

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Coordenação de Engenharia Química/CCET

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC



ANA CLARA SILVA NUNES

**OTIMIZAÇÃO DE ADITIVOS PARA MELHORIA DE PROCESSOS QUÍMICOS EM
UMA REFINARIA DE ALUMINA**

São Luís
2023



ANA CLARA SILVA NUNES

**OTIMIZAÇÃO DE ADITIVOS PARA MELHORIA DE PROCESSOS QUÍMICOS EM
UMA REFINARIA DE ALUMINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso da Engenharia Química do Centro de
Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade
Federal do Maranhão, como parte dos
requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Wendell Ferreira de la Salles

São Luís

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Silva Nunes, Ana Clara.

Otimização de aditivos para melhoria de processos
químicos em uma refinaria de alumina / Ana Clara Silva
Nunes. - 2023.

76 p.

Orientador(a): Wendell Ferreira de la Salles.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2023.

1. Antiespumante. 2. Floculante. 3. Otimização de
aditivos. 4. Processo Bayer. 5. Processos Químicos. I.
Ferreira de la Salles, Wendell. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. WENDELL FERREIRA DE LA SALLES
Orientador – DETQI/CCET/UFMA

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO PEREIRA RODRIGUES
DEEQ/CCET/UFMA

Profa. Dra. AUDIRENE AMORIM SANTANA PAIXÃO
DEEQ/CCET/UFMA

29 de dezembro de 2023

DADOS CURRICULARES**Ana Clara Silva Nunes****NASCIMENTO** 07/01/1998 – SÃO LUIS / MA**FILIAÇÃO**
João Morais Nunes Filho
Maria Rosalba Costa da Silva**2017/2023** Curso de Graduação
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Rosalba e João Moraes e toda minha família, por terem sido suporte durante toda minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus, razão de todas as minhas conquistas. Aquele que orienta meu caminho, guia meus passos e me abençoa todos os dias.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Maria Rosalba e João Moraes Nunes, por estarem comigo em todos os momentos da vida, me encorajando a perseguir meus objetivos, pelo apoio e por pedir a benção de Deus sobre mim onde quer que eu vá.

Aos meus irmãos Mariana Nunes, Ana Rita Nunes, Diogenes Nunes. Tia Rose e meus tios Antônio Mabio, Carlos Klinger, Joaquim e Neto. Minha cunhada Meriene e meus sobrinhos Ana Beatriz e George Lucas. Minha sogra Rejane Raulino. Por estarem comigo em todos os momentos da vida.

Agradeço ao meu companheiro, Marcos Leite, por ser um grande parceiro em todos os momentos da minha vida. Seu apoio, incentivo, compreensão e ajuda em todas as etapas da jornada acadêmica foram imprescindíveis para que eu enfrentasse os obstáculos do trabalho.

Ao meu orientador, Profº Wendell de la Salles, pelo apoio, orientação e auxílio durante a elaboração do trabalho de conclusão de curso.

Ao corpo de docentes de Engenharia Química da Universidade Federal do Maranhão, em especial Profº José Roberto Pereira Rodrigues, Audirene Amorim, Elmo de Sena, Jaiver Figueroa, por todo apoio, ensinamentos e amizade durante minha trajetória.

Aos meus amigos Andressa Lopes, Julles Mitoura, Bianca Alexandre, Vinícius Pereira, Hiza Nayra, Carlos Henrique, Maria Augusta, Danilo Alves, Michel Martins, que estiveram presentes nos momentos alegres e tristes, sendo fonte contínua de apoio e incentivo.

Ao meu gestor Geraldo Fernandes E. Oliveira, pela oportunidade, apoio profissional, amizade, e feedbacks que auxiliaram no meu crescimento profissional.

À Refinaria de Alumina e aos Engenheiros Denyse Gaspar, Nathália Lins, Emily Agostini, Airton Maciel, Xênia Azarias, Alexjan Mota, Gabriel Lucena, por terem me dado todo suporte desde o primeiro dia na companhia. Guilherme Kato, Zilmara Zamyla, Lariza Pontes, Gabriel Princhak, Marcelo Cerioni, Itapuã Oliveira, e à todo time da operação.

*“A lagarta que teme a metamorfose jamais plainará
como uma borboleta leve no azul do ar. A flor que
receia o desgaste nunca atingirá a semente que a
perpetua.”*

Rubem Alves

NUNES, A. C. **Otimização de aditivos para melhoria de processos químicos em uma refinaria de alumina.** 2023. p.76. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

RESUMO

Aumentar ao máximo a produtividade e reduzir gastos na extração de alumina tem se tornado um fator chave para se destacar em termos de performance e qualidade no processo Bayer. Dessa forma, a análise de processos químicos industriais é indispensável para garantir a eficiência, segurança e qualidade na produção química em larga escala. Essa análise envolve a avaliação e otimização dos diferentes estágios de um processo químico, desde a matéria-prima até o produto. Com base nesses conceitos, o presente estudo busca, a partir de análises na planta e em laboratório, otimizar o uso de produtos químicos como antiespumantes e floculantes utilizados no processo de classificação na área da precipitação, visando a melhoria do processo químico e suporte na avaliação financeira dos produtos. Foram avaliados em escala laboratorial 2 produtos diferentes de antiespumante, produtos A e B, também avaliados em escala industrial, e 2 produtos diferentes de floculantes, produtos 1 e 2 (avaliados apenas em escala laboratorial). Desse escopo, foi conduzida uma análise estatística das principais variáveis operacionais de processo, dentre elas a concentração de sólidos presentes no licor usado (pobre em alumina), níveis dos tanques, presença de espuma, ruídos de bombas, sistema de bombeamento de dosagem dos produtos e, seguimento financeiro. Para o antiespumante, os resultados demonstraram variabilidade de performance com redução de consumo das dosagens, o que tornou uma otimização viável economicamente. Já para os floculantes, os resultados obtidos em laboratório não demonstraram variabilidade significativa de performance.

Palavras-chave: Processo Bayer. Otimização. Antiespumante. Floculantes. Aditivos Químicos. Processos Químicos.

NUNES, A. C. **Optimization of additives to improve chemical processes in an alumina refinery.** 2023. 76 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

ABSTRACT

Maximizing productivity and reducing costs in alumina extraction has become a key factor to stand out in terms of performance and quality in the Bayer process. Thus, the analysis of industrial chemical processes is essential to ensure efficiency, safety, and quality in large-scale chemical production. This analysis involves evaluating and optimizing the different stages of a chemical process, from raw material to product. Based on these concepts, the present study seeks, based on plant and laboratory analysis, to optimize the use of chemical products such as defoamers and flocculants used in the classification process in the precipitation area, aiming at improving the chemical process and supporting the financial evaluation of the products. Two different defoamer products, products A and B, also evaluated on an industrial scale, and two different flocculant products, products 1 and 2, were evaluated on a laboratory scale. From this scope, a statistical analysis of the main operational process variables was carried out, among them the concentration of solids presents in the liquor used (low in alumina), tank levels, presence of foam, pump noise, product dosing pumping system, and financial follow-up. For the defoamer, the results demonstrated performance variability with reduced dosage consumption, which made an optimization economically viable. However, for the flocculants, the laboratory results did not show significant performance variability.

Keywords: Bayer Process. Optimization. Antifoam. Flocculants. Chemical Additives. Chemical processes.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Diagrama simplificado do processo Bayer para produção de alumina a partir da bauxita..... | 3 |
| Figura 2 – Pedra de bauxita e localização das minas de bauxita no Brasil..... | 4 |
| Figura 3 – Fluxograma simplificado do processo da extração de alumina | 6 |
| Figura 4 – Fluxograma simplificado da clarificação..... | 6 |
| Figura 5 – Fluxograma esquemático do processo da precipitação..... | 7 |
| Figura 6 – Fluxograma simplicado do processo da precipitação..... | 8 |
| Figura 7 – Zonas de sedimentação em um espessador..... | 9 |
| Figura 8 – Espessador de bandeja..... | 10 |
| Figura 9 – Processo de floculação por pontes..... | 13 |
| Figura 10 – Desestabilização da interface ar/líquido..... | 14 |
| Figura 11 – Sistema do teste do antiespumante..... | 16 |
| Figura 12 – Teste de avaliação do antiespumante..... | 17 |
| Figura 13 – Locais de aplicação do teste..... | 18 |
| Figura 14 – Recipientes com os produtos..... | 19 |
| Figura 15 – Skid de dosagem..... | 19 |
| Figura 16 – Painel de controle..... | 20 |
| Figura 17 – Pasta sendo agitada com êmbolo..... | 24 |
| Figura 18 – Sedimentação da pasta..... | 24 |
| Figura 19 – Filtração dos sólidos..... | 25 |
| Figura 20 – Saída do underflow do cone..... | 25 |
| Figura 21 – Tempo de formação de espuma vs. dosagem de A e B simulando um precipitador..... | 27 |
| Figura 22 – Tempo de formação de espuma vs. dosagem de produto A e produto B simulando um tanque de filtrado de hidrato..... | 28 |
| Figura 23 – Comportamento do fluxo total de dosagem do antiespumante no tanque de GLQ..... | 30 |
| Figura 24 – Comportamento do fluxo total de dosagem do antiespumante no tanque de filtrado..... | 31 |
| Figura 25 – Vazamento do produto devido pequena obstrução durante a montagem..... | 32 |
| Figura 26 – Carta de controle de nível do tanque de GLQ durante o teste com produto B..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 27 – Carta de controle de nível do tanque de filtrado 1 durante o teste com produto B..... | 34 |
| Figura 28 – Carta de controle de nível do tanque de filtrado 2 durante o teste com produto B..... | 35 |
| Figura 29 – Carta de controle de nível do tanque de filtrado 3 durante o teste com produto B..... | 35 |
| Figura 30 – a): Espumas na zona superior dos espessadores; b) Caixa de transbordo dos espessadores..... | 37 |
| Figura 31 – Registros de espumas na calha de transbordo do tanque..... | 38 |
| Figura 32 – Dados de concentrações de sólidos (g/L) coletados pelo overflow dos espessadores..... | 39 |
| Figura 33 – Média diária das concentrações de sólidos (g/L) no overflow..... | 40 |
| Figura 34 – Curva da Distribuição Normal..... | 41 |
| Figura 35 – Frequência em que os valores ocorrem para o Produto A..... | 42 |
| Figura 36 – Frequência em que os valores ocorrem para o Produto B..... | 42 |
| Figura 37 – Média diária das concentrações de sólidos (g/L) dos tanques de filtrado..... | 45 |
| Figura 38 – Curva da Distribuição Normal para sólidos dos tanques de filtrado..... | 46 |
| Figura 39 – Frequência em que os valores ocorrem para o Produto A..... | 46 |
| Figura 40 – Frequência em que os valores ocorrem para o Produto B..... | 46 |
| Figura 41 – Concentração de sólidos de overflow entre a zona 1000 a 900ml (g/L)..... | 50 |
| Figura 42 – Velocidade de Sedimentação de 1000 a 500 mL (m/h)..... | 51 |
| Figura 43 – Tempo de escoamento em cone de imhoff (s)..... | 52 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Dados de processo para tanque de hidrato e tanque de filtrado..... | 21 |
| Tabela 2 – Dosagens ótimas de antiespumante nos tanques..... | 21 |
| Tabela 3 – Ajuste de dosagem das bombas – Produto B..... | 21 |
| Tabela 4 – Tempo de formação de espuma..... | 28 |
| Tabela 5 – Tempo de formação de espuma simulando um tanque de filtrado | 29 |
| Tabela 6 – Limites de nível dos tanques em %..... | 33 |
| Tabela 7 – Descrições Estatísticas da variação da concentração de sólidos (g/L)..... | 40 |
| Tabela 8 – Resultado estatístico a partir do teste t Student..... | 43 |
| Tabela 9 – Tamanho do efeito de variância..... | 43 |
| Tabela 10 – Descrições Estatísticas da variação da concentração de sólidos (g/L) no filtrado..... | 45 |
| Tabela 11 – Resultado estatístico a partir do teste t Student..... | 47 |
| Tabela 12 – Tamanho do efeito de variância..... | 47 |
| Tabela 13 – Consumo médio de antiespumante..... | 48 |
| Tabela 14 – Custo médio mensal e economia (mensal e anual)..... | 48 |
| Tabela 15 – Dados obtidos nos testes de floculantes 1 e 2..... | 49 |
| Tabela 16 – Resultado estatístico a partir do teste t Student..... | 53 |
| Tabela 17 – Tamanho do efeito de variância..... | 53 |
| Tabela 18 – Consumo e valor médio de floculante..... | 54 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----|---|
| DP | Desvio Padrão |
| GLQ | (<i>Green liquor</i>) – Licor com alta concentração de alumina |
| IC | Intervalo de confiança |
| LIC | Limite inferior de controle |
| LM | Limite médio de controle |
| LSC | Limite superior de controle |
| OF | (<i>Overflow</i>) – Transbordo |
| OP | (<i>Operation Pump</i>) – Operação da bomba |
| SLQ | (<i>Spent liquor</i>) – Licor com baixa concentração de alumina |
| TDE | Tamanho do Efeito de Cohens'D |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|-----------------------------------|
| bar | unidade de pressão |
| °C | graus Celsius |
| cm | centímetro |
| g | grama |
| g/L | grama por litro |
| g/ton | grama por tonelada |
| h | unidade de tempo - hora |
| kg | quilograma |
| kPa | quilopascal |
| L | litro |
| lts | litros |
| m ³ | metro cúbico |
| min | unidade de tempo - minuto |
| ml | mililitro |
| p/p | % peso por peso |
| ppm | partes por milhão |
| psi | libra-força por polegada quadrada |
| R\$ | reais – símbolo monetário |
| s | unidade de tempo – segundo |
| ton | tonelada |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| FICHA CATALOGRÁFICA..... | ii |
| FOLHA DE APROVAÇÃO..... | iii |
| DADOS CURRICULARES..... | iv |
| DEDICATÓRIA..... | v |
| AGRADECIMENTOS..... | vi |
| EPÍGRAFE..... | vii |
| RESUMO..... | viii |
| ABSTRACT..... | ix |
| LISTA DE FIGURAS..... | x |
| LISTA DE TABELAS..... | xii |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS..... | xiii |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | xiv |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 OBJETIVOS..... | 2 |
| 2.1 Objetivo geral..... | 2 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 2 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 3.1 Processo Bayer..... | 3 |
| 3.2 Etapas do processo Bayer..... | 4 |
| 3.2.1 Extração da bauxita..... | 4 |
| 3.2.2 Processo de moagem..... | 5 |
| 3.2.3 Processo de Digestão..... | 5 |
| 3.2.4 Processo de Clarificação..... | 6 |
| 3.2.5 Processo de Precipitação..... | 7 |
| 3.2.5.1 Separação sólido-líquido em espessadores da precipitação..... | 8 |
| 3.2.5.2 Espessadores de bandeja..... | 10 |
| 3.2.5.3 Aditivos químicos para melhoria do processo..... | 11 |
| 3.2.5.3.1 Floculantes..... | 12 |
| 3.2.5.3.2 Antiespumante..... | 13 |
| 3.2.6 Processo de Calcinação..... | 14 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS..... | 15 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1 Local de pesquisa..... | 15 |
| 4.2 Teste de antiespumante no laboratório..... | 15 |
| 4.2.1 Amostras..... | 15 |
| 4.2.2 Aditivos..... | 15 |
| 4.2.3 Instrumentos e equipamentos..... | 15 |
| 4.2.4 Metodologia..... | 16 |
| 4.3 Teste de antiespumante na planta..... | 18 |
| 4.3.1 Aplicação do teste..... | 18 |
| 4.3.2 Análises..... | 18 |
| 4.3.3 Instrumentos e equipamentos..... | 19 |
| 4.3.4 Metodologia..... | 20 |
| 4.4 Teste de Floculante no laboratório..... | 21 |
| 4.4.1 Amostras..... | 21 |
| 4.4.2 Aditivos (Floculantes)..... | 21 |
| 4.4.3 Instrumentos e equipamentos..... | 21 |
| 4.4.4 Análises..... | 23 |
| 4.4.5 Metodologia..... | 23 |
| 4.4.5.1 Teste de sedimentação e agitação do floculante de hidrato..... | 23 |
| 4.5 Softwares..... | 25 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 26 |
| 5.1 Análise de performance dos antiespumantes A e B em escala laboratorial..... | 27 |
| 5.2 Análise de performance dos antiespumantes A e B em planta..... | 29 |
| 5.2.1 Comportamento da dosagem..... | 30 |
| 5.2.2 Ruídos das bombas..... | 32 |
| 5.2.3 Controle de nível do tanque..... | 32 |
| 5.2.4 Análise qualitativa de presença de espumas nos tanques da precipitação..... | 36 |
| 5.2.5 Concentração de sólidos no overflow dos espessadores..... | 37 |
| 5.2.6 Concentração de sólidos no tanque de filtrado..... | 44 |
| 5.2.7 Impactos financeiros..... | 48 |
| 5.3 Análise de performance dos floculantes 1 e 2 em escala laboratorial..... | 49 |
| 5.3.1 Impactos financeiros..... | 54 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 55 |
| 7 REFERÊNCIAS..... | 56 |

1 INTRODUÇÃO

O processo Bayer é um dos métodos mais comuns e amplamente utilizados na indústria para produção de alumina, também conhecida como óxido de alumínio (Al_2O_3), devido à sua eficiência e baixo custo. Uma das etapas fundamentais da produção é a digestão, que tem como principal objetivo enriquecer a solução cáustica com o máximo de alumina obtida na bauxita, e, subsequentemente retirar o máximo de alumina da solução na etapa da precipitação, ou seja, maximizar a produtividade do licor que será reutilizado no processo e o rendimento de alumina (DENHOND; HIRALAL; RIJKEBOER, 2016). Dessa forma, a alumina cristalizada é transportada para a calcinação e o licor usado (pobre em alumina), também conhecido como SLQ (*Spent Liquor*) é recirculado para a etapa de digestão e moagem, fechando o ciclo do Bayer (CONSTANTINO *et al.*, 2002).

A maximização do rendimento da precipitação envolve diversas análises de parâmetros que precisam serem controlados, entre eles estão a temperatura, concentração cáustica, área de superfície da partícula, impurezas do licor, características e capacidade de desempenho dos equipamentos (DENHOND; HIRALAL; RIJKEBOER, 2016). Além disso, cabe ainda ressaltar a concentração e granulometria de sólidos, viscosidade, pH, controle de nível dos tanques, através do balanço de massa, bem como dosagem e concentração de aditivos que contribuem para a melhoria contínua do processo e qualidade do produto.

Os antiespumantes, por exemplo, garantem menor tempo de formação de espumas no processo de classificação da precipitação, assim contribuem para que não haja maior arraste de sólidos pelo transbordo de espessadores, e contribuem para o controle do nível dos tanques. Por outro lado, os floculantes influenciam diretamente na eficiência dos espessadores, assegurando a concentração de sólidos no overflow dentro da faixa ótima de operação.

Nesse atual contexto, o presente trabalho propõe otimizar o uso de produtos químicos como antiespumantes e floculantes utilizados no processo de classificação na área da precipitação, através de avaliações em laboratório e na planta, visando a melhoria técnica e econômica do processo químico.

2 OBJETIVOS

Avaliar e comparar a eficiência de dois produtos químicos (antiespumantes e floculantes) para uma possível substituição dos produtos já utilizados na fábrica, a fim de otimizar o uso desses aditivos visando melhoria contínua do processo.

2.1 Objetivo geral

Otimizar o uso de aditivos químicos utilizados no processo de classificação de hidrato, visando a melhoria técnica e econômica do processo químico.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar performance de antiespumantes, comparando novo produto (B) com um já utilizado na planta, produto (A), buscando menor tempo de formação de espuma em diferentes concentrações dos produtos;
- Avaliar performance de floculantes, comparando novo produto (1) com um já utilizado na planta, produto (2), visando maior velocidade de sedimentação de sólidos de hidrato e menor concentração de hidrato na zona de clarificação;
- Reduzir taxa de consumo sem comprometer a qualidade do processo;
- Otimizar a dosagem dos aditivos químicos estudados visando melhoria de processos.

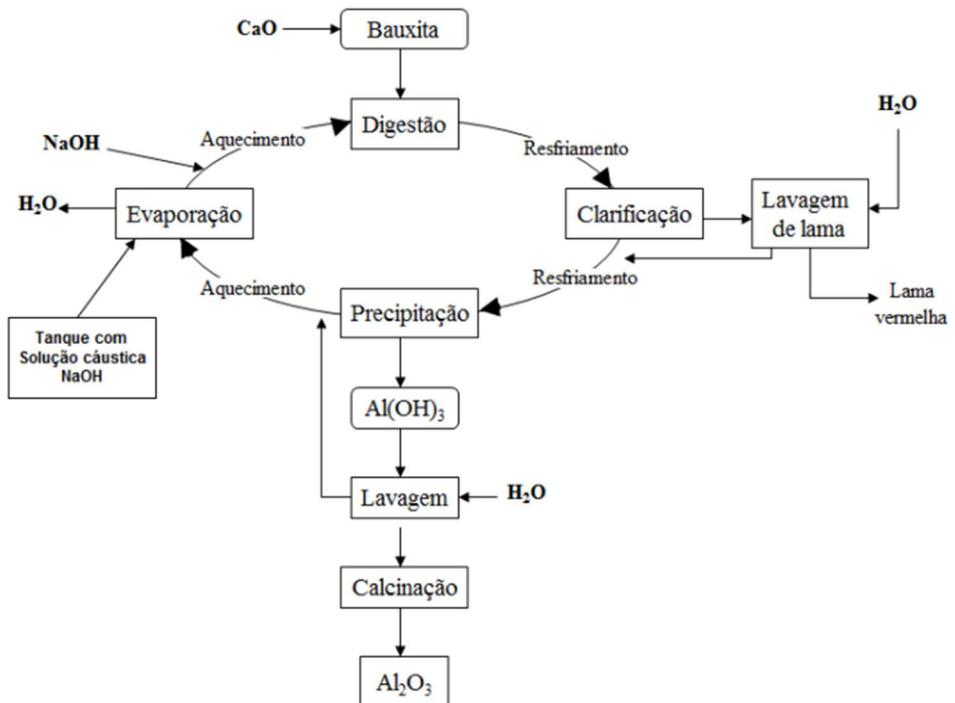
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSO BAYER

Apesar do alumínio ser o terceiro elemento metálico mais abundante da crosta terrestre (BELL, 2020), este metal não ocorre naturalmente. A primeira etapa da produção do alumínio é o processo Bayer, um método amplamente utilizado na indústria para a produção de alumina através do refino da bauxita, o precursor do alumínio (ANDREW *et al.*, 1999). Esse processo foi desenvolvido pelo químico austríaco Karl Josef Bayer em 1888 (HABASHI, 1995), e permanece como o principal método de produção de alumina em escala industrial.

Consiste em três etapas principais: a digestão da bauxita, a precipitação da gibsita presente no licor rico (rico em concentração de alumina em relação à concentração cáustico) e a calcinação da gibsita precipitada (ESCOBAR, 2004).

Figura 1 - Diagrama simplificado do processo Bayer para produção de alumina a partir da bauxita



Fonte: CONSTANTINO *et al.* (2002)

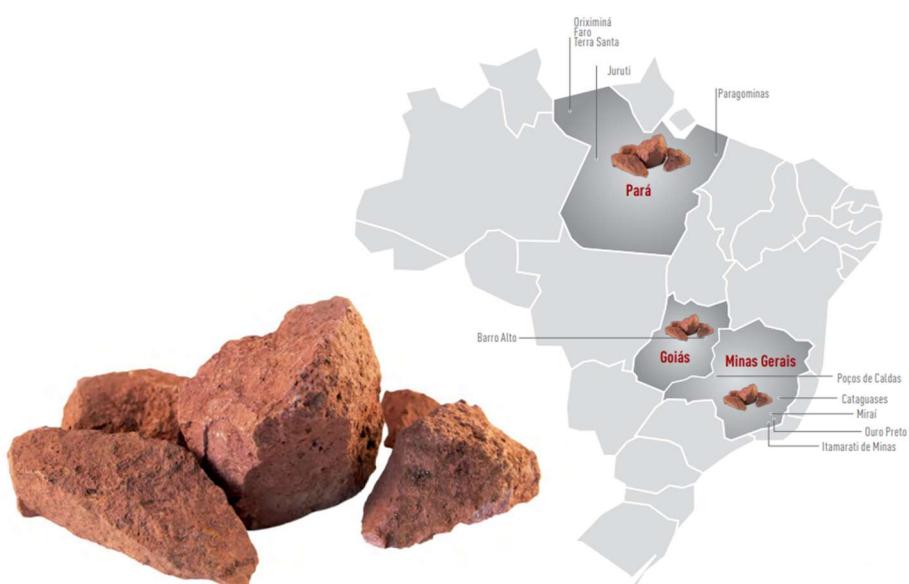
3.2 ETAPAS DO PROCESSO BAYER

3.2.1 Extração da bauxita

A extração da bauxita é o primeiro passo no processo de produção de alumina através do método Bayer. A bauxita é uma rocha sedimentar que contém cerca de 40 a 60 % em massa de Al_2O_3 combinada com uma pequena quantidade de óxidos, argila, sílica e outros minerais que são as impurezas. É uma rocha de cor geralmente avermelhada ou amarronzada (a proporção dos óxidos de ferro determina a coloração da rocha) composta por hidróxidos de alumínio, representados pelos minerais gibsite ($Al(OH)_3$) e os isômeros bohemita ($AlO(OH)$) e diáspero ($AlO(OH)$) (ALVES, 2017).

A formação da bauxita depende de um clima tropical ou subtropical em que favoreça o processo natural de intemperismo, lixiviação e deposição dos minerais presente na rocha (SAMPAIO, 2005). No Brasil, as reservas naturais do minério ficam localizadas nos Estados do Pará, Goiás e Minas Gerais, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Pedra de bauxita e localização das minas de bauxita no Brasil



Fonte: (ABAL, 2017)

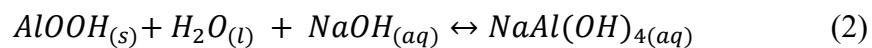
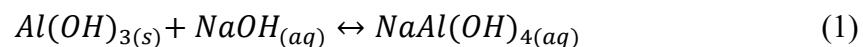
3.2.2 Processo de Moagem

Depois de extraída, a bauxita passa pelo processo de moagem que tem como objetivo principal reduzir e controlar a granulometria do minério. A redução do tamanho da partícula garante maior área de contato com a soda cáustica na etapa da Digestão, tornando-as mais adequadas para o processo (Ribeiro e Abrantes, 2001).

A bauxita é, então, triturada em partículas muito finas em moinhos que podem ser compartimentado de barras ou bolas. Conforme as pesquisas de Soares, (2018), essa etapa requer condições específicas de processo, como temperaturas altas e um meio alcalino, tornando mais fácil o processo de moagem e menos gasto de energia comparado com um processo mais seco. No final desse processo, temos uma polpa chamada “lama de bauxita” que será direcionada para etapa da digestão (SOARES, 2018).

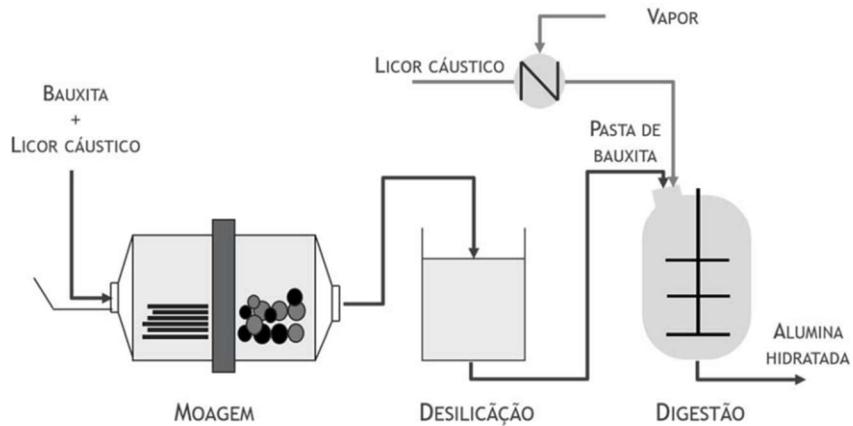
3.2.3 Processo de Digestão

O processo da digestão ocorre em reatores de mistura denominados digestores. O objetivo da mistura é solubilizar a alumina total extraível, contida na bauxita, através da reação com NaOH em altas temperaturas, formando o licor rico em alumina (*Green liquor* ou GLQ), e proporcionar um tempo adequado de retenção para a efetiva dessilicatação do licor (KIMMERLE, 2004). A reação é representada nas Equações 1 e 2:



Após o processo de mistura em altas temperaturas, o último digestor transfere a pasta para tanques de flasheamento, onde sucessivamente, vai perdendo pressão e temperatura garantindo condições adequadas de temperatura para o processo subsequente, conforme ilustrado na Figura 3:

Figura 3 - Fluxograma simplificado do processo da extração de alumina

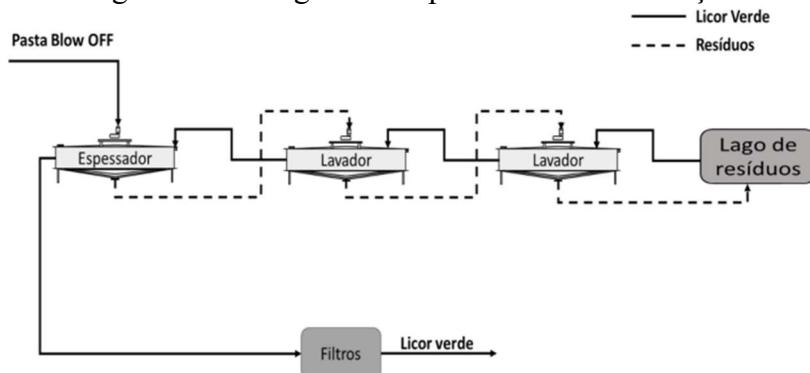


Fonte: CARNEIROR *et al.* (2016)

3.2.4 Processo de Clarificação

Após a etapa da digestão, a polpa resultante ainda contém partículas sólidas indesejadas, como sílica e outras impurezas. A mistura, então, é transferida para área da clarificação, que consiste na separação sólido-líquido em espessadores e filtros, conhecidos como clarificadores, onde o principal objetivo é a separação de partículas sólidas (rejeito) e recuperação do líquido claro, chamado de “licor de alumina”. Nessa etapa de clarificação em tanque lavadores, ocorre a dosagem de polímeros solúveis em água que contribui para o processo de espessamento da lama, recuperando o máximo de soda cáustica rica em alumina e pobre em resíduos no overflow. (BORTOLETO, CAMARGOS, DAVO, 2017). A solução resultante segue para as torres de resfriamento e, em seguida, para área da precipitação (SAMPAIO, 2005).

Figura 4 - Fluxograma simplificado da clarificação



Fonte: FREIRE, 2019

3.2.5 Processo de Precipitação

Nesta etapa, o licor de alumina é resfriado e misturado com sementes de hidrato de alumínio para iniciar o processo de precipitação do hidróxido de alumínio. O objetivo é transformar o hidróxido de alumínio dissolvido no licor em partículas sólidas de hidróxido de alumínio. O sólido resultante é chamado de “hidrato de alumina” ou “alumina tri-hidratada” (TORRES, 2001).

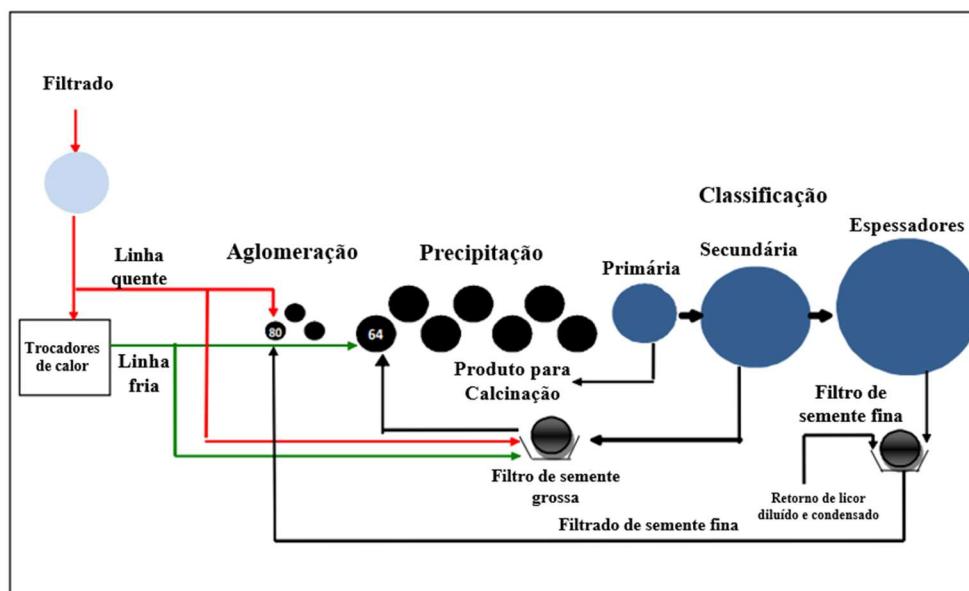
A reação do processo de precipitação, se divide em duas etapas (TORRES, 2001):

- I. Aglomeração dos sólidos da semente;
- II. Formação do precipitado entre as partículas destes aglomerados, resultando em aglomerados cristalizados de hidróxido de alumínio, como mostra a equação 3:



A reação ocorre em temperatura $\leq 80^{\circ}\text{C}$ e $P = 100 \text{ kPa}$

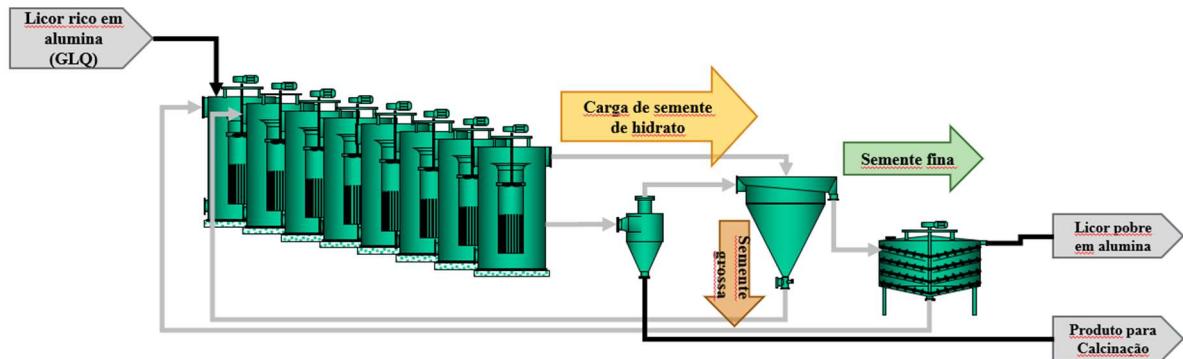
Figura 5 - Fluxograma esquemático do processo da precipitação



Fonte: Adaptado de The Bayer Process, (2019)

Após o processo de precipitação e aglomeração, o hidrato de alumina irá passar por um processo de classificação de hidrato baseado na granulometria definida pelo processo de separação das ciclonagens. Em seguida, o overflow das ciclonagens alimentam os espessadores e filtros horizontais, responsáveis pelo último estágio de classificação: separar o máximo possível de hidrato pelo underflow que retornará para os precipitadores como controle de aglomeração, e garantir menor concentração possível de sólidos de hidrato no licor usado (*Spend Liquor – SLQ*) que retornará para a área da digestão. O Fluxograma esquemático do processo da precipitação está ilustrado na Figura 6:

Figura 6 - Fluxograma simplificado do processo da precipitação



Fonte: Alcoa (Manuais Internos)

A etapa da precipitação desempenha um papel fundamental no processo Bayer, pois a qualidade do hidrato formado durante essa etapa afetará diretamente as propriedades finais da alumina obtida. Em geral, espera-se que o produto resultante da precipitação seja capaz de produzir alumina que atenda às expectativas dos clientes em termos de qualidade e características (KIMMERLE, 2004).

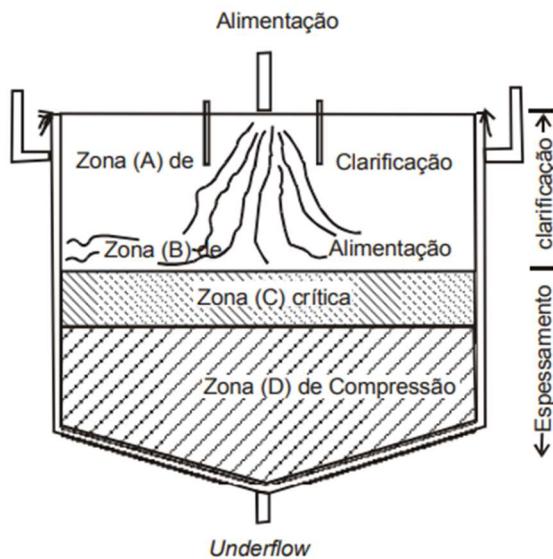
3.2.5.1 Separação sólido-líquido em espessadores da precipitação

Na precipitação, o processo de separação sólido-líquido constitui o último estágio de classificação do hidrato, realizados por espessadores de bandeja e filtros de disco. Estes são responsáveis pelo processo de adensamento da semente fina de hidrato, que são direcionadas para os precipitadores, as quais controlam o processo de aglomeração e conferem qualidade ao hidrato produzido. Já o composto de licor usado, após a classificação do hidrato, é direcionado para os tanques de filtrado.

Os espessadores são equipamentos muito utilizados na indústria de mineração e metalurgia para a clarificação de licor de alumina, polpa de minérios, rejeitos ou outros minerais contendo sólidos em suspensão. Em geral, os espessadores são tanques de sedimentação cuja área e volume possuem dimensões suficientes para permitir a sedimentação de toda partícula de uma mistura alimentada e o transbordo do líquido clarificado pelo overflow. Em instalações de grande porte os espessadores contínuos são a melhor solução para o processo, uma vez que são alimentados continuamente com a suspensão a uma taxa suficientemente baixa para permitir o tempo necessário à sedimentação da fase sólida e clarificação da fase líquida (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Baseado ainda nos estudos de *Oliveira et al.*, (2004), os espessadores possuem quatro diferentes zonas de sedimentação, como mostrado na Figura 7. A polpa é alimentada pelo duto de alimentação, considerado a zona A, depois, passa pela zona B onde ocorre a sedimentação livre. Em seguida, encontra a zona C, onde é considerada a zona crítica pois a partícula está em processo de sedimentação. Assim, chega a zona D, a região de compressão da partícula onde está totalmente sedimentada e poderá ser levada para o underflow. Nesse processo, o underflow e overflow descarregam continualmente. (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Figura 7 - Zonas de sedimentação em um espessador



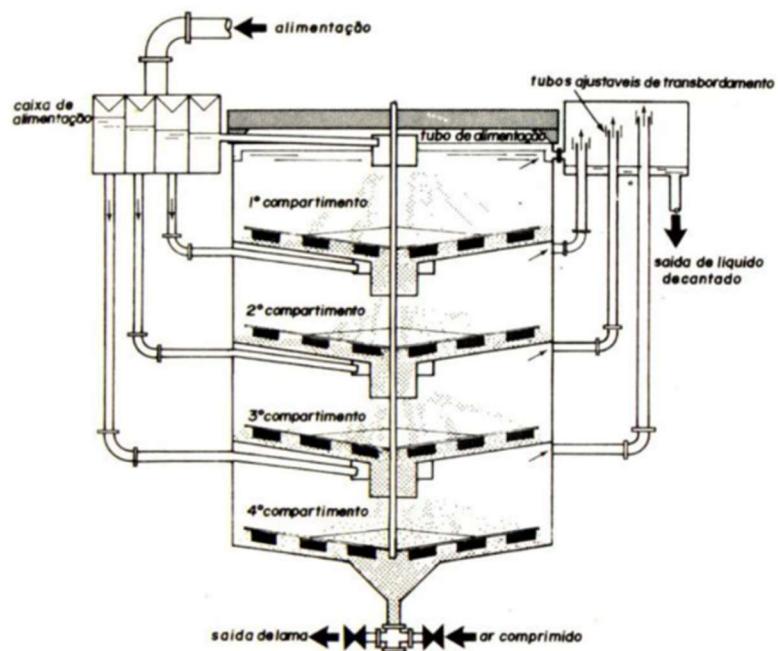
Fonte: OLIVEIRA *et al.*, (2004)

3.2.5.2 Espessadores de bandeja

Na precipitação são utilizados espessadores de bandeja, onde o processo de sedimentação é o mesmo de espessadores convencionais, a diferença é que a polpa é alimentada no topo do equipamento e flue através de uma série de bandejas horizontais. Cada bandeja possui aberturas (ou fendas) nas quais as partículas sólidas da suspensão se acumulam, enquanto o líquido passa por essas aberturas e desce para a bandeja seguinte. O processo é repetido em cada bandeja, resultando em uma sedimentação das partículas sólidas e uma concentração progressiva dos sólidos ao longo do caminho da suspensão.

À medida que as partículas sólidas se acumulam nas bandejas, são formadas camadas de torta nas superfícies das bandejas. A torta sedimentada é então coletada e removida do espessador para posterior processamento ou descarte. Por outro lado, o líquido clarificado é coletado na parte superior do espessador e pode ser encaminhado para etapas subsequentes do processo.

Figura 8 - Espessadores de bandeja



Fonte: Silva, (2014)

A eficiência dos espessadores está na sua capacidade de processar a suspensão, aumentando a concentração de sólidos no underflow e reduzindo no overflow, procedimento totalmente interligado com outros parâmetros que afetam diretamente a eficiência desses tanques de sedimentação (OLIVEIRA *et al.*, 2004):

- Densidade, viscosidade e temperatura da polpa;
- Os sistemas de alimentação (Feedwell) e retirada da polpa (underflow);
- Presença de produtos agregantes como floculantes, bem como seus métodos de aplicação;
- Presença de espumas derivadas de processos anteriores ao de espessamento;
- Tamanho e formato das partículas;
- Distribuição granulométrica dos sólidos.

3.2.5.3 Aditivos químicos na melhoria do processo

Os estudos de espessadores englobam a utilização do uso de aditivos como floculantes e antiespumantes. Durante o processo de decantação. Existem diversos fatores que impactam na eficiência dos processos minerais como (OLIVEIRA *et al.*, 2004):

- Partículas muito finas;
- Superfície de clarificado muito elevada;
- Não atendimento da densidade, seja na alimentação quanto no bombeamento do material;
- Velocidade de arraste, devido fluxo de alimentação mais elevado que o fluxo de bombeamento de fundo;
- Presença de espumas no processo, impactando facilmente no arraste de sólidos finos da superfície para o overflow.

Assim, para facilitar o processo de separação sólido-líquido, é necessário o uso de produtos químicos que facilite a segregação dos sólidos e maior velocidade de decantação, como é o caso da utilização de floculantes. Além disso, em casos de polpa com fluido capazes de gerar espumas, é necessário o uso de antiespumante para reduzir o tempo de formação de espumas no processo que antecede o espessamento.

3.2.5.3.1 Floculantes

Os floculantes são produtos químicos que auxiliam na formação de aglomerados de partículas em um líquido, facilitando sua sedimentação. A aglomeração depende da utilização de moléculas que agem como pontes entre partículas. Esses produtos são geralmente polímeros que podem ser orgânicos ou sintéticos, denominados polieletrolitos classificados por: aniónico, não iônicos ou catiônicos. Essas pontes permitem que os floculantes se unam às partículas, formando aglomerados maiores, facilitando o processo de sedimentação, pois quanto maior a partícula maior será sua velocidade de sedimentação (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

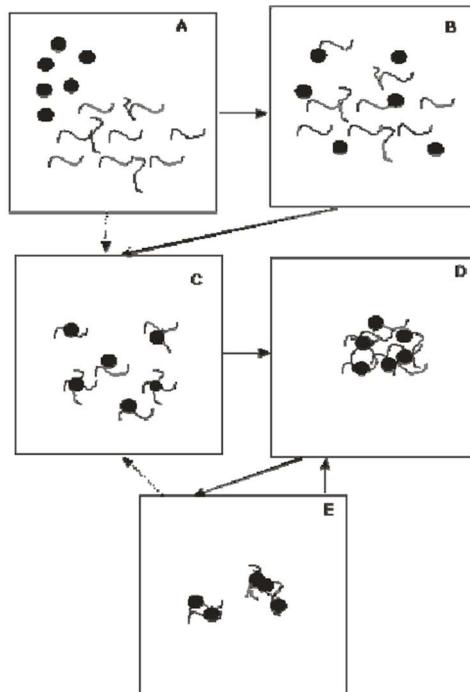
A escolha do produto precisa levar em consideração:

- Natureza iônica do polímero;
- Densidade iônica;
- Tamanho da cadeia molecular;
- Características químicas dos reagentes;
- Eficiência em relação à partícula a partir de testes.

Após adição do floculante em uma suspensão ocorre a adsorção das pontes no sólido e, em seguida, a homogeneização do produto na suspensão. Assim, as moléculas do floculante tem mais chances de se ligar às partículas formando grandes aglomerados. O produto deve ser adicionado à polpa com uma agitação suave para garantir a dispersão do floculante no fluxo. E reduzida agitação após o início do processo e ruptura das moléculas do polímero. O que acontece é que se a homogeneização for excessiva, é provável que os aglomerados se desfaçam antes que formem grandes flocos. Além disso, a agitação não pode se manter constante para também não favorecer a quebra dos flocos. Logo, é essencial encontrar um equilíbrio de homogeneização para garantir que o floculante se distribua uniformemente sem desfazer os aglomerados formados de forma prematura (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Na Figura 9, o comportamento de flocação está ilustrado para melhor visualização. Nas imagens de A até D observa-se o processo de adição do produto, homogeneização, adsorção e flocação. Na imagem E mostra-se a quebra desses flocos sob grandes agitações ou homogeneização excessiva.

Figura 9 - Processo de floculação por pontes



Fonte: OLIVEIRA *et al.*, (2004).

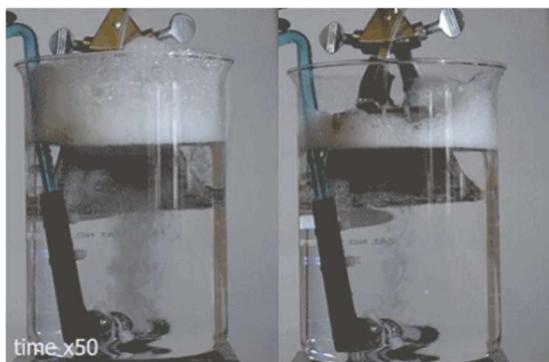
3.2.5.3.2 Antiespumantes

Espumas são constituídas por bolhas de ar separadas por um filme líquido (lamela) (LEAL, 2010). A formação de espumas, principalmente nas indústrias, é geralmente resultado da mistura de substâncias que contêm tensoativos no sistema. Essas substâncias quando entram em contato com um líquido e são agitadas, naturalmente se posicionam no seio da solução, na interface entre o líquido e o gás, para tornarem-se mais estáveis. Esse processo reduz a tensão superficial e permite a formação de bolhas estáveis, fatores favoráveis à formação de espuma (DENKOV, 2004).

É comum a presença de espuma ao longo do circuito da Precipitação devido as características do licor (soda cáustica mais substâncias tensoativas), e o movimento turbulento de transferência do licor ao longo dos tanques estar em contato com o ar, o que gera formação de uma camada de bolhas de ar na superfície, além disso há a presença de agitação contínua ao longo dos tanques. A formação de espuma pode causar prejuízos consideráveis como danos em equipamentos, arraste de sólidos indesejáveis no processo de sedimentação, e aumento no nível dos tanques. Com isso faz-se necessário o uso de produto que minimize esse impacto no processo.

O antiespumante é um produto químico em que o ponto de ação é exatamente na interface líquido/ar. Devido a sua estrutura molecular (fase polar e apolar), o antiespumante é capaz de criar um sistema chamado de micela com o ar e o licor, ao fazer isso, o antiespumante se espalha e empurra para o lado os componentes estabilizadores do sistema de duas fases (ar mais licor), isso desestabiliza a interface tornando-a com ligações menos fortes. Esse tipo de desestabilização provoca a ruptura da lamela e consequentemente da bolha de ar (BARCARO, 2018).

Figura 10 - Desestabilização da interface ar/líquido



Fonte: Chandler, (2020)

3.2.6 Processo de Calcinação

A calcinação é a etapa final do processo, a alumina tri-hidratada (hidrato) é desidratada e convertida em cristais de várias formas, os quais foram lavados e separados do licor pobre durante a precipitação e, após serem calcinados produzem essencialmente alumina anidra isenta de água. Nesse processo são comumente utilizados calcinadores de leito fluidizado. A uma temperatura de aproximadamente 970°C há formação de cristais de alumina gama e formação de alumina alfa (KIMMERLE, 2004). Este é obtido por meio do processo Hall-Héroult, que utiliza a eletrólise da alumina fundida.

Após o processo de calcinação, o pó de alumina deixa a Unidade da Refinaria e segue para a obtenção do alumínio metálico em cubas eletrolíticas (Unidade de Redução – aplicação do Processo Hall-Héroult) ou vai para o porto.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local da pesquisa

O trabalho foi desenvolvido na área da precipitação e laboratório em uma refinaria de produção de alumina, situada na região Nordeste do Brasil, entre os meses de setembro e dezembro de 2022.

4.2. TESTE DE ANTIESPUMANTE NO LABORATÓRIO

4.2.1 Amostras

Para a realização do teste de antiespumante, utilizou-se licor verde (rico em alumina), coletado dos precipitadores e amostras de hidrato na concentração de 150 g/L.

4.2.2 Aditivos (Antiespumante)

Para análise de performance de aditivos químicos, fez-se neste primeiro momento, comparação da eficiência de dois antiespumantes em escala laboratorial: um já utilizado na precipitação, chamado de produto A, e outro à ser avaliado, chamado de produto B.

4.2.3 Instrumentos e equipamentos

Para testar a eficiência de produto com antiespumante, utilizou-se os seguintes instrumentos e equipamentos:

- a) Agitador e aquecedor de amostra
- b) Banho-Maria com o termopar para controle de temperatura
- c) Medidor de temperatura do banho-maria
- d) Pulmão para estabilização da pressão
- e) Manômetro para controle da linha de alimentação (2 bar)
- f) Regulador de pressão de ar na linha do sistema
- g) Fluxômetro para controle do fluxo de ar
- h) Frascos com água como sistema para estabilizar pressão
- i) Válvulas para ajuste do fluxo
- j) Cronômetro utilizado para medição

4.2.4 Metodologia

Durante a execução dos testes com antiespumante, foi analisado o tempo de formação de espuma em diferentes concentrações do produto (antiespumante).

O teste foi realizado simulando-se um precipitador, utilizando sólidos e licor do overflow da calha do tanque e simulando tanque de filtrado, utilizando licor do overflow da ciclonagem da precipitação e sólidos. O sistema montado foi ilustrado na Figura 11:

Figura 11 - Sistema do teste do antiespumante



Fonte: Próprio autor, 2022

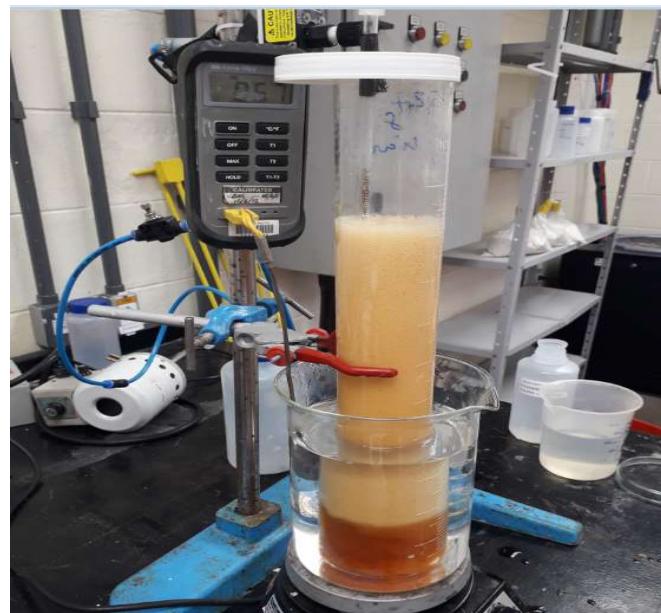
O teste em laboratório foi realizado em acordo com o seguinte procedimento:

- Preparo da composição do licor do precipitador em proveta: utilizou-se o licor verde e semente fina (hidrato de menor granulometria) na proporção de 150 g/L.
- Agitação mecânica através da inserção de ar na proveta no fluxo de 7 L/min;
- Utilizou-se o limite visual de 700ml a 1000ml da proveta para a padronização do fluxo de ar de agitação;
- Medição visual, minuto a minuto, do nível de formação de espumas na proveta;
- Medição padrão do tempo que o licor levou para formar espuma até o volume de 1000ml sem adição de antiespumante (branco);

- Medição padrão do tempo que o licor levou para formar espuma até o volume de 1000ml com adição de antiespumante nas dosagens: 1.25 ppm, 2.5 ppm e 3.75 ppm;
- Avaliação do resultado em laboratório e consolidação da sugestão do teste em planta.

A Figura 12 ilustra um momento do teste sendo realizado, onde pode-se ver claramente o volume de espuma formado.

Figura 12: Teste de avaliação do antiespumante



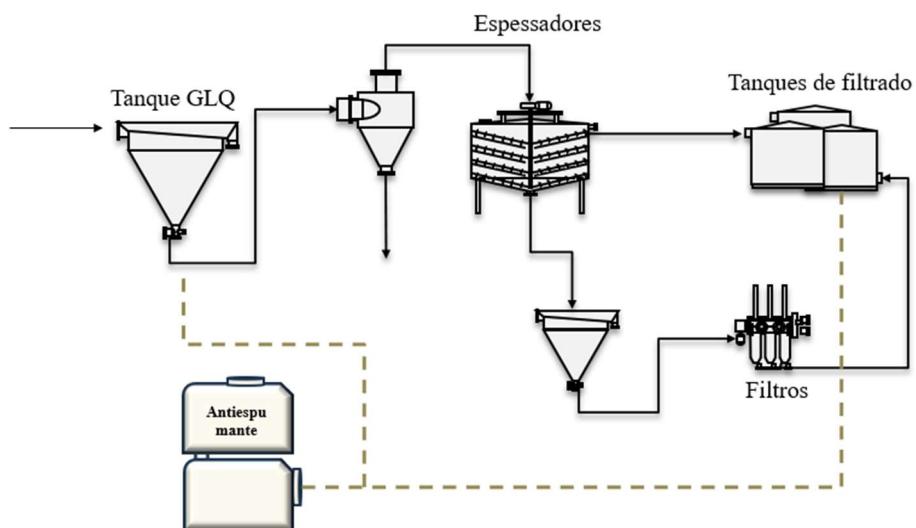
Fonte: Próprio autor, 2022

4.3 TESTE DE ANTIESPUMANTE NA PLANTA

4.3.1 Aplicação do teste

O teste em planta foi realizado na área da precipitação, na última etapa de classificação do hidrato que não foi precipitado durante o processo, podendo ser melhor visualizado na Figura 13. O produto foi testado no tanque rico em GLQ (*Green Liquor*) que recebe o overflow da ciclonagem e alimenta os espessadores, e no tanque de filtrado que recebe licor usado (SLQ - *Spent Liquor*) do overflow dos espessadores e dos filtros de semente de hidrato. Os espessadores e os filtros são responsáveis por maximizar a recuperação de sólidos pelo underflow, além de aumentar a produtividade do licor usado que será reutilizado no processo, garantindo o retorno do licor com menos sólidos possível.

Figura 13 - Locais de aplicação do teste



Fonte: Próprio autor, 2022

4.3.2 Análises

Os principais parâmetros de processo impactados pela presença excessiva de espumas foram avaliados, em especial:

- Comportamento da dosagem do antiespumante nos tanques de GLQ e de filtrados;
- Ruídos de bombas em operação;
- Controle de nível dos tanques;

- Análise visual da presença de espuma nos tanques;
- Média da concentração de sólidos de overflow dos espessadores;
- Média da concentração de sólidos nos tanques de filtrado;
- Seguimento financeiro.

4.3.3 Instrumentos e equipamentos

Para controle de dosagem do produto, utilizou-se os seguintes equipamentos:

1. Recipientes (tote bins) com o produto
2. Bombas dosadoras – bombas de dosagem químicas de 7 L/h
3. Proveta de calibração - Proveta de 250 ml para aferição de dosagem
4. Painel elétrico para controle de dosagem

Tais equipamentos podem ser observados nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Recipientes com os produtos

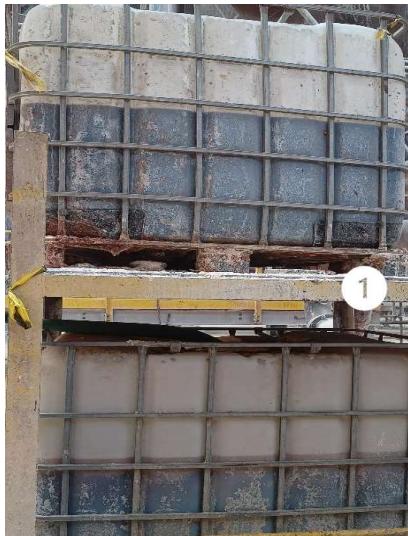
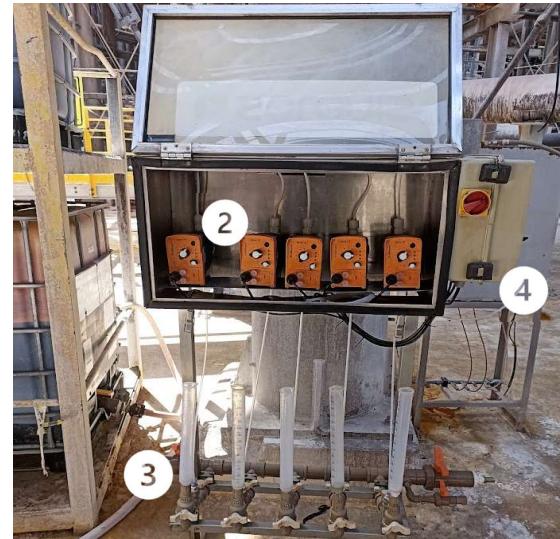


Figura 15 – Skid de dosagem



Fonte: Próprio autor, 2022

Para controle das bombas do antiespumante, utilizou-se um painel composto pelos seguintes dispositivos, os quais podem ser observados na Figura 16:

5. Botoeira de emergência - Dispositivo de comando com a função de desligar a carga de um circuito, a partir de um acionamento manual
6. Chave de acionamento das bombas - Chave para ligar ou desligar as bombas
7. Luzes de indicações - Luz de indicação de bomba ligada
8. Luz de indicação - Luz indica que o painel está energizado

Figura 16 – Painel de controle



Fonte: Próprio autor, 2022

4.3.4 Metodologia

Realizou-se a aplicação do produto utilizando-se dois recipientes (totes bins), os quais são utilizados no sistema de alimentação e são interconectados. O tanque localizado na parte superior é trocado frequentemente e garante que o tanque inferior esteja sempre abastecido com produto químico. No início do teste havia cerca de 1000 litros do produto B no tanque superior e 300 litros no tanque inferior, aproximadamente 700 litros do material foi transferido para o tanque inferior.

Para realizar o teste fez-se necessário dados de processo dos produtos para os tanques de GLQ e de filtrado, como: faixas de concentração do antiespumante, fluxo mássico, vazão, e ajustes de dosagem das bombas como mostram as Tabelas 1, 2 e 3:

Tabela 1 - Dados de processo para tanque de hidrato e tanque de filtrado

| Parâmetros | Valor ref. | Unidade |
|---|------------|---------|
| Concentração recomendada dos produtos A e B | 2,5 | g/ton |
| Concentração máxima dos produtos A e B | 7,5 | g/ton |
| Fluxo mássico de antiespumante recomendado | 11250 | g/h |
| Fluxo mássico de antiespumante máximo | 33750 | g/h |
| Vazão de antiespumante mínima | 10,7 | L/h |
| Vazão de antiespumante máxima | 32,1 | L/h |

Fonte: Próprio autor, 2022

Tabela 2 - Dosagens ótimas de antiespumante nos tanques

| Concentração (ppm) ou (g/ton) | Fluxo mássico de antiespumante B (g/h) | Vazão de antiespumante (L/h) |
|-------------------------------|--|------------------------------|
| 1,25 | 5625 | 5,36 |
| 2,5 | 11250 | 10,71 |
| 3,75 | 16875 | 16,07 |

Fonte: Próprio autor, 2022

Tabela 3 - Ajuste de dosagem das bombas – Produto B

| OP bomba (%) | Litros/hora | OP bomba (%) | Litros/hora |
|--------------|-------------|--------------|-------------|
| 5 | 0,3 | 55 | 3,8 |
| 10 | 0,7 | 60 | 4,2 |
| 15 | 1,0 | 65 | 4,5 |
| 20 | 1,4 | 70 | 4,9 |
| 25 | 1,7 | 75 | 5,4 |
| 30 | 2,1 | 80 | 5,6 |
| 35 | 2,4 | 85 | 6,0 |
| 40 | 2,8 | 90 | 6,3 |
| 45 | 3,1 | 95 | 6,7 |
| 50 | 3,5 | 100 | 7,0 |

Fonte: Próprio autor, 2022

Com base na tabela de ajuste de dosagem e relacionando com o planejamento de dosagem do produto, ficou definido para teste:

- OP da bomba = 70 a 100%
- Fluxo de dosagem = 5 a 7 L/h
- Concentração do antiespumante = 1,17 a 1,63 g/ton
- Fluxo mássico = 5265 a 7335 g/h

É importante salientar que os resultados obtidos nos testes em laboratório indicaram que os testes a serem realizados em planta poderiam ser realizados em concentrações inferiores aos níveis de concentração normalmente recomendados.

4.4 TESTE DE FLOCULANTE NO LABORATÓRIO

4.4.1 Amostras

Para a realização do teste de floculante, utilizou-se coletas de licor ainda rico em alumina, coletado do overflow da ciclonagem que alimenta os espessadores.

4.4.2 Aditivos (Floculantes)

Para análise de performance de aditivos químicos, fez-se neste terceiro momento, comparação da eficiência de dois floculantes: um já utilizado na precipitação, chamado de produto 2, e outro para fins de comparação, chamado de produto 1.

4.4.3 Instrumentos e equipamentos

Para testar a eficiência do floculante, utilizou-se os seguintes materiais:

- Banho-maria
- Provetas de 1000 ml
- Seringas de plásticos
- Cronômetro
- Agitador mecânico
- Becker de 1000 ml
- Cone de imhoff

4.4.4 Análises

A performance do floculante utilizado influencia diretamente nas características do overflow dos espessadores, assegurando a concentração de sólidos do licor usado (pobre em alumina) dentro da faixa ótima de operação e garantindo uma melhoria na qualidade do licor usado enviado aos clientes.

Algumas análises observadas no laboratório:

- Tempo (s) de escoamento no cone de imhoff
- Velocidade de sedimentação de 1000 a 500 ml
- Presença de sólidos entre a zona clarificada (zona 1000 a 900 ml)

4.4.5 Metodologia

4.4.5.1 Teste de sedimentação e agitação do floculante de hidrato

Produziu-se uma solução de floculante a 0,1% p/p com água deionizada. Para tal, aspirou-se 0,5 ml de floculante puro em uma seringa de plástico e adicionou-se água deionizada até um volume total de 500 ml em uma proveta de 1 litro. Depois, misturou-se com uma barra de agitação em um agitador de placa. Os floculantes de hidratos devem misturar-se prontamente e não deve exigir agitação vigorosa.

Usando um agitador mecânico, misturou-se a pasta coletada do espessador para garantir a sua homogeneidade. Em seguida, determinou-se a densidade da pasta em g/L de sólidos. 1000 ml da pasta foram colocados nos cilindros transparentes (provetas) e posicionados lado a lado em banho-maria na temperatura necessária.

Após isso, mediu-se o volume necessário de solução floculante em seringas. Para soluções floculantes de 0,1% p/p, a adição de 1 ml a 1000 ml de pasta é equivalente a 1 ppm. Para espessante típico de sólidos de 100 g/L, 1 ml de solução floculante é equivalente a 10 g/ton (gramas por tonelada). É recomendado que floculantes de hidratos sejam testados a 20 e 60 g/ton (2 e 6 ppm). Por fim, misturou-se as amostras de pasta usando o êmbolo de gangue para garantir uma boa suspensão de sólidos e, depois injetado a solução de floculantes.

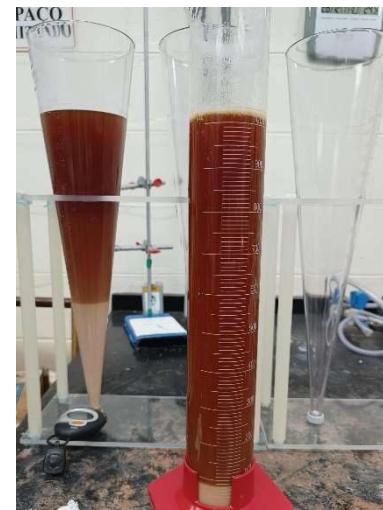
Observações:

- A pasta foi agitada levantando e abaixando lentamente o êmbolo cinco vezes (Figura 17);
- O cronômetro foi iniciado quando o êmbolo foi retirado após o mergulho final;
- A descida da interface do nível de sólidos floculados foi cronometrada até a marca de 500 ml da proveta, a interface entre o licor sobrenadante (transparente) e a pasta floculada ficou claramente visível (Figura 18);
- Para fins de cálculo, foi avaliada a taxa de sedimentação em metros por hora medindo a altura entre as marcas de 1000 e 500 ml na proveta;

Figura 17 – Pasta sendo agitada com êmbolo



Figura 18 – Sedimentação da pasta



Fonte: Próprio autor, 2022

- Para determinar a clareza do sobrenadante, após 15 minutos de sedimentação, extraiu-se 50 ml de licor do topo do cilindro e realizou-se a sua filtração em papel filtro de 9 cm (Figura 19);
- Lavou-se o papel de filtro com água deionizada quente. Os sólidos retidos foram colocados num cadiño de cerâmica e mantidos em um forno a 800°C por 1 hora;
- Por fim, pesou-se os sólidos e calculou-se a claridade do sobrenadante.

- Para determinar o tempo de escoamento no cone de imhoff. Aguardou-se a sedimentação completa por 20 minutos;
- Após esse tempo, liberou-se a saída do underflow do cone e a contagem do tempo com o cronômetro (Figura 20);

Figura 19 – Filtração dos sólidos



Figura 20 – Saída do underflow do cone



Fonte: Próprio autor, 2022

4.5 Softwares

Para o tratamento de dados, utilizou-se:

- ✓ Excel 2016 Pacote Office 365 (Microsoft, Redmond, Washington, Estados Unidos)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dosagem de antiespumante é essencial nos processos de produção de alumina, especialmente nos processos que antecedem os espessadores de bandeja de hidrato. O antiespumante controla a formação de espuma, que pode interferir na eficiência do processo de espessamento do hidrato de alumina, e consequentemente na qualidade do licor usado no overflow.

O controle da formação de espuma com o auxílio do antiespumante, ajuda manter a operação estável, garantindo um processo eficiente de separação sólido-líquido. Isso não só melhora a qualidade do produto final, mas também contribui para a redução de custos operacionais, minimizando acúmulo de material, paradas não programadas e otimizando a produtividade da planta.

Os resultados aqui apresentados foram obtidos em acordo com a metodologia detalhada no item 4, divididos nas seguintes etapas:

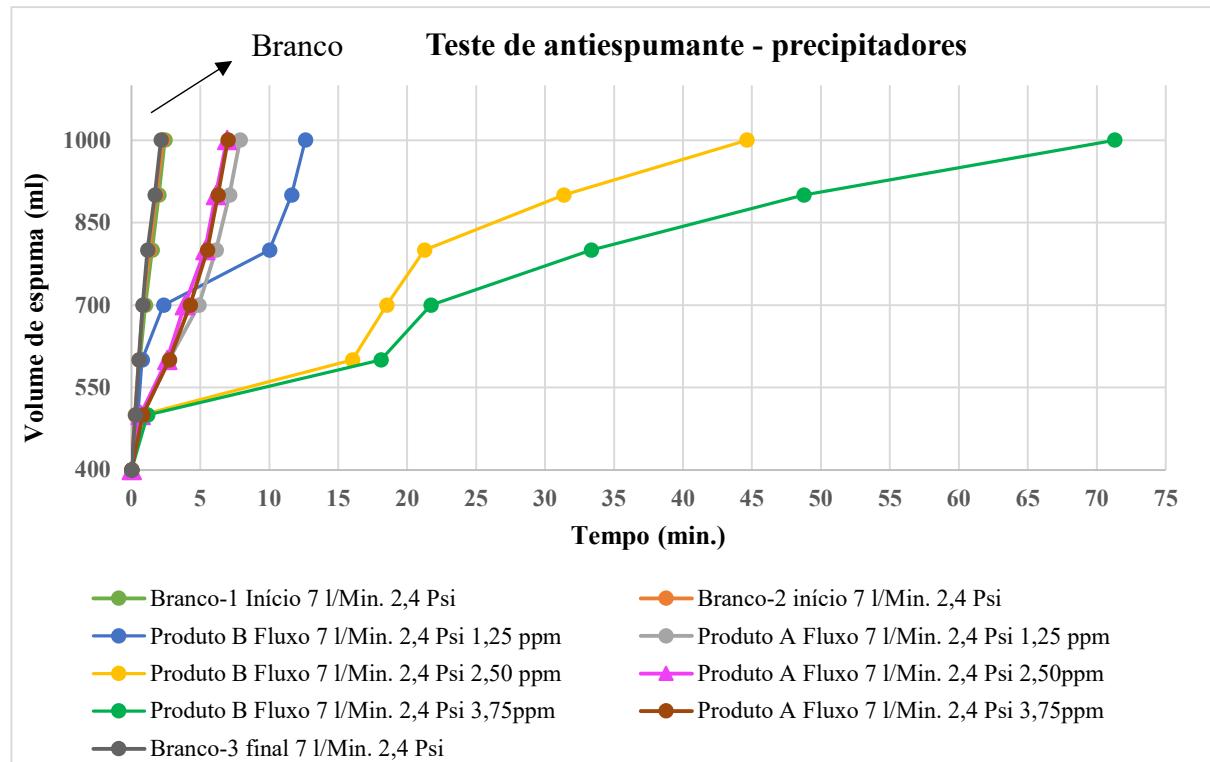
1. Análise de performance dos antiespumantes A e B em escala laboratorial comparando tempo de formação de espuma e dosagem dos produtos (seção 5.1);
2. Avaliação estatística da performance dos antiespumantes A e B em planta a partir do monitoramento dos principais parâmetros de processo (seção 5.2);
3. Análise de performance dos floculantes 1 e 2 em escala laboratorial comparando as variáveis de maior influência e impactos no processo de sedimentação com a adição do produto (seção 5.3)

Os testes realizados em laboratórios são sempre pré-requisitos para avaliação de performance de novos produtos comparados com os já utilizados em planta. Os testes em laboratórios aqui apresentados buscam avaliações sem levar em consideração oscilações de processos e performance de equipamentos, mas a eficiência em si do produto. Já os testes em planta são avaliados levando em consideração todos os parâmetros monitorados pelo processo, incluindo o mecanismo dos equipamentos e rendimento.

5.1 ANÁLISE DE PERFORMANCE DOS ANTIESPUMANTES A E B EM ESCALA LABORATORIAL

A Figura 21 apresenta os resultados obtidos nos testes em laboratório simulando um precipitador com os dois antiespumantes avaliados.

Figura 21 - Tempo de formação de espuma vs. dosagem de A e B simulando um precipitador



Fonte: Próprio autor, 2022

Os resultados obtidos mostram que sem a adição dos antiespumantes o tempo de formação de espuma (tomando-se como referência o tempo em que a espuma atingia um volume de 1000 ml na proveta) foi de 2.4 min. Com a adição de 1.25 ppm de antiespumante, o tempo médio foram de 8 min e 12 min, para o produto A e produto B, respectivamente. Adicionando-se 2.5 ppm de antiespumante o tempo médio foram de 7 min e 44 min, para o produto A e produto B, respectivamente. Com 3.75 ppm de antiespumante o tempo médio foram de 7 min e 71 min, para o produto A e produto B, respectivamente. Observa-se claramente a maior efetividade do antiespumante B, resultando em um aumento do tempo necessário a formação da espuma em função da concentração empregada. Para o espumante A, empregado atualmente na empresa, o aumento neste tempo é muito baixo (passa de 2,4 min para 8 min aproximadamente) e não é influenciado por um aumento na dosagem.

Vale ressaltar também o baixo volume de espuma formado até 15 minutos de teste quando utilizado o antiespumante B nas concentrações de 2,5 ppm e 3,75 ppm.

Os resultados discutidos acima foram dispostos da Tabela 4:

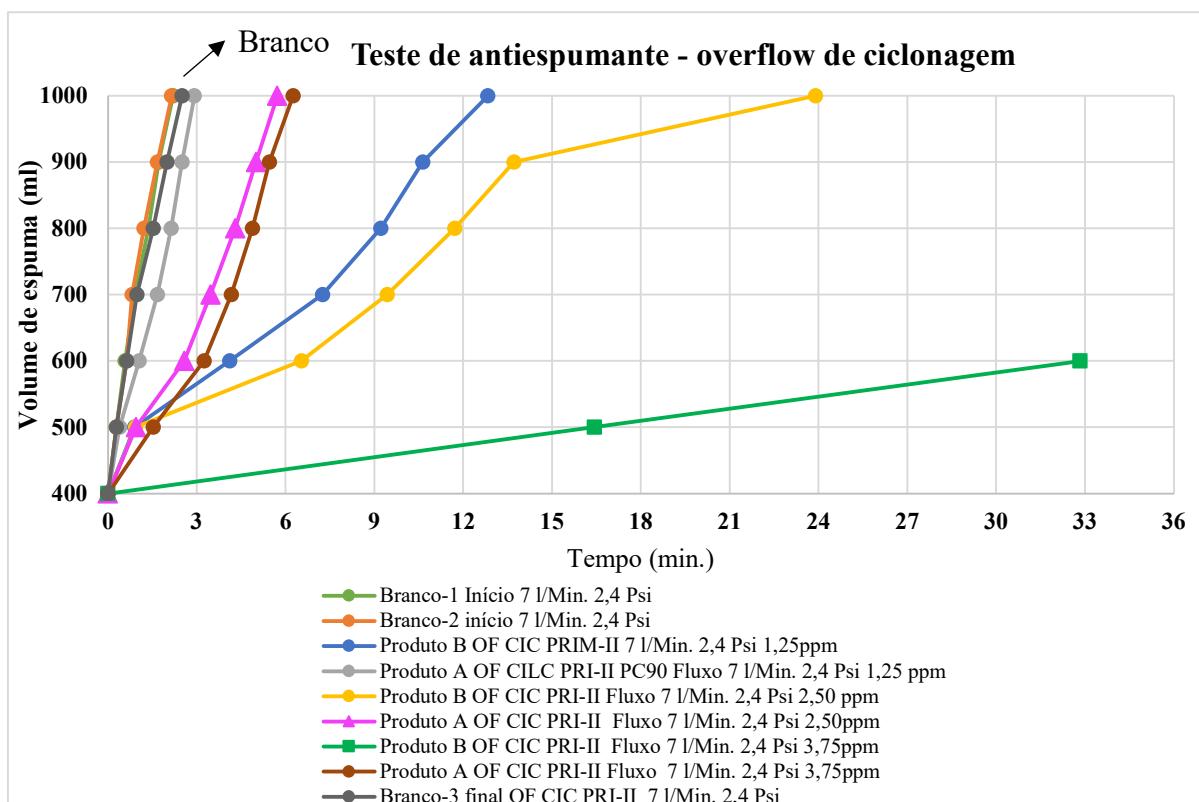
Tabela 4 - Tempos de formação de espuma

| Dosagem (ppm) | Tempo de formação de espuma produto A (min) | Tempo de formação de espuma produto B (min) |
|---------------|---|---|
| 0 | 2.4 | 2.4 |
| 1.25 | 8 | 12 |
| 2.5 | 7 | 44 |
| 3.75 | 7 | 71 |

Fonte: Próprio autor, 2022

A Figura 22 apresenta os resultados obtidos nos testes em laboratório simulando um tanque de filtrado de hidrato com os dois antiespumantes avaliados.

Figura 22 - Tempo de formação de espuma vs. dosagem de produto A e produto B simulando um tanque de filtrado de hidrato.



Fonte: Próprio autor, 2022

Da mesma forma que no ensaio anterior, os resultados obtidos mostram que sem a adição dos antiespumantes o tempo de formação de espuma, dentro da faixa de controle pré-estipulada, foi de 2.4 min. Com a adição de 1.25 ppm de antiespumante o tempo de formação de espuma foram de 3 min e 13 min, para o produto A e produto B, respectivamente. Adicionando-se 2.5 ppm de antiespumante o tempo médio foram de 5,7 min e 24 min, para o produto A e produto B, respectivamente. Com 3.75 ppm de antiespumante o tempo médio foram de 6.3 min para o produto A e de 32 min para o produto B, neste caso atingindo um volume máximo de espuma de 800 ml . Tais resultados confirmam a maior eficiência do antiespumante B em comparação ao antiespumante A, conforme já havíamos observado nos ensaios simulando um precipitador.

Os principais resultados obtidos neste estudo foram dispostos na Tabela 5:

Tabela 5 - tempos de formação de espuma simulando um tanque de filtrado.

| Dosagem (ppm) | Tempo de formação de espuma produto A (min) | Tempo de formação de espuma produto B (min) | Observação |
|---------------|---|---|-----------------------------|
| 0 | 2.4 | 2.4 | |
| 1.25 | 3 | 13 | |
| 2.5 | 5.76 | 24 | |
| 3.75 | 6.3 | 32 | Até 800 ml para o produto B |

Fonte: Próprio autor, 2022

De um modo geral, os dados obtidos indicam claramente uma melhor performance do produto B comparado ao produto A em todas as concentrações avaliadas e em ambos os ensaios efetuados. Mediante aos resultados apresentados, decidiu-se pela realização do teste em planta.

5.2 ANÁLISE DE PERFORMANCE DOS ANTIESPUMANTES A E B EM PLANTA

A análise de performance do antiespumante B foi realizada durante os 96 dias de dosagem do produto. Para a análise estatística foram utilizados 95 dias antes e 95 dias durante a utilização do produto, a fim de comparar com o produto A já utilizado na planta.

Os principais parâmetros de processo impactados pela presença excessiva de espumas foram avaliados, em especial:

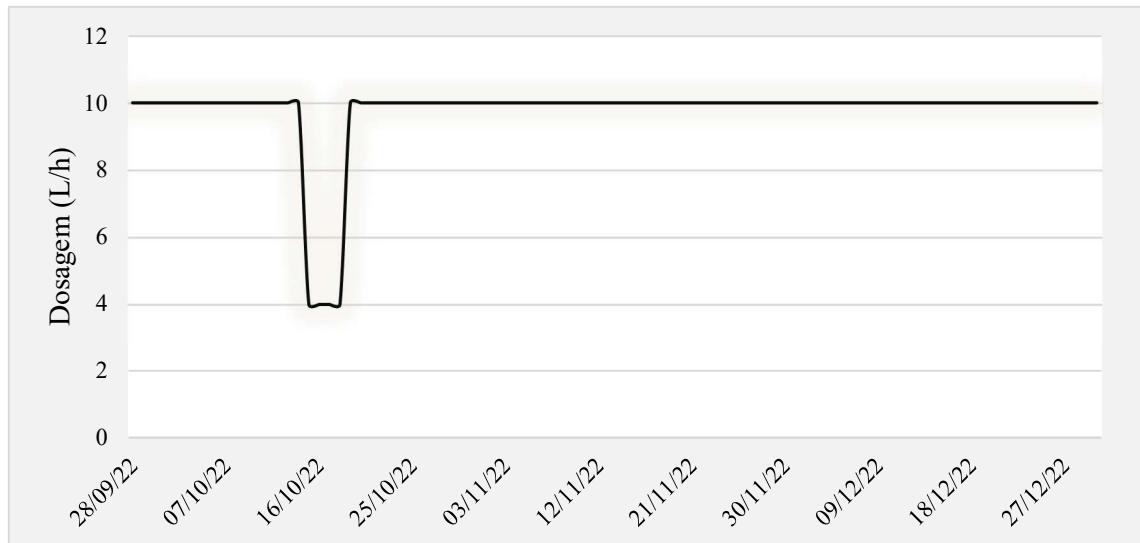
- Comportamento da dosagem;
- Ruídos de bombas em operação;
- Controle de nível do tanque;
- Análise visual da presença de espuma no tanque;
- Média da concentração de sólidos no overflow dos espessadores;
- Média da concentração de sólidos nos tanques de filtrado;
- Seguimento financeiro.

5.2.1 Comportamento da dosagem

O teste com o novo produto teve início em 26 de setembro e finalizou em 31 de dezembro de 2022. A substituição do produto A em uso na fábrica pelo produto B aconteceu instantaneamente, sem qualquer período de transição entre os produtos.

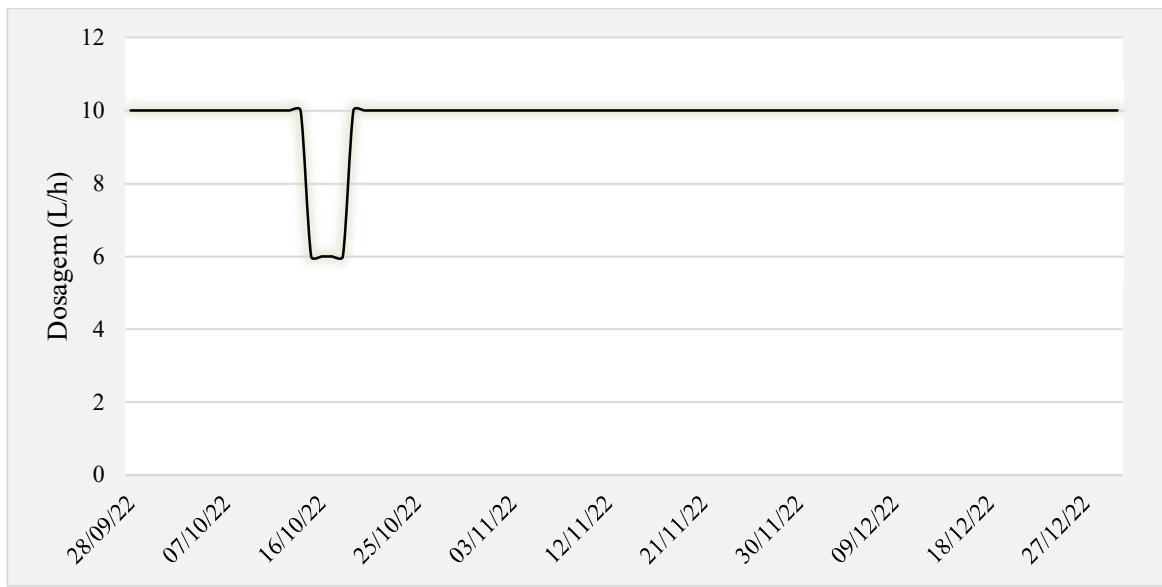
O fluxo de dosagem do antiespumante foi acompanhado diariamente pelo teste de proveta com volume de 100 ml no sistema de bombeamento do produto. O comportamento de dosagem em L/h pode ser visto pelas Figuras 23 e 24.

Figura 23 - Comportamento do fluxo total de dosagem do antiespumante no tanque de GLQ



Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 24 - Comportamento do fluxo total de dosagem do antiespumante no tanque de filtrado



Fonte: Próprio autor, 2022

O fluxo inicial foi de 5 L/h em cada bomba, totalizando 10 L/h de dosagem com OP da bomba em 70%, baseado na tabela de ajuste de dosagem relacionado com o planejamento de dosagem do produto, visto na seção 4.3.4.

Durante o teste de proveta, observou-se queda de volume de dosagem na linha de alimentação do insumo entre os dias 16 a 18 de outubro (ver Figuras 23 e 24). Alguns pontos principais foram checados pela operação a fim de verificar causas da falha e oportunidades na dosagem do insumo.

Durante a inspeção completa da condição do sistema, foi verificado um pequeno vazamento na conexão entre a válvula e a linha de alimentação do produto (mostrado na Figura 25), motivo da perda de carga no sistema.

Figura 25 - Vazamento do produto devido pequena obstrução durante a montagem



Fonte: Próprio autor, 2022

A falha foi solucionada de maneira ágil para que o processo não ficasse com baixo volume de dosagem do produto. Além disso, durante os três meses de teste, a dosagem do produto se manteve constante com 10 L/h, não impactando na performance do processo.

5.2.2 Ruídos das bombas

A avaliação de ruídos da bomba dosadora do antiespumante e do bombeamento do tanque foi uma das formas de avaliar o risco de cavitação em função da alteração nas características do fluido a ser bombeado. Essa avaliação foi realizada de forma auditiva e visual durante as inspeções da operação juntamente com a equipe da manutenção da refinaria, os quais não identificaram nenhum comportamento anormal das bombas em operação e não houve registros de ruídos diretamente ligado à troca de antiespumante.

5.2.3 Controle de nível do tanque

O controle de nível é fundamental no monitoramento de processo químico, desde armazenamentos até tanques de mistura, pois é possível regular fluxos de entrada e saída dos tanques, garantindo controle de volume da planta. Níveis excessivamente altos podem levar a transbordamentos de fluido perigoso, enquanto níveis muito baixos podem causar danos ao equipamento e impactar na eficiência do processo (JOSEPH; ISAAC, 2013).

O controle do nível dos tanques são monitorados através de um sensor de nível. O tanque de GLQ é monitorado para evitar transbordos e acidentes, além de evitar demandas de fluxos muito alto para os espessadores. Da mesma maneira, os níveis elevados dos tanques de filtrado podem comprometer no balanço de volume da planta. Além disso, os níveis não podem ser inferiores à 50%, pois como o tanque pode acumular material no fundo, esses sólidos podem ser arrastados e impactar na eficiência do processo.

Dessa forma, para fins de monitoramento de processo são definidos uma faixa específica de níveis de operação aceitáveis para o processo, sendo apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 - Limites de nível dos tanques em %

| | LIC [%] | LM [%] | LSC [%] |
|---------------------------|---------|--------|---------|
| Tanque GLQ | >70% | 80% | <95% |
| Tanque de filtrado | >50% | 70% | <97% |

Fonte: Próprio autor, 2022

Legenda:

LIC = Limite inferior de controle

LM = Limite médio de controle

LSC = Limite superior de controle

Baseado na visão de Ramos (1997), as cartas de controle são ferramentas que auxiliam no monitoramento de processos ao longo do tempo através de gráficos que ajudam identificar variações significativas e na tomada de soluções.

Assim, os níveis do tanque foram monitorados diariamente, feito o tratamento de dados, registrado a média diária do nível do tanque e avaliados. Posteriormente, foi possível através da ferramenta Excel, plotar uma carta de controle detalhada, representando graficamente as variações do nível do tanque antes e durante o teste. Essa visualização é fundamental para avaliar desvios e tendências, como demonstrado nas Figuras 26, 27, 28 e 29.

Figura 26 – Carta de controle de nível do **tanque de GLQ** durante o teste com produto B

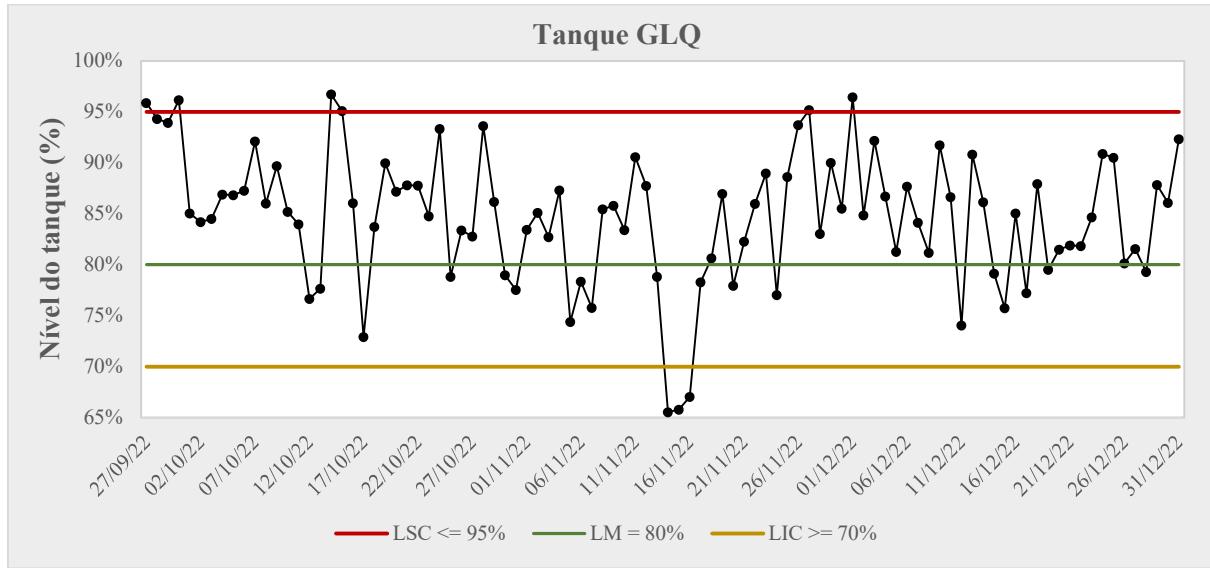


Figura 27 – Carta de controle de nível do tanque de **filtrado 1** durante o teste com produto B

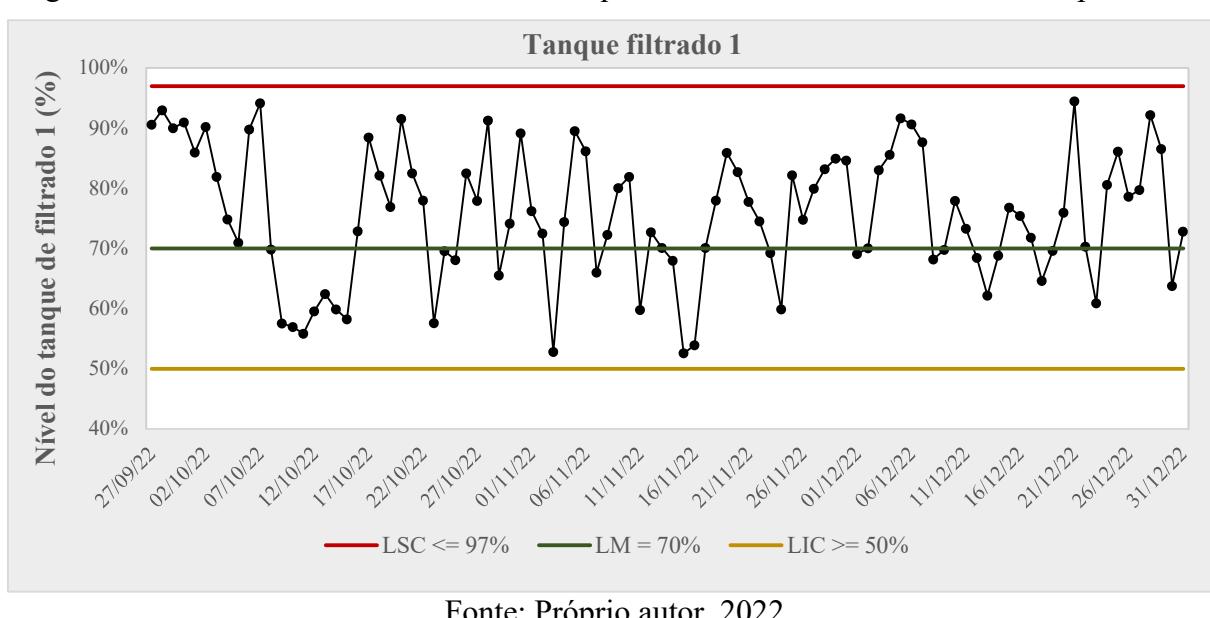


Figura 28 – Carta de controle de nível do tanque de **filtrado 2** durante o teste com produto B

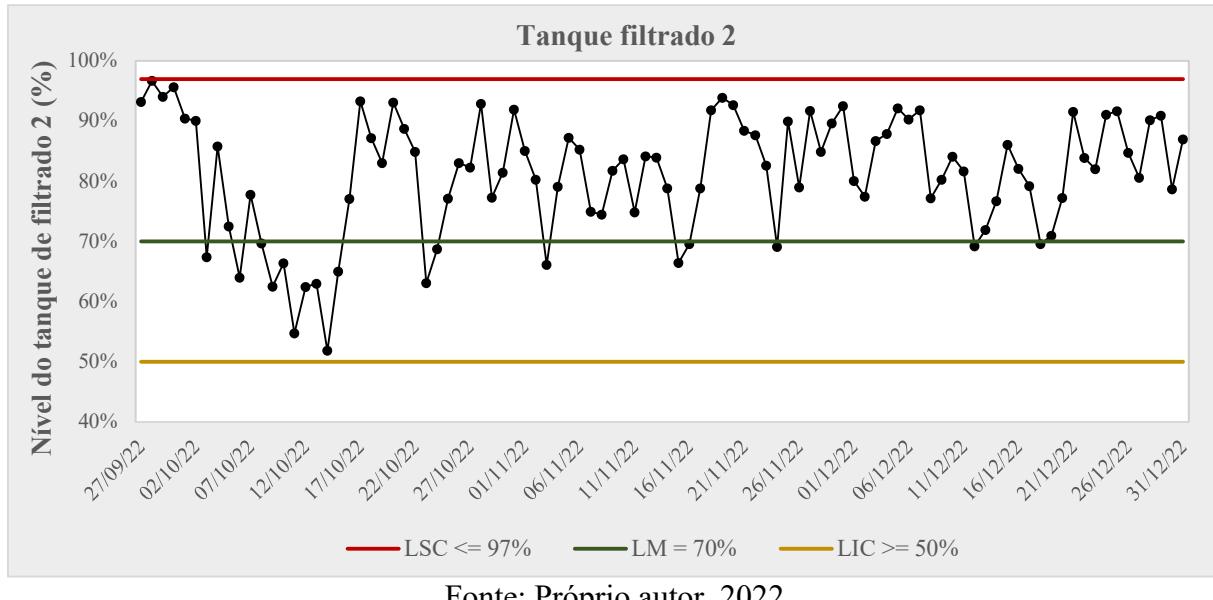
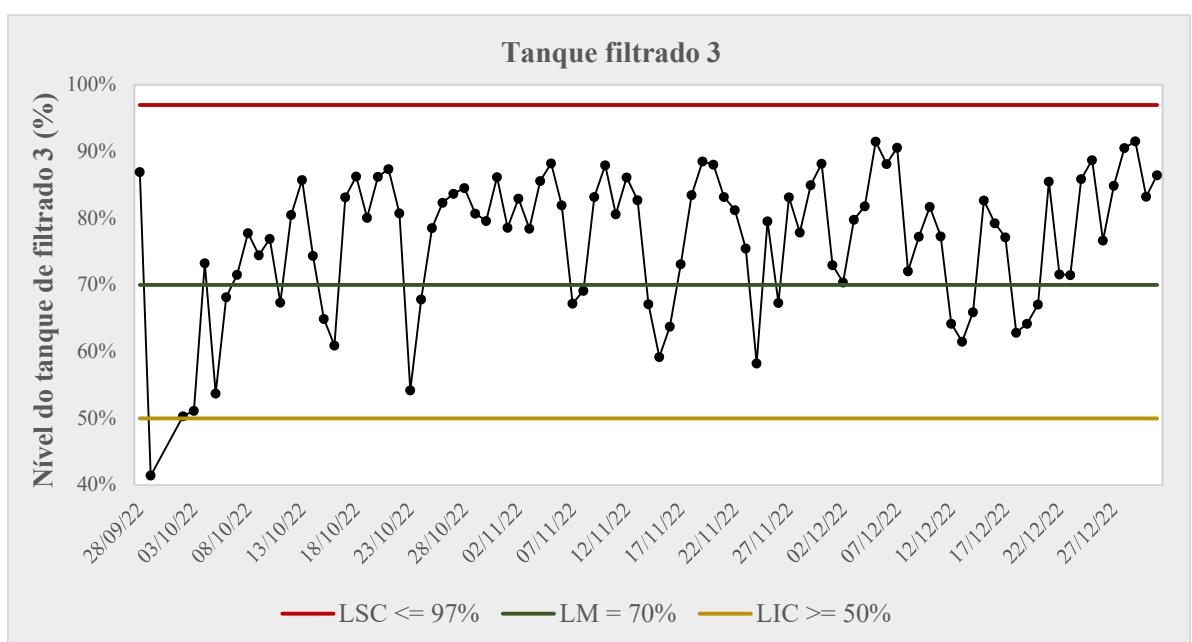


Figura 29 – Carta de controle de nível do tanque de **filtrado 3** durante o teste com produto B



Com a carta de controle foi possível observar a variação do nível dos tanques de GLQ e os tanques de filtrado, comparando-se com os limites estabelecidos pelo processo.

Pela avaliação, a conclusão foi que maior parte dos resultados se manteve dentro dos limites inferiores e superiores determinados. Dessa forma, essa consistência reflete um controle eficaz do nível do tanque, indicando que o sistema operou dentro dos parâmetros aceitáveis durante o teste do produto B, não impactando na eficiência do processo.

5.2.4 Análise qualitativa de presença de espumas nos tanques da precipitação

As espumas podem causar um grande impacto negativo no aumento do nível dos tanques. Manter as espumas sob controle, com a dosagem adequada do antiespumante contribui para estabilidade do processo, evitando flutuações inesperadas no nível do tanque, o que pode ser causado por oscilações na formação da espuma. Além disso, a presença de espumas pode diminuir ainda mais a velocidade de sedimentação dos sólidos finos de hidrato, aumentando o tempo na zona clarificada dos espessadores e contribuindo no arraste de sólidos pelo overflow e no impacto da qualidade do licor usado.

Nessa perspectiva, avaliou-se visualmente a presença da espuma tanto nas calhas do tanque de GLQ em que foi dosado o produto, quanto na zona superior e nas caixas de transbordo dos espessadores.

- Durante dosagem do produto A**

Os níveis de espuma foram avaliados ainda na aplicação do produto A na janela de alimentação, onde é possível ver a zona clarificada (Figura 30.a)) e nas caixas de transbordo dos 4 tanques de espessamento em operação (Figura 30.b)).

Figura 30 – a) Espumas na zona superior dos espessadores; b) Caixa de transbordo dos espessadores



Fonte: Próprio autor, 2022

- **Durante a dosagem do produto B**

Foram avaliados durante o teste de aplicação do produto B nas calhas de transbordo do tanque em que o produto foi dosado (Figura 31).

Figura 31 – Registros de espumas na calha de transbordo do tanque



Fonte: Próprio autor, 2022

As imagens capturadas fornecem uma avaliação visual do controle da espuma em diferentes tanques do processo em que a espuma sofre maiores influências. No primeiro caso, com a dosagem do produto A, observou-se claramente na janela da alimentação do espessador uma quantidade de espuma presente e, nas caixas de transbordo de um dos tanques de espessamento a presença de obstruções que pode ter sido consequência das espumas. Por outro lado, com a dosagem do produto B, observou-se uma diminuição no volume de espuma, evidenciando, mesmo de forma qualitativa, sua capacidade superior de controlar melhor a formação excessiva de espuma nos tanques.

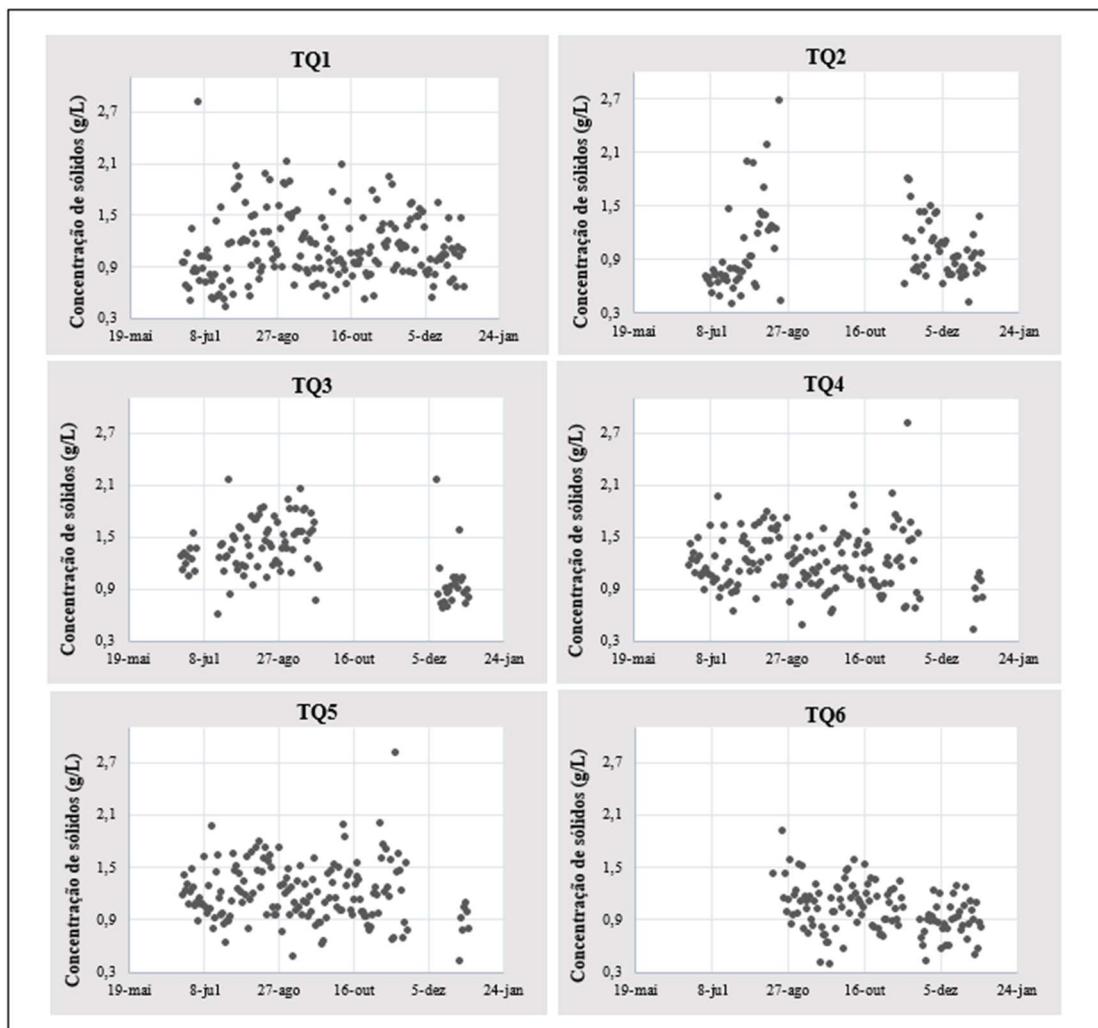
5.2.5 Concentração de sólidos no overflow dos espessadores

Para análise estatística da concentração de sólidos antes e durante o teste, coletou-se dados de aproximadamente 6 meses, sendo os 3 primeiros meses durante o emprego do produto A e os 3 últimos meses correspondendo ao período de avaliação do novo produto B. Após o tratamento de dados, totalizaram-se 192 dados, sendo 96 para cada período de análise.

De acordo com Martins e Ponte (2010), o tratamento de dados é crucial para a confiabilidade das conclusões estatísticas, pois envolve a remoção de valores discrepantes e que estejam fora da curva, a fim de preservar a integridade do conjunto de dados coletados.

Assim, o tratamento de dados levou em consideração um intervalo específico de valores de concentração, considerados aceitáveis para o processo: LL (*Low Limit*) = 0,3 g/L e HL (*High Limit*) = 3,0 g/L. Além disso, o *status* de funcionamento dos espessadores foi uma condicional para a remoção de dados associados a períodos de inatividade (parado=0 e operando=1), dando maior precisão e relevância aos dados estatísticos. A Figura 32 mostra os dados das concentrações de sólidos na corrente de overflow após a filtragem de dados.

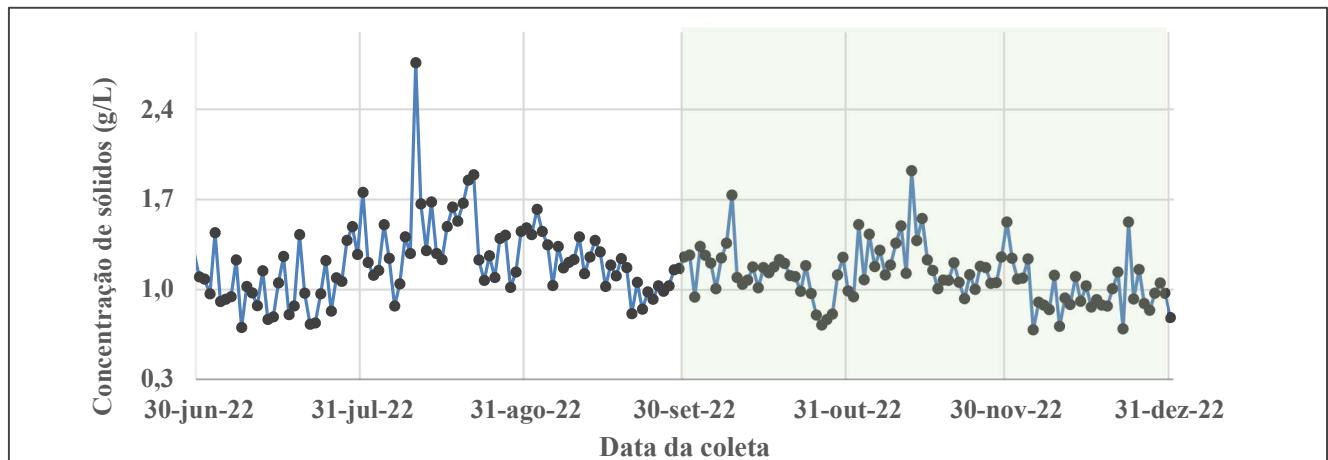
Figura 32 – Dados de concentrações de sólidos (g/L) na corrente de overflow dos espessadores



Fonte: Próprio autor, 2022

A Figura 33 apresenta a concentração média diária de sólidos na corrente de overflow dos espessadores durante o período de avaliação dos antiespumantes (junho a setembro, produto A e outubro a dezembro, produto B).

Figura 33 – Média diária das concentrações de sólidos (g/L) no overflow



Fonte: Próprio autor, 2022

A Tabela 7 mostra os dados estatísticos obtidos a partir da ferramenta *Data Analysis* do Excel, com as principais informações dos dados coletados.

Tabela 7 – Descrições Estatísticas da variação da concentração de sólidos (g/L)

| | Produto A | Produto B |
|----------------|-----------|-----------|
| Média | 1,20 | 1,09 |
| Erro padrão | 0,03 | 0,02 |
| Mediana | 1,16 | 1,08 |
| Modo | 0,80 | 1,00 |
| Desvio padrão | 0,32 | 0,21 |
| Variância | 0,10 | 0,05 |
| Curtose | 9,51 | 2,16 |
| Assimetria | 2,11 | 0,91 |
| Range | 2,30 | 1,24 |
| Mínimo | 0,7 | 0,7 |
| Máximo | 3,0 | 1,9 |
| Somatório | 115 | 104 |
| Contagem dados | 96 | 96 |

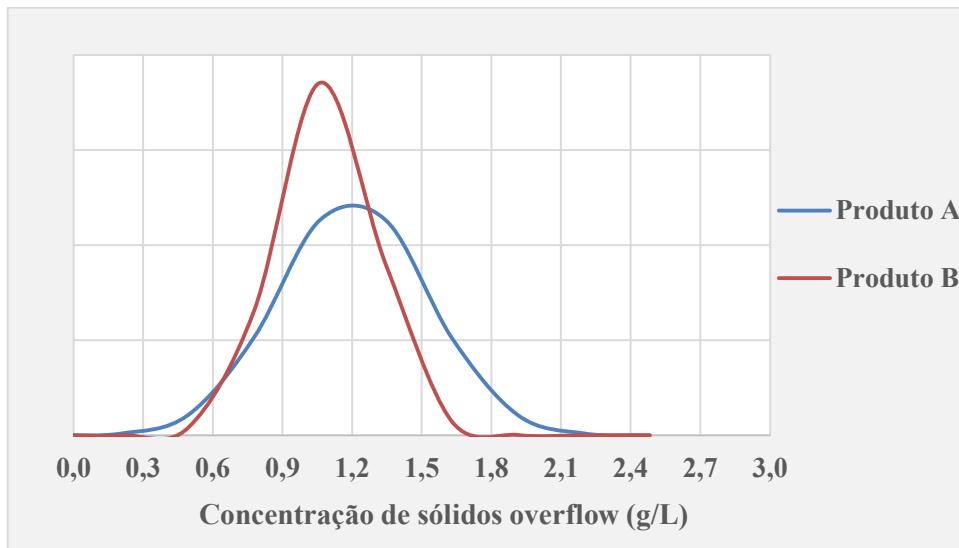
Fonte: Próprio Autor (2023)

Baseado nos resultados da Tabela 7, a descrição estatística da concentração de sólidos no overflow quando da aplicação dos produtos A e B mostram algumas diferenças. A média de concentração de sólidos pelo overflow dos espessadores é levemente mais alta para o produto A, com 1,20 g/L, em comparação com o produto B, 1,09 g/L.

Nota-se, ainda, que o produto A tem uma dispersão maior em torno da média do que o produto B, indicado pelo erro padrão, variância e range mais elevados.

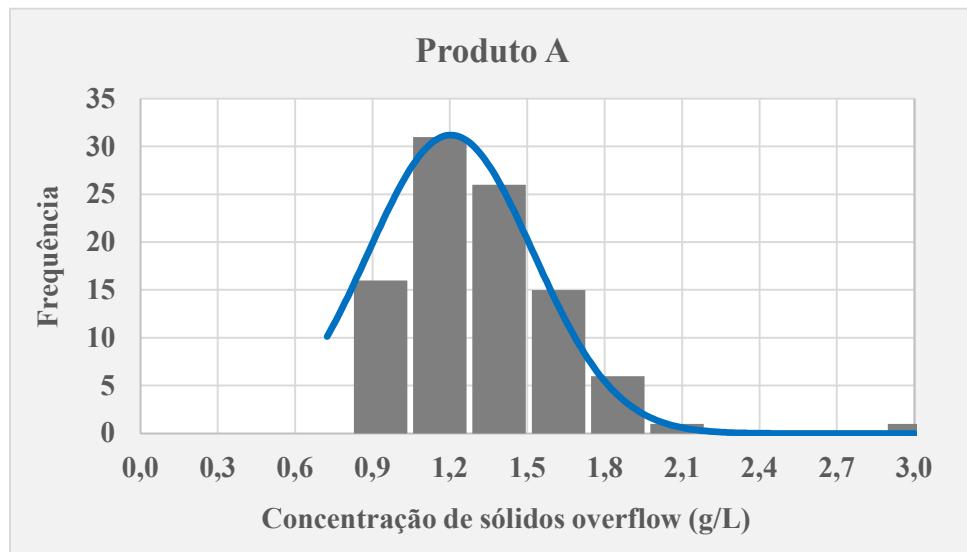
De acordo com Sousa (2019), a variabilidade dos dados entre duas amostras pode ser visualizada e compreendida com clareza através da curva de distribuição normal, pois ao examinar a curva, é possível observar a frequência com que os valores ocorrem, especialmente em torno da média, além de entender a dispersão dos dados ao redor dessa média. Sob essa perspectiva, a curva da distribuição normal (Figura 34) foi construída a partir da média e desvio padrão dos dados das concentrações de sólido no overflow apresentados na Tabela 7. Podendo ainda ser melhor visualizada quando sobreposta ao histograma para comparar visualmente se os dados seguem o padrão da curva (Figuras 35 e 36).

Figura 34 – Curva da Distribuição Normal



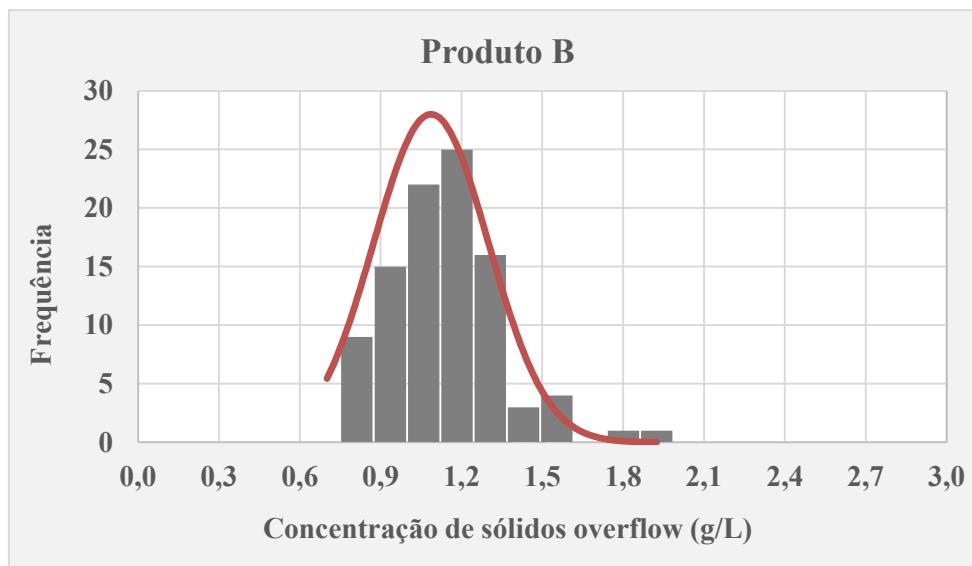
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 35 – Frequência em que os valores ocorrem para o Produto A



Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 36 – Frequência em que os valores ocorrem para o Produto B



Fonte: Próprio autor, 2022

Ao se analisar a distribuição dos dados concluiu-se que, de fato, as concentrações de sólidos (g/L) com o produto A ficaram mais dispersos e se agruparam mais no valores entre 1,1 e 1,4 g/L. Mas, durante o teste do produto B, é possível notar menor dispersão e maior agrupamento nos valores entre 0,9 e 1,2 g/L, se aproximando mais da média e do limite superior de 1,0 g/L de concentração definido pelo processo, refletindo menos variações nos resultados.

Esses dados mostram ainda que o produto A, em geral, contribuiu para uma média de concentração de sólidos de overflow dos espessadores mais alta com uma variabilidade maior em comparação com o produto B.

De acordo com a visão do Economista e Analista de Dados, Nagão (2022), o teste t de Student é uma ferramenta fundamental na análise estatística desenvolvida pelo William Sealy Gosset, conhecido como Student, a partir da necessidade de lidar com amostras pequenas, a fim de estimar a precisão das médias em torno da distribuição dos dados. Além disso, de acordo com os autores Cano-Corres, Sánchez e Fuentes (2012), o tamanho do efeito da variância por Cohen's D ajuda a interpretar a magnitude dessa diferença. Cohen, (1988), propôs uma escala ordinal para determinação do tamanho do efeito:

$d < 0,20 \rightarrow$ diferença muito pequena

$d = [0,20 - 0,49] \rightarrow$ diferença pequena

$d = [0,50 - 0,79] \rightarrow$ diferença mediana

$d > 0,80 \rightarrow$ diferença muito grande

Nessa perspectiva, a análise foi ampliada realizando o teste t (Valor-P) assumindo variâncias iguais ao nível de significância $p < 0,05$, e a significância desses valores baseados em Cohen. Os dados foram obtidos pela ferramenta *Data Analysis* do Excel, a partir do número de dados, média, desvio padrão e desvio padrão combinado para duas amostras, como mostram as Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Resultado estatístico a partir do teste t Student

| | Nº de dados | Média | DP | DP Combinado | Valor-P |
|------------------|-------------|-------|-----|--------------|---------|
| Produto A | 96 | 1,09 | 0,2 | 0,3 | 0,0034 |
| Produto B | 96 | 1,20 | 0,3 | | |

Fonte: Próprio autor, 2022

Tabela 9 – Tamanho do efeito de variância

| | TDE (d) | IC 95% | Interpretação |
|------------------|---------|---------------|-------------------|
| Cohen's D | 0,43 | (0,11 – 0,68) | Pequena diferença |

Fonte: Próprio autor, 2022

Legenda:

DP = Desvio Padrão

IC = Intervalo de Confiança

TDE = Tamanho do Efeito

Avaliando o resultado de p para o test t de Student de 0,0034, valor $< 0,05$, e um tamanho do efeito de Cohen's D de 0,43, sugere-se que há uma pequena diferença estatisticamente significativa entre os produtos A e B. No entanto, em se tratando de produção, ainda sim é uma diferença relevante, uma vez que um ganho de 0,1 g/L em 24 meses, convertendo hidrato em alumina equivale 2,14 toneladas por dia de produção, um ganho de aproximadamente 800 toneladas por ano.

5.2.6 Concentração de sólidos no tanque de filtrado

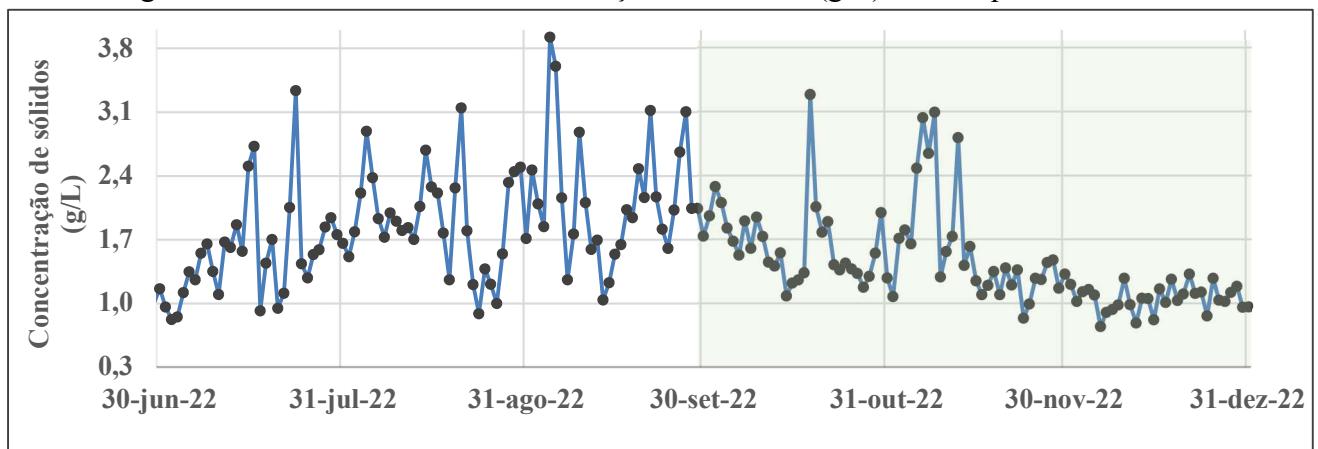
Por fim, a avaliação seguiu-se para os tanques de filtrado, onde também foi dosado o antiespumante B. Estes tanques também constituem o processo da classificação da área da precipitação e são responsáveis pela estocagem do licor usado, provenientes do overflow dos espessadores e dos filtros de semente de hidrato, onde também ocorre o processo de separação sólido-líquido com a finalidade de filtrar o máximo possível de hidrato e gerar mais licor usado, que retornará para área da digestão completando seu circuito.

Na área da precipitação operam 3 tanques simultaneamente, os quais foram denominados com os seguinte nomes fictícios: filtrado 1, filtrado 2 e filtrado 3.

Assim como para o tanque de GLQ, foram coletados dados dos 6 meses, sendo, 3 meses utilizando o produto A e 3 meses de avaliação do novo produto B. Após o tratamento de dados, totalizaram-se 192 dados, sendo 96 para cada período de análise.

O tratamento de dados levou em consideração um intervalo específico de valores de concentração LL (*Low Limit*) = 0,3 g/L e HL (*High Limit*) = 4,0 g/L, esses tanques a concentração máxima considerados aceitáveis para o processo é 1,3 g/L. Além disso, o *status* de funcionamento dos 3 tanques também foi uma condicional para a remoção de dados associados a períodos de inatividade (parado=0 e operando=1). A Figura 37, mostra os dados das concentrações médias diárias de sólidos no filtrado após o tratamento de dados durante o período de avaliação dos antiespumantes (junho a setembro, produto A e outubro a dezembro, produto B).

Figura 37 – Média diária das concentrações de sólidos (g/L) dos tanques de filtrado



Fonte: Próprio autor, 2022

A Tabela 10 mostra os dados estatísticos obtidos a partir da ferramenta *Data Analysis* do Excel, com as principais informações dos dados coletados.

Tabela 10 – Descrições Estatísticas da variação da concentração de sólidos (g/L) no filtrado

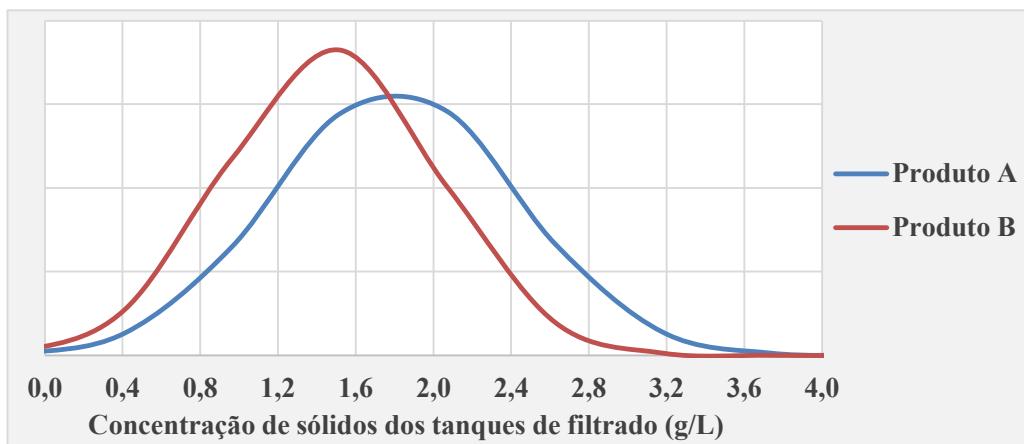
| | Produto A | Produto B |
|----------------|-----------|-----------|
| Média | 1,80 | 1,46 |
| Erro padrão | 0,06 | 0,05 |
| Mediana | 1,71 | 1,31 |
| Desvio padrão | 0,62 | 0,53 |
| Variância | 0,39 | 0,29 |
| Curtose | 1,09 | 2,54 |
| Assimetria | 0,92 | 1,58 |
| Range | 3,11 | 2,54 |
| Mínimo | 0,81 | 0,75 |
| Máximo | 3,92 | 3,29 |
| Somatório | 173 | 140 |
| Contagem dados | 96 | 96 |

Fonte: Próprio autor, 2022

Conforme os dados da Tabela 1, a descrição estatística da concentração de sólidos no filtrado quando da aplicação dos antiespumantes A e B também evidenciam diferenças significativas. A média de concentração de sólidos nos tanques de filtrado foi mais alta quando da aplicação do produto A com 1,80 g/L, em comparação com o produto B, 1,46 g/L. Nota-se ainda, que o produto A tem uma dispersão maior em torno da média do que o produto B, indicado pelo erro padrão, variância e range mais elevados.

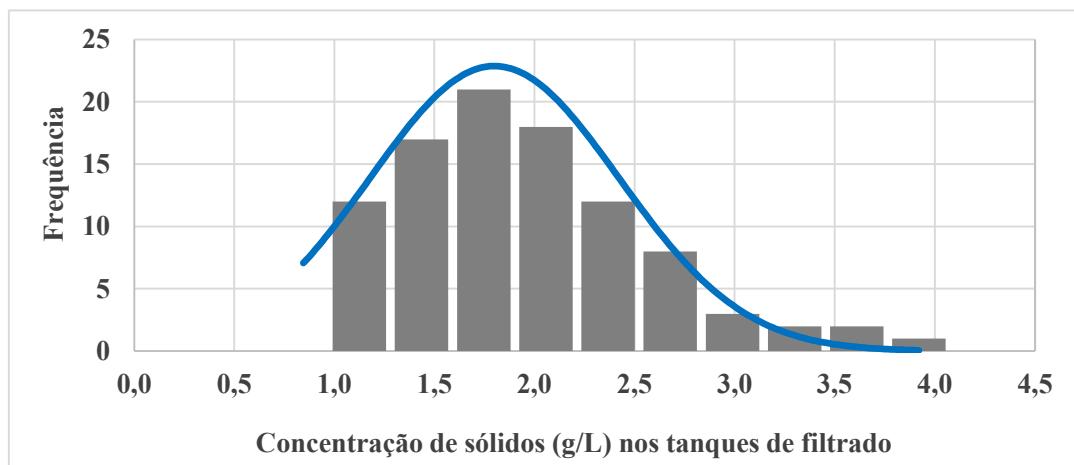
Essa variabilidade dos dados pode ser visualizada através da curva de distribuição normal para os dois produtos, como mostra a Figura 38, podendo ainda ser melhor visualizada quando sobreposta ao histograma para comparar visualmente se os dados seguem o padrão da curva (Figuras 39 e 40).

Figura 38 – Curva da Distribuição Normal para sólidos dos tanques de filtrado



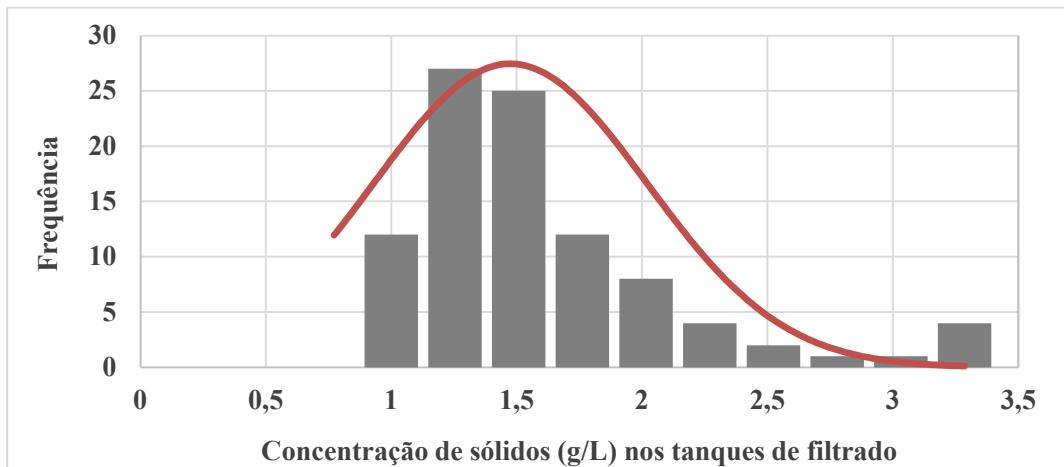
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 39 – Frequência em que os valores ocorrem para o Produto A



Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 40 – Frequência em que os valores ocorrem para o Produto B



Fonte: Próprio autor, 2022

Analizando as Figuras 38, 39 e 40, conclui-se que, as concentrações de sólidos (g/L) com o produto A ficaram mais dispersos e se agruparam mais nos valores entre 1,5 e 2,0 g/L. Durante o teste do produto B, é possível notar menor dispersão e maior agrupamento nos valores entre 1,3 e 1,5g/L.

Esses dados revelam que o produto B, assim como contribuiu para redução de sólidos dos tanques de GLQ, também contribui para redução de sólidos nos tanques de filtrado, uma vez que os valores se aproximaram mais da média e do limite superior de 1,3g/L de concentração máxima definida pelo processo, refletindo em menores variações nos resultados.

Ampliando esta análise por meio da realização do teste t (Valor-P) assumindo variâncias iguais ao nível de significância $p < 0,05$ e a significância desses valores baseados em Cohen, obtemos os dados apresentados nas Tabelas 11 e 12 por meio da aplicação da ferramenta *Data Analysis* do Excel.

Tabela 11 – Resultado estatístico a partir do teste t Student

| | Nº de dados | Média | DP | DP Combinado | Valor-P |
|------------------|-------------|-------|------|--------------|---------|
| Produto A | 96 | 1,47 | 0,54 | 0,6 | 0,0000 |
| Produto B | 96 | 1,80 | 0,62 | | |

Fonte: Próprio autor, 2022

Tabela 12 – Tamanho do efeito de variância

| | TDE | IC 95% | Interpretação |
|------------------|-----|-------------|-----------------|
| Cohen's D | 0,6 | (0,27 0,84) | Média diferença |

Fonte: Próprio autor, 2022

Legenda:

DP = Desvio Padrão

IC = Intervalo de Confiança

TDE = Tamanho do Efeito

Encontrando resultado de p para o test t de Student inferior à 0,01, e um tamanho do efeito de Cohen's D de 0,6, sugere-se que houve uma média diferença estatisticamente significativa entre os produtos A e B para os tanques de filtrado. O que confirma maior vantagem no produto B, em relação ao produto A.

5.2.7 Impactos financeiros

Para análise dos impactos financeiros, utilizou-se o consumo médio do produto A durante quatro meses (janeiro a abril de 2022, conforme dados da Tabela 13), totalizando uma média de aproximadamente 6258 kg de antiespumante por mês. Para o produto B, teve-se um consumo médio de 5281 kg de antiespumante por mês durante o período de avaliação

Tabela 13 – Consumo médio de antiespumante

| Consumo médio | | | | | | |
|---------------|----|------|------|------|------|-------------|
| | | JAN | FEV | MAR | ABR | MÉDIA |
| Produto A | Kg | 7301 | 6258 | 5215 | 6258 | 6258 |

Considerando-se o custo por quilo de cada produto pode-se avaliar o custo médio mensal destes produtos e constatou-se uma economia líquida mensal de R\$ 18.237,40 no caso do emprego do produto B, conforme dados na Tabelas 14, o que levaria a uma economia anual de R\$ 218.848,80.

Tabela 14 – Custo médio mensal e economia (mensal e anual)

| Custo médio mensal | |
|------------------------|-----------------------|
| Produto A | 14.4 R\$/Kg |
| Produto B | 13.8 R\$/Kg |
| Produto A | R\$ 90.115,20 |
| Produto B | R\$ 72.887,80 |
| Economia mensal | R\$ 18.237,40 |
| Economia anual | R\$ 218.848,80 |

Fonte: Próprio autor, 2022

5.3 ANÁLISE DE PERFORMANCE DOS FLOCULANTES 1 E 2 EM ESCALA LABORATORIAL

O floculante é um dos principais insumos utilizados na precipitação. Este atua na área superficial das sementes mais finas de modo a garantir o desempenho do processo de sedimentação na etapa de classificação das sementes de hidrato, que ocorre através da passagem da suspensão de hidrato por diferentes tipos de classificadores, nos quais, por efeito de velocidade da suspensão (licor + hidrato), separam o hidrato em duas faixas granulométricas. Dessa maneira, a performance do floculante utilizado influencia diretamente nas características do overflow dos espessadores, assegurando a concentração de sólidos do licor usado dentro da faixa ótima de operação.

O teste comparativo entre os produtos 1 e 2 foi realizado em duplicata em escala laboratorial para posterior teste na planta. O estudo foi conduzido conforme metodologia descrita no item 4.4 e os parâmetros analisados foram os seguintes:

- Concentração de sólidos no overflow entre a zona 1000 a 900ml (g/L);
- Velocidade de Sedimentação de 1000 a 500 ml (m/h);
- Tempo de escoamento em cone de imhoff (s)

A Tabela 15 resume os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 15 – Dados obtidos nos testes com os floculantes 1 e 2

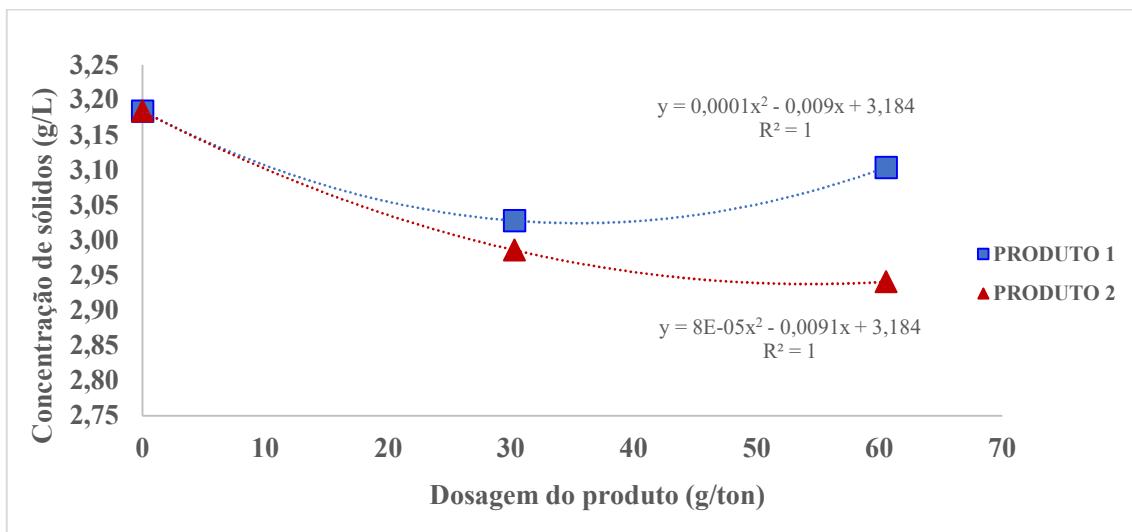
| Dosagem (g/ton) | Produto 1 | | | Produto 2 | | |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | Vel. Sed. (m/h) | T.E cone (s) | Sólidos (g/L) | Vel. Sed. (m/h) | T.E cone (s) | Sólidos (g/L) |
| 0 | 0,22 | 229 | 3,2 | 0,22 | 229 | 3,2 |
| 30 | 0,26 | 204 | 3,0 | 0,26 | 174 | 3,0 |
| 60 | 0,31 | 167 | 3,1 | 0,29 | 137 | 2,9 |

Fonte: Próprio autor, 2022

O teste foi realizado com concentração média de sólidos de 106 g/L (concentração de sólidos no overflow da ciclonagem no dia da amostragem).

No sentido de facilitar a comparação, apresentaremos os resultados obtidos nos testes na forma gráfica. Na Figura 41 estão apresentados os resultados da concentração de sólidos no overflow entre a zona 1000 a 900 ml do cone de imhoff. Um dos principais objetivos do processo de sedimentação dos espessadores é o rendimento do licor usado (SLQ) com a menor concentração de alumina possível. Assim, quanto menor a concentração de sólidos na zona clarificada, maior será a qualidade do licor usado que retornará para digestão, e mais eficiente será o processo de decantação auxiliado pelo floculante.

Figura 41 – Concentração de sólidos no overflow entre a zona 1000 a 900 ml (g/L)



Fonte: Próprio autor, 2022

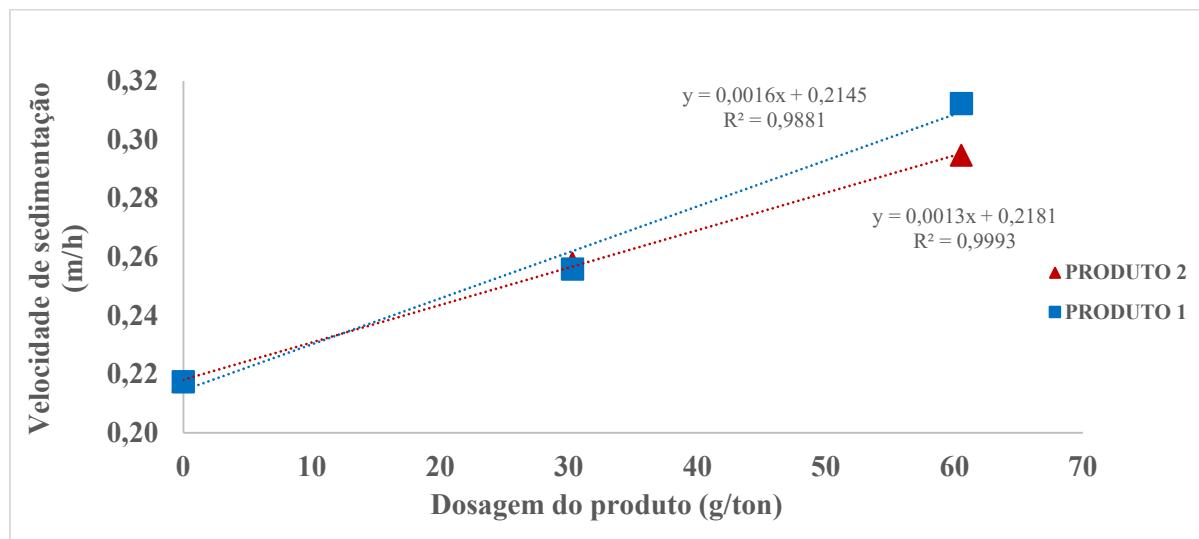
Avaliando-se o gráfico da Figura 41, nota-se que o produto 1 promove inicialmente uma redução na concentração de sólidos no overflow quando dosado na concentração de 30 g/ton, mas apresentou um resultado inesperado (aumento da concentração de sólidos) quando a sua concentração passou para 60 g/ton. Observa-se também que o produto 2, já utilizado na fábrica, apresentou uma menor concentração de sólidos na zona de overflow em toda a faixa do ensaio, com a mesma quantidade de floculante.

Na Figura 42, estão apresentados os resultados da velocidade de sedimentação entre a zona clarificada e a crítica de 1000 a 500 ml do cone de imhoff. Este parâmetro é fundamental a ser analisado, visto que um dos objetivos do processo de sedimentação dos espessadores é garantir a maior recuperação possível de hidrato que retornará para os precipitadores a fim de controlar a aglomeração do hidrato no processo de precipitação.

A sedimentação acontece quando a velocidade de sedimentação das partículas excede a velocidade de arraste. Assim, quanto mais rápido for a ação dos sólidos em sedimentar com o

uso do floculante, mais eficiente será o meu processo de decantamento e a garantia da qualidade do meu processo subsequente.

Figura 42 – Velocidade de Sedimentação de 1000 a 500 ml (m/h)



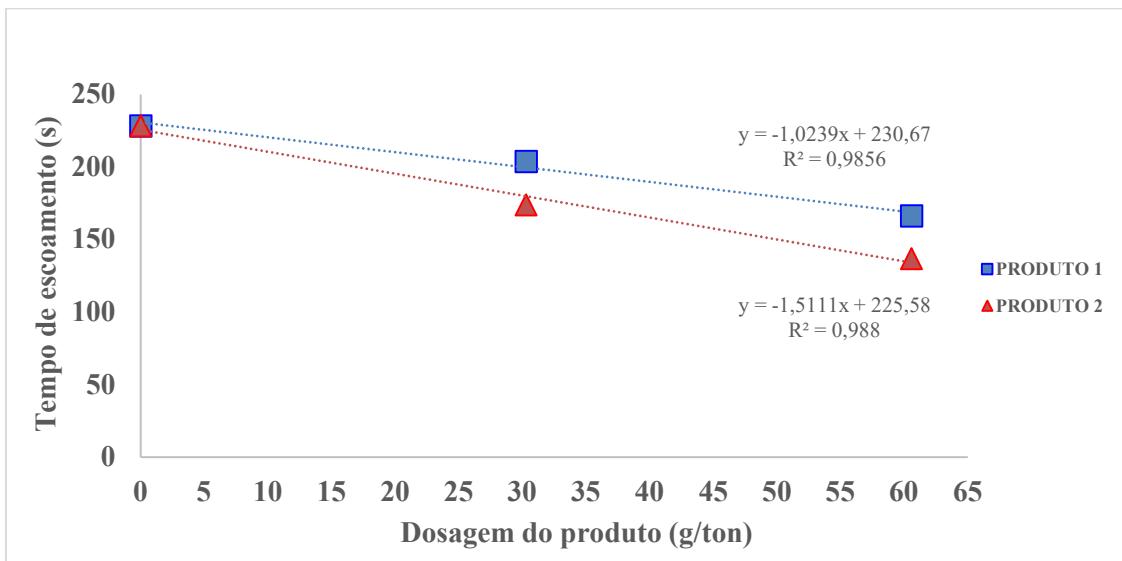
Fonte: Próprio autor, 2022

Os resultados apresentados na Figura 42 mostram que o aumento da concentração de floculante leva a um aumento na velocidade de sedimentação para os dois produtos analisados. Porém, quando a dosagem foi elevada para 60 g/ton, o produto 1 atingiu uma velocidade de sedimentação ligeiramente maior (0,31 m/h) comparando-se com o produto 2 (0,29 m/h). No entanto, esta maior velocidade de sedimentação na concentração mais elevada (60 g/ton) para o produto 1 não proporcionou uma concentração de sólidos no overflow mais baixa que a obtida com o produto 2, conforme observa-se na Figura 41.

Na Figura 43, estão apresentados os resultados do tempo de escoamento em cone de imhoff (em segundos). Além da velocidade de sedimentação, o tempo com que a partícula escoa pelo cone é uma simulação de como provavelmente acontecerá no cone de underflow dos espessadores. Logo, esse parâmetro é uma medida do tempo em que os sólidos se separam do fluido e se sedimentam por completo na zona crítica.

Quanto mais rápido for a ação dos sólidos em sedimentar no cone imhoff com o uso do floculante, mais eficiente será o processo de bombeamento desses sólidos.

Figura 43 – Tempo de escoamento em cone de imhoff (s)



Fonte: Próprio autor, 2022

O gráfico mostra que à medida que a dosagem do produto aumenta, o tempo de escoamento para ambos os produtos reduz. Observando os dados, verifica-se que o produto 2 obteve menores tempos de escoamento nas duas concentrações avaliadas.

Os resultados obtidos mostram que o floculante 1 apresentou performance levemente superior em apenas um dos três parâmetros avaliados (velocidade de sedimentação). O floculante atual (2) apresentou melhor performance na concentração de sólidos de overflow na dosagem ótima, sendo 8% superior ao floculante 1, e melhor desempenho na velocidade de escoamento no cone imhoff, 14% mais rápida em relação ao floculante 1.

No sentido de avaliarmos se os resultados obtidos a partir dos testes com os floculantes 1 e 2 apresentam diferenças de performances significativas, realizamos o teste t (Valor-P) assumindo variâncias iguais ao nível de significância $p < 0,05$ e a significância desses valores baseados em Cohen, obtendo os dados apresentados nas Tabelas 16 e 17 por meio da aplicação da ferramenta *Data Analysis* do Excel.

Tabela 16 – Resultado estatístico a partir do teste t Student

| | | Nº de dados | Média | DP | DPCombinado | Valor-P |
|----------------------------|--------|-------------|-------|------|-------------|---------|
| Sólidos (g/L) | Prod 1 | 3 | 3,1 | 0,10 | 0,13 | 0,6 |
| | Prod 2 | 3 | 3,0 | 0,15 | | |
| Velocid. Sed. (m/h) | Prod 1 | 3 | 0,3 | 0,05 | 0,04 | 0,8 |
| | Prod 2 | 3 | 0,3 | 0,04 | | |
| T.E Cone (s) | Prod 1 | 3 | 200 | 31 | 39 | 0,6 |
| | Prod 2 | 3 | 180 | 46 | | |

Fonte: Próprio autor, 2022

Tabela 17 – Tamanho do efeito de variância

| Cohen's D | TDE | IC 95% | Interpretação |
|----------------------------|------|------------|----------------|
| Sólidos (g/L) | <0,0 | (<0,0 1,1) | Diferença Nula |
| Velocid. Sed. (m/h) | <0,0 | (<0,0 1,4) | Diferença Nula |
| T.E Cone (s) | <0,0 | (<0,0 1,1) | Diferença Nula |

Fonte: Próprio autor, 2022

Legenda:

DP = Desvio Padrão

IC = Intervalo de Confiança

TDE = Tamanho do Efeito

Obtendo-se resultados de p para o test t de Student superior à 0,05, e um tamanho do efeito de Cohen's D inferior à 0,0, sugere-se que não houve uma diferença estatisticamente significativa entre os produtos 1 e 2.

5.3.1 Impactos financeiros

Para análise dos impactos financeiros, utilizou-se o consumo médio de floculante na empresa no período de 1 ano (365 dias), totalizando aproximadamente 231.045 kg de floculante. A comparação dos preços entre os produtos mostrou que o floculante proposto para teste (floculante 1) é 33% mais caro em relação ao floculante atualmente utilizado na etapa da classificação. A análise de custo foi calculado a partir dos preços por quilo de cada produto disponibilizados pelos fornecedores, como mostrado na Tabela 18.

Tabela 18 – Consumo e valor médio de floculante

| | | |
|-------------------------------------|---------------|---|
| Produção | 10.550 | ton. Al₂O₃ |
| Dosagem atual | 0,060 | kg/ton |
| Consumo de floculante | 231.045 | kg/ano |
| Preço por Kg: | | |
| Produto 2 (Atual) | 12,96 | R\$/kg |
| Produto 1 (Teste) | 17,30 | R\$/kg |
| Valor anual conforme consumo | | |
| Produto 2 (Atual) | 2.994.343 | R\$/ano |
| Produto 1 (Teste) | 3.997.078 | R\$/ano |
| Diferença de custo aproximado | 33% | Prod(1) > Prod(2) |

Fonte: Próprio autor, 2022

Assim, o produto 1 gerou uma diferença de custo de R\$1.002.735 a mais que o produto 2 utilizado para mesma dosagem. É importante salientar que o valor do aditivo só é um fator determinante para sua utilização quando não há diferença significativa na performance do processo. Para que haja eficiência da utilização do produto proposto, é necessário redução de sólidos no overflow de pelo menos 10%, ou seja, de 0,1 g/L de sólidos no licor usado, o que gera um ganho em produção de 11 ton/dia. Assim, a partir dos testes laboratoriais e dos resultados obtidos, não apresentando diferença significativa na performance do processo, não teríamos vantagem em utilizar o produto alternativo na fábrica.

6 CONCLUSÃO

As metodologias adotadas e as análises estatísticas em torno do processo permitem dizer que os objetivos do trabalho foram alcançados com êxito.

Em laboratório foi possível realizar os testes de antiespumantes e floculantes a fim de otimizar o uso desses insumos para melhoria contínua de processos relativo a concentração de sólidos no overflow dos tanques de espessamento de hidrato.

Avaliando-se todas as variáveis de processos aqui ponderadas, os resultados obtidos dos testes de antiespumante em laboratório comprovaram a eficiência do produto B e atestaram performance superior ao produto A, uma média de 6 vezes mais eficiente em escala laboratorial. Os testes em escala industrial mostraram que o antiespumante testado, B, apresentou boa performance frente ao antiespumante atualmente utilizado em planta, A, comprovado a partir de alterações significativas de performance entre os produtos testados em dosagens menores. Comparado os impactos financeiros entre os produtos, comprehende-se uma ótima vantagem lucrativo anual no produto B testado.

Os resultados obtidos dos testes em laboratório dos produtos 1 e 2 de floculantes mostraram que o produto atual utilizado na planta (2) apresentou performance semelhante ao floculante alternativo (1) quando testado sob condições laboratoriais. Cabe ressaltar que as análises foram realizadas em duplicata, e a diferença de valores encontrada nas avaliações dos parâmetros acima ficam dentro do desvio padrão das análises realizadas e da variabilidade do experimento.

7 REFERÊNCIAS

ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. **Bauxita no Brasil Mineração Responsável e Competitividade.** São Paulo, 2017. Disponível em: Acesso em: 12 de dezembro de 2023.

ALVES, Álvaro Antônio de Moraes, 1958 - **Extração de alumina - uma avaliação dos parâmetros influentes** /Álvaro Antônio de Moraes Alves.- 2017.

ANDREW, R. Hind, SURESH, K. Bhargava, STEPHEN, C. Grocott. **The surface chemistry of Bayer process solids: a review, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.** Volume 146, Issues 1–3. 1999. Pages 359-374, ISSN 0927-7757.

BARCARO, D. B. **Avaliação da eficiência da substituição de um aditivo antiespumante em uma dispersão polimérica acrílica adesiva base água.** – Lorena, 2018. 43 p.

Bell, Terence. "Aluminum Properties, Characteristics, and Applications." ThoughtCo, Oct. 29, 2020.

BORTOLETO, D. A.; CAMARGOS, M. A.; DAVO, J. B. **APLICAÇÃO DE FLOCULANTES EM PÓ PARA SEDIMENTAÇÃO DO RESÍDUO BAYER NA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO HOLOS.** vol. 6, 2017, pp. 217-223. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Natal, Brasil.

Cano-Corres R, Sánchez-Álvarez J, Fuentes-Arderiu X. **The Effect Size: Beyond Statistical Significance.** EJIFCC. 2012 Apr 4;23(1):19-23. PMID: 27683404; PMCID: PMC4975211.

CARNEIROR, S. S. F., HALLA, D. L., FRANCO, T. T., JÚNIOR, R. S., DUCK, A. R. K. **Aplicação de controle avançado de processos no aquecimento de licor cáustico na votorantim metais-CBA.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016

Cohen J. **Statistical power analysis for the behavioural sciences.** 2nd ed. Hillsdale NY: Lawrence Erlbaum Associates; 1988.

CONSTANTINO, V. R. L; ARAKI, K; SILVA, D. O; OLIVEIRA, W. - **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático.** Química Nova. v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002.

CHANDLER, David L. **A superfície de captura de bolhas ajuda a eliminar a espuma.** Escritório de notícias do MIT. MIT News on campus and around the world. 2020.

DENHOND, R; HIRALAL, I; RIJKEBOER, A. Alumina yield in the Bayer process past, present and prospects. **Essential Readings in Light Metals.** Springer, Cham, 2016. P. 528-533.

DENKOV, N. D. **Mechanisms of Foam Destruction by Oil-Based Antifoams.** *Langmuir*, 20(22), p. 9463–9505, 2004. doi:10.1021/la049676o.

ESCOBAR, EDUARDO MARCHIONI. - **Determinação simultânea, em linha, da concentração de soda cáustica e de alumina em solução de aluminato de sódio do processo Bayer de produção de óxido de alumínio** – Dissertação (Mestrado em Química) - UNICAMP – 2004.

FREIRE, EMILY DOS ANJOS ROCHA. **Desenvolvimento de uma metodologia para medição de carga moedora em moinhos tubulares em uma refinaria de alumina.** 2019. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

HABASHI, F. Bayer's process for alumina production: a historical perspective. **Bulletin for the history**, v. 17, p. 1115, 1995.

JOSEPH, A.; ISAAC, J. S. **Real time implementation of model reference adaptive controller for a conical tank.** International Journal on theoretical and applied research in Mechanical Engineering, v. 2, n. 1, p. 57–62, 2013.

KIMMERLE F. M. - **Introduction to Bayer Process** - In Course Bayer Process – Barcarena - Alunorte, 2004.

LEAL, F. L. S. Tema 4: **Espumas e agentes espumantes**. Escola Politécnica da USP. 2010

MARTINS, Maria Eugénia Graça; PONTE, João Pedro. **Organização e tratamento de dados**. Lisboa: ME-DGIDC, 2010.

NAGÃO, Rafael Kenji. ZUP: **Teste T de Student: tome decisões com base em apenas uma amostra**. 2022.

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

RAMOS, A. W. **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a Serviço da Modernização da Empresa**. 2^a ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1997

RIBEIRO, M. J. P. M., & ABRANTES, J. C. C. (2001). **Moagem em moinho de bolas: Estudo de algumas variáveis e otimização energética do processo**. Cerâmica Industrial, 6(2), 7-11.

Soares, Ana Paula Martins; Almeida, Júlio; Bicalho, Fernando; Moura, Jonni; Sales, Rodrigo; Volavicius, Boris. **AVALIAÇÃO DA MOAGEM DA BAUXITA CONSIDERANDO DIFERENTES BLENDS DE MINÉRIO**. p. 65-75. In: *19º Simpósio de Mineração*, São Paulo, 2018. ISSN: 2594-357X , DOI 10.5151/2594-357X-31354

SAMPAIO, J. A., ANDRADE, M. C., DUTRA, A. J. B., **Bauxita**. Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2005

SILVA, R. R. **Operações de separação sólido-líquido**. Moodle UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Depto de Eng. Química e de Eng. De Alimentos. EQA 5313 – Turma 645 – Op. Unit. De Quantidade de Movimento. 2014.

SOUSA, Áurea. **O papel da distribuição normal na Estatística**. Correio dos Açores, 2019.

THE BAYER PROCESS – Section 4.8 Operational Report 1. EPA.ie. 2019. Disponível em: https://epawebapp.epa.ie/licences/lic_eDMS/090151b2806ec707.pdf. Acesso em: 13, dezembro, 2023.

TORRES, A. A. de O. Modelagem do procesos bayer utilizando o software comercial Aspen Plus. 2001. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.