

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS ARAXÁ
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL

CARLOS MURILO DA SILVA FILHO

AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO CIRCUITO DE FILTRAGEM
DE REJEITOS

ARAXÁ

2024

CARLOS MURILO DA SILVA FILHO

**AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO CIRCUITO DE FILTRAGEM DE
REJEITOS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET – MG, Campus Araxá.

Orientadora: Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira – CEFET – M G

ARAXÁ

2024

Silva Filho, Carlos Murilo da

S586a Avaliação da produtividade do circuito de filtragem de rejeitos /
Carlos Murilo da Silva Filho. – 2024.
89 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Michelly dos Santos Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Araxá, 2024.

Bibliografia.

1. Rejeitos de Mineração – Teses. 2. Tecnologia Mineral – Teses.
3. Barragens de Rejeitos – Teses. I. Oliveira, Michelly dos Santos. II.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDU 622'17

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pela saúde a mim concedida para que não me faltasse motivos para continuar a buscar os meus objetivos.

A minha mãe e minha irmã que sempre foram minhas incentivadoras e pela paciência que sempre tiveram nos momentos que me ausentei da família para dar continuidade aos trabalhos.

A minha orientadora Michelly dos Santos, pelos ensinamentos e acompanhamento desde o curso técnico até o Mestrado Profissional e sua confiança no trabalho proposto e ao professor Natal Junio Pires que desde a primeira aula, no Mestrado Profissional, foi um incentivador deste trabalho.

A AngloGold Ashanti, por ter disponibilizado recursos para a execução desta pesquisa, possibilitado um período de grande aprendizado e compartilhamento de conhecimento.

Aos amigos de profissão Róger Amaral, Márcio Salgado e Bernardo Bandeira por me apoiarem durante todo o processo de aprendizado sobre filtros prensa e por não medirem esforços para que esta pesquisa fosse concluída.

Aos alunos, Márcio Souza e Victor Diniz, do curso de Engenharia de Minas, do CEFET – MG, campus Araxá, que me apoiaram nos testes e foram presentes durante toda a pesquisa.

Por fim, obrigado a todos que participaram e me apoiaram nesta conquista.

RESUMO

As mineradoras têm buscado, cada dia mais, eliminar a disposição de rejeito em barragens devido aos grandes acidentes que aconteceram na última década. Uma das formas utilizadas, para atender esta demanda, tem sido a disposição do rejeito à seco, que ocorre após um detalhado processo de filtração. Esta tecnologia, ajuda a manter a produtividade, a recirculação de água no processo e, também, realizar a disposição do rejeito de forma segura. Apesar da filtração ser uma tecnologia conhecida, o domínio das variáveis de processo, para determinadas litologias, ainda não foi estabelecido, sendo necessários estudos detalhados e uma melhor compreensão. Uma forma de auxiliar a produtividade dos filtros, além das características dos meios filtrantes, é a utilização de auxiliares químicos de filtração, que podem reduzir a umidade do rejeito a ser depositado, aumentando assim a recirculação de água de processo e a produtividade. Neste sentido, o presente trabalho visou alcançar os melhores resultados para atingir a umidade ótima e a maior taxa unitária de filtração (massa seca/tempo/área de filtração) possível, utilizando auxiliares químicos de filtração e modelos diferentes de tecidos. Para concluir estes objetivos, testes de filtração em bancada (*Leaf Tests*), com filtro a vácuo, foram realizados utilizando água de processo, água comum, filtros de papel, tecidos e auxiliares químicos de filtração, fornecidos por empresas atuantes na mineração nacional e internacional. Uma amostra de rejeito, proveniente da empresa AngloGold Ashanti, localizada na cidade de Crixás, no estado de Goiás, foi utilizada durante toda a pesquisa. Os testes foram realizados no laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET – MG e a análise estatística dos resultados foi realizada utilizando o *Minitab Statistical Software*[®]. Os resultados alcançados, utilizando os reagentes e os tecidos, com os testes em bancada, foram satisfatórios, obtendo 13,7% de umidade (base úmida) no *cake*, atingindo a umidade ótima realizada pelo teste de compactação e uma TUF (taxa unitária de filtração) média de 280 kg/h/m², acima da TUF alcançada pelos testes sem adição de reagentes. Separadamente, os testes de otimização com utilização do auxiliar de filtração Flotisor FA 18899, mostraram um ganho de 4% em produtividade, enquanto os testes de otimização com a utilização do tecido fabricado com 100% de poliamida, permeabilidade entre 84,9 e 135,9 m³/h e gramatura 348 g/cm² mostraram um ganho de 7,7% em produtividade. A utilização dos auxiliares químicos de filtração e dos tecidos mostraram que é possível atingir a umidade ótima para escala industrial, bem como aumentar a taxa unitária de filtração.

Palavras-chave: Auxiliar químico de filtração; tecidos; filtros prensa; planejamento fatorial.

ABSTRACT

Mining companies are increasingly seeking alternatives to tailings dams due to major accidents in the last decade. One way to meet this demand has been the dry disposal of the tailings, which occurs after a detailed filtration process. This technology helps to maintain productivity, water recirculation in the process and to dispose of the tailings safely. Although filtration is a known technology, the domain of process variables for certain lithologies has not yet been established, requiring detailed studies and a better understanding. One way to help the productivity of the filters, in addition to the characteristics of the filter clothes, is the use of chemical filtration assistants, which can reduce the tailings moisture to be deposited, thus increasing the recirculation of process water, and increasing the filtration rate. In this sense, the present work aimed to achieve the best results to achieve the optimal moisture and the highest possible filtration rate (dry mass/time/filtration area), using chemical filtration assistants and different filter clothes. To conclude these objectives, bench filtration tests (Leaf Tests), with vacuum filters, were performed using process water, common water, paper filters, filter clothes and chemical filtration assistants, supplied by companies operating in national and international mining. A tailings sample, from the company AngloGold Ashanti, located in the city of Crixás, in the state of Goiás, was used throughout the research. The tests were carried out at The Mineral Treatment Laboratory of CEFET – MG and the statistical analysis of the results was performed using Minitab Statistical Software[®]. The results achieved, using the reagents and filter clothes, with the bench tests, were satisfactory, obtaining 13.7% moisture (wet base) in the cake, reaching the optimal moisture performed by the compaction test and an average TUF (filtration rate) of 280 kg/h/m², above the TUF achieved by the tests without the addition of reagents. Separately, the optimization tests with the use of the reagent Floctacor FA 18899 showed a gain of 4% in productivity. In comparison, the optimization tests with the use of filter cloth made with 100% polyamide, permeability between 84.9 and 135.9 m³/h and grammage of 348 g/cm² showed a gain of 7.7% in productivity. Using chemical filtration assistants and filter clothes has demonstrated the feasibility of achieving optimal moisture levels on an industrial scale while also increasing the filtration rate.

Keywords: Chemical filtration assistant; filter cloth; filter press; design of experiments.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Filtro prensa em operação, no início do século 20 (Museu de Wheal Martyn, St Austell, UK) | 15 |
| Figura 2 – Um dos primeiros filtros de tambor a vácuo rotativo de 1910 (FLSmidth GmbH). | 16 |
| Figura 3 – Disposição geral de um filtro prensa indicando os elementos essenciais. | 19 |
| Figura 4 – Esquema de alimentação de polpa em placas de um filtro prensa. | 20 |
| Figura 5 – Diagrama simplificado de um filtro rotativo à vácuo | 21 |
| Figura 6 – Exemplo de um fluxograma de instalação industrial com filtro rotativo a vácuo .. | 22 |
| Figura 7 – Vistas do interior de um filtro hiperbárico de discos. | 23 |
| Figura 8 – O efeito na plotagem de t/V vs. V em relação aos tamanhos das partículas..... | 26 |
| Figura 9 – Efeito no volume de filtrado produzido depois de dobrar o tamanho da partícula na alimentação do filtro. | 27 |
| Figura 10 – Efeito da regeneração/limpeza inadequada no fluxo do filtrado..... | 29 |
| Figura 11 – Agregados formados através dos mecanismos de “Pontes”..... | 32 |
| Figura 12 – Etapas envolvidas na formação do floculo..... | 33 |
| Figura 13 – Etapas envolvidas na formação do coágulo. | 34 |
| Figura 14 – Influência do surfatante no grau de hidrofobicidade na superfície da partícula. .. | 35 |
| Figura 15 – Desenho esquemático do sistema de filtração a vácuo em escala laboratorial.... | 36 |
| Figura 16 – Amostra homogeneizada..... | 40 |
| Figura 17 – Etapas de preparação de amostras..... | 41 |
| Figura 18 – Peneirador utilizado para determinação da distribuição granulométrica | 42 |
| Figura 19 – (a) Balança Marte, (b) picnômetros com material e (c) analisador de densidade . | 44 |
| Figura 20 – Cilindro de Proctor e cilindro complementar..... | 44 |
| Figura 21 – (a) Rejeito no cilindro Proctor, (b) material compactado | 45 |
| Figura 22 – (a) béquer e bastão de vidro, (b) béquer com polpa condicionada..... | 47 |
| Figura 23 – Sistema de filtração em escala laboratorial..... | 47 |
| Figura 24 – Torta gerada durante o teste de filtração..... | 48 |
| Figura 25 – Sequência dos testes exploratórios..... | 49 |
| Figura 26 – Unidade experimental do filtro de pressão..... | 53 |
| Figura 27 – Difratoograma de raios-X dos minerais agrupados..... | 56 |
| Figura 28 – Difratoograma de raios-X para SiO_2 | 57 |
| Figura 29 – Difratoograma de raios-X para Fe_2O_3 | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 30 – Difratoograma de raios-X para Al_2O_3 | 58 |
| Figura 31 – Teste de granulometria | 59 |
| Figura 32 – Curva granulométrica via granulômetro (CILAS 1090) | 59 |
| Figura 33 – Gráfico da curva de compactação | 62 |
| Figura 34 – Resultados de umidade média com utilização dos reagentes | 64 |
| Figura 35 – Resultados de TUF em função da dosagem de reagente | 64 |
| Figura 36 – Resultados para testes com os tecidos | 67 |
| Figura 37 – Efeitos das interações para umidade | 73 |
| Figura 38 – Efeitos das interações para taxa unitária de filtragem | 75 |
| Figura 39 – Efeitos padronizados das interações em forma de Pareto | 76 |
| Figura 40 – Efeitos das interações para a turbidez | 77 |
| Figura 41 – Otimização da resposta: TUF (t/h/m^2) e Umidade | 78 |
| Figura 42: (a) Torta do teste 01, (b) torta do teste 02 | 80 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Efeito do tamanho da partícula e da porosidade na resistência específica da torta | 26 |
| Tabela 2 – Os efeitos das alterações no tamanho das partículas de alimentação de um filtro de tambor rotativo | 28 |
| Tabela 3 – Massa de rejeito e água utilizados | 45 |
| Tabela 4 – Dados da polpa preparada..... | 46 |
| Tabela 5 – Auxiliares de filtração fornecidos | 49 |
| Tabela 6 – Características dos tecidos fornecidos para testes | 50 |
| Tabela 7 – Matriz para planejamento fatorial..... | 52 |
| Tabela 8 – Variáveis para preparação da polpa..... | 53 |
| Tabela 9 – Composição química da amostra | 55 |
| Tabela 10 – Distribuição granulométrica via difração a laser | 60 |
| Tabela 11 – Testes de picnometria | 61 |
| Tabela 12 – Resultados dos testes de compactação para umidade ótima..... | 61 |
| Tabela 13 – Resultados dos testes exploratórios | 63 |
| Tabela 14 – ANOVA dos resultados de TUF em função da dosagem de reagente..... | 65 |
| Tabela 15 – Otimização de resposta para análise de regressão dos reagentes | 65 |
| Tabela 16 – Resultados dos testes sem a aplicação de reagentes | 66 |
| Tabela 17 – Otimização de resposta para análise de regressão dos tecidos | 68 |
| Tabela 18 – Comparativo entre água comum e água de processo..... | 69 |
| Tabela 19 – Análise de variância para a umidade | 70 |
| Tabela 20 – Análise de variância para TUF | 70 |
| Tabela 21 – Testes de avaliação do tempo de condicionamento..... | 71 |
| Tabela 22 – Resumo do planejamento fatorial..... | 71 |
| Tabela 23 – Resultados do planejamento fatorial..... | 72 |
| Tabela 24 – Variáveis para predição da otimização de resposta | 78 |
| Tabela 25 – Resultados alcançados nos testes com o filtro de pressão | 79 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 | Justificativa | 12 |
| 1.2 | Objetivo Geral..... | 13 |
| 1.3 | Objetivo Específico..... | 13 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 14 |
| 2.1 | História da filtração | 14 |
| 2.2 | Rejeitos na mineração..... | 16 |
| 2.3 | Filtração..... | 17 |
| 2.4 | Equipamentos de filtração | 18 |
| 2.4.1 | Filtros prensa | 18 |
| 2.4.2 | Filtros à vácuo | 20 |
| 2.4.3 | Filtros Hiperbáricos..... | 22 |
| 2.5 | Influência das propriedades das partículas na filtração | 23 |
| 2.5.1 | Resistência específica da torta..... | 25 |
| 2.5.2 | Efeito do tamanho da partícula na taxa de filtração | 26 |
| 2.5.3 | Efeito do tamanho das partículas na lavagem da torta | 27 |
| 2.5.4 | Efeito do tamanho das partículas no ciclo de filtração..... | 28 |
| 2.6 | Tecidos filtrantes..... | 29 |
| 2.6.1 | Frequência de substituição dos tecidos filtrantes | 30 |
| 2.7 | Importância dos reagentes como auxiliar de filtração | 30 |
| 2.7.1 | Floculantes..... | 32 |
| 2.7.2 | Surfactantes | 34 |
| 2.8 | Teste de folha (<i>Leaf Test</i>) | 35 |
| 2.9 | Planejamento Fatorial | 37 |
| 3 | METODOLOGIA | 39 |
| 3.1 | Método de Pesquisa | 39 |
| 3.2 | Preparação da amostra | 40 |
| 3.3 | Caracterização da amostra | 41 |
| 3.3.1 | Análise granulométrica..... | 42 |
| 3.3.2 | Análise química | 42 |
| 3.3.3 | Picnometria..... | 43 |
| 3.3.4 | Ensaio de compactação..... | 44 |
| 3.4 | Testes de folha com alimentação por cima (<i>Leaf Test</i>)..... | 46 |
| 3.5 | Testes preliminares | 48 |
| 3.5.1 | Auxiliar químico de filtração | 49 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.5.2 | Tecidos de filtração..... | 50 |
| 3.5.3 | Efeito do tipo de água..... | 51 |
| 3.5.4 | Tempo de condicionamento | 51 |
| 3.6 | Planejamento Fatorial | 51 |
| 3.7 | Testes com filtro de pressão..... | 53 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 55 |
| 4.1 | Caracterização..... | 55 |
| 4.1.1 | Análise química..... | 55 |
| 4.1.2 | Granulometria..... | 58 |
| 4.1.3 | Densidade | 61 |
| 4.1.4 | Umidade ótima | 61 |
| 4.2 | Teste de folha..... | 62 |
| 4.2.1 | Seleção dos reagentes..... | 63 |
| 4.2.2 | Seleção dos tecidos..... | 67 |
| 4.2.3 | Avaliação do tipo de água | 69 |
| 4.2.4 | Tempo de condicionamento | 70 |
| 4.2.5 | Planejamento Fatorial..... | 71 |
| 4.3 | Teste com filtro de pressão | 79 |
| 5 | CONCLUSÃO | 81 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 83 |
| 7 | REFERÊNCIAS | 84 |

1 INTRODUÇÃO

Os rejeitos são uma mistura de subprodutos residuais gerados após a recuperação dos minerais úteis, usando o processamento mineral e processos hidrometalúrgicos. Após uma extração seletiva dos minerais desejados, os rejeitos da planta de beneficiamento são misturados para formar apenas um fluxo de rejeito. Em muitos casos, os rejeitos são descartados em forma de polpa nas barragens, baias e minas exauridas, onde os sólidos e fluidos de processo se separam por gravidade. Dado o tempo suficiente, o sobrenadante, quase livre de sólidos, pode ser recirculado no beneficiamento para reduzir o consumo de água e minimizar o volume de resíduos (WANG *et al.*, 2014).

Em pouquíssimos casos, os rejeitos são lançados diretamente no meio ambiente, e embora esta prática não seja aceita, ela é proibida em muitos países, e caso seja realizada a empresa pode responder por crime ambiental de acordo com as leis que buscam pelo descarte zero de rejeito no meio ambiente (POWER *et al.*, 2011). O descarte de rejeitos em baias e *ponds*, continua sendo uma tecnologia barata e tem sido amplamente adotada pela indústria mineral (WANG *et al.*, 2014). No entanto, essa abordagem geralmente não fornece uma solução de gerenciamento de rejeitos a longo prazo.

Com a crescente demanda por produtos provenientes da mineração, juntamente com o esgotamento de depósitos de minério com bons teores e viáveis para exploração, a mineração com minério de baixo teor, que consomem mais recursos e energia por tonelada beneficiada, tem se tornado mais comum (CROWSON, 2012; JONES; BOGER, 2012). Nesses casos, a etapa de moagem e a etapa de classificação do minério, tornam-se inevitáveis para alcançar a liberação e a recuperação do mineral usando o processamento convencional e processos hidrometalúrgicos.

Infelizmente, a moagem fina reduz a seletividade das partículas, ocasionando uma formação de polpa com partículas finas indesejadas. Esses sólidos finos, muitas vezes com apenas alguns micrometros de diâmetro, são extremamente difíceis de separar da água de rejeitos. Como resultado, eles contribuem diretamente para o acúmulo de um volume grande de rejeito que requer uma contenção mais segura (POWER *et al.*, 2011).

Os enormes volumes de rejeito são convencionalmente enviados para cavas naturais ou cavas construídas através de engenharia, cercado por barragens e diques, que são críticos para a integridade estrutural da área de contenção. Ao longo dos anos, ocorreram vários incidentes

de falhas de barragens e uma liberação muito grande de rejeitos, que são frequentemente resultados de condições meteorológicas extremas e/ou catástrofes naturais (WISE URANIUM PROJECT, 2023). As falhas das barragens são consequência tanto de problemas geotécnicos da estrutura de contenção quanto de gestão dos rejeitos armazenados (JONES *et al.*, 2012).

Além das consequências desastrosas de falhas acidentais de contenção de rejeitos, as estruturas das barragens de rejeitos também são motivo de preocupação para as empresas. Os finos presentes na polpa de rejeito, requerem um longo tempo de sedimentação, o que requer o uso de grandes áreas para receber a produção do beneficiamento (JONES; HAYNES, 2011; PERCY, *et al.*, 2012; TIMONEY, *et al.*, 2009).

À medida que a população se torna cada vez mais consciente dessas questões ambientais e desastres relacionados a barragem de rejeitos, os projetos de mineração estão enfrentando cada vez mais pressão de agências governamentais em termos de sustentabilidade e responsabilidade social. A prática conhecida de disposição de rejeitos utilizando barragens convencionais e diques, não é mais considerada aceitável em muitos países (POWER *et al.*, 2011).

Em resposta às regulamentações governamentais progressistas e ao sentimento público, as empresas estão mais dispostas a abordar os impactos ambientais e sociais dos rejeitos gerados e, também, das práticas convencionais de gestão de rejeitos. No entanto, as tecnologias atuais para disposição de rejeito, como por exemplo, empilhamento drenado, disposição com espessamento e secagem, disposição com filtragem (filtros prensa, tambor, discos), entre outras, são geralmente caras, têm um desempenho abaixo do esperado e possuem um rendimento limitado. Devido a esses fatores, o risco associado aos programas de gerenciamento de rejeitos fica elevado. Isso se deve a utilização de tecnologias alternativas que diferem dos métodos mais baratos e mais bem aceitos no mercado, fazendo com que as empresas fiquem desencorajadas com a execução dos projetos. Por outro lado, as empresas não estão dispostas a reduzir as taxas de produção, devido aos altos valores dos métodos de disposição à seco, já que produzir menos com um custo fixo maior, aumenta o custo das plantas (WANG *et al.*, 2014).

O empilhamento de rejeitos pode resultar em interações indesejáveis com o meio ambiente (e.g. drenagem ácida), e esta prática também tem sido associada a deformidades da estrutura e mortes da flora e fauna locais (GENTES *et al.*, 2006; RENAULT *et al.*, 2000).

O método de empilhamento de rejeitos após filtragem tem sido implantado, principalmente, após os 2 grandes acidentes com barragens no Brasil. Um dos desafios que este método encontra é a busca pela alta produtividade dos filtros, que possuem inúmeras variáveis de controle. Segundo Silverblatt e Dahlstrom (1954), a quantidade de finos, presente no minério, também tem sido um problema para este método de empilhamento devido aos desafios que se tem durante a filtragem. Para melhorar o desempenho da filtração e auxiliar na solução da quantidade de finos indesejada os auxiliares químicos de filtragem têm sido utilizados. Eles interferem em parâmetros importantes, como porosidade, resistência específica, umidade de torta e taxa unitária de filtragem.

Além da presença de finos, alguns problemas relacionados à filtragem de rejeitos são a maior frequência de substituição dos tecidos filtrantes e a influência das propriedades das partículas.

Diante disso, o presente trabalho estudou as características das partículas, variáveis de filtragem e a possibilidade de utilização de auxiliares de filtragem para aumentar a vida útil dos tecidos filtrantes, modificando a superfície das partículas para que elas fiquem mais firmes e se soltem com mais facilidade dos tecidos, não forçando uma limpeza manual ou excessivas limpezas com água sob pressão.

1.1 Justificativa

Atualmente, devido à Resolução 95 da Agência Nacional de Mineração (ANM) que trata sobre as barragens de rejeitos, as empresas de mineração como a AngloGold Ashanti, Mineração Serra Verde, Nexa, Usiminas, Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e entre outras, estão investindo em disposição de rejeito à seco. Este tipo de disposição, exige um bom domínio do modo de operação dos filtros, bem como do conhecimento sobre as variáveis de operação que devem ser utilizadas para cada tipo de minério (tipo de tecido, pressão de ar, tempo de enchimento das câmaras dos filtros, porcentagem de sólidos de alimentação, pressão da água de lavagem dos tecidos etc.).

Avaliar a produtividade de um circuito de filtragem e buscar melhorias, é contribuir para que a empresa consiga ou se aproxime cada vez mais da produção orçada para o período desejado, bem como reduzir os custos fixos da tonelada de rejeito filtrado, em relação as produções antes da otimização.

Os resultados esperados para a pesquisa, incluíram tanto resultados diretos quanto resultados indiretos e todos eles estão ligados ao melhor deslocamento da torta e à otimização da umidade do produto.

1.2 Objetivo Geral

O presente trabalho busca uma melhor performance do circuito de filtração de rejeito de ouro, utilizando auxiliares químicos de filtração, na formação e desagumamento das tortas, que ainda não foram testados e utilizados pela empresa mineradora. Além de buscar um produto que consiga atingir uma umidade ótima para disposição em pilhas, utilizando o método de pesquisa experimental.

1.3 Objetivo Específico

Os passos para avaliar o aumento de produção dos filtros prensa, foram:

- Investigar a mineralogia do rejeito que foi utilizado para os ensaios em bancada e teste com filtro de pressão;
- Determinar a umidade ótima, através dos testes de compactação, para comparação com os resultados de projeto;
- Avaliar efeito do tempo de secagem nos testes exploratórios, para analisar o melhor tempo e aplicar nos testes do planejamento fatorial, bem como os testes de escolha dos melhores tecidos e melhores reagentes;
- Avaliar a performance dos auxiliares químicos e tecidos de filtração utilizados nos testes para determinação do modelo de otimização;
- Avaliar o efeito da água de processo nos resultados de TUF e umidade;
- Determinar a porcentagem de sólidos ótima, utilizando o planejamento fatorial, para aplicação nos testes com filtro de pressão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica irá apresentar assuntos importantes para o presente trabalho como a história da filtração, os principais conceitos sobre o assunto, quais os desafios atuais e como as variáveis dos filtros, utilizados nas indústrias de mineração, impactam na produtividade da empresa, principalmente nos filtros prensa que são o foco do estudo.

2.1 História da filtração

A evidência mais antiga sobre filtração, é de uma escultura no túmulo do faraó Amenhotep II, mostrando um dispositivo de purificação de água e nos ajudando a perceber que os humanos entenderam a importância em consumir água limpa para uma boa saúde, mesmo sem saber da presença de microrganismos e outras contaminações microscópicas. A filtração é também mencionada no Papiro X de Estocolmo e Leyden, escrito por volta de 300 d.C, que inclui receitas para fazer vários produtos químicos simples (ALCIATORE; ZIEVERS, 2002).

Há muito tempo, a filtração tem sido utilizada para produção de cerveja, viticultura e óleo alimentar, existindo inúmeras prensas de sidra e azeitona em museus populares ao redor da Europa. A história mostra que a primeira forma de filtro prensa foi uma patente de 1853, utilizada para obtenção de sementes de óleo através da utilização de várias células prensas (KURITA; SUWA; MURATA, 2010). À medida que a necessidade de corantes (para colorir roupas, por exemplo) e outros produtos químicos básicos foram surgindo, as tecnologias utilizadas para a produção tornaram-se mais sofisticadas (ALCIATORE; ZIEVERS, 2002).

Com a revolução industrial, vieram novos meios para intensificar e controlar as energias que antes eram inimagináveis. A revolução também significou a mudança das pessoas dos campos para as cidades em busca de trabalho nas fábricas e com isso a necessidade do consumo e tratamento de água, o que os avanços das tecnologias fizeram possível (ALCIATORE; ZIEVERS, 2002).

Outros dispositivos e tecnologias de engenharia, muitos deles úteis para a separação sólido-líquido, originaram-se ou foram desenvolvidos durante o tempo da revolução industrial. Sem bombas centrífugas, bombas de vácuo, têxteis industriais, fundição de metal e soldagem, poucas tecnologias modernas de filtração seriam viáveis (ALCIATORE; ZIEVERS, 2002).

Alguns desenvolvimentos importantes na filtração e separação vieram da produção de caulim, ou argila de porcelana. Enormes quantidades deste material, usado na produção de utensílios de mesa, foram descobertas na Cornualha, no Reino Unido, no final do século XVIII. A argila era extraída e classificada por meio de um processo à úmido, sendo que a maioria do material extraído (o rejeito, ou despojo) formaria as pilhas que podem ser vistas, naquela parte do mundo, ainda hoje (ALCIATORE; ZIEVERS, 2002).

O desafio era retirar a água do produto para que ele tivesse a consistência certa para formar copos, pratos, bacias sanitárias e azulejos. Inicialmente, isso foi feito por uma combinação de decantação (deixando a argila por vários dias e clarificando a água) e evaporação térmica. No entanto, todo este processo foi grandiosamente acelerado pela introdução da filtração. O Museu Wheal Martyn, na Cornualha, contém um filtro prensa de 1911. A Figura 1 mostra um filtro semelhante em operação, por volta dessa época. O filtro é semelhante a uma moderna prensa de filtro de barra lateral (ALCIATORE; ZIEVERS, 2002).

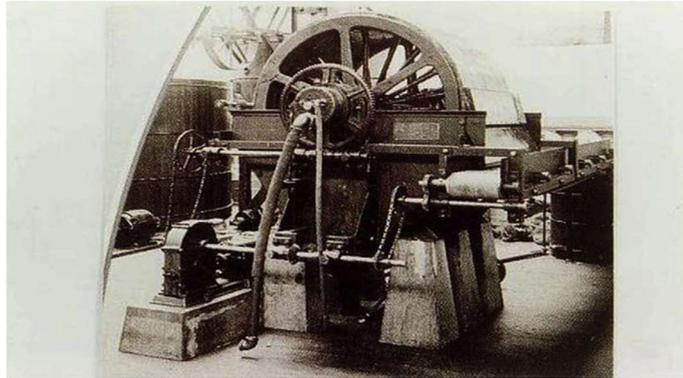
Figura 1 – Filtro prensa em operação, no início do século 20 (Museu de Wheal Martyn, St Austell, UK)



Fonte: ALCIATORE e ZIEVERS (2002)

Segundo Alciatore *et al.* (2002), foram realizados vários desenvolvimentos na área de filtração, muitos dos quais em paralelo com o desenvolvimento das centrais elétricas a carvão e das indústrias de refinação de metais. Um exemplo deste desenvolvimento em paralelo, é de um filtro de tambor a vácuo rotativo de extremidade aberta (Figura 2).

Figura 2 – Um dos primeiros filtros de tambor a vácuo rotativo de 1910 (FLSmith GmbH).



Fonte: ALCIATORE e ZIEVERS (2002)

Todos os avanços realizados durante todo este tempo, nos trouxeram oportunidades de utilizar os sistemas de filtragem, atualmente, para secagem e disposição de rejeito à seco nas indústrias de mineração.

2.2 Rejeitos na mineração

As características físicas e químicas dos rejeitos variam de acordo com o tipo de minério. Os efluentes do processo podem conter metais e ácidos que devem ser neutralizados antes do descarte para o meio ambiente (EDRAKI *et al.*, 2014).

Franks *et al.* (2011) propuseram um conjunto de princípios para o descarte, de forma responsável, de resíduos de processamento mineral. Utilizando conceitos de desenvolvimento, argumentaram que os resíduos devem ser estáveis, inertes, contidos, ajustados ao contexto local e submetidos a uma melhoria contínua da sua disposição. Estratégias existentes para gerenciar instalações de armazenamento de rejeitos, são para eliminar ou reduzir a descarga de água de baixa qualidade, gerenciar a poeira e criar formas de relevo estáveis. A modelagem preditiva da gestão de rejeitos está atualmente limitada ao planejamento para o fechamento de mina, baseado em propriedades intrínsecas (modelagem geoquímica), controles ambientais (modelagem do balanço hídrico), requisitos regulatórios e considerações de custo-benefício.

No entanto, pode haver mais oportunidades para reduzir o impacto dos rejeitos na fase de projeto da mineração, ao invés de reduções somente nas fases de operação ou pós-fechamento (MCLELLAN *et al.*, 2009).

Uma boa opção para garantir o gerenciamento seguro de rejeitos é a disposição à seco, ao invés da disposição em polpa como acontece em muitas minerações ao redor do mundo. O empilhamento a seco está sendo aplicado em áreas que possuem espaço e recursos hídricos limitados, e em áreas em que as condições topográficas e geotécnicas não são indicadas para a construção de barragens convencionais (BOWKER; CHAMBERS, 2015).

Embora projetos tenham demonstrado a viabilidade técnica da filtragem de rejeitos, requerida para disposição à seco, ela tem sido pouco implementada. Alguns dos motivos incluem alto custo de aquisição e operação, disponibilidade de água e condições topográficas e geotécnicas favoráveis à instalação de barragens (GOMES *et al.*, 2016).

Algumas formas possíveis de se utilizar os rejeitos estão sendo estudadas, como o uso na construção civil para construção de tijolos, telhas, cimento, uso para construção de estradas e outras aplicações. Embora, ainda se tenha o desafio de encontrar maneiras mais viáveis para aplicação em escala industrial (ALVES, 2020).

2.3 Filtragem

Os processos atuais de filtragem utilizados nas empresas de mineração são, normalmente, referidos como filtração com formação de torta. Estes processos são frequentemente utilizados em separações sólido-líquido para recuperar o produto que pode ser, por exemplo, o sólido da polpa, o líquido que contém os minerais de valor ou até mesmo para recuperar o sólido e o líquido. A fase líquida é utilizada como água para recirculação no beneficiamento e os sólidos são encaminhados para a próxima etapa do processo (SPARKS; CHASE, 2015).

Sparks e Chase (2015) citam que na maioria dos casos, a polpa que alimenta o filtro, às vezes, pode ser considerada como uma lama, o que dificulta sua filtragem. Porém, na maioria dos casos, a polpa contém aproximadamente 55% de sólidos e pode ser facilmente filtrada nos filtros prensa, tambor, disco, correia, dentre outros. Cada filtro possui um meio filtrante, normalmente tecido ou não tecido, localizado acima de um suporte que permite que o filtrado passe livremente.

Para estabelecer um fluxo de filtrado, é necessário aplicar uma diferença de pressão, chamada de queda de pressão, através do meio filtrante. Existem várias maneiras de fazer isso, dependendo da força que será aplicada, por exemplo: (1) gravidade, (2) vácuo, (3) pressão, (4) vácuo e pressão combinados, (5) força centrífuga e (6) um gradiente de saturação.

Normalmente, as diferentes forças motrizes requerem um equipamento de filtragem diferente (CONCHA, 2014).

2.4 Equipamentos de filtragem

Segundo Concha (2014), os filtros a vácuo tinham a vantagem sobre os filtros de pressão devido ao seu design e operação simples, o que os tornou muito populares na indústria de mineração durante a maior parte do século XX. Na década de 1980, os filtros de pressão começaram a substituir os filtros a vácuo devido à limitação da queda de pressão dos filtros a vácuo, que depende da pressão atmosférica. Essa restrição é mais bem observada em minas de grandes altitudes, em alguns casos de mais de 4.000 metros acima do nível do mar. As limitações dos filtros a vácuo e os grandes avanços no mecanismo de controle dos filtros de pressão, tornaram este último o favorito da indústria de mineração atual.

Uma alternativa interessante é a combinação de equipamentos de vácuo e pressão em uma única unidade. Se um filtro a vácuo tradicional for introduzido em uma câmara de pressão para que a queda de pressão seja aumentada, um filtro hiperbárico é obtido (CONCHA, 2014).

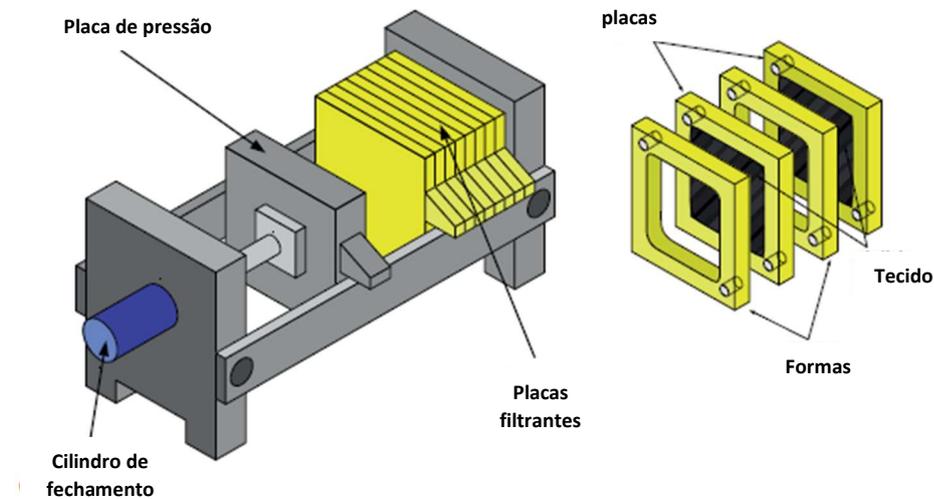
2.4.1 Filtros prensa

Os filtros de pressão tipo prensa têm sido utilizados por mais de 100 anos (SPARKS *et al.*, 2012). Existem alguns elementos essenciais para o funcionamento destes filtros, como citados abaixo e mostrados na Figura 3.

- Um conjunto de placas ou elementos filtrantes. Por exemplo, ao longo dos anos, estes eram feitos de madeira, metal fundido e, mais comumente hoje, de polímero moldado (tipicamente polipropileno). A ideia básica é que esses elementos, quando empurrados juntos, formam uma série de elementos filtrantes contidos. A polpa passa para cada uma dessas câmaras, sob uma pressão fornecida por uma bomba de polpa, o filtrado passa por um meio filtrante e a torta retida se acumula nas câmaras.
- O meio filtrante - geralmente um tecido, mas muitas vezes um não tecido ou papel.
- O quadro ou a estrutura. Este deve ser projetado para suportar as forças, às vezes enormes, que estão tentando forçar as placas a se separarem quando pressurizadas.

Todos esses elementos devem ser acertados e mantidos limpos, para que um filtro prensa funcione adequadamente (SPARKS *et al.*, 2012).

Figura 3 – Disposição geral de um filtro prensa indicando os elementos essenciais.

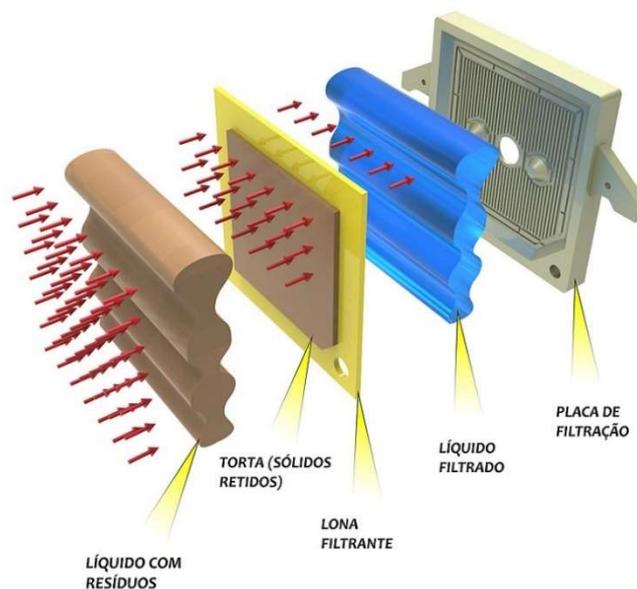


SPARKS *et al.* (2012)

Os filtros prensa têm se mostrado bastante úteis nas atividades industriais e com isso têm sido utilizados em muitas operações ao redor do mundo, porém como qualquer outro equipamento apresentam problemas operacionais e limitações que podem ser vistas e avaliadas.

Segundo Cheremisinoff (2017), os sistemas de filtragem mais antigos mostraram uma série de problemas operacionais, que em grande parte foram eliminados ou minimizados em projetos mais modernos. Alguns problemas operacionais encontrados em máquinas operadas de forma manual, vão de uma torta que exige que os operadores a remova manualmente para fora das placas, utilizando espátulas ou algum dispositivo que os auxilie na tarefa, até placas que as vezes são muito finas, fazendo com que o canal de alimentação de polpa (Figura 4) fique bloqueado, o que é um problema comum em projetos mais antigos dos filtros prensa. Comumente, todos os filtros prensa atuais possuem placas embutidas ou de câmaras que praticamente eliminaram esse problema.

Figura 4 – Esquema de alimentação de polpa em placas de um filtro prensa.



Fonte: GRABE (2023)

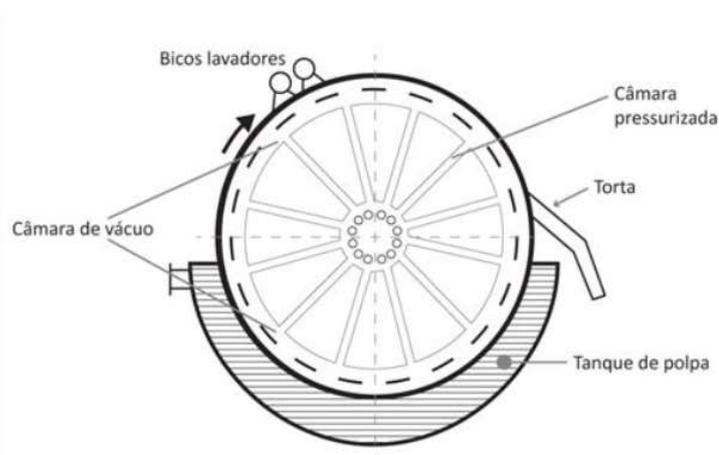
Cheremisinoff (2017) cita ainda que abrir e fechar o filtro prensa são etapas demoradas. Este problema em geral foi eliminado, uma vez que as prensas modernas estão equipadas com sistemas automáticos de movimentação de placas, que selecionam uma ou várias placas, permitindo que elas descarreguem a torta. Se a torta grudar no tecido, não há descarga, sendo assim, melhorias nos tecidos reduziram consideravelmente este problema. Além disso, a maioria dos fabricantes oferecem uma gama de raspadores de tecido, agitadores de placas ou quaisquer outros dispositivos mecânicos para induzir a torta a cair. Se houver apenas um pouco de torta restante nas placas, as câmaras não podem ser preenchidas e o resultado é uma placa com produto parcialmente filtrado, que se mistura com a placa e que não pode ser lavado ou seco. Se o filtro prensa for projetado com um sistema de compressão de membrana, que é um sistema interno da placa que infla para ajudar a descarregar o produto, o deslocamento ineficiente da torta pode ser superado, porém a utilização deste sistema, reduz a área de filtração e reduz a resistência química do meio filtrante, gerando um maior custo de capital e maior tempo de manutenção.

2.4.2 Filtros à vácuo

Segundo França e Massarani (2018), quando consideramos os filtros à vácuo que operam fisicamente sob o mesmo princípio, temos: filtros à vácuo de disco, tambor, correia ou bandeja.

Considerando este princípio, temos que a diferença de pressão entre o tanque de armazenamento de polpa e a superfície do meio filtrante do equipamento é dada pelo sistema de vácuo que o filtro possui, possibilitando a passagem do líquido pelo tecido ou meio filtrante utilizado, enquanto o material retido forma a torta proveniente da filtração, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama simplificado de um filtro rotativo à vácuo



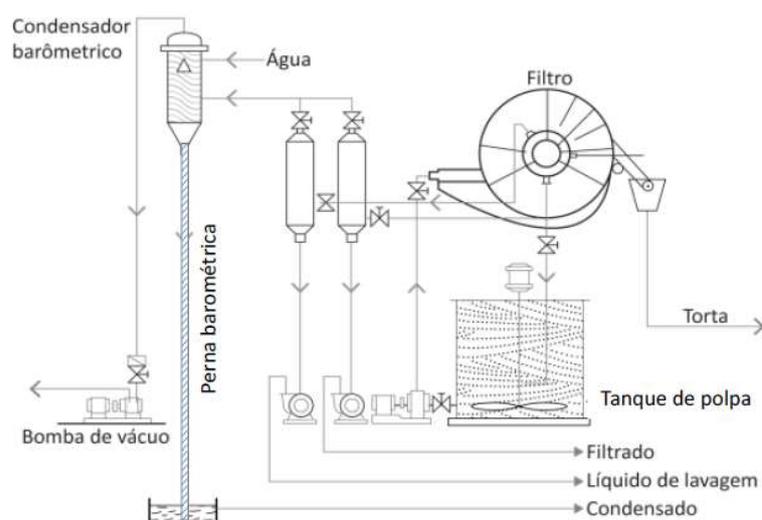
Fonte: FRANÇA e MASSARANI (2018)

Segundo Guimarães (2011), os equipamentos de filtração a vácuo são contínuos, porém realizam diversas tarefas, em um espaço de tempo, que é chamado de ciclo, como: formação da torta, secagem, lavagem e descarga da torta. A formação da torta é realizada através de um meio filtrante, sob ação do vácuo, em contato com a polpa. A torta é formada pela deposição do material sobre o meio filtrante ou pela aspiração da polpa para junto do meio filtrante (por exemplo, os filtros de discos e de tambor). Durante a secagem, que é realizada sob ação do vácuo, há a retirada da água ainda presa à estrutura da torta. A lavagem da torta, uma das etapas da filtração, ocorre muito comumente nas indústrias químicas e metalúrgicas, devido ao valor agregado do produto que pode ser tanto o filtrado quanto a torta. Atualmente, na indústria mineral, a etapa de lavagem tem sido amplamente aplicada, o que antes não havia muita aplicação. Anteriormente a lavagem era conhecida na filtração do caulim (filtros de tambor rotativo) a fim de melhorar a reologia do produto filtrado, através da redução da quantidade de sais solúveis retidos na torta. A descarga é a atividade final, para a etapa de filtração, onde a torta formada é descarregada do filtro, podendo ser realizada de diversas formas. Um dos

exemplos, é o caso dos filtros de discos convencionais, onde o fluxo de ar é invertido e o sopro de ar ocorre no meio filtrante.

O filtro rotativo a vácuo, quando em operação, produz tortas secas com espessura pequena, podendo chegar até 20 mm, opera em regime contínuo e sob queda de pressão reduzida, sendo inferior a 0,8 atm. Na indústria mineral, normalmente, o produto de valor agregado é a torta, composta, em sua maioria, pela fase sólida; o filtrado pode ser tratado e enviado para o meio ambiente e/ou recirculado no beneficiamento mineral (FRANÇA; MASSARANI, 2018). A Figura 6 mostra o exemplo de um fluxograma de montagem industrial de um filtro à vácuo.

Figura 6 – Exemplo de um fluxograma de instalação industrial com filtro rotativo a vácuo



Fonte: FRANÇA e MASSARANI (2018)

2.4.3 Filtros Hiperbáricos

Segundo França e Massarani (2018), a tendência dos produtos de moagens mais finas de minérios em usinas de beneficiamento leva a maiores desafios de desaguamento, exigindo que se direcione para a filtragem sob pressão. Os equipamentos com capacidade para operarem sob pressão possuem larga aplicação em processos de metalurgia, devido à necessidade de desaguamento e lavagem dos resíduos provenientes da lixiviação e precipitados.

O filtro hiperbárico possui uma combinação de operação de vácuo e pressão (Figura 7). Sendo o equipamento (filtro de discos ou de tambor) instalado dentro de um vaso de pressão e podendo operar sob pressões que alcancem até 6 bar, bem diferente dos filtros a vácuo, que são submetidos a pressões que chegam até 0,8 bar. Com essa condição, o filtro atinge, operacionalmente, uma produção específica de sólidos, com uma possibilidade, três vezes maior do que a de um filtro a vácuo, além de produzir tortas com a umidade bem menor (FRANÇA; MASSARANI, 2018).

Figura 7 – Vistas do interior de um filtro hiperbárico de discos.



Fonte: FRANÇA *et al.* (2018)

2.5 Influência das propriedades das partículas na filtração

Três tipos de parâmetros devem ser identificados para descrever completamente um sistema de separação sólido-líquido. São eles: as propriedades primárias, o estado do sistema e as propriedades macroscópicas (WAKEMAN, 2007).

As propriedades primárias são aquelas que podem ser medidas independentemente de outros componentes do sistema, e são as propriedades físicas dos sólidos e líquidos, a distribuição granulométrica das partículas e as propriedades de superfície das partículas em seu ambiente com solução. A forma como as partículas interagem com o fluido ao redor dela se torna importante para partículas menores ($< 10 \mu\text{m}$), assim a rede de atração ou as forças repulsivas entre as partículas podem se tornar tão significante quanto forças induzidas gravitacionalmente ou hidrodinamicamente. Estes fatores decidem se as partículas vão, por exemplo, depositar-se vagarosamente ou rapidamente, se elas podem ser retidas em algum tipo

de meio filtrante, ou se a torta resultante terá uma consistência seca ou mais umedecida (WAKEMAN, 2007).

De acordo com o estudo realizado por Wakeman (2007), as interações entre as partículas e o meio líquido, quando as partículas estão suspensas, possuem uma grande influência quando as partículas são menores do que alguns micrômetros. As forças repulsivas entre as partículas ocorrem devido à distribuição de íons da solução ao redor da superfície carregada da partícula, e a carga elétrica resultante é dependente da química presente na superfície. Uma energia potencial de repulsão pode se estender para longe da superfície da partícula, mas seu alcance pode ser reduzido aumentando a quantidade de eletrólitos da solução. Para propósitos práticos, a magnitude da rede de força repulsiva entre as partículas, é representada pelo potencial zeta (ζ). Algumas afirmações podem ser feitas sobre a influência do potencial zeta na separação, como por exemplo, a afirmação que a força repulsiva entre as partículas aumenta com a fração de volume de sólidos na mistura sólido/líquido, bem como a força repulsiva aumenta com o aumento do potencial zeta. Enquanto a redução da magnitude da força repulsiva causa agregação, tornando o processo mais instável e mais fácil de separar. As forças repulsivas podem ser reduzidas pela adição de um eletrólito não adsorvente no líquido que muda a distribuição dos íons da solução ao redor da partícula ou pela modificação da carga elétrica na superfície da partícula por uma adsorção específica de certos íons ou polímeros carregados.

O especialista em filtragem, muitas vezes manipula o potencial zeta usando coagulantes ou floculantes para melhorar a separabilidade da suspensão; testes estruturados com coagulantes e floculantes são usados para determinar a dosagem correta (TARLETON; WAKEMAN, 2005). Entender a conexão entre o potencial zeta e as características de separação como a taxa de formação da torta e a taxa de sedimentação pode encurtar os programas de testes, quando avaliado a separabilidade de novas suspensões.

Analisando a variação do potencial zeta, o especialista de processos pode esperar baixas taxas de sedimentação, menor taxa de formação de torta e uma pequena alteração de redução na umidade da torta e dos sedimentos, devido à existência de forças repulsivas maiores, mantendo as partículas em suspensão na polpa, ou seja, mais dispersas. Baixas taxas de formação de tortas são mais frequentes devido à menor porosidade na torta, fazendo com que a lavagem e a secagem posteriormente demorem mais. No entanto, a baixa porosidade pode também levar a uma maior utilização da água filtrada. Alguns efeitos do potencial zeta e da

concentração iônica nas taxas de filtração são amplamente estudadas (TARLETON; WAKEMAN, 2005).

2.5.1 Resistência específica da torta

Segundo Wakeman (2007), a resistência específica da torta é uma medida de resistência do fluido através da torta; isto é inversamente proporcional a permeabilidade da torta, e pode ser obtida conforme a Equação 1.

$$\alpha_{av} = \frac{1}{\rho_s(1 - \varepsilon)k} \quad (1)$$

onde ρ_s é a densidade dos sólidos, ε é a porosidade da torta, e k é a permeabilidade. De acordo com Kozeny e Carman (Kozeny, 1927), a redução do diâmetro das partículas tem uma forte influência negativa na permeabilidade. A Equação 2 mostra que a resistência específica é inversamente relacionada ao quadrado do tamanho da partícula; portanto, à medida que o tamanho das partículas diminui, a resistência aumenta.

$$\alpha_{av} \propto \frac{1}{X_{sv}^2} \quad (2)$$

onde x_{sv} é o tamanho da partícula.

Espera-se que a força de arraste resistente ao fluxo através da torta, deve ser proporcional à área de superfície das partículas na torta. Então, reduzindo o tamanho das partículas por um fator de 10 vezes, aumenta-se a resistência específica por um fator de 100 vezes (WAKEMAN, 2007).

A Equação 3 de Carman-Kozeny é válida para descrever a porosidade da torta.

$$\alpha_{av} = \frac{180}{\rho_s X_{sv}^2} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (3)$$

O grande efeito do tamanho da partícula e da porosidade na resistência específica pode ser visto na Tabela 1. A porosidade é independente do tamanho da partícula, mas é uma função da distribuição granulométrica. Quando o intervalo de tamanhos é maior, as partículas são capazes de se empacotar mais firmemente para formar a torta – que é simplesmente visualizada como as partículas menores sendo capazes de ocupar espaços entre os maiores (WAKEMAN, 2007).

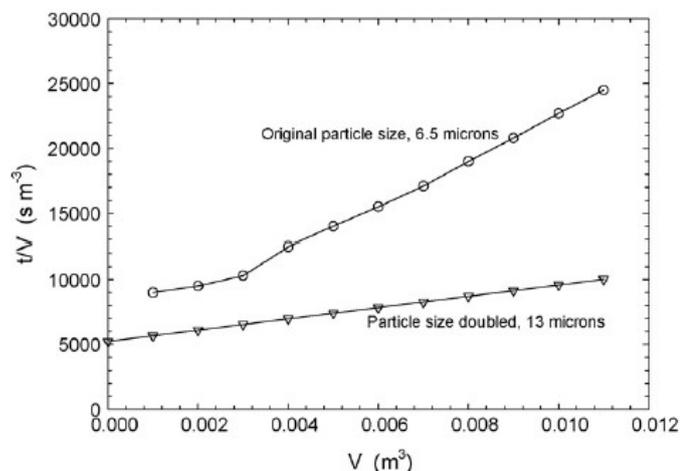
Tabela 1 – Efeito do tamanho da partícula e da porosidade na resistência específica da torta

| Tamanho da partícula X_{sv} (μm) | Porosidade ϵ | Resistência Específica α_{av} (mkg^{-1}) |
|--|-----------------------|---|
| 1 | 0,4 | $6,7 \times 10^{11}$ |
| 2 | 0,4 | $1,7 \times 10^{11}$ |
| 10 | 0,4 | $0,068 \times 10^{11}$ |
| 100 | 0,4 | $0,00068 \times 10^{11}$ |
| 2 | 0,5 | $0,72 \times 10^{11}$ |
| 2 | 0,6 | $0,33 \times 10^{11}$ |
| 2 | 0,7 | $0,16 \times 10^{11}$ |

Fonte: WAKEMAN (2007)

2.5.2 Efeito do tamanho da partícula na taxa de filtração

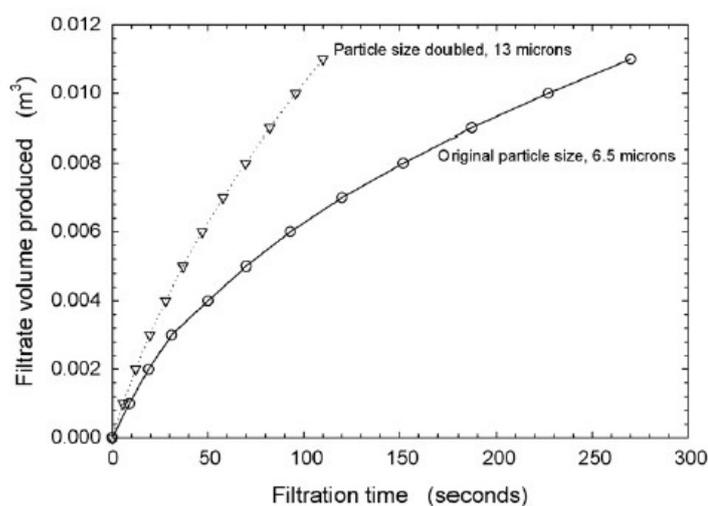
Segundo Wakeman (2007), os efeitos do tamanho da partícula na filtração são mostrados através de teste de laboratório onde o material fica sob pressão constante. As figuras 8 e 9 mostram os dados experimentais obtidos de um teste de filtração, sob pressão constante, com silicato de cálcio em suspensão, utilizando um filtro prensa em escala laboratorial. O comparativo das filtrações antes e depois da mudança do tamanho da partícula é mostrado na Figura 8, onde V é o volume de filtrado obtido em cada instante de tempo.

Figura 8 – O efeito na plotagem de t/V vs. V em relação aos tamanhos das partículas

Fonte: WAKEMAN (2007)

Outra forma de olhar o efeito do tamanho das partículas na taxa de filtração é comparar os tempos de produção de um determinado volume específico de filtrado, antes e depois da mudança no tamanho da partícula. Esta comparação é feita na Figura 9. Neste exemplo, para produzir 0,01 m³ de filtrado depois que foi dobrado o tamanho da partícula, exige-se apenas 42% do tempo de filtração que era exigido antes da mudança; este fator reduz em volumes maiores de filtração. Expressando de outra forma, neste exemplo, dobrando o tamanho da partícula aumenta o volume de filtrado produzido, em qualquer tempo de filtração, em 50%. Se a resistência do meio for zero, o volume de filtrado produzido seria aumentado em 100%. Isto mostra um importante fator ao escolher um tecido para filtração com a menor resistência possível para aumentar a produtividade do filtro, ou seja, dobrando o tamanho das partículas na alimentação, tem-se a redução do ciclo de filtração para uma operação mais otimizada. Com isso temos que o dobro do tamanho das partículas também leva ao aumento da espessura da torta. Os resultados são ligeiramente modificados quando a resistência é levada em consideração (WAKEMAN, 2007).

Figura 9 – Efeito no volume de filtrado produzido depois de dobrar o tamanho da partícula na alimentação do filtro.



Fonte: WAKEMAN (2007)

2.5.3 Efeito do tamanho das partículas na lavagem da torta

O tamanho da partícula afeta na lavagem da torta de duas maneiras: tamanhos grandes reduzem a resistência específica da torta e, portanto, permitem fluxos maiores de água filtrada

levando a formação de poros maiores na torta e promovendo turbulências localizadas. Na maioria dos casos práticos, o Número de Reynolds é tão pequeno que a transferência de massa é determinada pela taxa de difusão (modificada pela tortuosidade dos poros da torta) dos sólidos dentro da água filtrada. Para tortas com partículas muito grosseiras, a razão da espessura da torta determina a eficiência da limpeza e as melhores condições de limpeza podem ser esperadas com tortas mais espessas (WAKEMAN, 2007).

2.5.4 Efeito do tamanho das partículas no ciclo de filtração

O tamanho da partícula afeta todos os estágios no ciclo de filtração de diferentes formas e muitos aspectos dos últimos estágios são dependentes dos estágios anteriores; esses fatores dificultam a estimativa dos efeitos globais das mudanças nas variáveis. *Softwares* de modelagem estão disponíveis para permitir que todas essas interações complexas sejam calculadas, e foram utilizados para prever os efeitos mostrados no estudo de Tarleton e Wakeman, 2006.

Os efeitos em aumentar o tamanho das partículas na performance do filtro de tambor rotativo são mostrados na Tabela 2. Aumentar o tamanho das partículas na alimentação leva a uma torta mais espessa, um produto com porcentagem de sólidos e volume de filtrado mais altos, baixa umidade da torta e mais sólidos na descarga dela (WAKEMAN, 2007).

Tabela 2 – Os efeitos das alterações no tamanho das partículas de alimentação de um filtro de tambor rotativo

| Tamanho (µm) | Espessura da torta (mm) | Produtos sólidos (kg m⁻² h⁻¹) | Taxa de ar (m³ m⁻² s⁻¹) | Umidade da torta (%) | Soluto na torta (kg h⁻¹) | Líquido na torta (m³ m⁻² h⁻¹) |
|---------------------|--------------------------------|--|---|-----------------------------|--|---|
| 5 | 9,2 | 666 | 0,041 | 15,7 | 1,3 | 0,12 |
| 10 | 18,3 | 1318 | 0,072 | 15,0 | 2,3 | 0,23 |
| 20 | 35,8 | 2578 | 0,159 | 14,5 | 4,0 | 0,44 |
| 40 | 68,5 | 4932 | 0,326 | 13,8 | 6,5 | 0,80 |

Fonte: WAKEMAN (2007)

Portanto o tamanho das partículas afeta todos os estágios do ciclo do filtro e pode exigir que as condições de funcionamento do filtro sejam alteradas em alguns momentos.

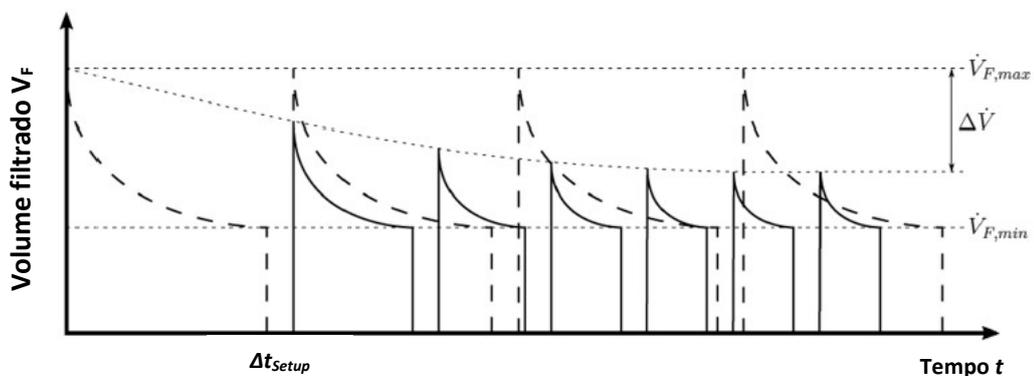
2.6 Tecidos filtrantes

Segundo Morsch *et al.* (2021), o desempenho da separação sólido-líquido é essencialmente influenciado pela escolha do tecido adequado. Se a malha e a trama não forem adequadas para o fluxo de minério a ser filtrado, tem-se como resultado uma turbidez muito alta e duradoura ou uma alta carga residual de partículas no filtrado ou no tecido (obstrução). Além dos efeitos sobre o processo de filtragem atual, a seleção do tecido também afeta a descarga da torta. Os tecidos mais adequados para uma boa descarga dependem essencialmente das experiências dos operadores dos equipamentos de filtragem.

Os tipos de tecidos utilizados na mineração, variam de acordo com a granulometria, abrasividade e tempo de vida útil que se deseja. Sendo assim, o tipo de filamento (monofilamento ou multifilamento), a gramatura e o material de fabricação do tecido (sendo poliamida e polipropileno os mais comuns) influenciam diretamente nos resultados obtidos.

O efeito de um tecido inadequado para a atividade de separação específica, em combinação com uma regeneração/limpeza igualmente inadequada é dramático. A Figura 10, mostra o efeito da regeneração/limpeza inadequada no fluxo do filtrado, tendo o \dot{V}_F no início de cada ciclo de filtragem. O fluxo de volume inicial de cada ciclo atinge o fluxo de volume inicial do ciclo anterior $\dot{V}_{F, \max}$. Com o aumento da retenção de partículas nos tecidos, essa resistência inicial é reduzida em $\Delta\dot{V}$. Como resultado, os ciclos de regeneração (Δt_{Setup}) aumentam quando $\dot{V}_{F, \min}$ é atingido (MORSCH *et al.*, 2021).

Figura 10 – Efeito da regeneração/limpeza inadequada no fluxo do filtrado



Fonte: MORSCH *et al.* (2021)

Para uma boa regeneração/limpeza, o fluxo de volume inicial de cada ciclo de filtração deve ser da mesma ordem de grandeza do ciclo anterior (VF_{\max}). Isso reduz o número de tempos de paradas (Δt_{Setup}) durante a regeneração. Em caso de má regeneração/limpeza, a resistência inicial do tecido diminui. Isso é resultado de partículas que ficaram dentro e sobre o tecido e conseqüentemente aumentam os ciclos de regeneração, além do volume filtrado diminuir, comparando quando se tem uma boa regeneração/limpeza (MORSCH *et al.*, 2021).

2.6.1 Frequência de substituição dos tecidos filtrantes

Do ponto de vista de engenharia, os filtros-prensa são apropriados para atingir a umidade necessária para deposição e transporte do rejeito seco. Apesar de ser um processo em batelada, os filtros permitem uma alta produtividade em uma alta pressão de filtração.

Infelizmente, o tecido utilizado nestes filtros possui um tempo de vida útil. Além dos danos mecânicos, a deposição de partículas finas entre as placas e os tecidos, aumentam com o aumento da quantidade dos ciclos de filtração, que é referido como cegamento dos tecidos. Com o tempo se faz necessária a limpeza e a troca destes tecidos. Esta troca de tecidos envolve um esforço financeiro muito alto, bem como métodos efetivos de limpeza e uma investigação detalhada para buscar possíveis opções necessárias para manutenção dos tecidos (FRÄNKLE *et al.*, 2021).

A base para a descrição da resistência dos poros, como tecidos e tortas, é a equação de Darcy (FRÄNKLE *et al.*, 2021), ela descreve a taxa de fluxo \dot{m} quando passa por estruturas porosas em função da densidade do fluido ρ_{fluido} , a área de superfície (A), a permeabilidade (P), a diferença de pressão aplicada Δ_p , a espessura da torta h_{torta} e a viscosidade dinâmica do fluido η_{fluido} . Esta equação (4) é válida para as condições com fluxo laminar presumidas e fricção (RIPPERGER *et al.*, 2013).

$$\frac{\dot{m}}{\rho_{\text{fluido}} \times A} = P \times \frac{\Delta_p}{h_{\text{torta}} \times \eta_{\text{fluido}}} \quad (4)$$

2.7 Importância dos reagentes como auxiliar de filtração

A aplicação de produtos químicos apropriados garante uma floculação eficaz, o que aumenta significativamente a separação sólido-líquido (NGUYEN *et al.*, 2021). A agregação

de partículas é em sua maioria desejável, ou até mesmo essencial, para a etapa de filtração, principalmente quando a polpa possui granulometria fina (especialmente abaixo de 45 μ m) ou que tenha elevadas superfícies específicas. O fluxo filtrado possui uma qualidade melhor quando se tem esta agregação, além de ocorrer uma boa formação de torta e redução dos problemas de bloqueio progressivo do meio filtrante (VALADÃO, 1996).

Um dos primeiros estudos realizado para aplicação de produtos químicos como auxiliar de filtração foi feito por Silverblatt e Dahlstrom em 1954, quando estudaram a viscosidade e a tensão superficial no filtrado, além da umidade da torta de carvão.

Pereira (1999) fez estudos sobre auxiliares de filtração, floculantes e surfatantes, buscando reduzir a umidade e elevar a taxa de filtração tanto para a torta quanto para o filtrado de diversas polpas minerais. Foi concluído que os surfatantes não apenas reduzem a umidade da torta, reduzindo a tensão superficial e abaixando a pressão capilar, mas também são capazes de serem adsorvidos na interface sólido-líquido, podendo modificar o ângulo de contato. Conclui-se, também, que os auxiliares agregantes (floculantes e coagulantes) aumentavam a taxa de filtração devido à redução da resistência específica da torta, agindo sobre a cinética do desaguamento.

Rejeitos contendo argilominerais, partículas altamente negativas, e uma grande quantidade de sais inorgânicos são dificilmente desidratados para atender aos requisitos da prática de descarte e da qualidade da água de processo. Existe uma hipótese que a superfície carregada negativamente precisa ser neutralizada antes de ser quimicamente floculada (LEE *et al.*, 2012; MAGDASSI; RODEL, 1996).

Assim como Pereira (1999), Silverblatt *et al.* (1954), mostrou que ao adicionar surfactantes na polpa, tem-se a formação de tortas com umidades menores, o que mais adiante foi comprovado por Pearse e Allen (1983) ao demonstrarem que a utilização de reagentes químicos melhora as características de uma vasta variedade de polpas de minério, resultando em uma menor umidade do produto. O efeito de vários auxiliares químicos (floculantes e surfatantes), no desaguamento de finos de minério de ferro, foi motivo de estudo para Singh *et al.* (1997). Os resultados obtidos mostraram que as taxas de sedimentação possuem mais oportunidades de estudo, utilizando-se auxiliares químicos apropriados (floculantes), e escolhendo o surfactante correto, a umidade residual das tortas pode ser reduzida.

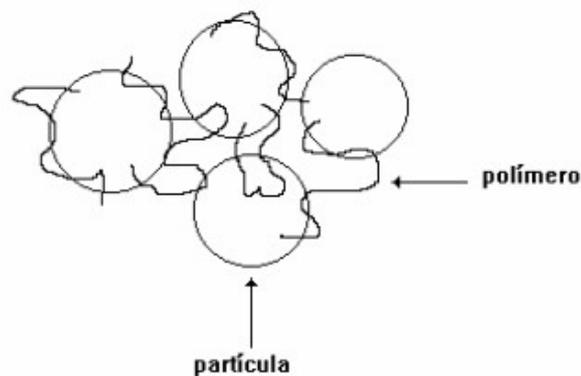
2.7.1 Floculantes

Floculantes são polímeros, solúveis em meio aquoso, que são apresentados na forma de macromoléculas, sendo formadas por muitos segmentos unitários, chamados de monômeros. Estes monômeros presentes na composição dos floculantes, podem ser diferentes ou iguais entre si, o que resulta na formação de copolímeros e homopolímeros, sendo os copolímeros os floculantes iguais e homopolímeros os floculantes diferentes (BALTAR, 2018).

Os floculantes, geralmente, utilizados são solúveis em água e lineares de cadeia longa, sendo os mais utilizados no setor mineral, os floculantes de poliacrilamidas iônicas e não iônicas (DIAS *et al.*, 2004). Durante a agregação do floculante com as partículas, existem alguns mecanismos que ocorrem, como por exemplo a floculação por pontes, neutralização de carga na superfície e floculação por reversão localizada de carga.

De acordo com Valadão (1996), o principal meio, que se relaciona com a formação dos agregados (flóculos), é conhecido como a formação de “pontes”. Esta situação ocorre quando o polímero é adsorvido na superfície da partícula e deixa os segmentos da sua cadeia voltados, para o meio líquido, como é exemplificado na Figura 11, que mostra a estrutura de agregados, onde determinada quantidade de líquido é aprisionada.

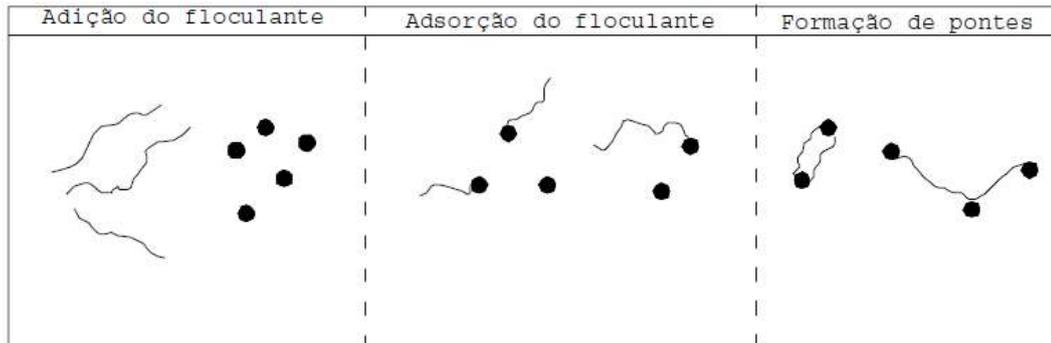
Figura 11 – Agregados formados através dos mecanismos de “Pontes”.



Fonte: VALADÃO (1996)

Segundo DIAS *et al.* (2004), o que faz com que esta formação de pontes aconteça, é o peso molecular dos polímeros elevado e que não precisa de uma carga oposta às partículas. A Figura 12 mostra como ocorre uma flocculação por pontes.

Figura 12 – Etapas envolvidas na formação do floculo.

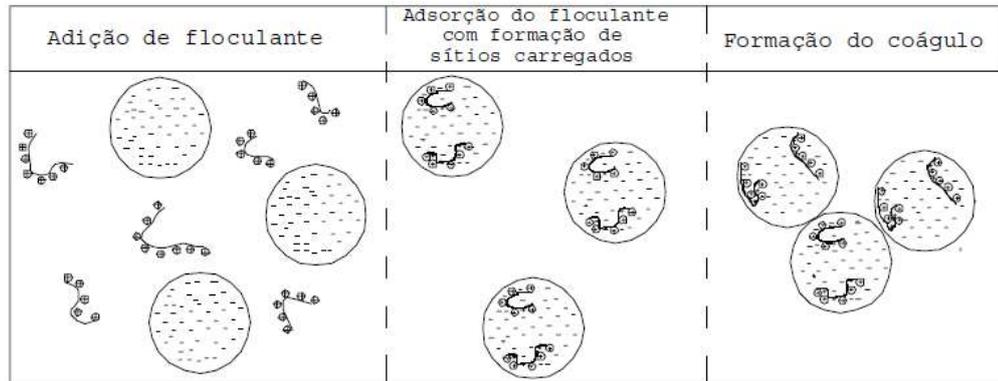


Fonte: DIAS *et al.* (2004)

Já a flocculação por neutralização de carga na superfície ocorre quando um polímero, com o peso molecular médio ou baixo, e com baixa densidade iônica, é adsorvido em alguma superfície com carga contrária. A carga elétrica que o polímero possui consegue neutralizar apenas excesso de carga que existe na superfície e a agregação acontece através da redução da repulsão eletrostática (YAN *et al.*, 2004).

Segundo Baltar (2018), a reversão localizada de carga requer um polímero com um baixo peso molecular, porém com uma densidade de carga elevada. A reversão da carga elétrica na área coberta pelo polímero ocorre devido à adsorção, com carga contrária, na superfície mineral. Como resultado, a superfície passa a apresentar cargas distribuídas heterogeneamente, com áreas negativas e outras positivas. Quando a colisão de duas ou mais partículas ocorrem, com cargas opostas, tem-se a formação dos flocos, como mostra na Figura 13.

Figura 13 – Etapas envolvidas na formação do coágulo.



Fonte: DIAS *et al.* (2004)

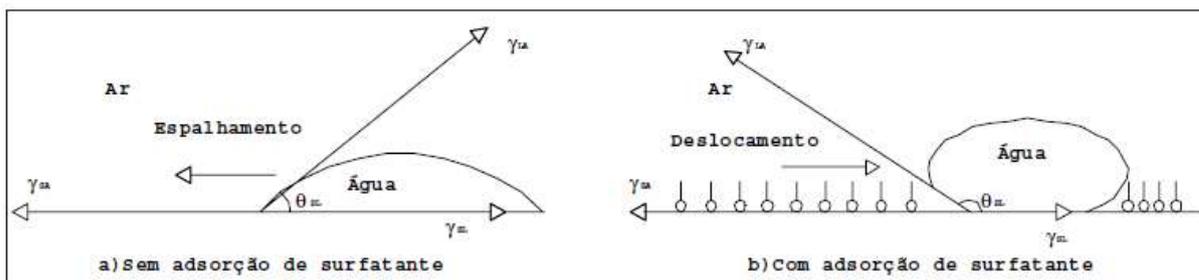
Alguns fatores que afetam o desempenho dos floculantes, são: diluição e preparo, dosagem, peso molecular, agitação, pH, força iônica da solução e concentração de sólidos na polpa (VALADÃO, 1996).

2.7.2 *Surfactantes*

De acordo com Dias *et al.* (2004), por ter um ou até mais grupos hidrofílicos (sulfato, etoxilato, carboxilato, sulfonato etc.) e hidrofóbicos (cadeias hidrocarbônicas), a molécula que é formada pelo surfactante tem um caráter duplo. Alguns surfactantes são tensoativos, por possuírem influência sobre a tensão da superfície do líquido, com isso ocorre uma redução das forças de coesão e conseqüentemente a redução da tensão superficial devido ao acúmulo de moléculas na superfície.

São considerados dois mecanismos de atuação, dos surfactantes, como sendo os principais para o desaguamento de polpas aquosas. Um deles é a atuação que ocorre na interface sólido/líquido da superfície do mineral, tornando-a hidrofóbica (Figura 14) e o outro é a atuação que ocorre na interface líquido/ar, que reduz a tensão superficial (DIAS *et al.*, 2004).

Figura 14 – Influência do surfatante no grau de hidrofobicidade na superfície da partícula.



Fonte: DIAS *et al.* (2004)

Dias *et al.* (2004), ainda conclui que ao adicionar apenas o floculante, houve uma redução no tempo de formação da torta, o que reduz também o tempo de ciclo neste caso, porém houve um aumento na umidade do produto. Já para os surfactantes utilizados, o autor comenta que houve uma redução na tensão superficial do produto filtrado, sem reduzir a umidade da torta, gerando um aumento no tempo necessário para formação da torta.

2.8 Teste de folha (*Leaf Test*)

Segundo França *et al.* (2007), o teste de folha é um teste de filtragem feito em escala laboratorial, empregado para dimensionamentos de filtros industriais de operação contínua. São utilizados para este teste, equipamentos relativamente simples, de fácil montagem e escala pequena.

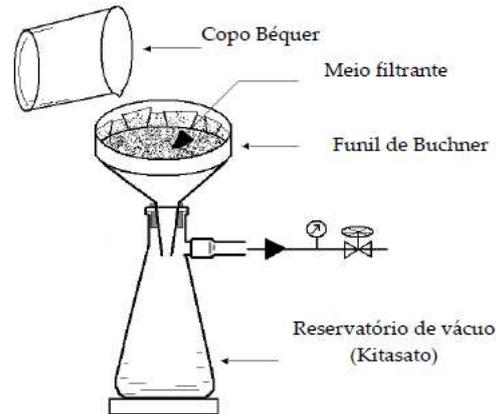
Uma campanha de testes de filtragem deve ser iniciada com algumas investigações preliminares com o intuito de observar o tempo de formação de torta, o desaguamento ou secagem, o nível de vácuo e a escolha do meio filtrante, que fornecem os resultados desejados (FRANÇA *et al.*, 2007).

França *et al.* (2007), cita que para os testes de laboratório, que se deseja separar a polpa ou suspensão, contendo sólidos filtráveis, em uma torta sólida e uma solução de líquido clarificado, emprega-se a filtragem a vácuo para auxiliar no processo de separação.

A filtragem a vácuo ocorre através da aplicação de uma pressão menor que a pressão atmosférica, promovendo o aumento da velocidade de formação da torta. O kitassato é o recipiente utilizado, mais adequado, para o teste em escala laboratorial (FRANÇA *et al.*, 2007).

O sistema se resume em acoplar o kitassato em um funil de Buchner e ligar o funil a uma linha de vácuo, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Desenho esquemático do sistema de filtragem a vácuo em escala laboratorial



Fonte: FRANÇA *et al.* (2007)

Ao terminar o teste, o material filtrado e a torta são recolhidos para pesagem das massas seca e úmida. Alguns dados que, também, são interessantes para análise são: espessura da torta, volume, turbidez do filtrado e o nível do vácuo. Utilizando estes dados pode-se determinar os parâmetros de filtragem, como a umidade da torta, a taxa unitária de filtragem (TUF) e a porcentagem de sólidos presente no filtrado.

Segundo Araujo Junior (2014), a produtividade ou taxa unitária de filtragem (TUF) ou razão de filtragem, quantifica a massa que foi produzida durante o teste, considerando a área utilizada para filtragem com relação ao tempo. A Equação 5 mostra a forma como o resultado pode ser obtido.

$$TUF \left(\frac{kg}{m^2} \right) = \frac{massa\ seca\ (kg) \times 3.600}{\text{área de filtragem}\ (m^2) \times tempo\ de\ ciclo\ (s)} \quad (5)$$

Para o material filtrado, além do volume, pode-se medir a turbidez presente no líquido através de um turbidímetro. A qualidade do filtrado também pode ser analisada pela

determinação da porcentagem de sólidos, conforme a Equação 6, onde mp é a massa de polpa e ms é a massa seca presente na solução.

$$\text{Percentual de sólidos (em massa)} = \frac{ms}{mp} \times 100 \quad (6)$$

A determinação da porcentagem de sólidos na solução, ajuda na identificação de possíveis tecidos danificados/rasgados ou na eficiência dos auxiliares químicos de filtragem.

2.9 Planejamento Fatorial

O *Design of Experiment* (DoE) ou planejamento fatorial é uma ferramenta, que permite investigar as interações entre os parâmetros desejados e pode fornecer informações sobre todo o processo (GORBOUNOV *et al.*, 2022). O uso do DoE pode ser altamente eficaz na identificação da combinação ideal de variáveis de entrada que alcancem os KPI's (*Key Performance Indicator*) ou indicador-chave de desempenho desejados, ao mesmo tempo em que aumenta a velocidade em que a otimização pode ocorrer (BABAMOHAMMADI *et al.*, 2023).

O DoE foi desenvolvido no início da década de 20 por Ronald Fisher na Rothamsted Agricultural Field Research Station em Londres, na Inglaterra. Os experimentos iniciais, que utilizaram esta ferramenta, estavam focados em determinar o efeito de vários fertilizantes em diferentes pedaços de terra, onde a condição final do grão não dependia apenas do fertilizante, mas também de uma série de outros fatores, tais como a condição e a umidade do solo etc. (ANTONY, 2003).

Segundo Gorbounov *et al.* (2022), os planejamentos fatoriais podem produzir resultados positivos, minimizando o número de recursos e o tempo utilizado, conseguindo assim uma abordagem mais robusta. Além disso, ao projetar o experimento de forma inteligente, informações sobre a interação entre as variáveis podem ser coletadas, permitindo uma compreensão mais aprofundada do processo e identificação dos pontos principais do projeto.

Segundo Antony (2003), as principais aplicações potenciais do DoE em processos industriais incluem: maior rendimento e estabilidade do processo, aumento dos lucros e do retorno do investimento, melhoria na capacidade de processo, redução da variabilidade do processo e, portanto, melhor consistência do desempenho do produto, redução dos custos de produção, redução do tempo de projeto e desenvolvimento de processos, maior credibilidade

de engenharia com sucesso na resolução de problemas crônicos, maior compreensão da relação entre as principais entradas e saídas do processo, aumento da rentabilidade do negócio através da redução da taxa de desperdício de insumos, taxa de defeitos, retrabalho, reteste, etc.

Antony (2003) ainda enfatiza que os experimentos industriais devem passar por uma sequência de atividades para que possam ser validados, sendo elas: uma hipótese que irá dar motivos para a execução dos experimentos, o experimento propriamente dito para que a hipótese seja investigada, análises dos dados gerados e performances estatísticas para entendimento da natureza do problema, interpretação dos resultados para entender os resultados gerados durante a análise experimental e finalmente, a conclusão que envolve se a hipótese originalmente definida é verdadeira ou falsa. Muitas vezes mais experimentos devem ser realizados para testar a hipótese e às vezes são estabelecidas novas hipóteses que exigem mais experimentos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são abordados os métodos e os materiais utilizados para caracterização da amostra de rejeito, bem como os testes de folha com os auxiliares químicos de filtragem e diferentes tecidos filtrantes.

Para este estudo buscamos o melhor reagente que se adequa às condições de processo previamente definidas, bem como aquele que performou de forma que os finos presentes no minério conseguissem se agregar para serem descarregados na torta e não causassem obstrução nos tecidos, além de buscar a maior desidratação das partículas para atingir a umidade ótima.

3.1 Método de Pesquisa

O método de pesquisa utilizado foi o método hipotético dedutivo (H-D), uma vez que foram feitas pesquisas de modelos de simulação com o intuito de projetar experimentos, reduzindo a influência de outras variáveis para que pudéssemos, com confiança, determinar como as variáveis de interesse interagem entre si.

A pesquisa hipotético-dedutiva abrange o que é amplamente considerado o método científico tradicional; experimentação. A experimentação é um dos métodos mais utilizados, atualmente, para entender o comportamento e a resposta de um sistema sob condições variadas. Através da pesquisa hipotético-dedutiva, o melhor suporte probatório pode ser acumulado (SIPONEN; KLAUVUNIEMI, 2020).

Existem inúmeras razões para a utilização deste método, onde Hempel e Popper são talvez os mais conhecidos defensores do método H-D na filosofia da ciência. A hipótese no método H-D (por Hempel ou Popper) é tipicamente adivinhada, enquanto na literatura, acredita-se que as hipóteses sejam baseadas em teoria ou literatura já estabelecidas (SIPONEN; KLAUVUNIEMI, 2020).

Segundo Edgar e Manz (2017), o método de experimentação é bom para rejeitar uma teoria antiga ou construir evidências para uma nova. As teorias são uma representação do conhecimento que pensamos ter sobre um campo de estudo. Portanto, um forte objetivo da ciência é refinar e melhorar nossas teorias, de modo que elas nos permitam fazer melhores previsões de como um sistema se comportará. Experimentos são uma das melhores maneiras de direcionar uma teoria e gerar evidências para provar que ela é falsa ou fortalecer ainda mais

a confiança nela. Um bom método de gerar uma hipótese para um experimento é gerar uma previsão do comportamento a partir da teoria e percorrer o experimento para ver se o mesmo comportamento existe no sistema real.

3.2 Preparação da amostra

A amostra utilizada durante os testes foi proveniente do rejeito do beneficiamento de minério de ouro, na região norte do estado de Goiás. A coleta da amostra foi feita durante uma semana, na forma de polpa a 60% de sólidos em massa, com o intuito de ter uma amostra representativa para as variações de granulometria, reologia e qualquer alteração que possa ter ocorrido na planta durante o período. Após a coleta, a amostra foi levada para o laboratório de processo da empresa, onde foi seca em uma estufa a 100°C e desaglomerada para ser enviada para o laboratório de Tratamento de Minérios do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET – MG), em Araxá. Junto com este material, também foi coletada e enviada a água de processo da planta metalúrgica, que possui características diferentes da água bruta, como dureza, pH, condutividade, concentrações de reagentes etc.

No laboratório do CEFET, a amostra foi homogeneizada em pilha alongada (Figura 16) e em seguida, alíquotas de 1kg foram retomadas da pilha de homogeneização e ensacadas para serem utilizadas durante os ensaios de caracterização física e testes de filtragem.

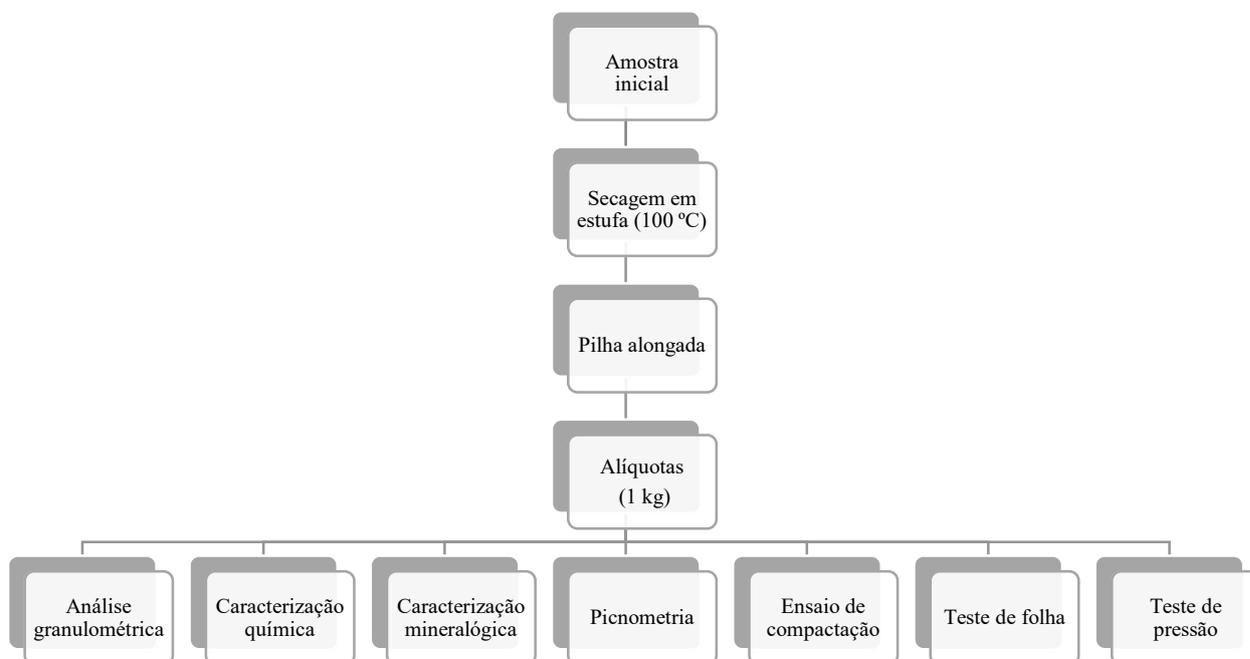
Figura 16 – Amostra homogeneizada



Fonte: Próprio autor

O fluxograma, mostrado na Figura 17, indica a sequência dos procedimentos feitos em laboratório.

Figura 17 – Etapas de preparação de amostras



Fonte: Próprio autor

3.3 Caracterização da amostra

Algumas análises iniciais foram realizadas para determinar as características físicas do minério e pontos iniciais para os testes de filtração:

- 1) Análise granulométrica via peneiramento a úmido e difração de raios laser, via granulômetro;
- 2) Análise química dos elementos por fluorescência de raios-X (FRX) e difração de raios-X (DRX);
- 3) Determinação da densidade via picnometria convencional e picnômetro a gás;
- 4) Determinação da umidade ótima pelo teste de compactação em cilindro de proctor normal.

3.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica, para determinação da distribuição de tamanho das partículas, foi realizada por peneiramento a úmido e foram utilizadas as malhas de 48# (296 μm), 60# (250 μm), 100# (148 μm), 140# (106 μm), 200# (74 μm), 270# (53 μm) e 400# (37 μm). Figura 18 ilustra o peneirador suspenso utilizado no teste.

Figura 18 – Peneirador utilizado para determinação da distribuição granulométrica



Fonte: Próprio autor

Uma segunda análise granulométrica foi realizada, utilizando um equipamento de difração de raios laser, modelo CILAS 1090. Este equipamento consegue analisar partículas menores do que as partículas analisadas por peneiramento via úmida, sendo mais eficiente para as frações menores do que 400# (37 μm).

3.3.2 Análise química

As análises químicas da amostra foram realizadas no laboratório químico do CEFET – MG, em Belo Horizonte, onde foram realizadas as análises por difração e fluorescência de raios-X, utilizando um equipamento modelo EDX-720 para a fluorescência de raios-X. A difração de raios-X foi realizada com uma fonte de radiação em cobre (Cu), comprimento de onda em 1,540 angstrom e início de faixa de varredura em 2θ , sendo o início em 5,020 (2θ) e a posição final em 99,9800 (2θ).

O método para análise dos dados utilizados, demandou a utilização de 3 programas, sendo eles: X'pert Highscore, Vesta[®] e Origin[®] 2024.

- X'pert Highscore: utilizado para realizar a análise qualitativa e identificação de fases cristalinas e amorfas, além de localizar possíveis códigos para arquivo de informações cristalográficas (cif) dos elementos a serem analisados.
- Vesta[®]: Utilizado para abrir a cif e exportar os dados para o Origin[®] 2024.
- Origin[®] 2024: Programa utilizado para análise e refinamento dos dados, onde os picos dos elementos cristalinos são plotados e podem ser visualizados com clareza.

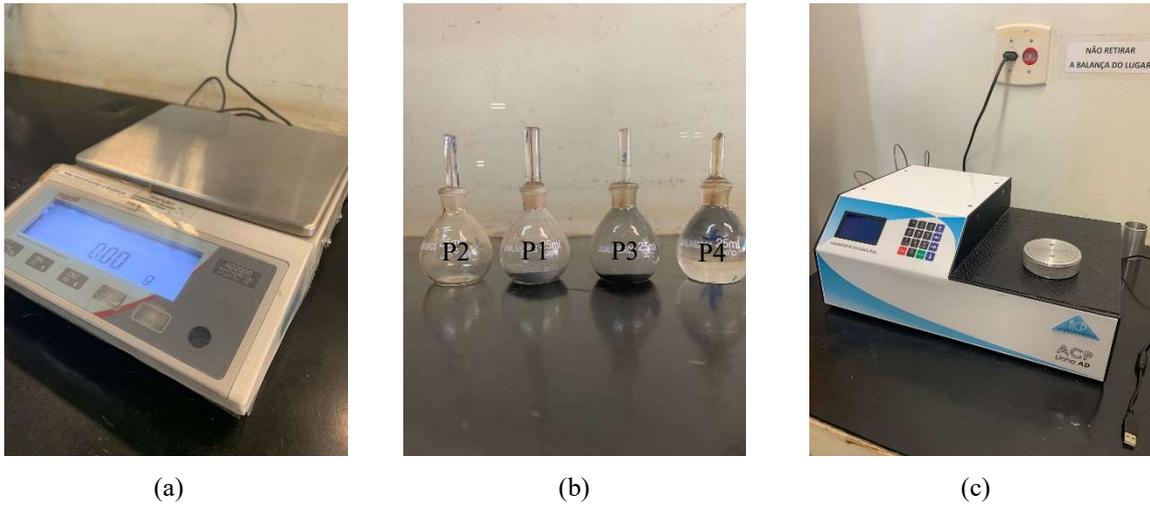
3.3.3 Picnometria

A densidade real do rejeito (ρ_s) foi determinada por picnometria. As massas do picnômetro com as partículas sólidas (P_1), picnômetro completamente vazio e seco (P_2), picnômetro com água e sólidos (P_3) e picnômetro somente com água (P_4) foram obtidas por meio de uma balança Marte, com precisão de 2 casas decimais, como mostrado na Figura 19a. A densidade foi obtida por meio da Equação 7, sendo realizados 5 testes de picnometria e retiradas 4 medidas de cada teste, como ilustrado na Figura 19b.

$$\rho_s = \frac{P_1 - P_2}{(P_4 + P_1) - (P_2 + P_3)} \quad (7)$$

A densidade foi também analisada em um picnômetro a gás da ACP, modelo Autodensity 200 e projetado especificamente para medir a massa específica, densidade real (volume real) de materiais sólidos, empregando o princípio de Arquimedes de deslocamento do fluido (gás) e da técnica de expansão de gás, ilustrado na Figura 19c.

Figura 19 – (a) Balança Marte, (b) picnômetros com material e (c) analisador de densidade



Fonte: Próprio autor

3.3.4 Ensaio de compactação

Os testes de compactação foram realizados, seguindo a norma da ABNT NBR 7182:2016, para determinação da umidade ótima, que é referência como característica do produto da filtragem, considerando a compactação necessária para disposição do rejeito em pilhas.

Foram utilizados, para o teste, um cilindro metálico de Proctor com volume de 992 cm^3 , acoplado com o cilindro complementar (Figura 20) e um soquete para auxiliar na compactação.

Figura 20 – Cilindro de Proctor e cilindro complementar



Fonte: Próprio autor

A massa de rejeito utilizada, para os ensaios, foi de aproximadamente 1.800 gramas, preparada em níveis de umidade diferentes. Sendo o primeiro ensaio com umidade próxima de 2% (base seca), chegando no 5º ensaio com umidade acima de 20%, sendo a umidade ótima industrial esperada para disposição em pilha, de 15%. A Tabela 3 mostra a quantidade de rejeito e água utilizados para cada ensaio.

Tabela 3 – Massa de rejeito e água utilizados

| Ensaio | Massa de rejeito (g) | Massa de água (g) |
|---------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | 1.600 | 35,7 |
| 2 | 1.700 | 124,0 |
| 3 | 1.900 | 214,9 |
| 4 | 2.000 | 325,1 |
| 5 | 1.900 | 515,9 |

Fonte: Próprio autor

Após ter a homogeneização da água com os sólidos, aos poucos a amostra foi sendo adicionada nos cilindros, formando 3 camadas com alturas aproximadamente iguais. Para a formação de cada camada foram aplicados 26 golpes, utilizando o soquete, a uma altura fixa e distribuídos de forma uniforme. Concluída a última camada, o cilindro complementar foi retirado e o excesso de rejeito, acima do cilindro Proctor, foi removido com o auxílio de uma régua biselada. A Figura 21 mostra a massa úmida de rejeito compactado, após a retirada do cilindro complementar e após a remoção do cilindro Proctor.

Figura 21 – (a) Rejeito no cilindro Proctor, (b) material compactado



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor

Ao final dos ensaios, a massa úmida, do rejeito compactado, foi pesada e uma alíquota foi retirada para determinação da umidade em base seca ($W_{b.s}$) e base úmida ($W_{b.u}$), expressas em percentual, conforme mostram as Equações (8 e 9).

$$W_{b.s} = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad (8)$$

$$W_{b.u} = \frac{mu - ms}{mu} \times 100 \quad (9)$$

Onde mu é a massa úmida e ms é a massa seca obtida após a secagem da amostra em estufa a 100 °C durante 24 horas.

3.4 Testes de folha com alimentação por cima (*Leaf Test*)

As polpas de rejeito foram condicionadas com 55% de sólidos em massa, para a reprodução dos testes em escala laboratorial de forma semelhante a escala industrial. O volume de polpa utilizado, foi estimado de acordo com a capacidade volumétrica do recipiente escolhido para os testes, como mostra a Tabela 4.

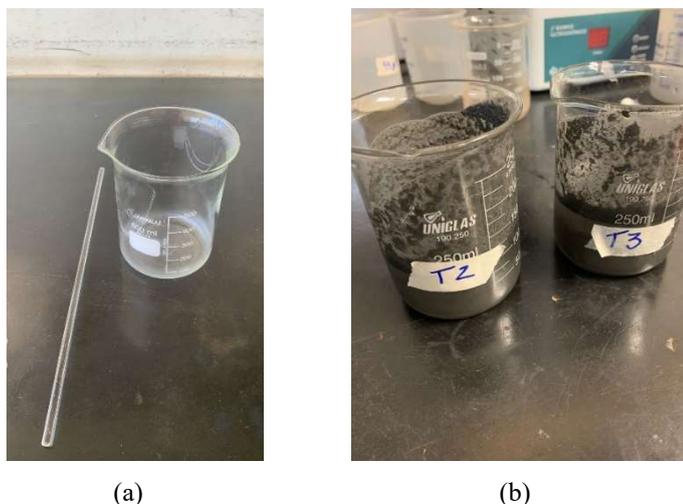
Tabela 4 – Dados da polpa preparada

| Massa de sólidos (g) | Massa de água (mL) | Volume de polpa (mL) |
|----------------------|--------------------|----------------------|
| 86 | 70 | 100 |

Fonte: Próprio autor

Após o preparo, a amostra foi colocada em suspensão, utilizando agitação manual com um bastão de vidro, para homogeneização (Figura 22).

Figura 22 – (a) béquer e bastão de vidro, (b) béquer com polpa condicionada



Fonte: Próprio autor

Um sistema de filtragem a vácuo foi montado, em escala laboratorial, para execução dos testes. O sistema é composto por uma bomba a vácuo, um kitassato, meio filtrante e um funil de Buchner, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Sistema de filtragem em escala laboratorial



Fonte: Próprio autor

Inicialmente, após a amostra ser homogeneizada, no béquer, houve a medição do pH da polpa, utilizando o medidor de pH Edge[®] HI2002-02 Hanna, e quando planejado, a adição do reagente na dosagem pré-estabelecida. Após o tempo de condicionamento da polpa com o reagente, acionou-se a bomba de vácuo com 480 mmHg de pressão e adicionou-se a polpa sobre

o meio filtrante. Com o início do processo de secagem, o tempo de formação da torta foi medido, observando a água livre sobre a torta. Após o tempo de secagem, pré-determinado, a bomba de vácuo foi desligada e a amostra retirada e colocada em uma bandeja (Figura 24). A espessura da torta foi medida em 3 pontos, utilizando um paquímetro e posteriormente verificou-se a quantidade/presença de rachaduras. Com as medidas retiradas, a torta foi pesada e armazenada em uma estufa, a aproximadamente 100 °C, durante o período de 24 horas para posterior determinação da umidade.

Figura 24 – Torta gerada durante o teste de filtração



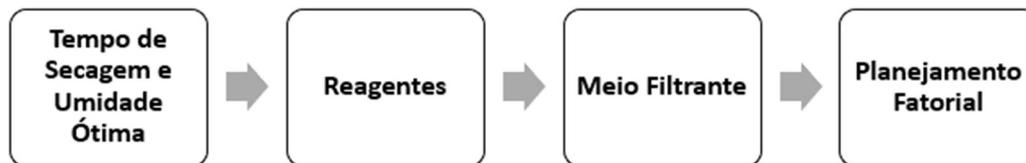
Fonte: Próprio autor

A umidade (base úmida) e a taxa unitária de filtração (TUF) (calculada segundo a Equação 5) foram os parâmetros utilizados para expressar os resultados dos testes exploratórios.

3.5 Testes preliminares

O teste de folha foi utilizado para definir o tempo de secagem da torta, bem como selecionar os auxiliares químicos de filtração e os meios filtrantes (tecidos) para os testes posteriores. Após a conclusão dos testes exploratórios e definição das variáveis, um planejamento fatorial foi elaborado para estudar e analisar o comportamento das variáveis na busca por uma otimização dos resultados. Sendo assim, a sequência de ensaios mostrada na Figura 25 foi definida.

Figura 25 – Sequência dos testes exploratórios



Fonte: Próprio autor

Inicialmente foram feitos testes para determinar o tempo de secagem necessário para se atingir a umidade ótima, sendo os tempos de secagem utilizados de 60, 120, 180, 300 e 420 segundos. O nível de vácuo tanto para a formação quanto para a secagem da torta foi mantido em 480 mmHg.

3.5.1 Auxiliar químico de filtração

Os auxiliares químicos de filtração testados, estão apresentados na Tabela 5. Estes auxiliares foram preparados em uma concentração de 0,05% (massa/volume) e para sua completa homogeneização, a solução do reagente foi submetida a uma agitação mecânica, com mínima frequência de rotação (300 rpm), por 15 minutos.

As empresas BASF® e Clariant®, que são duas empresas conceituadas no setor mineral, enviaram os reagentes para comparação em escala laboratorial.

Tabela 5 – Auxiliares de filtração fornecidos

| Auxiliar de Filtração | Empresa | Natureza Química |
|------------------------------|----------------|---------------------------|
| Magnafloc®351 | BASF | Poliacrilamida Não Iônica |
| Alclar®662 | BASF | Floculante Aniônico |
| Magnafloc®919 | BASF | Poliacrilamida Aniônica |
| Magnafloc®611 | BASF | Poliacrílico Aniônico |
| Magnafloc®10 | BASF | Poliacrilamida Aniônica |
| Flotisor FA 18899 | Clariant | Poliacrilamida Aniônica |
| Flotisor FA 18939 | Clariant | Poliacrilamida Aniônica |

Fonte: Próprio autor

Os testes foram realizados com água de processo e tiveram o pH medido utilizando um peagâmetro, para comparação dos resultados e análise de influência nos reagentes. O tempo de condicionamento do rejeito com os reagentes foi mantido em 1 minuto. Todos os testes foram realizados em duplicata e após a execução dos testes, os 2 reagentes com melhor performance foram selecionados para serem testados no planejamento fatorial.

3.5.2 Tecidos de filtragem

Foram utilizados 6 tipos de tecidos de filtragem, especificados na Tabela 6, fornecidos pela empresa Air Slaid®, que é uma empresa com grande atuação no setor mineral, principalmente na área que abrange os tecidos de filtragem.

Tabela 6 – Características dos tecidos fornecidos para testes

| Artigo | Fibra | Fio | Gramatura (g/m²) | Espessura do fio (mm) | Permeabilidade (m³/h) |
|------------------------|-----------------------|------------------------------|--|----------------------------------|---|
| AS-130.CA- REV.:0.6 | 100% Polipropileno | Urdume: Mono Trama: Multi | 388 | 0,55 a 0,60 | 3,4 a 8,5 |
| AS-341.CA- REV.:0.6 | 100% Polipropileno | Urdume: Mono Trama: Multi | 560 | 0,80 a 0,85 | 0,85 a 4,25 |
| AS-345.CA- REV.:0.7 | 100% Polipropileno | Urdume: Mono Trama: Mono | 388 | 0,60 a 0,65 | 13,6 a 20,4 |
| AS-618.CA- REV.:0.1 | 100% Poliamida | Urdume: Mono Trama: Mono | 560 | 0,79 a 0,83 | 135,9 a 203,9 |
| AS-619.CA- REV.:0.4 | 100% Poliamida | Urdume: Mono Trama: Mono | 348 | 0,45 a 0,55 | 84,9 a 135,9 |
| AS-620.CA- REV.:0.5 | 100% Poliamida | Urdume: Mono Trama: Multi | 460 | 0,60 a 0,65 | 3,4 a 8,5 |

Fonte: Próprio autor

Os testes para escolha do melhor meio filtrante, foram realizados sem a utilização de qualquer reagente, apenas buscando a menor umidade da torta e maior TUF, utilizando água de processo.

3.5.3 Efeito do tipo de água

Para comparativo do efeito que o tipo de água pode exercer no desempenho da filtração, foram realizados testes com Magnafloc[®] 351, dosagem de 15g/t, e sem reagente. Os mesmos parâmetros usados para os testes exploratórios foram empregados para os dois tipos de água, comum (torneira) e água de processo, medindo a umidade e a taxa unitária de filtragem.

3.5.4 Tempo de condicionamento

Testes de tempo de condicionamento com reagente foram realizados para avaliar os efeitos deste tempo na performance do reagente e comparar os possíveis impactos para a umidade e TUF. O reagente escolhido para os testes foi o Magnafloc[®] 611, que foi um dos reagentes selecionado para a continuidade dos testes executados com o planejamento fatorial. Os tempos de condicionamento foram: 60, 120, 300 e 480 segundos. A dosagem foi mantida em 45g/t e foi usado água de processo.

3.6 Planejamento Fatorial

Os testes realizados, foram executados seguindo um planejamento fatorial elaborado utilizando o *Minitab Statistical Software*[®], conforme mostrado na Tabela 7. Os testes foram definidos de forma aleatória para equilibrar o efeito de condições diferentes ou incontrolláveis, que poderiam afetar os resultados do experimento, a 1ª coluna (OrdemPad) mostra qual foi a ordem dos ensaios no experimento como ordem padrão, já a 2ª coluna (OrdemEns) mostra qual foi a ordem dos ensaios no experimento em ordem aleatória. Os níveis analisados para o reagente foram: Flotisor FA 18899 (-1) e Magnafloc 611 (+1); para o tecido: AS-620.CA (-1) e AS-619.CA (+1); para a porcentagem de sólidos: 40% (-1), 50% (0) e 60% (+1) e, por fim, para a dosagem dos reagentes: 15 g/t (-1), 45 g/t (0) e 75 g/t (+1). O tempo de secagem foi mantido constante em 180 segundos e o tempo de condicionamento em 2 minutos.

Todas as análises estatísticas dos resultados obtidos com os experimentos realizados, foram feitas utilizando o *Minitab Statistical Software*[®]. Considerou-se as análises estatísticas para as variáveis que poderiam impactar no resultado dos testes de filtragem: tipo de reagente, tipo de tecido, dosagem de reagente e porcentagem de sólidos da polpa.

O planejamento fatorial também foi feito com os tecidos que chegaram às melhores performances e que obtiveram valores próximos ou melhores do que os valores industriais esperados.

Tabela 7 – Matriz para planejamento fatorial

| OrdemPad | OrdemEns | PtCentral | Blocos | Tecido | Reagente | % de Sólidos | Dosagem |
|-----------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|-----------------|---------------------|----------------|
| 19 | 1 | 1 | 1 | -1 | +1 | -1 | -1 |
| 36 | 2 | 0 | 1 | +1 | +1 | 0 | 0 |
| 28 | 3 | 1 | 1 | +1 | +1 | -1 | +1 |
| 24 | 4 | 1 | 1 | +1 | +1 | +1 | -1 |
| 23 | 5 | 1 | 1 | -1 | +1 | +1 | -1 |
| 15 | 6 | 1 | 1 | -1 | +1 | +1 | +1 |
| 5 | 7 | 1 | 1 | -1 | -1 | +1 | -1 |
| 8 | 8 | 1 | 1 | +1 | +1 | +1 | -1 |
| 14 | 9 | 1 | 1 | +1 | -1 | +1 | +1 |
| 30 | 10 | 1 | 1 | +1 | -1 | +1 | +1 |
| 37 | 11 | 0 | 1 | -1 | -1 | 0 | 0 |
| 33 | 12 | 0 | 1 | -1 | -1 | 0 | 0 |
| 40 | 13 | 0 | 1 | +1 | +1 | 0 | 0 |
| 1 | 14 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 31 | 15 | 1 | 1 | -1 | +1 | +1 | +1 |
| 4 | 16 | 1 | 1 | +1 | +1 | -1 | -1 |
| 12 | 17 | 1 | 1 | +1 | +1 | -1 | +1 |
| 26 | 18 | 1 | 1 | +1 | -1 | -1 | +1 |
| 29 | 19 | 1 | 1 | -1 | -1 | +1 | +1 |
| 9 | 20 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | +1 |
| 16 | 21 | 1 | 1 | +1 | +1 | +1 | +1 |
| 21 | 22 | 1 | 1 | -1 | -1 | +1 | -1 |
| 17 | 23 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 25 | 24 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | +1 |
| 11 | 25 | 1 | 1 | -1 | +1 | -1 | +1 |
| 2 | 26 | 1 | 1 | +1 | -1 | -1 | -1 |
| 22 | 27 | 1 | 1 | +1 | -1 | +1 | -1 |
| 35 | 28 | 0 | 1 | -1 | +1 | 0 | 0 |
| 18 | 29 | 1 | 1 | +1 | -1 | -1 | -1 |
| 13 | 30 | 1 | 1 | -1 | -1 | +1 | +1 |
| 10 | 31 | 1 | 1 | +1 | -1 | -1 | +1 |
| 32 | 32 | 1 | 1 | +1 | +1 | +1 | +1 |
| 27 | 33 | 1 | 1 | -1 | +1 | -1 | +1 |
| 20 | 34 | 1 | 1 | +1 | +1 | -1 | -1 |
| 38 | 35 | 0 | 1 | +1 | -1 | 0 | 0 |
| 6 | 36 | 1 | 1 | +1 | -1 | +1 | -1 |
| 7 | 37 | 1 | 1 | -1 | +1 | +1 | -1 |
| 3 | 38 | 1 | 1 | -1 | +1 | -1 | -1 |
| 34 | 39 | 0 | 1 | +1 | -1 | 0 | 0 |
| 39 | 40 | 0 | 1 | -1 | +1 | 0 | 0 |

Fonte: Próprio autor

3.7 Testes com filtro de pressão

Após a elaboração e execução do planejamento fatorial, alguns testes, utilizando um filtro de pressão (Figura 26), foram executados para aplicação dos resultados alcançados pela otimização.

Figura 26 – Unidade experimental do filtro de pressão



Fonte: Próprio autor

Para preparação da polpa calculou-se as massas dos sólidos, água e reagentes necessárias para garantir representatividade em relação aos testes realizados no filtro a vácuo (Tabela 8). Ajustou-se a quantidade de materiais de acordo com a maior proporção do filtro de pressão, sendo a polpa foi preparada e condicionada com os reagentes conforme os procedimentos padrão dos ensaios anteriores.

Tabela 8 – Variáveis para preparação da polpa

| 198 gramas de rejeito (60% Sólidos) | Dosagem (g/t) | Massa reagente (g) | Massa de solução (g) |
|--|----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | 15 | 0,00297 | 5,94 |

Fonte: Próprio autor

Para realização do ensaio, o meio filtrante foi devidamente instalado no filtro, a polpa preparada foi adicionada ao corpo cilíndrico do filtro de pressão e o filtro foi fechado para início dos testes. Após o fechamento do filtro, a pressão foi aplicada ao sistema e mantida constante durante todo o período de filtragem. O resíduo sólido retido na torta foi coletado e pesado para

determinação da eficiência de filtração e o filtrado foi diretamente captado por uma proveta para cálculo do volume filtrado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo visa apresentar os resultados obtidos acerca da caracterização física e química do rejeito, além de apresentar os resultados obtidos com os testes de folha realizados com o filtro à vácuo e filtro de pressão e demais passos realizados até a avaliação final do estudo.

4.1 Caracterização

A caracterização foi feita com o intuito de preparar e analisar as amostras para os testes que foram realizados, bem como verificar se a amostra possuía representatividade quando comparada com os resultados esperados industrialmente.

4.1.1 Análise química

As análises químicas realizadas tanto por difração de raios-X quanto para fluorescência de raios-X mostraram a predominância do quartzo, o que era o esperado para este minério. A Tabela 9 mostra o resultado da fluorescência de raios-X.

Tabela 9 – Composição química da amostra

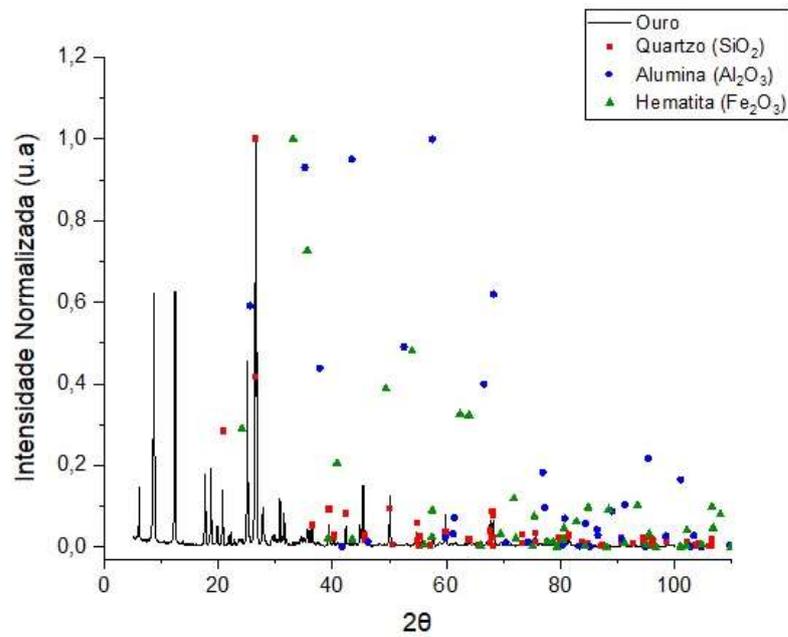
| Elemento | % | Desvio Padrão |
|--------------------------------|----------|----------------------|
| SiO ₂ | 51,20 | 0,116 |
| Fe ₂ O ₃ | 18,03 | 0,030 |
| Al ₂ O ₃ | 15,30 | 0,093 |
| CaO | 6,46 | 0,024 |
| K ₂ O | 4,77 | 0,022 |
| SO ₃ | 1,51 | 0,015 |
| TiO ₂ | 1,29 | 0,018 |
| BaO | 0,67 | 0,036 |
| As ₂ O ₃ | 0,38 | 0,003 |
| MnO | 0,23 | 0,005 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,08 | 0,005 |
| ZnO | 0,04 | 0,002 |
| SrO | 0,04 | 0,001 |

Fonte: Próprio autor

Para identificar os principais minerais presentes na amostra de rejeito, uma análise de difração de raios-X foi realizada. As figuras 27, 28, 29 e 30 apresentam os resultados de identificação das fases por difratometria de raios-X. Os seguintes minerais (em maior

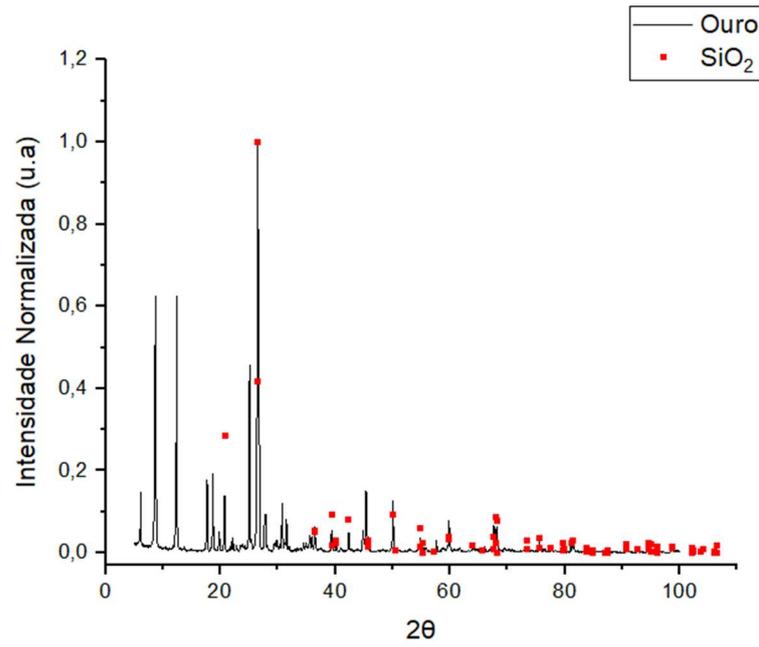
concentração na amostra) foram identificados em suas fases cristalinas: quartzo, alumina e hematita.

Figura 27 – Difratoograma de raios-X dos minerais agrupados

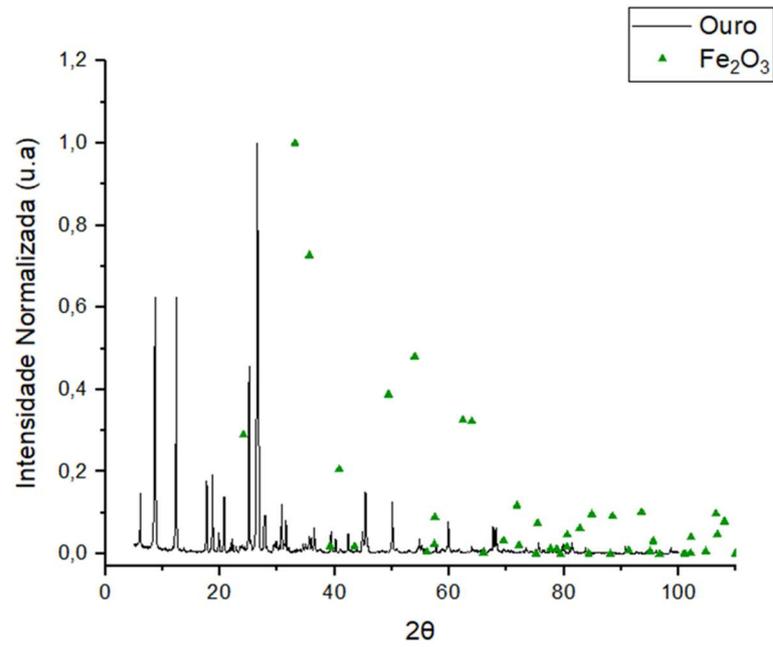


Fonte: Próprio autor

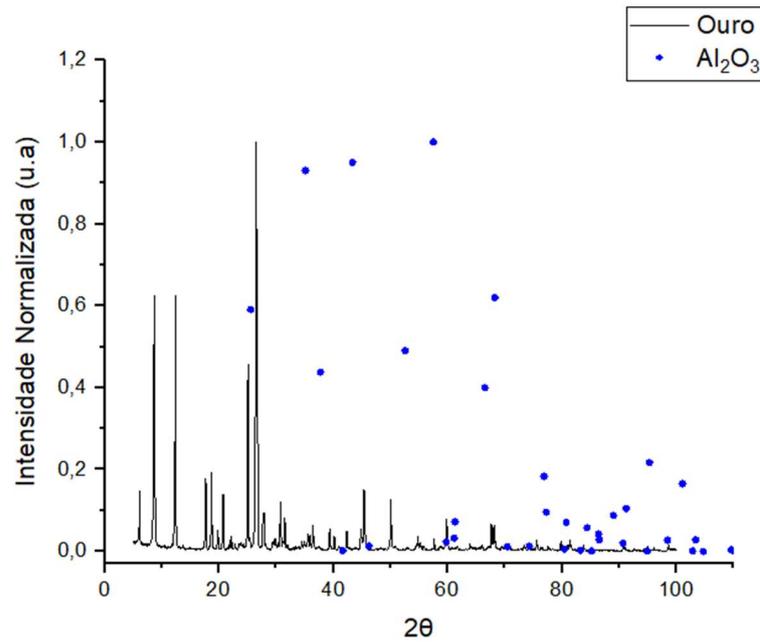
A utilização da intensidade normalizada foi determinada com o intuito de deixar o gráfico mais limpo tendo os valores entre 0 e 1 no eixo y, bem como o espaçamento entre os valores de 2θ no eixo x. As figuras 28, 29 e 30 mostram como ficaram as distribuições dos elementos de forma individualizada.

Figura 28 – Difratoograma de raios-X para SiO₂

Fonte: Próprio autor

Figura 29 – Difratoograma de raios-X para Fe₂O₃

Fonte: Próprio autor

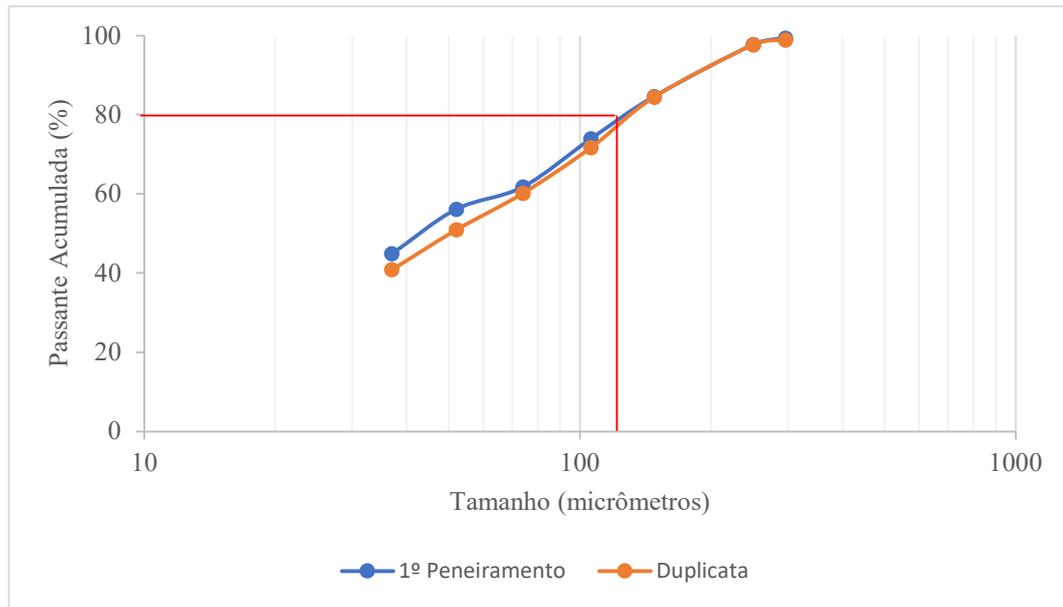
Figura 30 – Difratoograma de raios-X para Al_2O_3 

Fonte: Próprio autor

4.1.2 Granulometria

Os resultados de granulometria, via peneiramento a úmido (Figura 31), indicam que a amostra possui 80% passante em 130 micrômetros e aproximadamente 45% está abaixo de 400# (37 μm), o que indica que a etapa de moagem, durante o período da coleta da amostra, estava operando próxima das variáveis de processo (80% passante em 106 μm) e indica uma boa representatividade da amostra para o período.

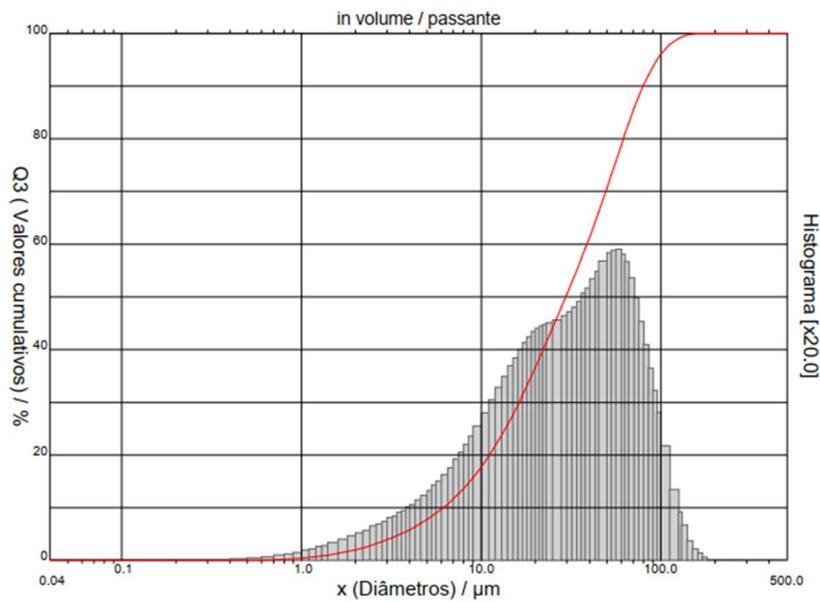
Figura 31 – Teste de granulometria



Fonte: Próprio autor

Utilizando um granulômetro por difração a laser, modelo CILAS 1090, para uma segunda análise granulométrica, obtivemos a curva granulométrica apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Curva granulométrica via granulômetro (CILAS 1090)



Fonte: Próprio autor

Observa-se pela curva da Figura 32 que a quantidade de finos analisada pela difração a laser é maior do que pela análise feita via peneiramento a úmido. Isso se dá pela eficiência de leitura do equipamento e a capacidade de análise para as frações mais finas. A Tabela 10 mostra

os parâmetros característicos da distribuição granulométrica para as granulometrias de 0,04 à 500 micrômetros analisadas pelo granulômetro.

Tabela 10 – Distribuição granulométrica via difração a laser

| Distribuição Granulométrica | |
|------------------------------------|----------|
| D ₁₀ | 6,13 μm |
| D ₅₀ | 29,57 μm |
| D ₉₀ | 79,65 μm |
| D _{médio} | 37,41 μm |

Fonte: Próprio autor

A tabela mostra que mais 60% do material está abaixo de 40 micrômetros e que mais de 96% do material é passante em 106 micrômetros, indicando uma grande quantidade de finos, mostrando que o material está além dos 80% passante em 106 micrômetros esperados para a etapa de moagem.

Por se tratar de um rejeito muito fino e que, normalmente, não seria filtrado à vácuo e sim, provavelmente, em um filtro de pressão, devido à granulometria, pôde-se alcançar uma boa umidade porém com o impacto na taxa unitária de filtragem. A quantidade de quartzo presente na amostra, pode tornar o material compacto e isso pode ter contribuído durante a filtragem à vácuo.

A forma da partícula não foi analisada para o presente trabalho, porém comparando a distribuição granulométrica via peneira e via granulômetro, têm-se um indicativo de que a forma das partículas não tenham um formato esférico, visto que a peneira mede a segunda maior dimensão das partículas e a difração a laser mede a esfera equivalente para a determinada difração. Como houve diferença na distribuição granulométrica entre as análises, pode-se interpretar que houve influência do formato da partícula, o que influencia também na filtragem.

Segundo Wakeman (2007), o tamanho das partículas, na alimentação, possui influência direta nos resultados finais e quanto maior o tamanho da partícula, mais espessa seria a torta, maior porcentagem de sólidos e maior volume de filtrado, além de baixa umidade da torta e mais sólidos na descarga dela.

4.1.3 Densidade

Os testes de densidade por picnometria, tanto convencional quanto a gás, mostraram os resultados de $2,986 \text{ g/cm}^3 \pm 0,300$ e $2,905 \text{ g/cm}^3 \pm 0,00702$, respectivamente. A média dos resultados da picnometria convencional (Tabela 11), ficaram próximos dos valores que são utilizados industrialmente ($2,80 \text{ g/cm}^3$) para questão de cálculos de dimensionamento de equipamentos e testes industriais.

Tabela 11 – Testes de picnometria

| Teste | Densidade (g/cm³) |
|--------------|-------------------------------------|
| 01 | 2,780 |
| 02 | 2,810 |
| 03 | 2,770 |
| 04 | 3,110 |
| 05 | 3,460 |
| Média | 2,986 |
| A Gás | 2,905 |

Fonte: Próprio autor

4.1.4 Umidade ótima

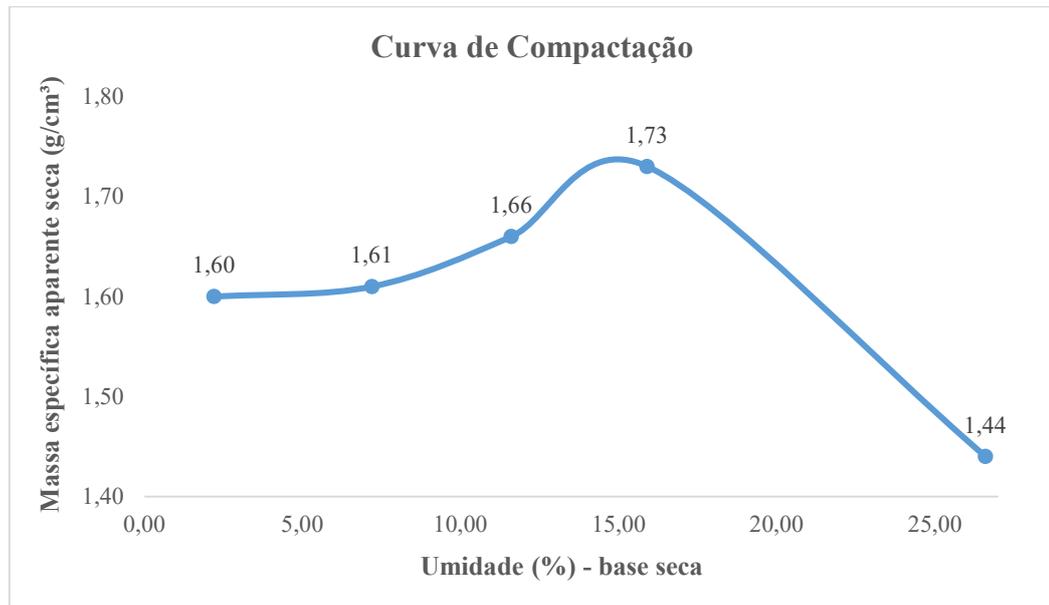
Os resultados do Ensaio de Proctor para determinação da umidade ótima para compactação do rejeito estão descritos na Tabela 12. Com estes resultados podemos obter a curva de compactação apresentada na Figura 33, calculando a umidade (base seca) e a massa específica aparente de acordo com as massas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 12 – Resultados dos testes de compactação para umidade ótima.

| Ponto | Massa Úmida (g) | Massa Seca (g) | Umidade b.s (%) | Densidade Aparente (g/cm³) |
|--------------|------------------------|-----------------------|------------------------|--|
| 01 | 37,1 | 36,3 | 2,2 | 1,60 |
| 02 | 23,8 | 22,2 | 7,2 | 1,61 |
| 03 | 30,4 | 27,3 | 11,6 | 1,66 |
| 04 | 41,1 | 35,5 | 15,9 | 1,73 |
| 05 | 41,7 | 32,9 | 26,6 | 1,44 |

Fonte: Próprio autor

Figura 33 – Gráfico da curva de compactação



Fonte: Próprio autor

Ao analisar a curva de compactação, observa-se que o aumento da umidade resulta no aumento da massa específica aparente seca. Contudo, ao atingir determinado ponto ocorre o efeito contrário. Segundo Reinert, Silva e Diniz (2015), o aumento da quantidade de água mostra um efeito positivo na compactação até o limite de alcance da umidade ótima. A partir do momento em que a adição de água apresenta umidades superiores a umidade ótima, nota-se que ocorre o processo inverso.

Portanto, o ponto em que a massa específica aparente seca apresenta seu valor máximo, 1,73 g/cm³, corresponde a umidade ótima de compactação em base seca, sendo ela, 15,9%. Dessa forma, a umidade alvo utilizada como referência nos ensaios de filtração foi de 13,7% em base úmida. O valor de umidade obtido corrobora com o valor de 15% (base seca) especificado nos projetos e utilizado em escala industrial.

4.2 Teste de folha

A Tabela 13 mostra os resultados dos testes de folha com variação do tempo de secagem da torta de 60 a 420 segundos.

Tabela 13 – Resultados dos testes exploratórios

| Variáveis | | Teste 01 | Teste 02 | Teste 03 | Teste 04 | Teste 05 |
|-----------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Vácuo (mmHg) | Formação | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 |
| | Secagem | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 |
| Tempo (s) | Formação | 36 | 28 | 36 | 32 | 27 |
| | Secagem | 60 | 120 | 180 | 300 | 420 |
| | Ciclo | 96 | 148 | 216 | 332 | 447 |
| Polpa | % Sólidos | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 |
| | Densidade (g/cm ³) | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 1,57 |
| Filtrado | Volume (mL) | 48 | 55 | 58 | 60 | 60 |
| | Água | Comum | Comum | Comum | Comum | Comum |
| Torta | Espessura (mm) | 12,7 | 11,3 | 11,5 | 12,6 | 11,0 |
| | TUF (kg/h/m²) | 620 | 367 | 267 | 174 | 132 |
| | Rachaduras | Não | Não | Não | Não | Não |
| | Peso úmido (g) | 102,47 | 89,43 | 93,12 | 92,15 | 93,08 |
| | Peso seco (g) | 82,61 | 75,48 | 79,95 | 80,03 | 81,87 |
| | Umidade (%) b.u | 19,4% | 15,6% | 14,1% | 13,2% | 12,0% |

Fonte: Próprio autor

Analisando os resultados da Tabela 13 e buscando o melhor cenário para atingir os resultados industriais esperados, optou-se por utilizar os resultados obtidos no teste 03, que foi o primeiro teste que atingiu valores de umidade (base úmida) próximo da umidade ótima esperada (13,7%) e com uma taxa unitária de filtragem acima dos testes 04 e 05.

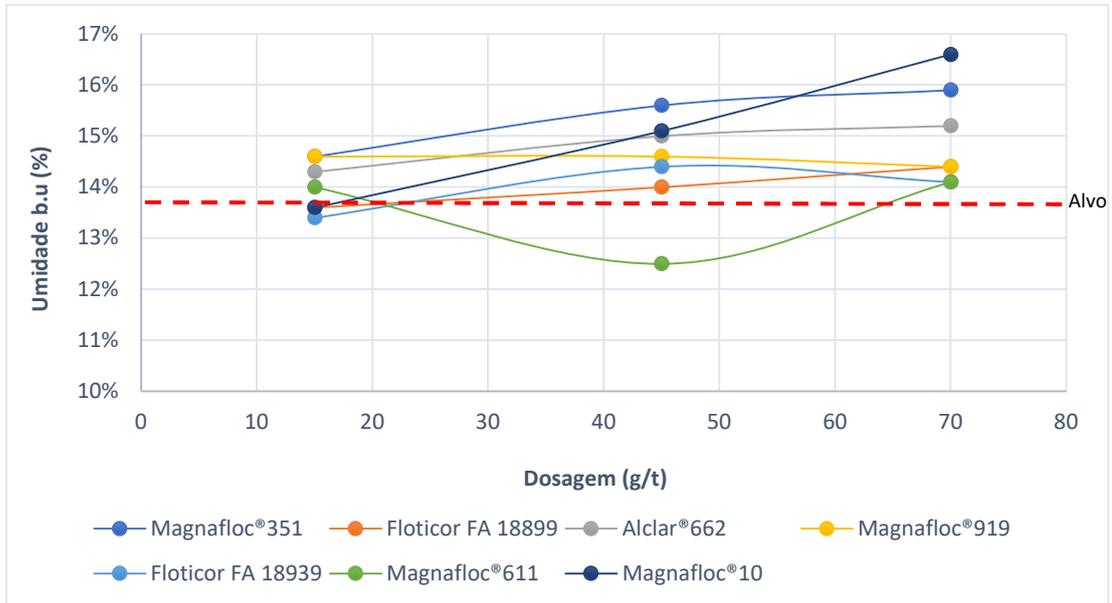
Para avaliar os tipos de reagentes, tipos de meio filtrante e a utilização da água de processo foi mantido o tempo de secagem igual a 180 segundos (3 minutos) que proporcionou uma TUF de 267 kg/h/m².

4.2.1 Seleção dos reagentes

Após a seleção das variáveis que foram utilizadas como padrão, iniciou-se os testes com reagentes para encontrar aqueles que possuem melhor performance e atendem aos requisitos para escala industrial. O alvo para umidade (base úmida) escolhido, foi o valor de 13,7% encontrado no teste de compactação para umidade ótima (Figura 33). A Figura 34 mostra os resultados alcançados, de umidade média para cada reagente testado, com suas respectivas dosagens, enquanto a Figura 35 apresenta a média da TUF. Em todos os testes foram feitas

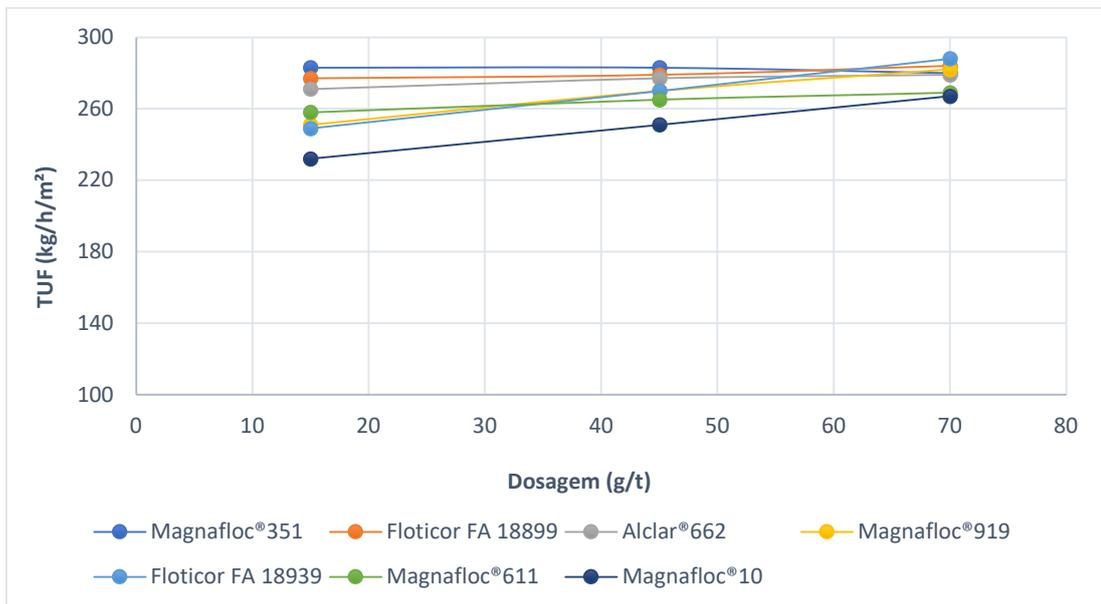
réplicas, sendo os valores de umidade e TUF, apresentados nas figuras 34 e 35, referentes a média dos testes.

Figura 34 – Resultados de umidade média com utilização dos reagentes



Fonte: Próprio autor

Figura 35 – Resultados de TUF em função da dosagem de reagente



Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos com os testes exploratórios, mostraram que a torta condicionada com o Magnafloc®611, fornecido pela BASF®, obteve 13,7% de umidade, porém com uma das menores médias de TUF (264 kg/h/m²) dentre os reagentes testados (Figura 35). O Flotitor FA

18899, fornecido pela Clariant[®], obteve uma média de TUF de 280 kg/h/m² e uma umidade de torta igual a 14,0%.

Graficamente, os resultados para TUF ficaram muito próximos e para melhor observação, uma análise de variância (Tabela 14) foi realizada para analisar se, estatisticamente, a média dos resultados são iguais, como parece ser pelo gráfico.

Tabela 14 – ANOVA dos resultados de TUF em função da dosagem de reagente

| Análise de Variância | | | | | | | |
|----------------------|----|--------|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Fonte | GL | SQ Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
| Reagente | 7 | 2156 | 51,96% | 2156 | 308 | 2,16 | 0,104 |
| Erro | 14 | 1993 | 48,04% | 1993 | 142,4 | | |
| Total | 21 | 4149 | 100,00% | | | | |

Fonte: Próprio autor

Com o valor-p de 0,104, temos que a hipótese alternativa (nem todas as médias são iguais) foi rejeitada, nos indicando que não houve indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula (todas as médias são iguais), confirmando, estatisticamente, que os resultados obtidos, para TUF, são realmente tão parecidos como o gráfico nos mostra.

Uma análise estatística, utilizando o Minitab, foi feita para confirmar quais seriam os dois melhores reagentes, buscando uma maior TUF e uma menor umidade visto que graficamente e pela análise de variância, os valores estariam muito próximos. A Tabela 15 mostra os resultados encontrados após a otimização.

Tabela 15 – Otimização de resposta para análise de regressão dos reagentes

| Solução | Dosagem (g/t) | Especificação | TUF (t/h/m ²) Ajuste | Umidade % (b.u) Ajuste | Desejabilidade Composta |
|---------|---------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 41,7 | Flotisor FA 18899 | 0,28 | 13,95 | 0,73 |
| 2 | 15,0 | Flotisor FA 18899 | 0,27 | 13,48 | 0,72 |
| 3 | 70,0 | Magnafloc [®] 611 | 0,27 | 13,93 | 0,70 |
| 4 | 70,0 | Flotisor FA 18939 | 0,28 | 14,49 | 0,66 |

Fonte: Próprio autor

Observa-se que os reagentes Flotisor FA 18899 e o Magnafloc[®]611 foram os dois melhores reagentes, apontados tanto nos testes quanto estatisticamente, para continuidade dos estudos. Os resultados são analisados através da desejabilidade composta, que avalia em que medida uma combinação de variáveis pode satisfazer as metas definidas para as respostas. Neste

caso, a dosagem e o reagente foram as 2 variáveis utilizadas para satisfação das metas (maximização da TUF e redução da umidade).

Podemos notar também que o Flotisor FA 18899 apresenta duas soluções com menores dosagens, antes de conseguirmos a terceira solução com o Magnafloc® 611.

Para uma análise comparativa dos resultados alcançados, pelos testes com os reagentes, testes sem reagentes foram realizados. A Tabela 16 mostra as variáveis utilizadas e os resultados de umidade e TUF dos testes executados.

Tabela 16 – Resultados dos testes sem a aplicação de reagentes

| Variáveis | | Teste 01 | Teste 02 |
|-----------------|---------------------------------|---------------|---------------|
| Vácuo (mmHg) | Formação | 480 | 480 |
| | Secagem | 480 | 480 |
| Tempo (s) | Formação | 37 | 35 |
| | Secagem | 180 | 180 |
| | Ciclo | 217 | 215 |
| | % Sólidos | 55% | 55% |
| Polpa | Densidade (g/cm ³) | 1,57 | 1,57 |
| Filtrado | Volume (mL) | 53 | 53 |
| | Água | Processo | Processo |
| | Espessura (mm) | 11,3 | 11,7 |
| | TUF (kg/h/m²) | 270 | 265 |
| | Rachaduras | Não | Não |
| Torta | Peso úmido (g) | 94,45 | 91,27 |
| | Peso seco (g) | 81,25 | 79,02 |
| | Umidade (%) b.u | 14,00% | 13,40% |
| | Umidade (%) b.s | 16,20% | 15,50% |

Fonte: Próprio autor

Os testes sem a adição de reagentes mostraram uma média de 13,7% nos resultados de umidade (base úmida), com um desvio padrão de $\pm 0,424\%$, e uma TUF média de 267,5 kg/h/m², com um desvio padrão de $\pm 3,53$ kg/h/m².

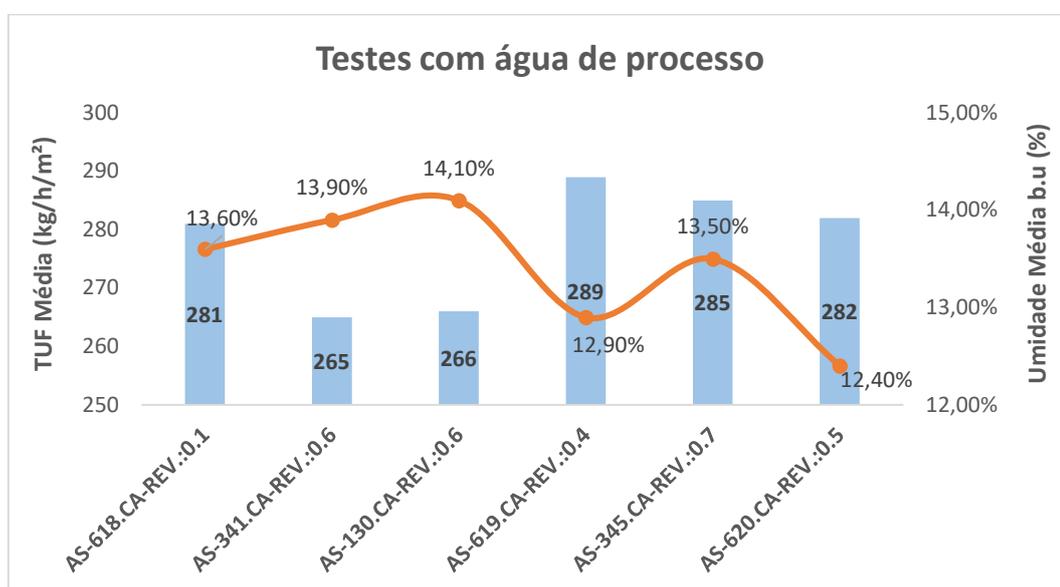
Comparando os resultados sem adição de reagente, com o melhor reagente, encontrado através da regressão, como mostrado na Tabela 15, o aumento de produtividade é de aproximadamente 4,7%, com um aumento de umidade (base úmida) em 0,25%, quando comparada com a umidade dos testes sem adição de reagentes.

Os resultados de aumento em produtividade, após a utilização dos reagentes, estão alinhados com os estudos realizados por Pereira (1999), quando o autor conclui que os auxiliares de filtragem utilizados aumentam a taxa unitária de filtragem devido à redução da resistência específica da torta, agindo sobre a cinética do desaguamento.

4.2.2 Seleção dos tecidos

Logo após finalizar os testes com os reagentes, iniciou-se os testes com os tecidos, disponibilizados pela Air Slaid[®], a fim de encontrar os 2 tecidos que serão avaliados para otimização dos resultados. A Figura 36 mostra os resultados de TUF e umidade média encontrada para cada tipo de tecido.

Figura 36 – Resultados para testes com os tecidos



Fonte: Próprio autor

Os tecidos testados não demonstraram uma variação muito grande nos resultados de umidade, sendo o desvio padrão encontrado de $\pm 0,639$, com a umidade (base úmida) máxima atingida de 14,10%, pelo tecido de polipropileno com permeabilidade de 3,4 a 8,5 m³/h. Não é possível afirmar que os tecidos com permeabilidade mais alta ou mais baixa, possam favorecer a redução ou aumento da umidade, uma vez que o AS – 620.CA – REV.:05 e o AS – 130.CA –

REV.:06, possuem a mesma permeabilidade e atingiram o menor e o maior valor de umidade dos testes, respectivamente.

Os resultados mostram que os tecidos AS – 619.CA – REV.:04 e AS – 620.CA – REV.:05 tiveram uma boa performance, atingindo uma umidade ótima (base úmida) abaixo do esperado industrialmente (13,7%) e taxa unitária de filtragem acima de 280 kg/h/m². O material dos 2 tecidos é de 100% poliamida e entre os tecidos de poliamida testados, estes possuem as menores gramaturas, sendo 348 e 460 g/m², respectivamente. O AS – 619.CA – REV.:04 possui uma permeabilidade de 84,9 a 135,9 m³/h e a espessura dos fios entre 0,45 e 0,55 mm, já o AS – 620.CA – REV.:05 possui uma permeabilidade de 3,4 a 8,5 m³/h e a espessura dos fios entre 0,60 e 0,65 mm.

É importante ressaltar que, atualmente, os tecidos de poliamida têm sido mais utilizados na indústria devido as melhores performances em comparação com os tecidos de polipropileno. As gramaturas, são mais observadas quando buscamos um aumento de vida útil do tecido, porém a permeabilidade e a espessura dos fios são comumente verificadas para cada teste industrial, já que influenciam diretamente na umidade final e espessura da torta. Dependendo da granulometria do minério, uma alta permeabilidade pode aumentar a umidade final, em decorrência da obstrução dos poros, o que podemos confirmar com os resultados obtidos quando utilizamos o tecido AS-618.CA-REV.:0.1, também fabricado com 100% de poliamida e com a maior permeabilidade (135,9 a 203,9 m³/h) entre os tecidos testados.

Uma análise estatística, utilizando o *Minitab Statistical Software*[®], foi feita para confirmar quais seriam os dois melhores tecidos, buscando uma maior TUF e menor umidade. A Tabela 17 mostra os resultados encontrados estatisticamente, ao nível de significância de 95%.

Tabela 17 – Otimização de resposta para análise de regressão dos tecidos

| Solução | Tecido | TUF (t/h/m²) Ajuste | Umidade % (b.u) Ajuste | Desejabilidade Composta |
|----------------|-------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1 | AS-619.CA-VER.:04 | 0,29 | 13,95 | 0,80 |
| 2 | AS-620.CA-VER.:05 | 0,28 | 12,45 | 0,78 |
| 3 | AS-345.CA-VER.:07 | 0,29 | 13,50 | 0,61 |
| 4 | AS-618.CA-VER.:01 | 0,28 | 13,60 | 0,52 |

Fonte: Próprio autor

Sendo assim, de acordo com a desejabilidade composta, os dois tecidos que apresentaram as melhores soluções, ou seja, as maiores desejabilidades (AS – 619.CA – REV.:04 e AS – 620.CA – REV.:05), foram avaliados em novos testes junto com os reagentes, para buscarmos a otimização do processo de filtração.

4.2.3 Avaliação do tipo de água

Como os testes foram realizados com água de torneira (pH em torno de 9 após o condicionamento) e água de processo (pH em torno de 11 após o condicionamento), foi necessária uma avaliação, para entender a influência que os 2 tipos de água podem exercer nos resultados dos testes.

Ao analisar a umidade e a taxa unitária de filtração, podemos observar de acordo com a Tabela 18 que os resultados obtidos não foram significativamente influenciados pelo tipo de água utilizada.

Tabela 18 – Comparativo entre água comum e água de processo

| Reagente | Água | Espessura (mm) | pH | Umidade (%) | TUF |
|----------------------------|----------|-------------------|----|-------------|------------------------|
| | | | | b.u | (kg/h/m ²) |
| Sem reagente | Comum | 11,5 | 9 | 14,10% | 266,50 |
| Sem reagente | Comum | 11,3 | 9 | 13,80% | 271,20 |
| Sem reagente | Processo | 11,3 | 11 | 14,00% | 269,60 |
| Sem reagente | Processo | 11,7 | 11 | 13,40% | 264,60 |
| Magnafloc [®] 351 | Comum | 12,1 | 9 | 14,40% | 281,63 |
| Magnafloc [®] 351 | Processo | 12,1 | 11 | 14,90% | 283,00 |
| Magnafloc [®] 351 | Processo | 13,3 | 11 | 14,30% | 282,92 |

Fonte: Próprio autor

Como os resultados de umidade foram próximos uns dos outros, uma análise de ANOVA nos indicou se houve alguma diferença estatística entre eles. A Tabela 19 mostra o resultado da análise de variância entre as médias.

Tabela 19 – Análise de variância para a umidade

| Fonte | GL | SQ Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------|----|----------|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Fator | 1 | 0 | 0,32% | 0 | 0 | 0,02 | 0,905 |
| Erro | 5 | 0,000135 | 99,68% | 0,000135 | 0,000027 | | |
| Total | 6 | 0,000135 | 100,00% | | | | |

Fonte: Próprio autor

Os resultados da análise de variância mostraram um valor-p de 0,905 e com este resultado temos que a hipótese alternativa (nem todas as médias são iguais) foi rejeitada, nos indicando que não houve indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula (todas as médias são iguais), confirmando, estatisticamente, que os resultados obtidos, para umidade, não foram significativamente influenciados pelo tipo de água. Os testes com Magnafloc[®]351, nos dois diferentes tipos de água (comum e processo), mostraram que não há alteração no desempenho da filtração de rejeito para variação do pH entre pH 9 e 11.

Os resultados de TUF também foram muito próximos e, então, foram avaliados através de uma análise de ANOVA. A Tabela 20 mostra os resultados obtidos pela análise de variância entre as médias.

Tabela 20 – Análise de variância para TUF

| Fonte | GL | SQ Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------|----|---------|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Fator | 1 | 6,32 | 1,62% | 6,32 | 6,32 | 0,08 | 0,786 |
| Erro | 5 | 383,973 | 98,38% | 383,973 | 76,795 | | |
| Total | 6 | 390,293 | 100,00% | | | | |

Fonte: Próprio autor

Os resultados encontrados mostram um valor-p de 0,786 e com isso rejeitou-se a hipótese alternativa, que sugere que nem todas as médias são iguais e que não houve indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula, que sugere que todas as médias são iguais, confirmando, estatisticamente, que os resultados obtidos, para a TUF, não foram significativamente influenciados pelo tipo de água utilizada.

4.2.4 Tempo de condicionamento

O tempo de condicionamento do rejeito com o reagente Magnafloc[®]611 foi analisado através dos testes de filtração, observando-se os resultados para umidade e TUF. A Tabela 21 mostra os resultados alcançados,

Os ensaios 3 e 4 mostram que para um tempo de condicionamento de 2 minutos (120 segundos), tem-se uma maior produtividade e a umidade (base úmida) de acordo com o esperado (13,7%), sendo assim o tempo de condicionamento para os testes que foram executados, seguindo o planejamento fatorial, foi de 2 minutos.

Tabela 21 – Testes de avaliação do tempo de condicionamento

| Ensaio | Condicionamento (s) | TUF (kg/h/m²) | Umidade (%) b.u |
|---------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 1 | 60 | 261,25 | 11,52% |
| 2 | 60 | 268,71 | 13,55% |
| 3 | 120 | 288,90 | 12,71% |
| 4 | 120 | 291,04 | 13,88% |
| 5 | 300 | 278,80 | 14,00% |
| 6 | 300 | 273,05 | 14,80% |
| 7 | 480 | 273,67 | 13,31% |
| 8 | 480 | 276,57 | 13,35% |

Fonte: Próprio autor

4.2.5 Planejamento Fatorial

O planejamento foi realizado de acordo com os resultados obtidos durante todo o estudo para escolha dos reagentes e tecidos. Sendo que 4 fatores foram analisados para a avaliação da performance: tipo de tecido, tipo de reagente, porcentagem de sólidos da polpa e dosagem de reagentes. A Tabela 22 mostra o resumo dos experimentos e Tabela 23 mostra os resultados encontrados no planejamento fatorial, considerando os valores codificados para as variáveis independentes. Os testes foram colocados em ordem de 1 a 40 e cada linha apresenta as variáveis utilizadas e os resultados obtidos de cada teste. Lembrando que os níveis analisados para o reagente (fator A) foram: Flotisor FA 18899 (-1) e Magnafloc[®] 611 (+1); para o tecido (fator B): AS-620.CA (-1) e AS-619.CA (+1); para a porcentagem de sólidos (fator C): 40% (-1), 50% (0) e 60% (+1) e, por fim, para a dosagem dos reagentes (fator D): 15 g/t (-1), 45 g/t (0) e 75 g/t (+1).

Tabela 22 – Resumo do planejamento fatorial

| Resumo do Experimento | | | |
|------------------------------|----|-------------------------|-------|
| Fatores | 4 | Experimento base | 4; 16 |
| Ensaio | 40 | Réplicas | 2 |
| Blocos | 1 | Pontos Centrais (total) | 8 |

Fonte: Próprio autor

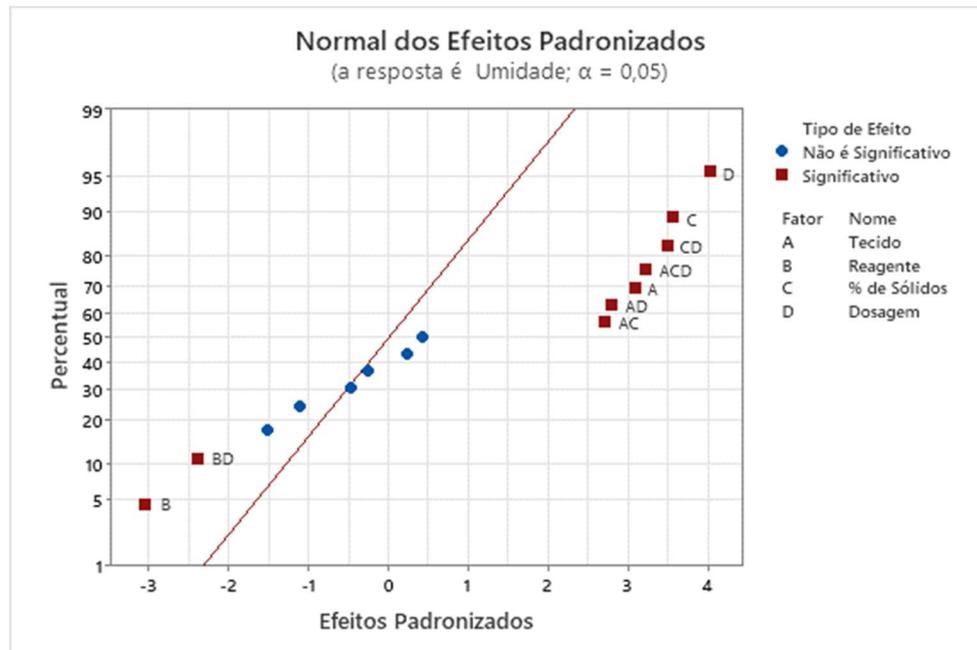
Tabela 23 – Resultados do planejamento fatorial

| Ordem | Tecido (A) | Reagente (B) | % de Sólidos (C) | Dosagem (D) | Turbidez (NTU) | Volume filtrado (ml) | Espessura (mm) | Umidade (%) | TUF (t/h/m ²) |
|-------|------------|--------------|------------------|-------------|----------------|----------------------|----------------|-------------|---------------------------|
| 1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 2 | 70 | 11,2 | 13,8 | 0,160 |
| 2 | +1 | +1 | 0 | 0 | 302 | 58 | 11,7 | 13,9 | 0,240 |
| 3 | +1 | +1 | -1 | +1 | 272 | 71 | 10,0 | 13,7 | 0,181 |
| 4 | +1 | +1 | +1 | -1 | 410 | 46 | 15,3 | 14,1 | 0,307 |
| 5 | -1 | +1 | +1 | -1 | 109 | 44 | 15,6 | 14,6 | 0,314 |
| 6 | -1 | +1 | +1 | +1 | 111 | 38 | 17,0 | 14,7 | 0,263 |
| 7 | -1 | -1 | +1 | -1 | 25 | 46 | 14,8 | 14,5 | 0,295 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | -1 | 257 | 44 | 14,2 | 17,1 | 0,286 |
| 9 | +1 | -1 | +1 | +1 | 293 | 24 | 14,0 | 26,3 | 0,289 |
| 10 | +1 | -1 | +1 | +1 | 250 | 19 | 17,0 | 28,6 | 0,256 |
| 11 | -1 | -1 | 0 | 0 | 45 | 60 | 13,9 | 16,2 | 0,24 |
| 12 | -1 | -1 | 0 | 0 | 45 | 41 | 13,1 | 15,3 | 0,245 |
| 13 | +1 | +1 | 0 | 0 | 490 | 64 | 12,3 | 14,9 | 0,226 |
| 14 | -1 | -1 | -1 | -1 | 23 | 68 | 8,3 | 16,3 | 0,133 |
| 15 | -1 | +1 | +1 | +1 | 19 | 42 | 14,8 | 13,0 | 0,263 |
| 16 | +1 | +1 | -1 | -1 | 230 | 70 | 7,7 | 13,9 | 0,153 |
| 17 | +1 | +1 | -1 | +1 | 295 | 77 | 9,7 | 13,9 | 0,176 |
| 18 | +1 | -1 | -1 | +1 | 341 | 79 | 8,7 | 16,1 | 0,158 |
| 19 | -1 | -1 | +1 | +1 | 26 | 24 | 16,1 | 15,7 | 0,233 |
| 20 | -1 | -1 | -1 | +1 | 40 | 70 | 11,0 | 15,3 | 0,171 |
| 21 | +1 | +1 | +1 | +1 | 436 | 34 | 15,3 | 16,4 | 0,263 |
| 22 | -1 | -1 | +1 | -1 | 25 | 44 | 14,2 | 14,5 | 0,291 |
| 23 | -1 | -1 | -1 | -1 | 5 | 70 | 7,5 | 13,4 | 0,136 |
| 24 | -1 | -1 | -1 | +1 | 92 | 58 | 11,3 | 18,0 | 0,169 |
| 25 | -1 | +1 | -1 | +1 | 12 | 46 | 8,8 | 12,7 | 0,169 |
| 26 | +1 | -1 | -1 | -1 | 360 | 71 | 9,0 | 14,0 | 0,167 |
| 27 | +1 | -1 | +1 | -1 | 568 | 46 | 14,4 | 13,6 | 0,307 |
| 28 | -1 | +1 | 0 | 0 | 43 | 60 | 13,4 | 13,9 | 0,223 |
| 29 | +1 | -1 | -1 | -1 | 360 | 68 | 8,2 | 18,0 | 0,143 |
| 30 | -1 | -1 | +1 | +1 | 11 | 64 | 15,8 | 18,8 | 0,266 |
| 31 | +1 | -1 | -1 | +1 | 341 | 68 | 9,1 | 16,4 | 0,144 |
| 32 | +1 | +1 | +1 | +1 | 261 | 20 | 12,5 | 26,4 | 0,227 |
| 33 | -1 | +1 | -1 | +1 | 40 | 72 | 11,2 | 13,0 | 0,17 |
| 34 | +1 | +1 | -1 | -1 | 480 | 78 | 13,0 | 13,9 | 0,151 |
| 35 | +1 | -1 | 0 | 0 | 456 | 58 | 14,9 | 15,6 | 0,254 |
| 36 | +1 | -1 | +1 | -1 | 439 | 46 | 14,4 | 13,7 | 0,305 |
| 37 | -1 | +1 | +1 | -1 | 136 | 46 | 15,4 | 14,3 | 0,302 |
| 38 | -1 | +1 | -1 | -1 | 2 | 70 | 9,7 | 12,7 | 0,146 |
| 39 | +1 | -1 | 0 | 0 | 456 | 70 | 11,6 | 14,2 | 0,234 |
| 40 | -1 | +1 | 0 | 0 | 59 | 60 | 13,7 | 14,1 | 0,230 |

Fonte: Próprio autor

Após os testes realizados e os resultados inseridos no *Minitab Statistical Software*[®], alguns testes estatísticos foram realizados para análise dos impactos de cada variável nos resultados. Uma regressão fatorial do impacto das variáveis na umidade apresentou o resultado mostrado na Figura 37, para um nível de significância de 5%.

Figura 37 – Efeitos das interações para umidade



Fonte: Próprio autor

Os efeitos principais ou de interação que se apresentaram a direita da reta normal, possuem influência positiva sobre a resposta de umidade quando ocorre o aumento do seu nível, ou seja, quanto mais a direita e mais alto, maior é a influência na resposta. Já para os efeitos que estão à esquerda da reta, apresentam efeito negativo sobre a resposta, quando se passa o fator do nível baixo para o mais alto.

Todas as variáveis estudadas e algumas interações de segunda e terceira ordem entre elas, possuem interferência, estatística, na umidade final do produto. Percebe-se que o reagente possui impacto negativo quando tem sua dosagem variada (interação BD), o que indica que a umidade final pode, também, depender da interação das partículas após a dosagem do auxiliar de filtração.

Ainda observando o efeito do auxiliar de filtração podemos ver que com a utilização do Magnafloc® 611 houve uma redução na umidade da torta, quando comparado com o Flotacor FA 18899. Ambos são reagentes aniônicos, espera-se que a carga das partículas de rejeito no pH alcalino seja negativa, uma vez que ele é composto majoritariamente por quartzo (Tabela 9). Sendo assim, de acordo com Baltar (2018) os polímeros sintéticos aniônicos adsorvem na superfície das partículas predominantemente por ligações de hidrogênio.

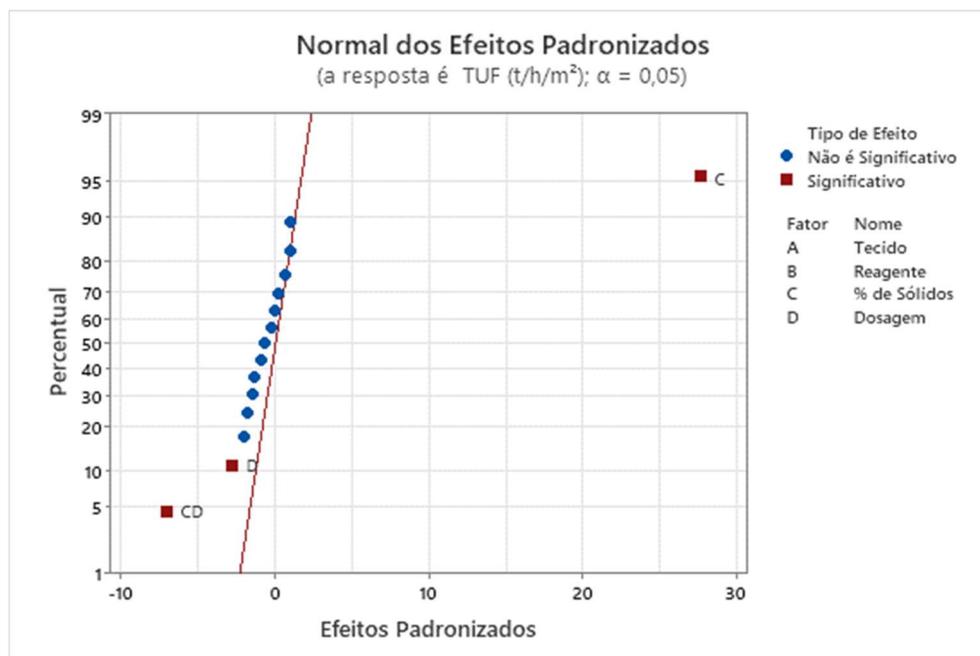
A dosagem de reagentes também possui efeito positivo (fator D), o que pode aumentar a umidade da torta, visto que Baltar (2018) e Valadão (1996), afirmam que quando a colisão de duas ou mais partículas ocorrem tem-se a formação dos flocos, que retêm mais água (floculação por ponte de ligação) e, conseqüentemente, aumenta a umidade.

Ao aumentar a quantidade de minério para o mesmo volume de polpa (interação C), vê-se que houve uma maior umidade, o que gera uma maior resistência para passagem do filtrado. Industrialmente, observa-se que a porcentagem de sólidos pode ser crucial para o tempo de enchimento dos filtros prensa e com isso um tempo de ciclo maior ou menor do que o projetado, além de contribuir para o aumento ou redução de vida útil do tecido que está sendo utilizado.

Quando avaliamos o impacto que o tecido proporcionou, observamos que ao utilizar o tecido AS-620.CA a umidade alcançada é menor do que a umidade alcançada com o tecido AS-619-CA. Esta afirmação pode ser feita quando se observa a interação A do lado direito da reta, indicando que quando houve a mudança de -1 (AS-620.CA) para +1 (AS-619.CA) houve um efeito positivo nos resultados.

Para analisarmos os efeitos das interações de acordo com a taxa unitária de filtração (TUF), uma regressão também foi realizada, como mostra a Figura 38.

Figura 38 – Efeitos das interações para taxa unitária de filtragem

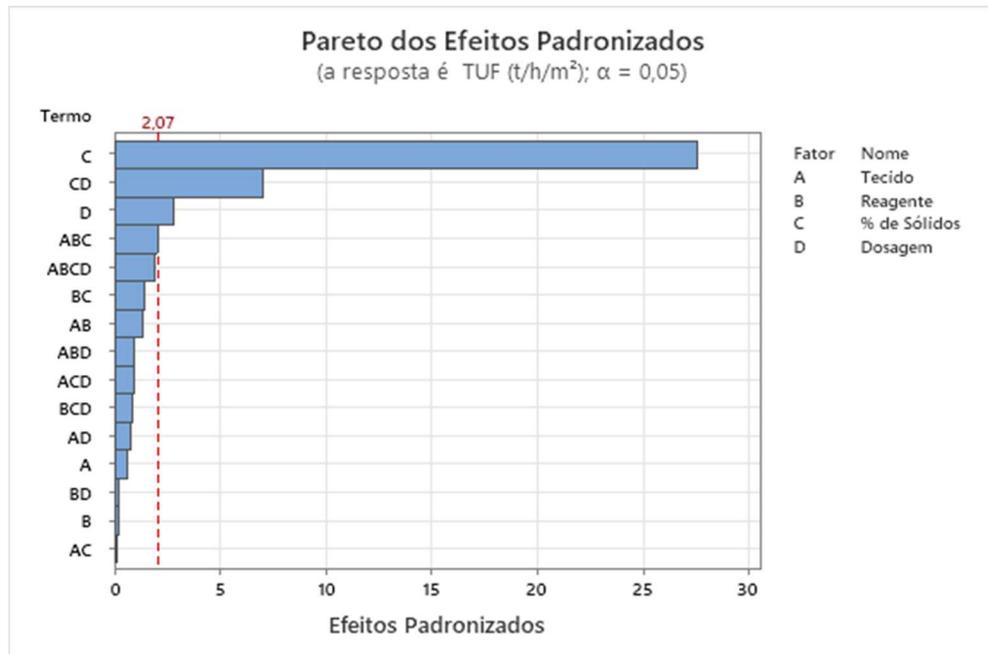


Fonte: Próprio autor

As variáveis/fatores que mais influenciaram para o aumento da TUF foram a porcentagem de sólidos e a dosagem de reagentes. Como a porcentagem de sólidos, industrialmente, é uma variável bastante sensível para a performance dos filtros prensa, estatisticamente ela também foi apontada como um efeito principal, além de estar na interação de segunda ordem, juntamente com a dosagem dos reagentes. Com isso, o teste nos mostra uma tendência e uma confirmação para a porcentagem de sólidos. Como o efeito foi positivo, o aumento da porcentagem de sólidos de 40 para 60% provocou um aumento na TUF e o aumento na dosagem de reagente de 15 para 75g/t causou uma redução na produtividade da filtragem.

Na Figura 39 podemos observar o gráfico de Pareto, ao nível de significância de 5%, as variáveis % de sólidos e dosagem de flocculante e a interação entre elas, cujas barras ultrapassam a linha pontilhada são significativas para TUF, para os níveis estudados. Enquanto as barras com valores menores do que 2,07 possuem efeitos não significativos. A próxima interação que seria considerada como impactante na TUF, seria uma interação de terceira ordem, onde o tecido, o reagente e a porcentagem de sólidos, juntos, poderiam influenciar na variação da taxa unitária de filtragem. O valor de efeito padronizado encontrado, para esta interação de terceira ordem, foi de aproximadamente 2,05 e por isso ela não foi considerada, estatisticamente, significativa para efeitos de interação já que o valor esperado foi de 2,07.

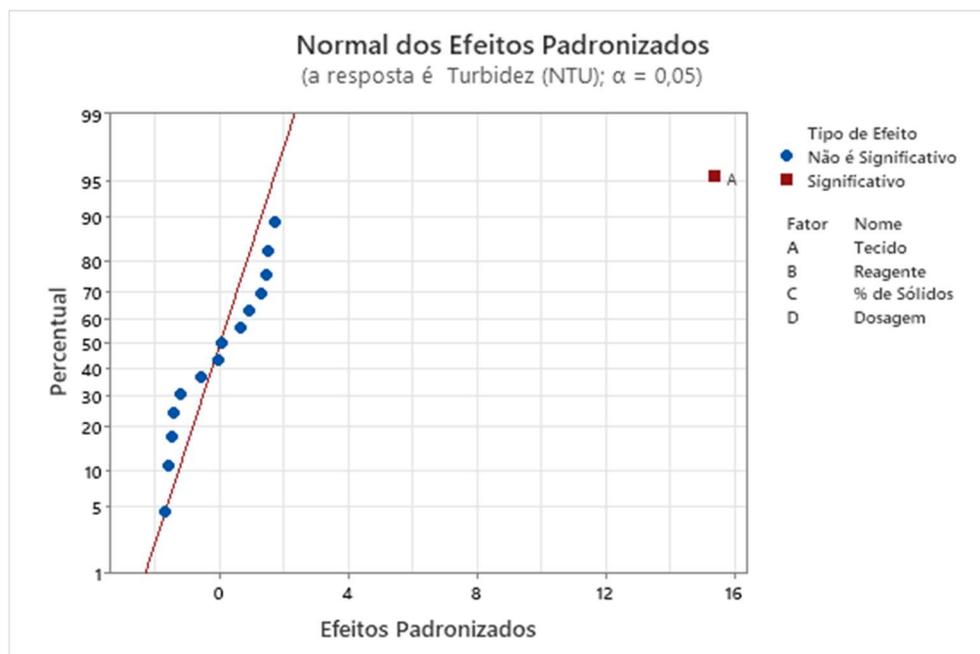
Figura 39 – Efeitos padronizados das interações em forma de Pareto



Analisando a produtividade dos filtros prensa e a umidade da torta a ser gerada para disposição do rejeito, também se faz necessário uma análise da turbidez do filtrado, que para este caso é uma água de recirculação do processo e com devida necessidade de qualidade.

A Figura 40 mostra a variável que impacta diretamente na turbidez encontrada durante os testes de filtragem.

Figura 40 – Efeitos das interações para a turbidez



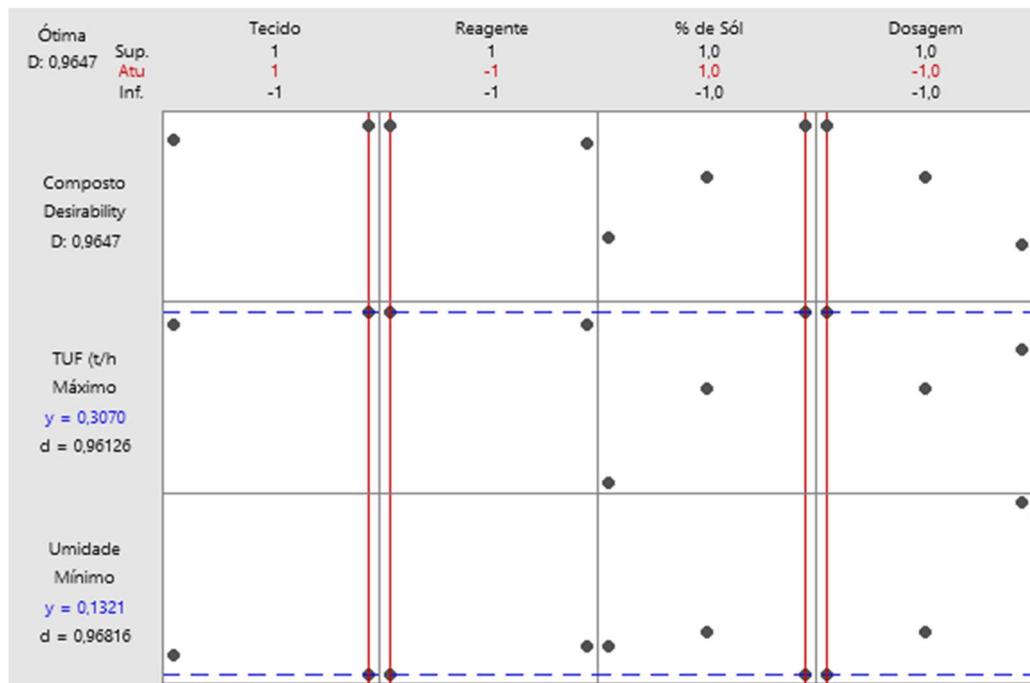
Fonte: Próprio autor

Para a turbidez, apenas o tecido possui um impacto significativo no resultado alcançado. Na prática quanto maior a permeabilidade do tecido, maior será a tendência de o produto filtrado ter uma turbidez mais alta. Vimos anteriormente que a permeabilidade não possui uma correlação com a umidade da torta, já que os tecidos AS – 619.CA – VER.:04 e AS – 620.CA – VER.:05 atingiram as menores umidade e possuem permeabilidade distintas (135,9 e 8,5 m³/h respectivamente), mas ela tem uma correlação direta com a turbidez. Como mostra a figura, o efeito A foi positivo, ou seja, quando passou do nível menor – tecido 620.CA (menor permeabilidade) – para o nível maior – tecido 619.CA (maior permeabilidade) – aumentou a turbidez, piorando a qualidade o filtrado.

A turbidez não foi utilizada para a avaliação da otimização devido à Mineração Serra Grande possuir, antes e durante o tempo em que o estudo foi realizado, uma estação de tratamento de efluentes (ETE) para o filtrado proveniente dos filtros prensa e este não ser um ponto de estudo para melhor deslocamento e produtividade dos filtros, neste momento. Apesar de não ter sido estudada, o aumento da turbidez no filtrado é um indicativo, industrial, de problemas na filtragem, podendo ser rasgos devido à vida útil dos tecidos, variações de processos e até mesmo dimensionamento dos tecidos com alta permeabilidade.

Com os resultados da análise estatística e os dados dos testes, realizou-se uma otimização de resposta utilizando o *Minitab Statistical Software*[®], buscando o indicativo da melhor configuração, para o aumento da TUF e a redução da umidade na torta. Os resultados esperados com o máximo da TUF e o mínimo da umidade são, respectivamente, 0,3070 (t/h/m²) e 13,21%, como apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Otimização da resposta: TUF (t/h/m²) e Umidade



Fonte: Próprio autor

Para atingir este objetivo, foi necessário configurar as variáveis estudadas anteriormente, utilizando os dados estatísticos de acordo com o *Minitab Statistical Software*[®], e que apresentaram correlação com os resultados. A Tabela 24 mostra as variáveis previstas para condição de melhor resultados para filtração do rejeito de ouro.

Tabela 24 – Variáveis para predição da otimização de resposta

| Variável | Configuração | Correspondente |
|--------------|--------------|-----------------------|
| Tecido | + 1 | AS – 619.CA – REV.:04 |
| Reagente | -1 | Flotisor FA 18899 |
| % de Sólidos | + 1 | 60% |
| Dosagem | -1 | 15 g/t |

Fonte: Próprio autor

4.3 Teste com filtro de pressão

A solução encontrada estatisticamente (Figura 41), maximizando a TUF e minimizando a umidade, foi executada em um filtro de pressão para melhor observação e análise. Foram realizados 2 testes para análise da variação dos resultados, como mostrado na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados alcançados nos testes com o filtro de pressão

| Variáveis | | Teste 01 | Teste 02 |
|-----------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
| Pressão (mmHg) | Formação | 1.551,5 | 1.551,5 |
| | Secagem | 1.551 | 2.586 |
| Tempo (s) | | 180 | 180 |
| Auxiliar de Filtragem | Especificação | Flotisor FA 18899 | Flotisor FA 18899 |
| | Concentração (%) | 0,05 | 0,05 |
| | Dosagem (g/t) | 15 | 15 |
| | Tecido | AS-619.CA | AS-619.CA |
| Polpa | % de sólidos | 60 | 60 |
| Filtrado | Turbidez (NTU) | 142 | 131 |
| | Tipo de água | Processo | Processo |
| | Umidade % (b.s) | 20,8 | 17,8 |
| Torta | Umidade % (b.u) | 17,2 | 15,1 |
| | TUF (kg/h/m ²) | 266,20 | 266,69 |
| | Espessura (mm) | 7,7 | 7,3 |

Fonte: Próprio autor

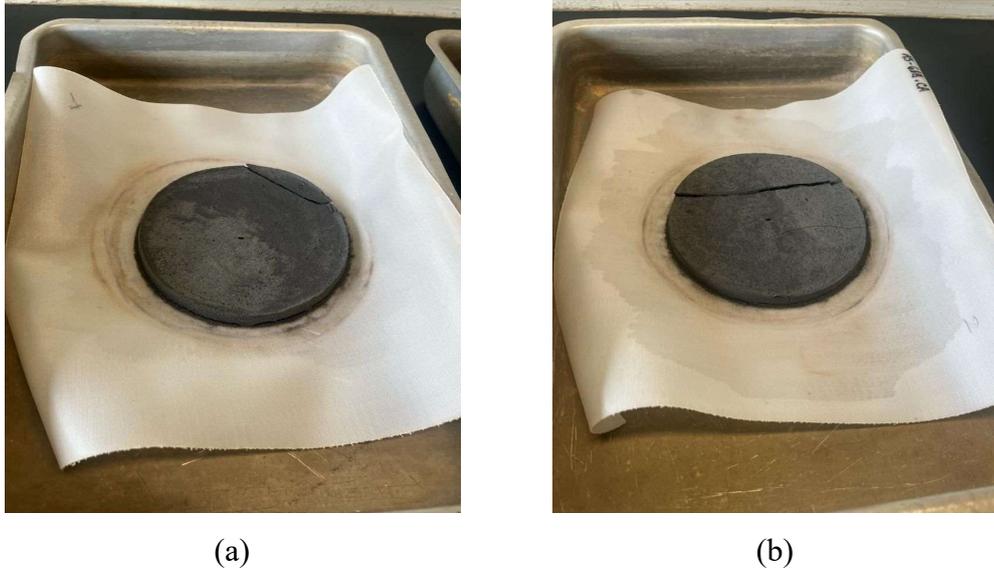
Analisando os resultados, é possível notar que o teste 02, com um aumento de pressão na etapa de secagem, obteve uma melhor umidade (base úmida), sendo próxima da umidade esperada na indústria (13,7%) e uma TUF ligeiramente maior do que o teste 01, alcançando 266,69 kg/h/m².

Como os testes foram controlados, a influência da granulometria não foi diretamente considerada para comparação nos resultados finais, mas esperava-se que o tempo de ciclo fosse maior do que o projetado. Kozeny e Carman (1927), citaram que a redução do diâmetro das

partículas tem uma forte influência negativa na permeabilidade, o que confirmaria o aumento no tempo de ciclo em busca de uma redução na umidade final.

As tortas produzidas durante os dois testes, são mostradas na Figura 42.

Figura 42: (a) Torta do teste 01, (b) torta do teste 02



Fonte: Próprio autor

Os resultados alcançados, nos testes com filtro de pressão, mostraram que a utilização do auxiliar de filtração, combinado com o tecido, pode contribuir para uma boa performance do circuito de filtração.

A diferença entre os dois mecanismos utilizados para os ensaios laboratoriais é que, como citado por França *et al.* (2007), o *Leaf Test* utiliza a pressão a vácuo, que ocorre através da aplicação de uma pressão menor que a pressão atmosférica e utiliza uma bomba a vácuo para realização, já para o filtro de pressão, temos um mecanismo diferente, onde a pressão é exercida sob o líquido, impulsionando o fluido através de um elemento filtrante, no entanto, esta aplicação fornece uma diferença de pressão maior do que a aplicada pelo filtro a vácuo.

Os dois mecanismos de filtração utilizados para realização dos testes, tanto o *Leaf test* quanto o filtro de pressão mostraram resultados semelhantes para umidade, indicando uma boa continuidade dos resultados à medida em que se avança para os níveis industriais.

5 CONCLUSÃO

A caracterização do rejeito mostrou uma grande quantidade de finos na amostra, tendo um d_{90} de 79,65 μm e um $d_{\text{médio}}$ de 37,41 μm , além de possuir quartzo, alumina e hematita como os três minerais dominantes. Com a quantidade de quartzo presente na amostra, uma maior quantidade de testes ou com maiores pressões podem ser realizados para verificar o quanto o tecido pode suportar ou não a abrasividade deste mineral.

Quando avaliado a umidade ótima, utilizando o teste de compactação, vimos que a umidade esperada para os testes, a fim de atender, geotecnicamente, a disposição de rejeitos, foi de 13,7% (base úmida). Esta umidade foi alcançada durante os testes com reagentes e mantida como alvo para os testes com filtro de pressão, que atingiu um valor de 15,1% para os mesmos 180 segundos de tempo de secagem, utilizados nos testes de folha.

Ao avaliar o efeito do tempo de secagem, durante os testes exploratórios vimos que quanto maior o tempo, impactando no tempo de ciclo, menor foi a umidade, porém ocorreu uma perda significativa, de 35%, na taxa unitária de filtração, quando saímos de 180 para 300 segundos e de 50% quando o tempo de secagem passa para 420 segundos. O tempo de secagem definido para o estudo foi de 180 segundos.

Com os resultados encontrados sobre a influência do tipo de água utilizada, para os possíveis impactos na filtração, com a alteração do pH e características da água, vimos que não houve diferença estatística nas médias dos valores encontrados. Para o caso deste estudo, mesmo o pH variando de 9 a 11, utilizando o Magnafloc[®] 351 ou sem reagente, não houve alteração na média dos resultados para TUF ou para umidade.

O planejamento fatorial evidenciou que todas as variáveis independentes testadas, bem como algumas interações, tiveram influência significativa na umidade da torta, enquanto o percentual de sólidos e a dosagem de reagentes tiveram influência na TUF. O aumento da dosagem de reagente e da porcentagem de sólidos pode ocasionar o aumento da umidade. Já para a taxa unitária de filtração tivemos a porcentagem de sólidos como uma influência positiva e a dosagem de reagentes como influência negativa no modelo. Estes resultados mostram que para uma boa filtração, a porcentagem de sólidos pode ser essencial para o alcance da produtividade esperada.

A otimização realizada por meio do planejamento experimental apresentou como melhor, dentre as condições testadas, para filtração do rejeito de ouro, o reagente Flotisor FA 18899 na dosagem de 15g/t, usando o tecido de 100% de poliamida monofilamento (AS-619.CA) com a polpa preparada com percentual mássico de sólidos de 60%.

Os resultados encontrados nos testes de folha, mostraram que é possível um aumento de 4,5% em produtividade no circuito de filtragem de rejeito de ouro, quando consideramos a primeira solução estatística encontrada e mostrada na Tabela 15, bem como o alcance da umidade ótima para a disposição do rejeito à seco. Testes em filtros prensas, de escala piloto, podem ser realizados para comprovação dos resultados encontrados na filtragem à vácuo e na filtragem com filtro de pressão. Com estes resultados, aprimoramentos devem ser realizados para aplicação dos testes em escala industrial e alcance dos objetivos desejados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência do formato das partículas, na filtração, com a aplicação dos auxiliares de filtração;
- Buscar novos auxiliares de filtração;
- Estudar a influência dos auxiliares de filtração em testes com filtros de pressão.

7 REFERÊNCIAS

ALCIATORE, A.; ZIEVERS, J.F. History of filtration. v.14, p. 39-42, 2002.

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de Rejeito Filtrado: A Expansão de uma Alternativa para Substituição de Barragens**. Ouro Preto, 2020.

ANTONY, J. Introduction to industrial experimentation, **Design of Experiments for Engineers and Scientists**, Butterworth-Heinemann, p. 1-5, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-075064709-0/50002-8>>.

ARAUJO JUNIOR, A. M. **Influência das variáveis de processo na filtragem cerâmica de polpas de minério de ferro**. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. dez. 2014.

BABAMOHAMMADI, S. DAVIES, W. G. SOLTANI, S. M. Probing into the interactions among operating variables in blue hydrogen production: A new approach via design of experiments (DoE), *Gas Science and Engineering*, v. 117, 2023.

BALTAR, C.A.M. Agregação na separação sólido-líquido. *In*: LUZ, A.B.; FRANÇA, S.C.A.; BRAGA, P.F.A. Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM, 6ª edição, 2018. p. 513-545.

BOWKER, L. N.; CHAMBERS, D. M. The risk, public liability, & economics of tailings storage facility failures. **Earthwork Act**, v. 24, p. 1–56, 2015.

BRODBECK, P. Flexible continuous manufacturing – based on S88 batch standards and object-oriented design. **Computer Aided Chemical Engineering**. Elsevier B.V., 2018. v. 41. p. 489–515.

CHEREMISINOFF, N. P. Industrial liquid filtration equipment. **Fibrous Filter Media**. Elsevier Inc., 2017. p. 27–50.

CONCHA, F. **Fluid Mechanics and Its Applications Solid-Liquid Separation in the Mining Industry**. v. 105, p. 281-336, 2014. Disponível em: <<http://www.springer.com/series/5980>>.

CROWSON, P. Some observations on copper yields and ore grades. **Resources Policy**, v. 37, n. 1, p. 59–72, mar. 2012.

DIAS, C.L.P.; SILVA, L.M.; PERES, A.E.C.; VALADÃO, G.E.S. Utilização de reagentes auxiliares na filtragem. *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 57(4): 229-234, 2004.

EDGAR, T. W.; MANZ, D. O. Chapter 9 - Hypothetico-deductive Research. **Research Methods for Cyber Security**. Syngress. Elsevier, 2017. p. 215–249.

EDRAKI, M.; BAUMGARTL, T.; MANLAPIG, E.; BRADSHAW, D.; FRANKS, D. M.; MORAN, C. J. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, n. 1, p. 411–420, 2014.

FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, R. G. Ensaio de filtragem em filtro de folha (Leaf Test). IN: SAMPAIO, J. A. (Ed.); FRANÇA, S. C. A. (Ed.); BRAGA, P. F. A. (Ed). **Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 411-422.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. *In*: LUZ, A.B.; FRANÇA, S.C.A.; BRAGA, P.F.A. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 6ª edição, 2018. p. 597-647.

FRÄNKLE, B.; MORSCH, P.; NIRSCHL, Hermann. Regeneration assessments of filter fabrics of filter presses in the mining sector. **Minerals Engineering**, v. 168, 1 jul. 2021.

FRANKS, D. M.; BOGER, D. V.; CÔTE, C. M.; MULLIGAN, D. R. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. **Resources Policy**, v. 36, n. 2, p. 114–122, jun. 2011.

GENTES, M. L.; WALDNER, C.; PAPP, Z.; SMITS, J. E.G. Effects of oil sands tailings compounds and harsh weather on mortality rates, growth and detoxification efforts in nestling tree swallows (*Tachycineta bicolor*). **Environmental Pollution**, v. 142, n. 1, p. 24–33, jul. 2006.

GOMES, R. B.; DE TOMI, G.; ASSIS, P. S. Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 5, n. 4, p. 339–344, 1 out. 2016.

GORBOUNOV, M., TAYLOR, J., PETROVIC, B. SOLTANI, S. M. To DoE or not to DoE? A Technical Review on & Roadmap for Optimisation of Carbonaceous Adsorbents and Adsorption Processes, *South African Journal of Chemical Engineering*, v. 41, p. 111-128, jul. 2022

GRABE. **Grabe Equipamentos Industriais - Filtro Prensa**. Disponível em: <<https://www.grabe.com.br/filtro-prensa.php>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

GUIMARÃES, N. C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a recuperação de água e a disposição empilhada. 2016. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

JIN, Junxun *et al.* The flotation of aluminosilicate polymorphic minerals with anionic and cationic collectors. **Minerals Engineering**, v. 99, p. 123–132, 1 dez. 2016.

JONES, B. E. H.; HAYNES, R. J. Bauxite processing residue: A critical review of its formation, properties, storage, and revegetation. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**. n.41, p. 271-315, jan. 2011.

JONES, H.; BOGER, D. V. Sustainability and waste management in the resource industries. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 30, p. 10057–10065, 1 ago. 2012.

KURITA, Y.; SUWA, S.; MURATA, Sadao. Filter presses: A review of developments in automatic filter presses. **Filtration and Separation**, v. 47, n. 3, p. 32–35, maio 2010.

LEE, B. Competition between kaolinite flocculation and stabilization in divalent cation solutions dosed with anionic polyacrylamides. **Water Research**, v. 46, n. 17, p. 5696–5706, 1 nov. 2012.

MAGDASSI, S; RODEL, B. Flocculation of montmorillonite dispersions based on surfactant-polymer interactions, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. v. 119, n.1, p. 51-56, dez. 1996.

MCLELLAN, B.C.; CORDER, G.D.; GIURCO, D.; GREEN S. Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations – Review and analysis of current approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 16, p. 1414–1425, 1 nov. 2009. Acesso em: 30 jun. 2023.

MORSCH, P.; ANLAUF, H.; NIRSCHL, H. The influence of filter cloth on cake discharge performances during backwashing into liquid phase. **Separation and Purification Technology**, v. 254, 1 jan. 2021.

NGUYEN, C. V.; NGUYEN, A. V.; DOI, A.; DINH, E.; NGUYEN, T. V.; EJTEMAEI, M.; OSBORNE, D. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation. **Separation and Purification Technology**, v. 259, 15 mar. 2021.

PARSAPOUR, G. A.; HOSSININASAB, M.; YAHYAEI, M.; BANISI, S. Effect of settling test procedure on sizing thickeners. **Separation and Purification Technology**, v. 122, p. 87–95, 2014.

PEARSE, M. J.; ALLEN, A. P. The use of flocculants and surfactants in the filtration of mineral slurries. *Filtr. Sep.*, v. 20, n. 1, 1983.

PERCY, K. E.; HANSEN, M. C.; DANN, T. Chapter 4 - Air Quality in the Athabasca Oil Sands Region 2011. **Developments in Environmental Science**. Elsevier, 2012. v. 11. p. 47–91.

PEREIRA, L.G. Aplicação de Aditivos Químicos à Filtragem de Polpas Mineraias. São Paulo: Universidade de São paulo – USP, SP, 1999. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral)

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. **Hydrometallurgy**, v. 108, n. 1–2, p. 33–45, jun. 2011.

REINERT, J.; SILVA, M. J.; DINIZ, F. C. P. Notas de aula do curso de engenharia civil: práticas de laboratório - Mecânica de solos I. Curvelo: CEFET-MG, 2015.

RENAULT, S.; ZWIAZEK, J.J.; FUNG, M.; TUTTLE, S. Germination, growth and gas exchange of selected boreal forest seedlings in soil containing oil sands tailings, *Environmental Pollution*, v. 107, n. 3, p. 357-365, 2000.

RIPPERGER, S.; GÖSELE, W.; ALT, C.; LOEWE, T. Filtration, 1. Fundamentals. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. John Wiley & Sons, Ltd, 2013. p. 1–38. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/14356007.b02_10.pub3>.

SILVERBLATT, C. E.; DAHLSTROM, D. A. Moisture Content of a Fine-Coal Filter Cake. Effect of Viscosity and Surface Tension. **Industrial & Engineering Chemistry**. n. 46, v. 6, p. 1201-1207, 1954.

SINGH, B. P.; BESRA, L. The Effect of Flocculants and Surfactants on the Filtration Dewatering of Iron Ore Fines. **Separation Science and Technology**, v. 32, n. 13, p. 2201–2219, 1997.

SIPONEN, M.; KLAUVUNIEMI, T. Why is the hypothetico-deductive (H-D) method in information systems not an H-D method? **Information and Organization**, v. 30, n. 1, 1 mar. 2020.

SPARKS, T. Solid-liquid filtration: Understanding filter presses and belt filters. **Filtration and Separation**, v. 49, n. 4, p. 20–24, jul. 2012.

SPARKS, T.; CHASE, G. Section 4 - Solid–Liquid Filtration. **Filters and Filtration Handbook (Sixth Edition)**, Butterworth-Heinemann, p. 199-295, 2015.

TARLETON, S.; WAKEMAN R. Solid/Liquid Separation: Equipment Selection and Process Design. 2006.

TARLETON, S.; WAKEMAN, R. **Solid/Liquid Separation Scale-up of Industrial Equipment**. 1st Edition, 2005.

TIMONEY, Kevin P; LEE, Peter. Does the Alberta Tar Sands Industry Pollute? The Scientific Evidence. **The Open Conservation Biology Journal**. v. 3, p. 65-81, out. 2009.

VALADÃO, G.E.S. Desenvolvimento de modelo matemático empírico para a simulação da filtração de “pellet feed” de minério de ferro. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1996. (Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 155p.)

WAKEMAN, R. The influence of particle properties on filtration. **Separation and Purification Technology**, v. 58, n. 2, p. 234–241, 15 dez. 2007.

WANG, C., HARBOTTLE, D., LIU, Q., XU, Z. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. **Minerals Engineering**.: Elsevier Ltd., 2014.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. **Wills' Mineral Processing Technology**. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. p. 267-352.

WISE URANIUM PROJECT. Major Uranium Deposits of the World. Disponível em: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Acesso em: 30 jul. 2023

YAN, Y.D.; GLOVER, S.M.; JAMESON, G.J.; BIGGS, S. The flocculation efficiency of polydisperse polymer flocculants, *International Journal of Mineral Processing*, v. 73, Issues 2-4, 2004.