



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**MARYNARA LUIZA BORGES**

**INFLUÊNCIA DOS REAGENTES AUXILIARES NA FILTRAÇÃO DO  
REJEITO FOSFÁTICO VISANDO O EMPILHAMENTO A SECO**

**ARAXÁ-MG  
2023**

**MARYNARA LUIZA BORGES**

**INFLUÊNCIA DOS REAGENTES AUXILIARES NA FILTRAÇÃO DO  
REJEITO FOSFÁTICO VISANDO O EMPILHAMENTO A SECO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Michelly dos Santos Oliveira

**ARAXÁ-MG**

**2023**

**MARYNARA LUIZA BORGES**

**INFLUÊNCIA DOS REAGENTES AUXILIARES NA FILTRAÇÃO DO  
REJEITO FOSFÁTICO VISANDO O EMPILHAMENTO A SECO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Data de Defesa: Araxá, 27 de junho de 2023.

---

Presidente e Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Michelly dos Santos Oliveira  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

---

Membro Titular: Prof. Dr. Natal Junio Pires  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

---

Membro Titular: Eng. Dr. Francisco Gregianin Testa  
Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)

*Dedico este trabalho aos meus pais, Vicente e Janice, que sempre me fizeram acreditar na realização dos meus sonhos e me apoiaram para que eu os fizesse acontecer. Ao meu companheiro de vida, Lázaro, por me incentivar ao longo da jornada. E aos meus irmãos, Mayara e Henrique, peças essenciais para esta conquista. A eles todo o meu amor e gratidão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à Deus, por me conceder a oportunidade da realização de mais um sonho. Por ser a minha base e o meu suporte, e por me proporcionar saúde e sabedoria para concluir essa etapa tão importante.

A minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Michelly dos Santos Oliveira, por todo apoio, atenção e disponibilidade. Pelas contribuições e ensinamentos compartilhados em toda a minha trajetória acadêmica, e por acreditar e me guiar na realização desse trabalho.

A minha família, por todo amor e incentivo, ao meu pai, Vicente, aos meus irmãos, Mayara e Henrique, e aos meus sobrinhos, Guilherme e Gabriel, que sempre estiveram ao meu lado durante a caminhada. De uma forma especial, agradeço a minha mãe, Janice, que sempre acreditou nos meus sonhos e fez de tudo para que eu pudesse realizá-los. Essa conquista é nossa! Te amo incondicionalmente.

Ao meu esposo, Lázaro, por todo amor, companheirismo e incentivo, por sempre acreditar na minha capacidade e por me motivar a dar sempre o meu melhor. Você faz parte dessa conquista!

Aos professores, por todos os conhecimentos repassados ao longo do curso, e por despertarem em mim, a certeza e o amor pela Engenharia de Minas. Agradeço, em especial, aos professores, Michelly, Natal e Francisco, aos quais tenho profunda admiração, vocês são verdadeiros exemplos, que com certeza irei levar para sempre em minha trajetória.

Por fim, agradeço aos meus amigos do curso Thaís, Natália, Geovanna e Sofia por toda cumplicidade e superação de desafios, e em especial ao meu grande amigo, Gabriel, pelo companheirismo, apoio e amizade.

*Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.*

*PROVÉRBIOS 16:3*

## RESUMO

Com o ascendente desenvolvimento de atividades no ramo da mineração e recentes eventos de rompimento de barragens, tornou-se necessário avaliar métodos alternativos, de disposição de rejeitos e de subprodutos gerados no beneficiamento mineral, às convencionais barragens de contenção de rejeitos. A filtração de tais resíduos consiste em uma medida mitigatória para este problema. Para otimizar a filtração, reagentes auxiliares de filtração são utilizados na etapa de separação sólido-líquido. Esses reagentes reduzem a tensão superficial na interface líquido/ar e, conseqüentemente, promovem um melhor desaguamento, aumentam a velocidade de filtração, a permeabilidade da torta e a Taxa Unitária de Filtração (TUF). Além disso, reduzem a umidade da torta e os custos de secagem. Com a possibilidade de filtração dos resíduos, métodos como a disposição de rejeitos grosseiros em pilhas de rejeitos desaguados e a disposição de rejeitos finos em pasta concentrada, passam a ser técnicas alternativas para substituição do método convencional. Tais métodos, apresentam uma estrutura com menor potencial de dano, demandam por menor área de instalação e propiciam maior recuperação de água. Em vista disso, este trabalho visa avaliar a adição de diferentes reagentes auxiliares na filtração do rejeito fosfático. Além disso, busca-se analisar a influência do tipo de reagente, pH e dosagem no desempenho da filtração do rejeito, visando o empilhamento a seco. Desse modo, testes em escala laboratorial foram realizados por meio do *leaf test* com alimentação por cima. Sendo esse o método de filtração universalmente utilizado para dimensionamento de filtros industriais. Dessa forma, espera-se que, a torta apresente uma umidade adequada para manter a estabilidade da pilha de rejeito filtrado (*dry stacking*), elevada taxa unitária de filtração e menor turbidez do clarificado. Sobretudo, presume-se que a aplicação de reagentes propicie maior eficiência ao processo quando comparado com o mesmo sem a adição de tais compostos auxiliares. A partir dos resultados obtidos concluiu-se que, os reagentes testados não alcançaram a umidade alvo para o empilhamento do rejeito fosfático, de 11,59%, em base úmida, conforme determinado pelo Ensaio de Proctor. Entretanto, o Magnafloc 351 e o Magnafloc 504, foram capazes de reduzir a umidade da torta, além de propiciarem elevadas TUF. Nesse sentido, destaca-se que, ao utilizar o Magnafloc 351, em pH 6 e dosagem de 30 g/t, obtêm-se uma melhor eficiência no processo de filtração do rejeito fosfático. Ademais, notou-se que a dosagem foi o fator que mais influenciou na umidade da torta e o pH o fator que mais impactou na Taxa Unitária de Filtração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rejeito, Fosfato, Filtração, Reagentes Auxiliares.

## ABSTRACT

With the rising development of activities in the mining industry and recent dam breakdowns, it became necessary to evaluate alternative methods, disposal of tailings and by-products generated in mineral processing, to conventional tailings containment dams. The filtering of such waste consists of a mitigation measure for this problem. To optimize filtration, auxiliary filter reagents are used in the solid-liquid separation step. These reagents reduce the surface tension at the liquid/air interface and, consequently, promote better dewatering, increase the filtration speed, cake permeability and filtration unit rate (TUF). In addition, they reduce cake moisture and drying costs. With the possibility of filtration of waste, methods such as disposal of coarse tailings in tailings piles drained and disposal of fine tailings in concentrated paste, become alternative techniques to replace the conventional method. Such methods have a structure with less damage potential, require a smaller installation area and provide greater water recovery. In view of this, this study aims to evaluate the addition of different auxiliary reagents in the filtration of phosphate tailings. In addition, we seek to analyze the influence of the type of reagent, pH and dosage in the performance of tailings filtration, aiming dry stacking. Thus, laboratory scale tests were performed by leaf test with feed over the top. This is the filtering method universally used for sizing industrial filters. Thus, it is expected that the cake presents adequate moisture to maintain the stability of the filtered tailings stack (dry stacking), high filtering unit rate and lower turbidity of the clarified. Above all, it is assumed that the application of reagents provides greater efficiency to the process when compared with the same without the addition of such auxiliary compounds. From the results obtained, it was concluded that the tested reagents did not reach the moisture target for stacking the phosphatic tailings, of 11.59%, on a wet base, as determined by the Proctor Test. However, Magnafloc 351 and Magnafloc 504 were able to reduce the cake moisture and provide high TUF. In this sense, it is noteworthy that the use of Magnafloc 351 at pH 6 and dosage of 30 g/t, obtain a better efficiency in the filtration process of phosphate waste. Moreover, it was noted that the dosage was the factor that most influenced the cake moisture and pH the factor that most impacted the filtration unit rate.

**KEYWORDS:** Tailings, Phosphate, Filtration, Auxiliary Reagents

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da Dupla Camada Elétrica em uma superfície mineral ...	19
Figura 2 – Mecanismo de floculação por pontes. ....	22
Figura 3 – Adsorção de um polímero catiônico em uma superfície com excesso de carga negativa.....	22
Figura 4 – Filtro de disco à vácuo. ....	25
Figura 5 - Comparativo: custos de filtragem dos rejeitos da ITMI VGR.....	26
Figura 6 - Primeira etapa do leaf test (formação da torta). ....	29
Figura 7 - Segunda etapa do leaf test (desaguamento da torta). ....	29
Figura 8 – Vista área da Barragem 6 (CBMM – Araxá/MG). ....	32
Figura 9 – Disposição de rejeitos em pilhas. ....	33
Figura 10 - Coagulação e floculação no processo de agregação e sedimentação das partículas.....	36
Figura 11 - Quarteamento do material. ....	37
Figura 12 - Pilha alongada. ....	38
Figura 13 – Peneiramento a úmido. ....	39
Figura 14 – Aparato experimental para realização do Ensaio de Proctor. ....	41
Figura 15 – Compactação do material com o soquete. ....	42
Figura 16 – Material compactado após 26 golpes.....	43
Figura 17 – Terceira camada de material compactada. ....	43
Figura 18 – Massa de rejeito compactado após a retirada de material excedente....	44
Figura 19 – Alíquotas de material compactado para determinação da massa seca. ....	45
Figura 20 – Massa úmida de rejeito compactado retirado do cilindro de Proctor.....	45
Figura 21 – Unidade Experimental de filtragem. ....	47
Figura 22 – Turbidez do filtrado.....	48
Figura 23 – Curva granulométrica obtida. ....	54
Figura 24 – Gráfico obtido por meio da curva de compactação. ....	56
Figura 25 - Não houve formação da torta ao utilizar o Flotisor RM 19400. ....	58
Figura 26 – Formação de flocos pelo mecanismo de Floculação por Pontes. ....	59
Figura 27 – Desempenho dos floculantes utilizados na filtração.....	60
Figura 28 – Desempenho dos reagentes mediante a condições distintas. ....	61
Figura 29 – Curva de desaguamento em diversas concentrações de floculante. ....	62

Figura 30 – Curva de desaguamento em diversas faixas de pH de coagulante. ....	62
Figura 31 – Gráfico dos efeitos principais para umidade da torta. ....	64
Figura 32 - Gráfico de Pareto para Umidade.....	65
Figura 33 – Gráfico de interações entre os fatores para umidade da torta. ....	66
Figura 34 - Gráfico dos efeitos principais para TUF. ....	67
Figura 35 – Formação de torta com maior umidade utilizando pH 9,5. ....	67
Figura 36 - Gráfico de Pareto para Taxa Unitária de Filtragem.....	68
Figura 37 – Gráfico de Interações entre os fatores para TUF. ....	69
Figura 38 - Parâmetros definidos e solução ideal para o processo de filtração. ....	69
Figura 39 - Otimização de resposta. ....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de filtração e modelos correspondentes.....	24
Tabela 2 – Fatores que influenciam no processo de filtração. ....	27
Tabela 3 – Aplicações do método de disposição de rejeitos filtrados. ....	34
Tabela 4 – Energias de Compactação. ....	44
Tabela 5 – Descrição dos reagentes sintéticos. ....	50
Tabela 6 – Matriz do Planejamento Fatorial 2 <sup>3</sup> .....	51
Tabela 7 – Planejamento Experimental 2 <sup>3</sup> . ....	52
Tabela 8 - Distribuição granulométrica após peneiramento a úmido.....	54
Tabela 9 - Resultados obtidos pelo método de picnometria a gás. ....	55
Tabela 10 – Variação do tempo de secagem da torta.....	57
Tabela 11 – Resultados obtidos para seleção de reagentes.....	58
Tabela 12 – Resultados obtidos no Planejamento Experimental. ....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CEFET/MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

$d_{50}$  - Tamanho em que 50% das partículas são passantes

$d_{80}$  - Tamanho em que 80% das partículas são passantes

DCE - Declaração de Condição de Estabilidade

DCE - Dupla Camada Elétrica

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

DPA - Dano Potencial Associado de Médio a Alto

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

ITMI VGR - Projeto de Itabiritos de Vargem Grande

LI - Licença de Instalação

MG - Minas Gerais

NBR - Norma Brasileira

PAEBM - Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração

PAM - Poliacrilamida

pH - Potencial hidrogeniônico

PSB - Plano de Segurança de Barragens

TUF - Taxa Unitária de Filtragem

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
<b>2.1. Separação Sólido-Líquido</b> .....	17
<b>2.2. Mecanismos de Agregação</b> .....	17
2.2.1. COAGULAÇÃO .....	19
2.2.1.1. <i>Teoria DLVO</i> .....	20
2.2.2. FLOCULAÇÃO .....	20
2.2.2.1. <i>Mecanismos de Floculação</i> .....	21
<b>2.3. Filtragem</b> .....	23
2.3.1. TIPOS DE FILTRAGEM .....	23
2.3.2. VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA FILTRAGEM .....	26
2.3.3. TESTES DE FILTRAGEM .....	28
<b>2.4. Reagentes Auxiliares de Filtragem</b> .....	30
2.4.1. FLOCULANTES.....	31
2.4.2. SURFACTANTES.....	31
2.4.3. COAGULANTES.....	32
2.4.4. MODULADORES DE pH .....	32
<b>2.5. Empilhamento de Rejeito Filtrado</b> .....	32
<b>2.6. Rejeito Fosfático</b> .....	35
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	37
<b>3.1. Preparação da amostra</b> .....	37
<b>3.2. Caracterização da amostra</b> .....	39
3.2.1. ANÁLISE QUÍMICA .....	39
3.2.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	39
3.2.3. DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS.....	40
3.2.4. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO .....	40

<b>3.3. Testes de filtração</b> .....	46
<b>3.4. Testes Exploratórios</b> .....	49
3.4.1. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM .....	49
3.4.2. REAGENTES .....	49
<b>3.5. Planejamento dos Ensaio e Análise Estatística de Experimentos Fatoriais 2<sup>k</sup></b> .....	50
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	53
<b>4.1. Caracterização da amostra</b> .....	53
4.1.1. ANÁLISE QUÍMICA .....	53
4.1.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	53
4.1.3. MASSA ESPECÍFICA.....	55
4.1.4. UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO .....	55
<b>4.2. Testes de Filtração</b> .....	56
4.2.1. TESTES EXPLORATÓRIOS .....	57
4.2.1.1. <i>Determinação do tempo de secagem</i> .....	57
4.2.1.2. <i>Seleção de Reagentes</i> .....	57
4.2.2. TESTES EFETIVOS.....	60
<b>4.3. Planejamento Fatorial a Dois Níveis</b> .....	63
4.3.1. UMIDADE DA TORTA .....	63
4.3.2. TAXA UNITÁRIA DE FILTRAGEM .....	66
<b>4.4. Viabilidade Econômica</b> .....	70
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	71
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

Consoante a Lei Federal nº 12.305/2010 – 02/08/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, rejeitos são:

resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis [...], não apresentam outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Nesse contexto, os rejeitos encontram-se constantemente presentes nas atividades mineiras, apresentam-se ao final do processo de beneficiamento da planta e, na maioria das vezes, na forma de polpa, como aponta Alves (2020). Além disso, a disposição de tal material ocorre, comumente, em barragens de contenção de rejeitos.

No entanto, posteriormente às rupturas das barragens de Fundão em Mariana (2015) e Barragem B1 em Brumadinho (2019), instaurou-se estado de alerta nos estados onde há maior concentração de minas no Brasil. Nesse sentido, os rejeitos da mineração têm sido uma questão evidente e constantemente discutida pela indústria mineral e pela sociedade. Conseqüentemente, o método convencional para disposição de rejeitos passou a ser questionado.

Diante disso, se tornou ainda mais difícil para as mineradoras conseguirem licenças para alteamentos e construção de barragens. Nesse sentido, em 2017, após o rompimento da barragem em Mariana, o DNPM publicou como complemento à lei federal nº 12334 de 2010, a obrigatoriedade de apresentação do Plano de Segurança de Barragem (PSB) acrescido do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), para estruturas classificadas com Dano Potencial Associado de Médio a Alto (DPA). Além disso, exigiu-se, a partir de então, a emissão semestral da Declaração de Condição de Estabilidade – DCE e Inspeções Quinzenais, conforme a portaria nº 70389 (DNPM, 2017).

Em vista disso, como alternativa às tradicionais barragens, as empresas passaram a buscar técnicas mais seguras, o empilhamento de rejeito filtrado é uma delas. A técnica conhecida como *dry stacking*, além de propiciar uma estrutura com menor potencial de dano, demanda por uma área menor de instalação. Nesse contexto, para realizar a filtração do rejeito utiliza-se reagentes auxiliares de filtração, já que eles influenciam em inúmeros parâmetros essenciais da etapa de separação sólido-líquido, tais como, umidade da torta, Taxa Unitária de Filtração (TUF) ou razão de filtração (massa seca/tempo/área de filtração) e porosidade da torta.

Consoante a Dias *et al.* (2004), os floculantes e surfactantes são os reagentes auxiliares mais comumente utilizados no processo de filtração. Os surfactantes são compostos que ascendem a velocidade de filtração e reduzem a tensão superficial na interface sólido-líquido. Enquanto que, os floculantes aumentam a permeabilidade da torta. Em vista disso, ao serem adicionados na polpa que será filtrada, espera-se obter uma torta livre de finos, sendo que a presença destes pode não só colmatar os poros da torta, como também propiciar o entupimento de meios filtrantes (CHAVES, 2013).

Com base nisso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar, por meio do *leaf test*, o desempenho de diferentes reagentes auxiliares de filtração, na filtração do rejeito fosfático. Dentre os objetivos específicos buscou-se identificar, através da análise estatística, o tipo de reagente, pH e dosagem, que promovessem menor teor de umidade, elevada TUF e menor turbidez do clarificado, visando o empilhamento a seco.

De modo geral, este trabalho foi dividido em cinco capítulos, sendo que o primeiro capítulo abordou a introdução e os objetivos do estudo realizado. No segundo capítulo apresentou-se as definições acerca dos mecanismos de agregação, os fundamentos que regem a separação sólido-líquido e a operação unitária de filtração, os auxiliares de filtração, e por fim, o rejeito fosfático. Subsequente a isso, o terceiro capítulo descreveu os procedimentos experimentais adotados para realização desse trabalho. Em sequência foram expostos os resultados obtidos e a discussão dos mesmos. Por fim, apresentou-se as conclusões acerca do trabalho desenvolvido.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esta seção tem como intuito dissertar conceitos e técnicas fundamentais abordadas na realização desse trabalho.

### **2.1. Separação Sólido-Líquido**

Com a crescente atuação do setor mineral, é imprescindível a recuperação e recirculação de água no processamento de minérios. Conforme Amarante (2002), as técnicas de filtração e espessamento são etapas fundamentais para separação sólido-líquido mediante a indústria mineral, e há um bom tempo vêm se apresentando como alternativas para o desaguamento de rejeitos. Dessa forma, é comum realizar tal processo de separação combinando espessamento e filtração, visto que no espessamento obtém-se polpas com porcentagens de sólidos em torno de 60% (MARTINS, 2017). Entretanto, se o objetivo é obter polpas com porcentagens de sólidos mais elevadas, deve-se realizar a filtração do material pós-espessamento (LUZ *et al.*, 2018).

Além disso, vale ressaltar que, para definir a operação unitária de separação sólido-líquido a ser utilizada, deve-se analisar as características da polpa. Nesse sentido, há polpas minerais que apresentam baixa porcentagem de sólidos e, por esse motivo, devem ser submetidas a etapas de adensamento antes mesmo de serem desaguadas (LUZ *et al.*, 2018).

Paralelamente a isso, tanto no caso de espessamento quanto de filtração, o processo é favorecido por uma desestabilização do sistema, provocada pela agregação de partículas, geralmente, obtida com o auxílio de substâncias químicas. Além disso, a presença de partículas coloidais, o desempenho e a capacidade dos equipamentos dependem fortemente da eficiência do processo de agregação (LUZ *et al.*, 2018).

### **2.2. Mecanismos de Agregação**

Os processos de agregação têm sido utilizados comumente nas diversas etapas de separação sólido-líquido (GREGORY, 1998; DOBIÁS E STECHEMESSER,

2005; BRATBY, 2008). Conforme YAN *et al.*, 2000, os mecanismos mais utilizados são os polímeros que propiciam a floculação e/ou sais que promovem a coagulação.

Nesse sentido, a separação sólido-líquido contempla o espessamento e a filtração, sendo que nos dois casos, o processo é beneficiado por uma desestabilização do sistema, que ocorre em função da agregação de partículas. No espessamento, tal agregação promove o aumento da velocidade de sedimentação, já na filtração propicia o aumento do fluxo do filtrado. Sendo assim, o desempenho das operações está diretamente interligado a eficiência do processo de agregação de partículas ultrafinas e coloidais, que conta com o auxílio de reagentes químicos (LUZ *et al.*, 2018).

Em sistemas coloidais uma característica de suma importância refere-se a elevada relação área/volume. Como uma porção significativa das moléculas de um coloide se encontram presentes em sua superfície, as forças de superfície, denominadas como forças estruturais ou interações coloidais, passam a determinar o comportamento do sistema coloidal. Nesse sentido, vale destacar que, as partículas maiores também apresentam forças de superfície, mas como apenas uma porção insignificante de suas moléculas encontram-se na superfície, as interações superficiais são desprezíveis. Em vista disso, o controle do processo de agregação das partículas ultrafinas e coloidais demanda pelo entendimento das forças de superfície (LUZ *et al.*, 2018).

Nesse contexto, as interações existentes entre a superfície do mineral e a água propiciam o desbalanceamento de cargas elétricas presentes na superfície do mineral. Tal desbalanceamento resulta em um excesso de cargas positivas ou negativas, dando origem a formação da dupla camada elétrica (DCE). Essa camada é constituída por uma camada externa, que contém uma quantidade de contra-íons exatamente igual ao excesso de cargas da camada interna (LUZ *et al.*, 2018).

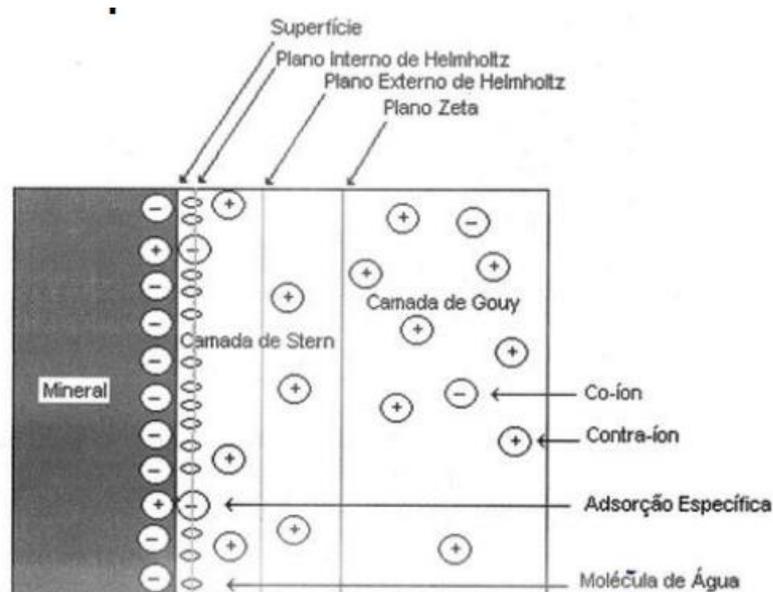
Paralelamente a isso, o processo de agregação das partículas ultrafinas e coloidais podem ocorrer por 3 formas – floculação, coagulação ou aglomeração (LYKLEMA, 1988; ATTIA, 1992). No entanto, na separação sólido-líquido, utiliza-se somente a floculação e a coagulação, visto que a aglomeração é mais utilizada no processo de metalúrgico, mais especificamente, na etapa de pelletização do minério de ferro (LUZ *et al.*, 2018).

### 2.2.1. COAGULAÇÃO

Naturalmente as partículas se encontram dispersas em virtude da repulsão eletrostática ocasionada pelas nuvens eletrônicas constituídas por contra-íons. Para reduzir/eliminar tal repulsão eletrostática há atuação do processo de coagulação, momento em que as forças de superfície de natureza atrativa vencem as forças de natureza repulsiva, o que faz com que o agregado seja formado (LUZ *et al.*, 2018).

Nesse sentido, a coagulação é mais efetiva quando as partículas apresentam potencial zeta igual à zero. A Figura 1 apresenta a dupla camada elétrica (DCE) carregada negativamente. Em virtude da presença de cargas negativas na superfície mineral, os íons positivos presentes na solução são atraídos para essa superfície formando a dupla camada elétrica – camada eletricamente neutra existente em função do excesso de carga na superfície mineral. Tal camada é constituída por uma superfície carregada e um meio polar onde se distribuem os contra-íons. A camada onde estão presentes os contra-íons é denominada como Camada de Stern, ocupando posições rígidas com relação a superfície. Além disso, há a Camada de Gouy, local onde os íons se encontram em constante movimentação (PERES, 2005).

Figura 1 – Representação da Dupla Camada Elétrica em uma superfície mineral



Fonte: PERES (2005).

Os agregados formados são denominados como coágulos, que por possuírem baixa repulsão eletrostática, são pequenos, apresentam maior estabilidade e menor retenção de líquido, portanto possuem maior velocidade de sedimentação, maior taxa unitária de filtragem e menor umidade de torta. Já o agente responsável pela agregação dessas partículas trata-se do coagulante (LUZ *et al.*, 2018).

#### 2.2.1.1. Teoria DLVO

Essa teoria refere-se à estabilidade dos sistemas coloidais e baseia-se nas variações de energia que são percebidas quando as partículas se aproximam. Nessa teoria, somente as forças de van der Waals (forças atrativas), efetivas em distâncias relativamente pequenas, e forças eletrostáticas (forças repulsivas) são consideradas. Em vista disso, o balanço das energias de forças atrativas ( $V_A$ ) e forças repulsivas ( $V_R$ ) é dado pela energia total de interação, conforme demonstrado pela Equação 1 (LUZ *et al.*, 2018).

$$V_T = V_A + V_R \quad (1)$$

Desse modo, a agregação das partículas só vai ocorrer quando forças atrativas foram superiores as forças repulsivas. Caso contrário, ocorrerá a dispersão das mesmas. Paralelamente a isso, à proporção que as partículas se aproximam, a intensidade das forças de van der Waals pode se tornar até 1000 vezes maior do que as forças eletrostáticas de repulsão (ZAJIC, 1971).

#### 2.2.2. FLOCULAÇÃO

O processo de agregação ocorre por meio da presença de uma macromolécula que por ser tão grande, se adsorve na superfície de inúmeras partículas ao mesmo tempo, formando agregados compostos por partículas de granulometria fina. A macromolécula formada trata-se de um polímero que é denominado como floculante, já o agregado formado é chamado de floco (LUZ *et al.*, 2018). Além disso, os agregados formados são grandes, apresentam menor estabilidade e maior retenção de líquido, logo apresentam maior umidade da torta e maior taxa unitária de filtragem.

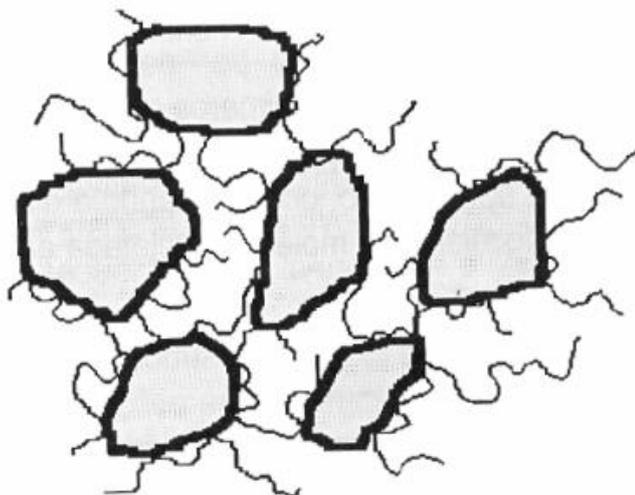
Ainda nesse sentido, a floculação forma agregados bem mais abertos que os agregados formados por meio da coagulação, além de formarem pontes de ligação entre as moléculas de polímero e as partículas separadas na suspensão. Para formar tais pontes os floculantes mais utilizados são polímeros orgânicos de cadeia longa, naturais ou sintéticos (polieletrólitos) (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004). Tais polímeros são produzidos em laboratórios e são os mais utilizados na separação sólido-líquido. Além disso, os tipos comumente utilizados são baseados na poli(acrilamida) (PAM), polímero neutro que pode ser classificado em não-iônico, aniônico e catiônico (LUZ *et al.*, 2018).

#### 2.2.2.1. Mecanismos de Floculação

A floculação pode ocorrer por meio de dois mecanismos principais – a floculação por pontes (*bridging flocculation*) ou a floculação por reversão localizada de carga (*patch flocculation*).

A floculação por pontes ocorre predominantemente quando são utilizados polímeros de elevado peso molecular, que podem ser não iônicos ou com carga elétrica de mesmo sinal da superfície mineral. Conforme demonstrado na Figura 2, é possível visualizar que, em tais sistemas somente uma parte da molécula interage diretamente com o sólido, as demais partes da cadeia polimérica estendem-se em forma de caudas propiciando o contato e a adsorção em outras partículas. Diante disso, agregados maiores podem ser formados, por meio da união de flocos, que podem possuir centenas de partículas individuais. Além disso, por apresentarem flocos com estrutura aberta, são grandes, flexíveis, resistentes e retêm muita água em seu interior, além de ser um processo rápido (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

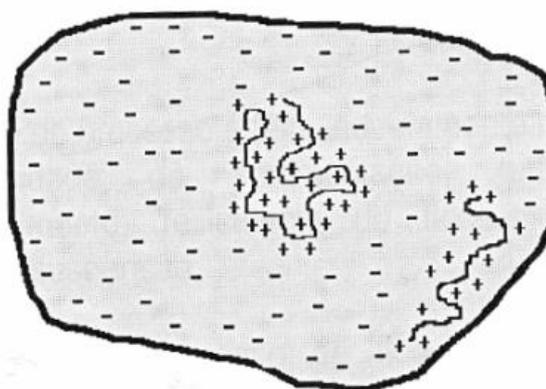
Figura 2 – Mecanismo de floculação por pontes.



Fonte: (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Já a floculação por reversão localizada de carga ocorre quando são utilizados polímeros de médio ou baixo peso molecular, de carga elétrica oposta à da superfície da partícula, que ao adsorver sobre o mineral, com carga contrária, reverte a carga elétrica da superfície na área que foi coberta pelo polímero. Diante disso, a superfície passa a apresentar uma distribuição heterogênea de cargas positivas e negativas, conforme ilustrado na Figura 3. Assim, quando houver colisões entre áreas com cargas opostas de duas partículas, o floco será formado. Além disso, os flocos formados são pequenos, compactos, rígidos e densos, e o processo de floculação é lento (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004; LUZ *et al.*, 2018).

Figura 3 – Adsorção de um polímero catiônico em uma superfície com excesso de carga negativa.



Fonte: (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

## 2.3. Filtragem

Conforme Luz *et al.* (2018), a filtragem trata-se de um processo de separação sólido-líquido, em que a polpa passa por um meio filtrante, que por sua vez retém as partículas sólidas. Desse modo, o material é dividido em duas partes, o filtrado – material que atravessa o meio filtrante – e o sólido retido que é chamado de torta. Outrossim, o método mais utilizado para realizar a filtragem ocorre por meio da diferença de pressão através do meio filtrante, seja causando compressão (filtros prensa) ou sucção (filtros à vácuo) (CONCHA, 2014).

### 2.3.1. TIPOS DE FILTRAGEM

A filtragem a vácuo é um método de filtragem em que é criada uma pressão negativa abaixo do meio filtrante. Subsequentemente a isso, os filtros de tambor, disco e correia são modelos de filtros à vácuo e operam sob o mesmo princípio físico. Sendo assim, esses filtros são compostos por seções perfuradas de cerâmicas ou metálicas, por meio dos quais ocorre o escoamento do líquido.

Além disso, essas seções perfuradas encontram-se recobertas por um meio filtrante, sob o qual é formada a torta constituída por sólidos depositados. Posteriormente, ocorre a coleta do filtrado nos compartimentos receptores de vácuo. Ademais, filtros à vácuo caracterizam-se por operarem de modo contínuo sob queda de pressão reduzida e por produzirem tortas secas de pequena espessura (LUZ *et al.*, 2018).

Já com relação a filtragem sob pressão – remete-se a um método de filtragem em que é criada uma pressão positiva sobre a polpa, o que faz com que ela vá de encontro ao meio filtrante. Em contrapartida, há também a filtragem que utiliza a força centrífuga para promover a passagem do líquido, sendo essa a filtragem centrífuga.

Ainda nesse sentido, há um processo de filtragem em que há uma combinação entre vácuo e pressão, tal método trata-se da filtragem hiperbárica. Ademais, há também a filtragem capilar, a qual ocorre por meio da ação de capilares de meios cerâmicos porosos (CHAVES, 2013). Em vista disso, a Tabela 1 apresenta uma síntese dos tipos de filtragem e modelos correspondentes mais utilizados no setor mineral, além de suas vantagens e desvantagens.

Tabela 1 - Tipos de filtração e modelos correspondentes.

Tipos	Modelos de filtros	Vantagens	Desvantagens
Filtração à vácuo	Filtro de tambor; Filtro de disco convencional; Filtro horizontal de mesa; Filtro horizontal de correia.	Produz tortas secas, de pequena espessura e opera continuamente sob queda de pressão reduzida.	Lavagem pouco eficiente.
Filtração sob pressão	Filtro prensa horizontal; Filtro prensa vertical.	Maior área filtrante por unidade de área de implantação.	Ciclo descontínuo e custos de operação e instalação elevados.
Filtração centrífuga	Centrífugas verticais.	Promissores na recuperação de minerais-minérios de granulometria ultrafina.	Não apresentam bons desempenhos com minerais de densidades semelhantes.
Filtração hiperbárica	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico.	Sistema de válvulas especiais que possibilita a descarga do filtrado e da torta sem contato direto do equipamento com o meio externo.	Elevado custo de aquisição por área de filtração.
Filtração capilar	Filtro <i>Ceramec</i> .	Ideal para obtenção de torta com baixa umidade e filtrado puro; Baixo consumo de energia.	Placas cerâmicas devem ser regeneradas por meio de lavagem ácida para manter a função de capilaridade.

**Fonte:** Guimarães 2011 (Adaptado).

As tecnologias mais utilizadas para filtração de rejeitos, são os filtros de pressão vertical, filtros-prensa, filtros de correia e filtros de disco rotativos à vácuo. Sendo que, o filtro de disco a vácuo, conforme demonstrado na Figura 4, é o mais econômico em termos de capital e custo operacional, em aproximadamente 80% de todas as aplicações, principalmente quando trata-se de filtros de alto desempenho, como os filtros de grandes diâmetros (HAHN, 2019).

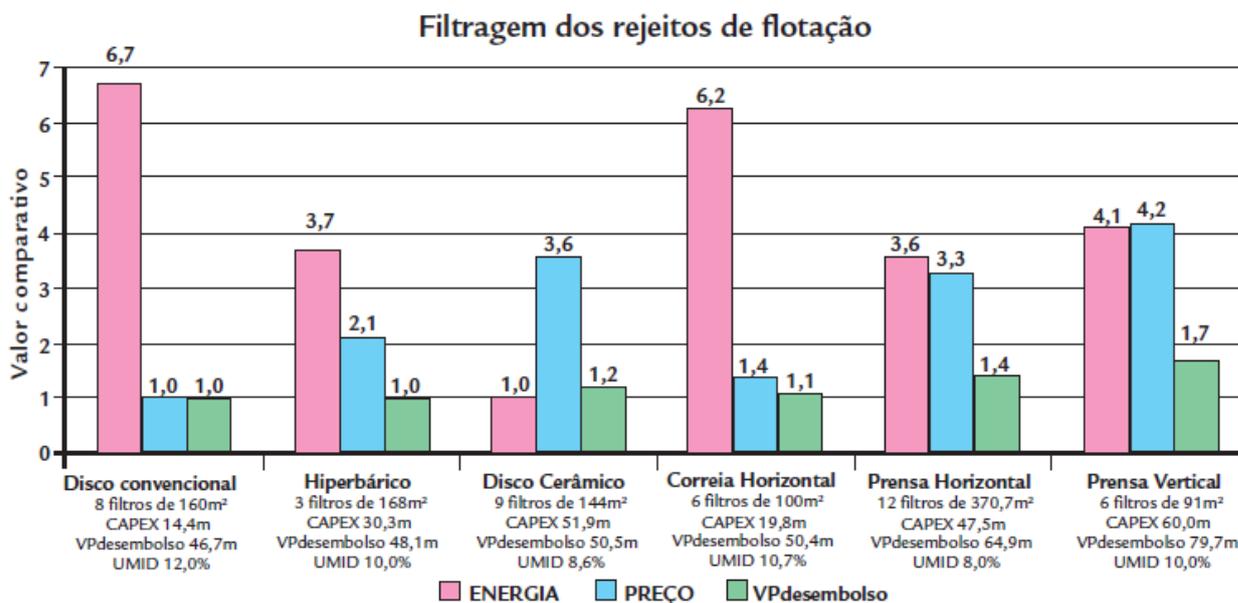
Figura 4 – Filtro de disco à vácuo.



**Fonte:** Revista In the Mine (2020).

Nesse cenário, estudos são realizados com o intuito de filtrar rejeitos por meio de filtros à vácuo. Segundo Guimarães *et al.* (2011), a melhor opção técnico-econômica para filtração de rejeitos de flotação, é o emprego do filtro de disco convencional, já que ele apresenta o menor Valor Presente de Desembolso (VP desembolso), conforme demonstra a Figura 5. Entretanto, o filtro de disco cerâmico, apresenta menor consumo de energia, o que pode torná-lo o filtro com menor valor presente de desembolso. Isso dependerá do custo energético do projeto. A Figura 5 apresenta um comparativo de custos de filtração dos rejeitos, realizado no Projeto de Itabiritos de Vargem Grande (ITMI VGR).

Figura 5 - Comparativo: custos de filtragem dos rejeitos da ITMI VGR.



Fonte: Guimarães *et al.*, 2011.

Em segunda análise, conforme Vieira (2015), o filtro de disco a vácuo com placas cerâmicas é um equipamento que supre as atuais necessidades do Brasil. A Ferro + Mineração, localizada em Congonhas (MG) é a empresa mineral pioneira no país no uso do equipamento na filtragem de rejeitos. Com a implementação desse sistema de filtragem, a empresa passou a reaproveitar até 46% da água que antes era perdida no processo convencional, com a utilização de canais de decantação.

Além disso, o gerente de Pesquisa e Desenvolvimento da Ferro + Mineração, afirma que a umidade final do material encontra-se na faixa de 10% para o concentrado e 14% para o rejeito, sendo que antes da implementação desse filtro, obtinham-se valores de umidade correspondentes a 16% para o concentrado e 26% para o rejeito. Segundo a Revista Minérios & Minerale, em 2015, a empresa contava com sete filtros em operação, sendo que, quatro deles atuavam na linha de rejeitos e três na linha de concentrados (VIEIRA, 2015).

### 2.3.2. VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA FILTRAGEM

As variáveis que influenciam no desempenho de um processo de filtragem de polpas minerais são muitas, segundo Guimarães (2011). A Tabela 2, apresenta essas variáveis agrupadas em 4 categorias.

Tabela 2 – Fatores que influenciam no processo de filtração.

<b>Sólido</b>	<b>Polpa</b>	<b>Torta/ Filtrado</b>	<b>Equipamento</b>
Área superficial específica	Taxa de alimentação	Espessura da torta	Ciclo
Distribuição granulométrica	Porcentagem de sólidos	Porosidade do leito	Nível de vácuo, sopro, pressão
Forma geométrica	Temperatura	Permeabilidade do leito	Meio filtrante
Propriedades de superfície	Viscosidade	Viscosidade do filtrado	Geometria dos componentes
Massa específica	pH	-	Nível de agitação
-	Presença de reagentes auxiliares	-	-
-	Sais dissolvidos	-	-

**Fonte:** Guimarães 2011 (Adaptado).

Dentre os fatores mencionados acima, destaca-se a área superficial específica, o percentual de sólidos, a viscosidade do fluido, a temperatura da polpa, a diferença de pressão, o tempo de filtração e a espessura da torta (ARAÚJO JUNIOR, 2014).

Por meio de resultados obtidos em estudos realizados, notou-se que a redução da área superficial específica acarreta um aumento significativo na produtividade da filtração, fato explicado por meio do aumento da permeabilidade da torta. Além disso, a redução da área superficial específica, ou seja, aumento da granulometria, propicia menor umidade da torta.

Paralelamente a isso, Guimarães (2011) afirma que partículas que apresentam distribuição granulométrica grossa constituem tortas com maiores interstícios. Sendo assim, a passagem do líquido pelo meio filtrante ocorrerá com maior facilidade, o que propicia o aumento na velocidade de filtração e redução na umidade da torta.

Já as polpas com altas concentrações de sólidos propiciam maior produtividade no sistema de filtração. Os filtros à vácuo, especialmente, necessitam de uma

concentração de sólidos mínima na sua alimentação com o intuito de garantir um bom desempenho. Por esse motivo, é comum utilizar espessadores anteriormente ao processo de filtração (GUIMARÃES, 2011).

Em paralelo, o efeito que a viscosidade promove sobre a polpa, geralmente, está relacionado à variação da temperatura na polpa, sendo que a viscosidade e a temperatura são inversamente proporcionais. Nesse sentido, o aumento da temperatura favorece a filtração (GUIMARÃES, 2011).

Ainda nesse sentido, a diferença de pressão está diretamente relacionada a capacidade de filtração. Ao passo que a taxa de filtração aumenta conforme a diminuição do tempo do ciclo de filtração. Todavia, isso pode propiciar maior umidade da torta, ou até mesmo a obtenção de tortas extremamente finas. Além disso, notou-se que a espessura da torta é inversamente proporcional a velocidade de filtração. Ademais, vale ressaltar que o pH está diretamente relacionado a dispersão das partículas. Portanto, quanto maior for a dispersão, menor será o fluxo de filtrado e maior será a umidade da torta (GUIMARÃES, 2011).

Já a adição de reagentes auxiliares no processo de filtração acarreta redução na tensão superficial do líquido. Além disso, vale destacar que presença de lamas no processo de filtração é prejudicial, visto vez que ela pode colmatar o meio filtrante. Nesse sentido, torna-se necessário a adição de floculantes nos tanques de filtração com o intuito de minimizar o efeito negativo provocado pela existência de lamas nesse processo (GUIMARÃES, 2011).

### 2.3.3. TESTES DE FILTRAÇÃO

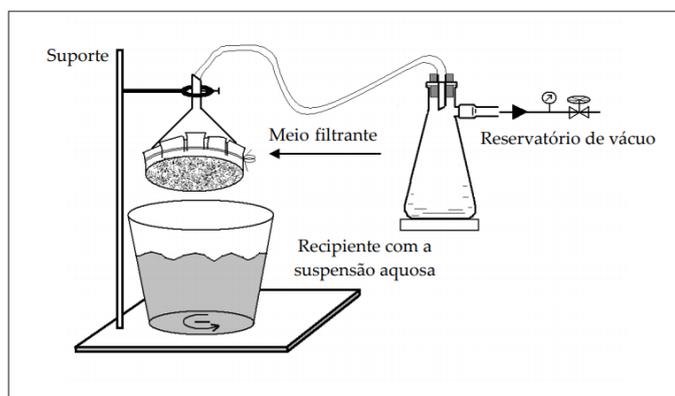
Os parâmetros utilizados para o dimensionamento de filtro e para reprodução da filtração industrial são fornecidos por meio de testes realizados em escala laboratorial. Portanto, somente por meio de ensaios torna-se possível analisar o comportamento de um determinado produto ao ser filtrado.

Ao lado disso, França e Casqueira (2007) afirmam que, o *leaf test* (teste de folha) é o método de filtração utilizado universalmente para dimensionamento de filtros industriais em escala de bancada. Portanto, conforme Chaves (2013), o ensaio por meio do *leaf test* deve contar com o auxílio de um suporte de filtração padrão, de área 1/10 ft<sup>2</sup>, que seja revestido por uma tela filtrante adequada à polpa que se almeja

filtrar. Sendo assim, esse suporte deve estar interligado a um kitasato, a uma bomba de vácuo e a um rotâmetro, por meio de mangueiras de plástico.

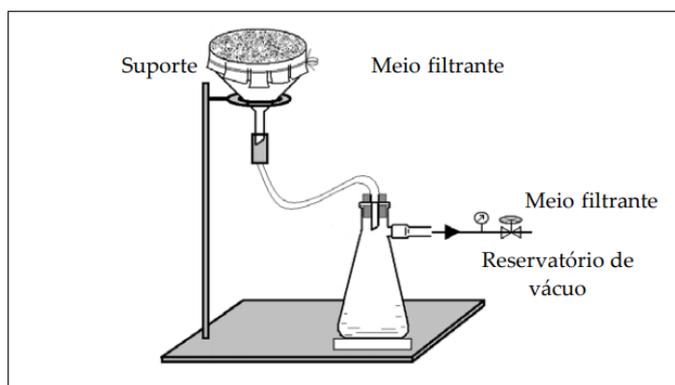
Ao iniciar o ensaio, durante o processo de formação da torta, o vácuo deve ser acionado e o filtro deve encontrar-se totalmente imerso na polpa. Além disso, deve garantir-se que a polpa a ser filtrada seja mantida sob leve agitação durante um tempo pré-determinado para que haja a formação da torta. Posteriormente, durante o processo de desaguamento da torta, retira-se o *leaf test* da polpa, colocando-o em sentido contrário de forma a posicioná-lo conjuntamente com o tubo de drenagem para baixo, a partir de então inicia-se o tempo de desaguamento da torta durante o tempo estabelecido. Subsequentemente a isso, o sopro de ar comprimido presente no tubo de drenagem promove o descarregamento da torta. A Figura 6 e a Figura 7 exemplificam a ocorrência do *leaf test* por meio de 2 etapas. Ademais, o *leaf test* fornece dados como o tempo de ciclo da filtragem, a espessura da torta, o nível de vácuo e o volume de filtrado.

Figura 6 - Primeira etapa do leaf test (formação da torta).



Fonte: França e Castanheira (2007).

Figura 7 - Segunda etapa do leaf test (desaguamento da torta).



Fonte: França e Castanheira (2007).

## 2.4. Reagentes Auxiliares de Filtragem

Os reagentes auxiliares têm como desígnio tornar os processos de filtragem mais eficazes e controláveis, de modo a otimizá-los. Além disso, atuam na filtragem com o intuito de reduzir a pressão do capilar – pressão mínima necessária para que haja a drenagem do poro. Nesse contexto, a drenagem pode ocorrer ao modificar a estrutura do poro e/ou alterar as características de molhabilidade. Diante disso, torna-se possível modificar a estrutura do poro ao adicionar flocculantes, sendo que eles atuam no sentido de agregar as partículas mais finas, o que acarreta o aumento do diâmetro médio dos poros. Tal ocorrência pode ser visualizada na Equação 2.

$$P_c = \gamma_{LA} \cdot \cos \theta_{SL} \cdot \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) \cdot \left( \frac{K}{d_m} \right) \quad (2)$$

The diagram shows the equation  $P_c = \gamma_{LA} \cdot \cos \theta_{SL} \cdot \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) \cdot \left( \frac{K}{d_m} \right)$  with a vertical dashed line separating the terms. An arrow points from  $\gamma_{LA}$  down to the text 'Propriedade de molhabilidade'. Another arrow points from the term  $\left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) \cdot \left( \frac{K}{d_m} \right)$  down to the text 'Estrutura do poro'.

Onde:

$P_c$ : pressão capilar;

$\gamma_{LA}$ : tensão superficial na interface líquido ar;

$\theta_{SL}$ : ângulo de contato (s/L);

$\varepsilon$ : porosidade da torta;

$K$ : constante característica da forma da partícula (se esférica,  $K=6$ ) e

$d_m$ : diâmetro médio do poro.

Adjacientemente a isso, ao inserir surfactantes torna-se possível alterar as características de molhabilidade, já que eles atuam no sentido de reduzir a tensão superficial na interface líquido-ar (à medida que aumenta a concentração na interface, diminui a tensão na superfície do líquido até se atingir uma monocamada denominada de concentração micelar crítica) e/ou atuam no sentido de aumentar o ângulo de contato na interface sólido-líquido – tornando a superfície do mineral hidrofóbica (DIAS *et al.*, 2004).

### 2.4.1. FLOCULANTES

A ação de um polímero de cadeia longa, denominado de floculante, necessariamente solúvel em água, promove a agregação de partículas formando flocos. Nesse contexto, os polímeros são classificados quanto à sua origem, carga elétrica e peso molecular. Sendo assim, os floculantes podem ser naturais, sintéticos ou modificados; aniônicos, catiônicos ou não iônicos e de baixo ( $PM < 10^5$ ), médio ( $10^5 < PM < 10^6$ ) ou elevado peso molecular ( $PM > 10^6$ ) (LUZ *et al.*, 2018).

As poliacrilamidas aniônicas e não iônicas são os floculantes mais utilizados na indústria mineral, uma vez que elas são capazes de formar flocos grandes de rápida sedimentação e boa compactação, já que elas podem ser produzidas com alto peso molecular. Por outro lado, as poliacrilamidas catiônicas são dificilmente utilizadas no setor mineral, em função do seu alto custo e baixo peso molecular (DIAS *et al.*, 2004).

Além disso, o mecanismo com formação de pontes (*bridging flocculation*) ocorre exclusivamente quando os polímeros apresentam elevado peso molecular e não necessitam de carga oposta às partículas. Enquanto que o mecanismo com neutralização de carga ocorre quando os polímeros apresentam baixo peso molecular (DIAS *et al.*, 2004).

### 2.4.2. SURFACTANTES

Os surfactantes do grupo sulfossuccinato são os reagentes auxiliares mais utilizados na filtragem. A molécula do surfactante é anfifílica, isto é, apresenta caráter duplo, uma vez que sua estrutura é constituída por uma parte hidrofílica e outra hidrofóbica, o que faz com que eles estimem tanto ambiente polar, quanto apolar (DIAS *et al.*, 2004).

Além disso, os surfactantes são tensoativos, o que significa que eles possuem influência sobre a tensão superficial do líquido. Sendo assim, ocorre um acúmulo de moléculas na superfície, o que diminui as forças de coesão existentes na superfície, portanto, conseqüentemente, haverá a redução da tensão superficial (DIAS *et al.*, 2004).

### 2.4.3. COAGULANTES

São reagentes, mais especificamente eletrólitos, que promovem a redução ou, até mesmo, a eliminação da barreira energética repulsiva entre as partículas minerais. Portanto, o coagulante faz com que as forças superficiais de natureza atrativa predominem sobre as de natureza repulsiva, promovendo, assim, a formação de um agregado que é denominado de “coágulo” (LUZ *et al.*, 2018).

### 2.4.4. MODULADORES DE pH

São reagentes utilizados para ajustarem a carga superficial dos minerais, uma vez que os íons  $H^+$  e  $OH^-$  são controladores de potencial de inúmeras espécies minerais (CHAVES, 2013).

## 2.5. Empilhamento de Rejeito Filtrado

Em primeiro âmbito, os rejeitos tratam-se de resíduos que após esgotadas todas as possibilidades de tratamento por processos tecnológicos, não apresentam outra possibilidade que não a disposição final adequada (Lei Federal nº 12.305/2010), já que se tornam passivos ambientais. Nesse contexto, a disposição desse material ocorre, geralmente, de forma subaquática, em barragens de rejeitos, conforme demonstra a Figura 8.

Figura 8 – Vista aérea da Barragem 6 (CBMM – Araxá/MG).



Fonte: LEMOS JÚNIOR, 2012.

A principal função dessas estruturas é a contenção dos resíduos e como objetivo secundário, o armazenamento de água para posterior reutilização na mina e/ou usinas de beneficiamento (IBRAM, 2016). Tal estrutura deve ser segura, além de respeitar às normas e às leis impostas.

Todavia, a disposição de rejeitos em barragens pode acarretar inúmeros riscos operacionais e ambientais. Com o rompimento das barragens das minas de Germano em Mariana e Córrego do Feijão em Brumadinho, se tornou ainda mais difícil para as mineradoras conseguirem Licenças de Instalação (LI) para implantação de barragens.

Em vista disso, o *dry stacking* passou a ser uma alternativa provável para disposição de rejeitos, substituindo, assim, o método convencional. Tal técnica além de propiciar uma estrutura com menor Dano Potencial Associado (DPA), demanda uma área menor para instalação (ALVES, 2020), o que pode ser visualizado na Figura 9. No entanto, vale destacar que muitas vezes ainda opta-se por dispor rejeito pelo método convencional, em função dos menores custos associados (VALADÃO *et al.*, 2020).

Figura 9 – Disposição de rejeitos em pilhas.



**Fonte:** Catálogo de Mineração Brasil (2020).

Todavia, para a implantação do empilhamento de rejeito alguns fatores devem ser avaliados. Sendo assim, é de suma importância assegurar o controle sobre a densidade e a granulometria da polpa que alimenta a planta de filtração, dispor de tecido/placa filtrante de alta durabilidade e aplicabilidade, além de propiciar local

dentro da planta de filtragem para troca de tecido/placa. Ademais, deve-se conceder área próxima à pilha de rejeitos para armazenamento temporário do rejeito filtrado, bem como disponibilizar correias para que haja o transporte do rejeito filtrado entre a planta de filtragem e o local de armazenamento temporário e fornecer eficiente sistema de drenagem (ALVES, 2020).

Além disso, algumas mineradoras já possuem projetos de empilhamento de rejeitos filtrados em desenvolvimento, o que informa a revista *In the Mine* (2019), dentre elas:

- AngloGold Ashanti (mina Cuiabá – Sabará MG), onde ocorre a filtragem de 50% dos rejeitos;
- AngloGold Ashanti (mina Córrego do Sítio – Santa Bárbara MG), onde ocorre a filtragem de aproximadamente 40% dos rejeitos;
- AngloGold Ashanti (planta do Queiroz – Nova Lima MG), onde ocorre a filtragem de 15% dos rejeitos;
- Jaguar Mining (mina Roça Grande – Complexo de Mineração Caeté (CCA) MG), projeto de filtragem de rejeitos com início em 2020;
- CBA (mina – Mirai MG), projeto de filtragem de rejeitos em andamento, conclusão prevista para 2022.

Paralelamente a isso, empresas como a Vallourec, CSN e Nexa Resources já apresentam aplicações do método de disposição de rejeitos filtrados. Algumas informações podem ser visualizadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Aplicações do método de disposição de rejeitos filtrados.

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>Local</b>	<b>Minério</b>	<b>Tipo de filtro</b>	<b>Umidade atingida</b>
Vallourec	Mina Pau Branco	Nova Lima (MG)	Minério de ferro	Filtro prensa	15 a 17%
CSN	Mina Casa de Pedra	Congonhas (MG)	Minério de ferro	Filtro prensa	13 a 16%
Nexa Resources	Unidade Vazante	Vazante (MG)	Polimetálico	Filtro prensa	9 a 11%

Vale	Mina do Pico	Itabirito (MG)	Minério de ferro	Filtro de disco vácuo (rejeito de flotação) e filtro prensa horizontal (lama)	13%
Ferro + Mineração S/A	-	Congonhas (MG)	Minério de ferro	Filtro de disco cerâmico à vácuo	14%
Mineração Herculano	Unidade Itabirito	Itabirito (MG)	Minério de ferro	Filtro de disco cerâmico	10 a 13%

## 2.6. Rejeito Fosfático

De acordo com Guimarães *et al.* (2011), os rejeitos dispostos em barragens se concentram em sua maioria em duas etapas da mineração, sendo elas a flotação e a deslamagem, cada uma é responsável por aproximadamente 34% dos rejeitos gerados.

Ao realizar uma comparação entre os rejeitos da flotação e as lamas provenientes da deslamagem, percebe-se que, os rejeitos da flotação apresentam maior potencial para filtração, propiciando umidade da torta aceitável e taxa unitária de filtragem satisfatória para aplicações em escala industrial. Já para tornar possível a filtração da lama, é necessário avaliar a possibilidade de adensamento do material ou incorporação ao rejeito arenoso. Isso pode ser explicado em função do rejeito de flotação apresentar uma granulometria mais grosseira do que a lama (BRAGA, 2021).

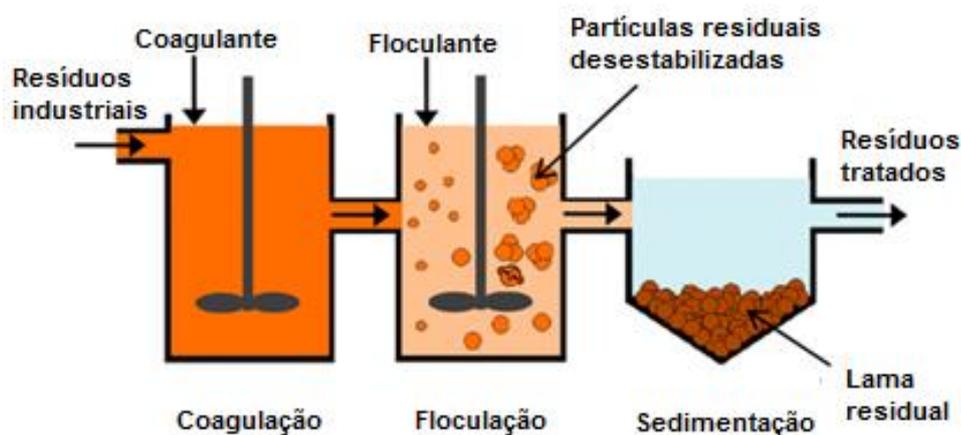
Em vista disso, a distribuição granulométrica de partículas grossas gera torta com interstícios maiores, o que favorece a velocidade de filtragem e, conseqüentemente, a obtenção de tortas com menores umidades. Enquanto que, as partículas finas dificultam a filtragem (GUIMARÃES, 2011).

Em conformidade a Tão *et al.* (2008), também são enfrentadas pela indústria de minérios fosfáticos, dificuldades com relação a disposição de lama. Tal fato ocorre em virtude do sistema coloidal constituinte, torná-la altamente estável em suspensões aquosas, promovendo, assim, uma sedimentação muito lenta. Consoante a Qi *et al.* (2011), a lama trata-se de um sistema coloidal em que pequenas partículas formam

uma suspensão estável na água. Dessa forma, o processo de separação entre o sólido e o líquido é complexo.

Em vista disso, a disposição de lamas tem enfrentado inúmeros desafios, sendo o desaguamento de lamas um processo essencial para redução dos custos do beneficiamento mineral (WEI *et al.*, 2018). Mediante a isso, testes mecânicos, elétricos, biológicos e químicos são realizados para solucionar impasses associados à disposição de lamas fosfáticas (LES *et al.*, 2011). Ademais reagentes auxiliares de filtragem, tais como floculantes e coagulantes, são adicionados ao processo para auxiliar na agregação das partículas, conforme demonstra a Figura 10.

Figura 10 - Coagulação e floculação no processo de agregação e sedimentação das partículas.



Fonte: Werjen, 2022 (Adaptado).

Nesse sentido, a floculação atua de modo a alterar as propriedades estáveis do coloide, tornando-o instável e formando flocos, cujos diâmetros são maiores do que as partículas isoladas. Tal fato ocorre em função dos sítios ativos presentes na superfície do polímero serem atraídos pelas cargas dos sólidos envolvidos no processo e, como consequência, ocorre a formação de agregados moleculares (LUZ *et al.*, 2018).

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os métodos utilizados para a realização dos ensaios de filtração.

#### 3.1. Preparação da amostra

A amostra utilizada no presente trabalho trata-se de 11 kg de rejeito de flotação de minério fosfático, e se encontrava no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG - Campus Araxá. Tal rejeito é proveniente dos circuitos de flotação *cleaner* e *rougher* de uma mineradora localizada em Patrocínio (MG). O material passou por processos de homogeneização em pilha cônica e alongada, quarteamento, caracterização química e granulométrica e filtração.

A homogeneização da amostra foi realizada em pilha cônica. Distribuiu-se a amostra sobre uma lona e levantou-se de forma alternada os vértices opostos do quadrado em um ciclo de 8 vezes, e, então, realizou-se o quarteamento com o auxílio de 2 chapas metálicas perpendiculares que se cruzam no eixo geométrico do cone, conforme demonstrado na Figura 11.

Figura 11 - Quarteamento do material.



Fonte: Próprio autor.

Em seguida, uniu-se as frações opostas, que se encontravam em diagonal, obtendo-se, assim, duas frações. Desse modo, as partes 1 e 3 seguiram para a construção da pilha alongada, já as partes 2 e 4 foram reservadas e utilizadas para realização do Ensaio de Proctor.

Para a construção da pilha alongada, primeiramente delimitou-se 1 metro da bancada por meio do auxílio de uma trena, conforme apresentado na Figura 12. A partir de então, por meio de uma concha distribuiu-se a amostra sobre a bancada, construindo, assim, uma pilha alongada na área delimitada, de forma lenta e contínua.

Figura 12 - Pilha alongada.



Fonte: Próprio autor.

Posteriormente a isso, retirou-se 10 cm de cada extremidade da pilha, o que corresponde a 10% do comprimento total, e o material retirado foi retomado e redistribuído ao longo da pilha. Em sequência, dividiu-se a pilha em alíquotas de 170 g cada.

## 3.2. Caracterização da amostra

### 3.2.1. ANÁLISE QUÍMICA

A caracterização química da amostra de rejeito fosfático foi realizada pela Atelpe Laboratório e Assessoria Agrícola, por meio da análise via úmida de  $P_2O_5$ .

### 3.2.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica do material foi realizada por meio do peneiramento a úmido utilizando um peneirador suspenso vibratório da marca CDC, modelo PV-0. Para composição do mesmo, utilizou-se a mais usual série de peneiras padronizadas – a Série Tyler, abrangendo as faixas de 48# (0,300 mm), 65# (0,210 mm), 100# (0,150 mm), 150# (0,106 mm), 200# (0,075 mm), 325# (0,045 mm) e 400# (0,038 mm). O peneirador pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 – Peneiramento a úmido.



Fonte: Próprio autor.

No peneirador suspenso foram adicionadas 100 g de rejeito fosfático, e por meio do auxílio de uma mangueira e de um balde foi realizado o peneiramento a úmido até que a água ficasse cristalina, com o intuito de retirar a maior quantidade possível

de finos. Após o término do peneiramento, o material retido em cada faixa foi separado de acordo com o tamanho da abertura da peneira e secado em estufa por 24h a 100°C. Em sequência, pesou-se as amostras secas. Com isso, obteve-se a distribuição granulométrica do material em cada faixa granulométrica.

### 3.2.3. DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

Utilizou-se a técnica de picnometria a gás para determinação da massa específica dos sólidos presente na amostra. O modelo utilizado refere-se ao AutoDensity 200 da ACP Instrumets.

Por meio da variação da pressão de gás em uma câmara de volume identificado, é possível determinar o volume verdadeiro de um sólido utilizando o picnômetro a gás (WEBB e ORR, 1997). Para a realização desse procedimento, utilizou-se o gás nitrogênio de alta pureza, que por possuir pequenos átomos, é capaz de adentrar-se com facilidade nos poros da amostra, fazendo com que o volume do sólido seja determinado com maior precisão (MOURA E FIGUEIREDO, 2002).

O principal benefício de tal método refere-se a sua capacidade de aferir somente o volume da amostra, descontando do volume total todos os poros presentes. Ademais, ele é capaz de aferir o volume dos sólidos que apresentem qualquer teor de umidade (MOURA E FIGUEIREDO, 2002).

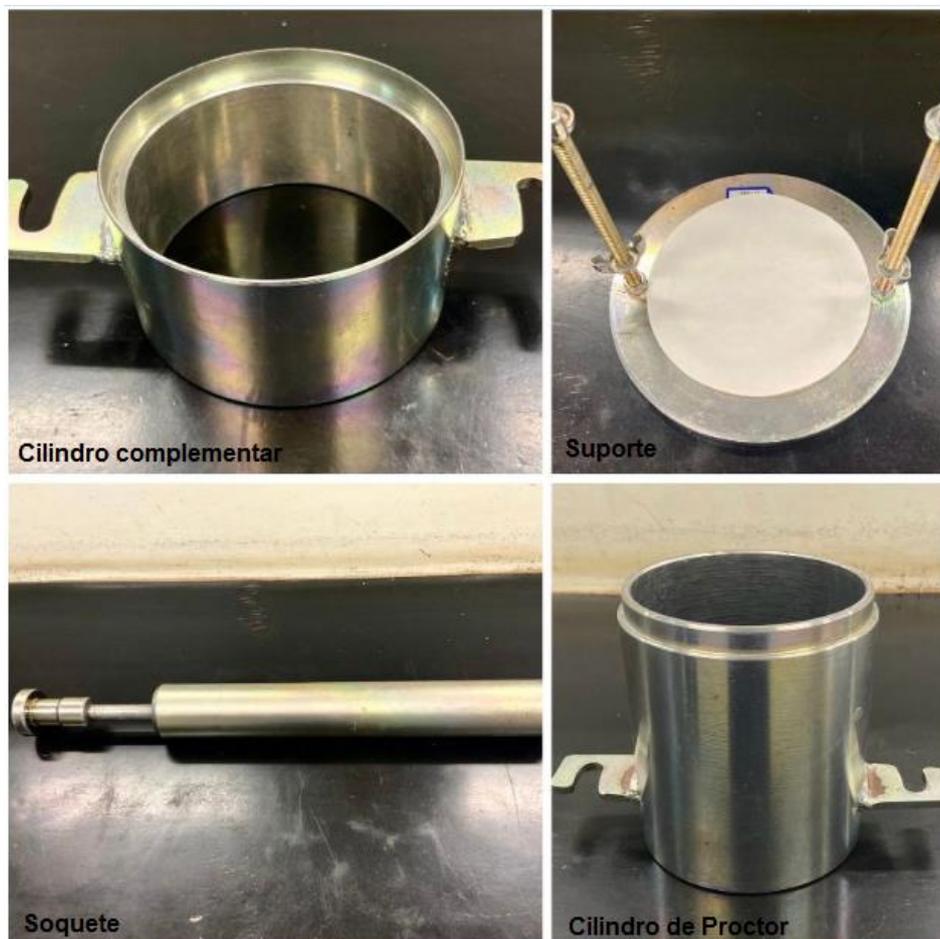
### 3.2.4. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Consoante a Norma Brasileira ABNT NBR 7182:2016, o ensaio de compactação é realizado com o intuito de determinar a umidade ótima do material em questão, possibilitando, assim, uma efetiva disposição/compactação de rejeitos em pilhas estáveis. Em vista disso, tornou-se viável a realização do Ensaio de Proctor neste trabalho, com o intuito de estabelecer a umidade alvo para a realização dos testes de filtração. Subsequente a isso, foi possível determinar o tempo de secagem ideal já que o teor da umidade foi pré-estabelecido.

Para realização dos ensaios, utilizou-se um cilindro metálico pequeno (Cilindro de Proctor) de 998 cm<sup>3</sup> interligado ao seu cilindro complementar de mesmo diâmetro,

bem como um soquete de 3,6 kg. O aparato experimental pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 – Aparato experimental para realização do Ensaio de Proctor.



Fonte: Próprio autor.

Os ensaios foram realizados com reuso de material, sendo que o rejeito fosfático foi preparado em diferentes porcentagens de umidade. Diante disso, a amostra global foi preparada adicionando em 5000 g de rejeito fosfático, 500 ml de água, apresentando, portanto, o primeiro ensaio, uma umidade de 10%. No total, foram realizados 5 testes, sendo que em cada teste foi incrementado 2% de umidade. Dessa forma, os testes 2, 3, 4 e 5 foram preparados com 12%, 14%, 16% e 18% de umidade, respectivamente.

Com relação a realização dos ensaios, primeiramente preparou-se o material com 10% de umidade sob uma lona e, então, fez-se a homogeneização do mesmo por meio da pilha cônica. Após obter completa homogeneização do sólido + água,

adicionou-se a polpa obtida no cilindro de Proctor e seu complementar, visando obter 3 camadas de alturas aproximadamente iguais.

Dessa forma, a primeira camada foi preenchida até completar a altura máxima do cilindro de Proctor e, assim, aplicou-se 26 golpes com o auxílio do soquete sobre a superfície da camada, o que pode ser visualizado na Figura 15. Já na Figura 16 é possível visualizar o material compactado. Após isso, a segunda camada foi formada, sendo preenchida até a metade do cilindro complementar, assim mais 26 golpes foram aplicados sobre o material. Em sequência, preencheu-se o cilindro complementar até o topo, o que equivale a terceira camada, e mais 26 golpes foram aplicados, compactando, assim, o material. A Figura 17 refere-se a última camada de material formada após a compactação.

Figura 15 – Compactação do material com o soquete.



Fonte: Próprio autor.

Figura 16 – Material compactado após 26 golpes.



Fonte: Próprio autor.

Figura 17 – Terceira camada de material compactada.



Fonte: Próprio autor.

Paralelamente a isso, vale destacar que, o soquete de 3600 g utilizado foi considerado como pequeno, visto que a NBR 7182:2016 determina como soquete pequeno aquele que apresenta massa de 2805 g e o soquete grande possui 4993 g. Tal massa refere-se ao soquete mais o dispositivo de controle de altura de queda (guia). Dessa forma, o soquete utilizado possui uma massa que se aproxima mais do soquete pequeno.

Além disso, ressalta-se que, conforme a NBR 7182:2016, o soquete pequeno de energia de compactação normal, deve realizar 26 golpes por camada, sendo o número de camadas igual a 3. Tal informação é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Energias de Compactação.

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27

Fonte: NBR 7182:2016.

Após a compactação da última camada, desconectou-se o cilindro complementar do cilindro de proctor e retirou-se o material excedente presente acima do cilindro de Proctor, o que pode ser visualizado na Figura 18. Posteriormente a isso, pesou-se 50 g de massa úmida referente ao material compactado e colocou-o em uma cápsula metálica para definição do teor da umidade em base seca, conforme apresenta a Figura 19, sendo que tal umidade foi obtida após a amostra ser submetida a um tempo de secagem na estufa de 24h à 100 °C. A cada teste, ressalta-se que, foram retiradas 3 alíquotas de massa úmida do material compactado, com o intuito de garantir a confiabilidade dos resultados. A Figura 20 apresenta a massa de rejeito compactado utilizando 18% de umidade.

Figura 18 – Massa de rejeito compactado após a retirada de material excedente.



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 – Alíquotas de material compactado para determinação da massa seca.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Massa úmida de rejeito compactado retirado do cilindro de Proctor.



Fonte: Próprio autor.

Após a secagem do material foi possível realizar os cálculos e encontrar a umidade em base seca de cada teste. O cálculo é realizado por meio da Equação 3, onde  $w_{bs}$  corresponde a umidade em base seca, expressa em %,  $mu$  refere-se a massa úmida e  $ms$  trata-se da massa seca, sendo que ambos são dados em gramas (g).

$$w_{bs} (\%) = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad (3)$$

Em sequência, deve-se definir por meio da Equação 4, a massa específica aparente seca ( $\rho_d$ ), dada em g/cm<sup>3</sup>.

$$\rho_d = \frac{\rho_{úmida}}{1 + w_{bs}} \quad (4)$$

Diante disso, a Equação 5 mostra que:

$$\rho_{úmida} = \frac{m_{úmida}}{v_{cilindro}} \quad (5)$$

Onde  $v_{cilindro}$  corresponde ao volume do cilindro, expresso em centímetros cúbicos, umidade em base seca do solo compactado é dada em decimal e  $m_{úmida}$  corresponde a massa úmida do solo compactado, expressa em gramas. A partir de então é possível obter a curva da massa específica aparente seca versus umidade, para cada ensaio.

Paralelamente a isso, como geralmente utiliza-se, em Tratamento de Minérios, a umidade em base úmida para quantificar a filtração, utilizou-se a Equação 6 para conversão da umidade em base seca para umidade em base úmida ( $w_{bu}$ ).

$$w_{bu} = \frac{w_{bs}}{1 + w_{bs}} \times 100 \quad (6)$$

### 3.3. Testes de filtração

A filtragem à vácuo é empregada em testes laboratoriais com o intuito de acelerar o processo de separação sólido-líquido. Tal filtração consiste na aplicação de uma pressão inferior a pressão atmosférica, o que faz com que haja o aumento da velocidade de formação da torta.

Com o intuito de reproduzir em escala laboratorial um cenário semelhante a realidade industrial, para a realização dos testes deve-se inicialmente realizar a preparação da polpa de rejeito fosfático com 60% de sólidos. Tal porcentagem é definida considerando que, a filtração trata-se de uma etapa posterior ao

espessamento, que apresenta no produto uma porcentagem média de 60% de sólidos (MARTINS, 2017).

Após a preparação da polpa, inseriu-se o meio filtrante no funil de Buchner e colocou-o sobre o kitassato. Posteriormente, conectou o kitassato na bomba de vácuo com o auxílio da mangueira, conforme demonstra a Figura 21. Colocou-se a polpa em suspensão agitando-a por 60 segundos em todos os testes realizados, posteriormente acionou-se o vácuo, que se manteve constante em -500 mmHg, e despejou a polpa homogênea no funil de buchner acoplado ao kitassato e a bomba de vácuo.

Figura 21 – Unidade Experimental de filtração.



Fonte: Próprio autor.

Para determinação do tempo de formação da torta, cronometrou-se o tempo a partir do momento em que o vácuo foi acionado até o instante em que não havia mais água sobre a torta. Posteriormente a isso, iniciou-se o tempo de secagem pré-determinado. O somatório do tempo de formação da torta e do tempo de secagem consistem no tempo de ciclo. Após a formação e desaguamento da torta, desligou-se a bomba de vácuo e então, finalizou-se a filtração.

Em seguida, o filtrado foi transferido do kitassato para uma proveta para identificar o volume de filtrado. Já com relação a turbidez do filtrado, por meio de um turbidímetro HI93703 foi possível avaliar a quantidade de sólidos presente no filtrado, conforme a Figura 22, lembrando que, quanto menor for a turbidez, melhor será o resultado da filtração.

Figura 22 – Turbidez do filtrado.



Fonte: Próprio autor.

Em seguida, sobre uma superfície lisa e plana a torta foi descarregada. Então, pesou-se a massa úmida da torta formada e aferiu-se a espessura da torta por meio do auxílio de um paquímetro. Posteriormente, a torta foi levada até a estufa à 100°C, onde ocorreu o processo de remoção da água remanescente. Após 24 horas obteve-se a massa seca da torta formada. A partir de então, foi possível realizar o cálculo de umidade da torta, por meio da Equação 7.

$$Umidade\ da\ Torta\ (\%) = \frac{\sum massa\ úmida - \sum massa\ seca}{\sum massa\ úmida} \times 100 \quad (7)$$

Tendo conhecimento a respeito da massa da torta úmida e seca e do tempo total do ciclo foi possível calcular a Taxa unitária de filtragem (TUF) em kg/h/m<sup>2</sup>, determinada a partir da Equação 8.

$$TUF = \frac{M}{A} \cdot \frac{3600}{Tempo\ ciclo\ (s)} \quad (8)$$

Onde M corresponde a massa seca da torta (kg) e A equivale a área do filtro (m<sup>2</sup>). Ao lado disso, a área do filtro trata-se da área circular interna do funil de Buchner ocupada pelo meio filtrante.

Para realizar o planejamento dos ensaios de filtração deve-se haver uma série de investigações preliminares com o intuito de analisar o tempo de formação e secagem da torta, o nível de vácuo e a seleção do meio filtrante (França e Casqueira, 2007). Diante disso, visa-se obter tortas com umidade ideal para compactação, baixa porcentagem de sólidos no filtrado e elevada Taxa Unitária de Filtração.

### **3.4. Testes Exploratórios**

Para determinar o tempo de secagem ideal de filtração e selecionar 2 dos melhores reagentes, fez-se em primeiro âmbito, testes exploratórios.

#### **3.4.1. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM**

Ao estabelecer a umidade ótima por meio do Ensaio de Compactação, iniciou-se os testes de filtração exploratórios, onde somente o tempo de secagem variou-se em 5 faixas distintas. Com os resultados obtidos, foi possível definir o tempo de secagem ideal para alcançar a umidade alvo pré-estabelecida. Os tempos utilizados foram 120, 180, 240, 360 e 600 segundos, sob uma pressão constante de -500 mmHg.

#### **3.4.2. REAGENTES**

Os reagentes auxiliares de filtração utilizados na realização dos testes exploratórios, foram fornecidos pela *BASF* e *Clariant*, e podem ser visualizados na Tabela 5 devidamente classificados. Eles foram preparados em uma concentração de 0,01% (massa/volume). Além disso, a solução do reagente foi submetida a uma agitação em agitador magnético por 10 minutos.

Após a preparação, adicionou-se o reagente na polpa. Por meio do auxílio de um bastão de vidro, agitou-se a mistura manualmente por 1 minuto, momento em que se obteve a polpa homogênea. Ao finalizar o tempo de condicionamento, os testes exploratórios foram iniciados.

Inicialmente, com o intuito de obter a umidade da torta, dois testes foram feitos sem a inserção de reagentes na polpa. Posteriormente a isso, fixou-se a dosagem de 40 g/t para os 5 auxiliares de filtração testados, com o objetivo de selecionar os 2

melhores reagentes que apresentaram menor teor de umidade, maior TUF e menor turbidez do clarificado.

Tabela 5 – Descrição dos reagentes sintéticos.

<b>Reagente</b>	<b>Fornecedor</b>	<b>Caracterização Química</b>
Magnafloc 504	BASF	Poliacrilamida Catiônica
Magnafloc 351	BASF	Poliacrilamida Aniônica
Magnafloc 10	BASF	Poliacrilamida Aniônica
Rheomax DR 1050	BASF	Poliacrilamida Aniônica
Flotisor RM 19400	Clariant	Modificador de Reologia

Após a finalização dos testes exploratórios, identificou-se os reagentes que forneceram os melhores resultados, fez-se um planejamento experimental e iniciou-se os testes efetivos.

### **3.5. Planejamento dos Ensaios e Análise Estatística de Experimentos Fatoriais $2^k$**

O Planejamento Fatorial  $2^k$  tem como intuito otimizar os procedimentos experimentais por meio de uma avaliação simultânea sobre o efeito de inúmeras variáveis, propiciando um menor número de experimentos. Neste tipo de planejamento os níveis são codificados em (+1) e (-1), sendo que o positivo é atribuído ao nível superior e o negativo ao nível inferior. Outrossim, esses códigos permitem estruturar as variáveis na forma de matrizes. Diante disso, torna-se possível determinar a influência das variáveis e suas interações no experimento. A matriz codificada para a realização dos testes efetivos pode ser visualizada na Tabela 6.

Ademais, ele é capaz de determinar quais fatores têm efeitos relevantes no resultado, além de determinar como o efeito de um fator varia conforme os níveis de outros fatores. Portanto, sem utilizar a técnica de planejamento fatorial, interações fundamentais entre fatores poderiam não ser detectadas. Desse modo, não haveria otimização máxima do sistema (CUNICO et al., 2008).

Tabela 6 – Matriz do Planejamento Fatorial 2<sup>3</sup>.

<b>Teste</b>	<b>Tipo de Reagente</b>	<b>pH</b>	<b>Dosagem (g/t)</b>
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1
9	-1	-1	-1
10	+1	-1	-1
11	-1	+1	-1
12	+1	+1	-1
13	-1	-1	+1
14	+1	-1	+1
15	-1	+1	+1
16	+1	+1	+1

Na realização dos testes efetivos utilizou-se o Planejamento Fatorial para determinar o menor número de experimentos possíveis, além de avaliar a interação entre as variáveis  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ . Em vista disso, a variável  $x_1$  corresponde ao tipo de reagente,  $x_2$  corresponde ao pH e  $x_3$  corresponde a dosagem.

No caso do tipo de reagente, -1 refere-se ao Magnafloc 504 e +1 refere-se ao Magnafloc 351. Para o pH, definiu-se -1 para o valor 6 e +1 para o valor 9,5, sendo que tais valores foram selecionadas com o propósito de verificar qual seria o comportamento do rejeito fosfático frente a um meio ácido e a um meio básico. Para o ajuste do pH utilizou-se soluções de HCl e NaOH. Já com relação a dosagem, -1 refere-se a 30 g/t e +1 refere-se a 80 g/t, sendo que tais valores foram selecionados com base na dosagem utilizada nos testes exploratórios, de 40 g/t.

Vale ressaltar que, o Planejamento Fatorial foi realizado somente para realização dos testes efetivos, todos eles foram realizados em duplicata, totalizando em 16 testes. Na Tabela 7 é possível visualizar o planejamento fatorial.

Tabela 7 – Planejamento Experimental 2<sup>3</sup>.

<b>Teste</b>	<b>Tipo de Reagente</b>	<b>pH</b>	<b>Dosagem (g/t)</b>
1	Magnafloc 504	6,0	30
2	Magnafloc 351	6,0	30
3	Magnafloc 504	9,5	30
4	Magnafloc 351	9,5	30
5	Magnafloc 504	6,0	80
6	Magnafloc 351	6,0	80
7	Magnafloc 504	9,5	80
8	Magnafloc 351	9,5	80
9	Magnafloc 504	6,0	30
10	Magnafloc 351	6,0	30
11	Magnafloc 504	9,5	30
12	Magnafloc 351	9,5	30
13	Magnafloc 504	6,0	80
14	Magnafloc 351	6,0	80
15	Magnafloc 504	9,5	80
16	Magnafloc 351	9,5	80

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes a caracterização do rejeito que contempla a massa específica dos sólidos, caracterização química, análise granulométrica e ensaio de compactação, bem como os ensaios de filtração. Com relação aos ensaios de filtração, eles foram divididos em 2 etapas – testes exploratórios e testes efetivos.

Os testes exploratórios foram realizados para fins de dimensionamento. Dessa forma, definiu-se, primeiramente, o tempo ideal para secagem da torta, e em seguida dois dos 5 reagentes testados que apresentaram melhores resultados relacionados a umidade da torta, TUF e turbidez do clarificado. Já nos testes efetivos, avaliou-se 3 variáveis, sendo elas tipo de reagente, dosagem e pH.

### 4.1. Caracterização da amostra

#### 4.1.1. ANÁLISE QUÍMICA

O resultado da análise química constata que o teor de fosfato ( $P_2O_5$ ) na amostra, é de 7,35% no circuito *cleaner* e 2,11% no circuito *rougher*, sendo este último um teor comum de  $P_2O_5$  no rejeito fosfático, conforme apresentado por Santos e Matiolo (2021), bem como por Martins (2017).

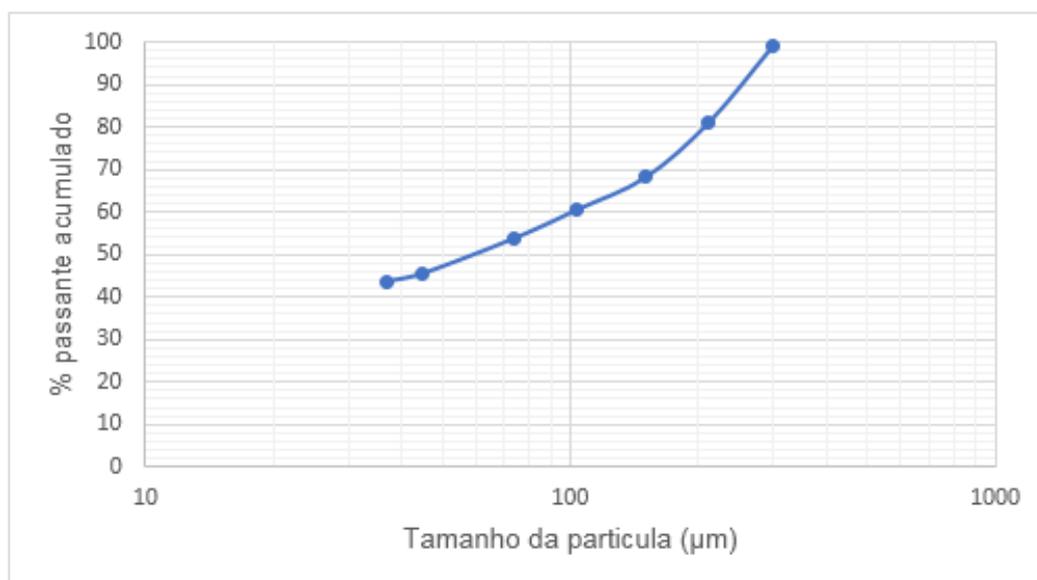
#### 4.1.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A Tabela 8 apresenta a distribuição granulométrica do rejeito fosfático. A análise granulométrica realizada propiciou a obtenção de dados para construção da curva granulométrica apresentada na Figura 23.

Tabela 8 - Distribuição granulométrica após peneiramento a úmido.

Peneiras (#)	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Massa retida (g)	% retido simples	% retido acumulado	% passante
48	300	0,65	0,657	0,657	99,343
65	212	17,87	18,058	18,715	81,285
100	150	12,96	13,096	31,811	68,189
150	104	7,44	7,518	39,329	60,671
200	74	6,65	6,720	46,049	53,951
325	45	8,23	8,316	54,365	45,635
400	37	1,89	1,910	56,275	43,725
>400	37	43,27	43,725	100,000	0,000
<b>TOTAL</b>		98,96	100,000		100,000

Figura 23 – Curva granulométrica obtida.



Fonte: Próprio autor.

Ao observar a Tabela 8, nota-se que, o tamanho em que 80% das partículas são passantes,  $d_{80}$ , é de 210  $\mu\text{m}$ , e o tamanho em que 50% das partículas são passantes,  $d_{50}$ , é de 60  $\mu\text{m}$ . Além disso, percebe-se que, a amostra apresenta uma quantidade significativa de partículas (43,725%) abaixo de 37  $\mu\text{m}$ . Isso significa que o material apresenta uma quantidade considerável de partículas finas, o que pode impactar negativamente na filtração, visto que haverá uma maior dificuldade na obtenção da umidade ótima.

#### 4.1.3. MASSA ESPECÍFICA

A picnometria a gás é amplamente utilizada na mineração por propiciar resultados de alta precisão. Na realização desse trabalho, por meio da Tabela 9, é possível identificar que, a densidade média é igual a  $2,913 \text{ g/cm}^3 \pm 0,0128$ . Tal densidade é comum para rejeitos fosfáticos advindos dessa região, conforme apresentando por Rodrigues (2016) e Martins (2017). Com base nesse valor foi possível dar prosseguimento nos cálculos para preparação da polpa.

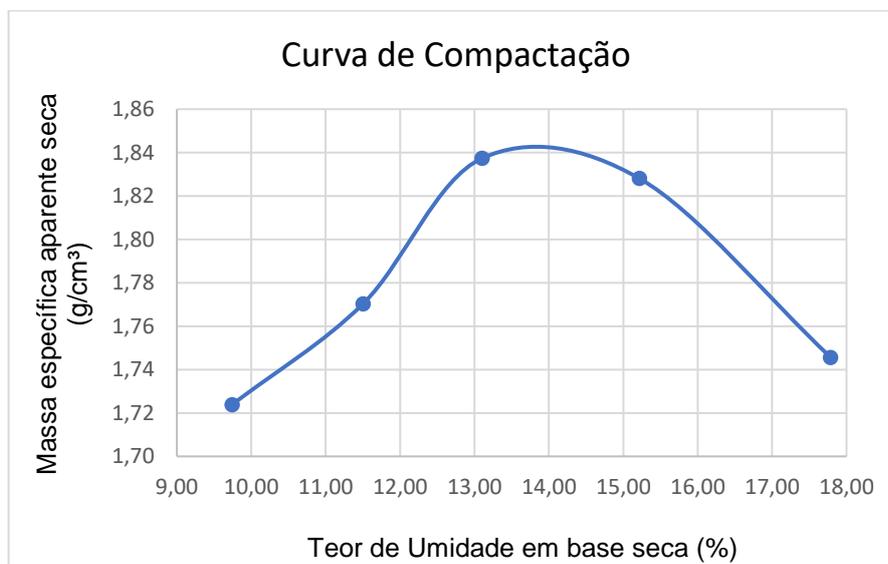
Tabela 9 - Resultados obtidos pelo método de picnometria a gás.

<b>Ensaio</b>	<b>Volume do sólido (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1	19,4387	2,899
2	19,2094	2,933
3	19,3403	2,913
4	19,3944	2,905
Média	19,3457	2,913

#### 4.1.4. UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO

Realizou-se o Ensaio de Proctor para determinação da umidade ótima para compactação do rejeito fosfático. Com os resultados apresentados, por meio dos cálculos de umidade e massa específica aparente seca advindos de cada ensaio de compactação realizados em níveis distintos de umidade, foram obtidos 5 pontos para construção da curva de compactação. Dos resultados obtidos, 2 pontos apresentaram-se no ramo seco, 1 ponto próximo a umidade ótima e 2 pontos no ramo úmido da curva de compactação, conforme determina a NBR 7182:2016. A curva obtida está representada na Figura 24.

Figura 24 – Gráfico obtido por meio da curva de compactação.



Fonte: Próprio autor.

Ao analisar a curva de compactação nota-se que o aumento do teor de umidade promove o aumento da massa específica aparente seca. Entretanto, ao atingir determinado ponto ocorre o efeito oposto. Conforme Reinert, Silva e Diniz (2015), a adição de água ao solo seco facilita a sua compactação, no entanto isso não ocorre indefinidamente. Experimentalmente, a elevação da quantidade de água apresenta um efeito positivo até que não se alcance a umidade ótima. A partir do momento em que a adição de água apresenta umidades superiores a umidade ótima, nota-se que ocorre o processo inverso.

Diante disso, o ponto em que a massa específica aparente seca apresenta seu valor máximo,  $1,84 \text{ g/cm}^3$ , corresponde a umidade ótima de compactação em base seca, sendo ela, 13,10%. Para conversão de umidade em base seca para umidade em base úmida utilizou-se a Equação 6. Dessa forma, a umidade alvo utilizada como referência nos ensaios de filtração foi de 11,59%.

## 4.2. Testes de Filtração

Os resultados dos ensaios de filtração foram divididos em 2 etapas – testes exploratórios e testes efetivos. Os testes exploratórios foram realizados para fins de dimensionamento dos ensaios, já os testes efetivos foram executados para identificar a influência do tipo de reagente, dosagem e pH.

#### 4.2.1. TESTES EXPLORATÓRIOS

Na realização dos ensaios exploratórios, primeiramente definiu-se a umidade ótima por meio do Ensaio de Proctor, e estabeleceu-se o tempo de secagem ideal por meio dos testes de filtração iniciais. Com isso foi possível parametrizar os ensaios. Posteriormente a isso, realizou-se testes de filtração para selecionar os 2 reagentes que apresentassem os melhores resultados.

##### 4.2.1.1. Determinação do tempo de secagem

Foram realizados 5 ensaios de filtração iniciais, em duplicata, com o intuito de identificar a umidade da torta do rejeito fosfático, bem como a influência do tempo de secagem sobre essa umidade. Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 10.

Tabela 10 – Variação do tempo de secagem da torta.

Teste	Secagem (s)	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)	Umidade (%)	TUF (kg/h/m <sup>2</sup> )
1	120	95,05	76,23	19,80	374,65
2	180	94,68	76,51	19,19	284,39
3	240	95,65	77,3	19,18	226,43
4	360	95,02	76,95	19,02	162,08
5	600	95,53	77,75	18,61	104,21

Ao avaliar os resultados apresentados, concluiu-se que não houve uma variação significativa na umidade da torta conforme aumentava-se os tempos de secagem sob uma pressão constante de -500 mmHg. Dessa forma, definiu-se como tempo de secagem para realização dos demais testes, o menor tempo testado, sendo, portanto, 120 segundos. Além disso, vale ressaltar que, para esse tempo de secagem, a TUF foi igual a 374,65 kg/h/m<sup>2</sup>.

##### 4.2.1.2. Seleção de Reagentes

Após definir o tempo de secagem ideal foram realizados 5 ensaios, em duplicata, com o intuito de testar os diferentes tipos de reagentes. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados obtidos para seleção de reagentes.

Reagente	Formação (s)	Secagem (s)	Tempo de Ciclo (s)	Turbidez (FTU)	Umidade (%)	TUF (kg/h/m <sup>2</sup> )
Branco	60	120	180	3,36	19,80	374,65
Magnafloc 504	51	120	171,00	2,30	18,44	406,50
Rheomax DR 1050	175	120	295,00	2,37	22,47	237,45
Magnafloc 10	82	120	202,00	0,00	19,58	346,38
Magnafloc 351	85	120	205,00	1,87	17,90	340,45
Floticor RM 19400	Não formou torta					

Ao avaliar os resultados, concluiu-se que não houve formação de torta ao utilizar o Floticor RM 19400, conforme apresentado na Figura 25. Além disso, o Magnafloc 351 apresentou o menor teor de umidade (17,90%), enquanto que o Magnafloc 504 apresentou a maior taxa unitária de filtragem (406,50 kg/h/m<sup>2</sup>). Sendo ambos, parâmetros decisivos na seleção dos reagentes. Ademais, concluiu-se que, a turbidez do clarificado não apresentou resultados significativos, portanto não impactou na seleção dos polímeros.

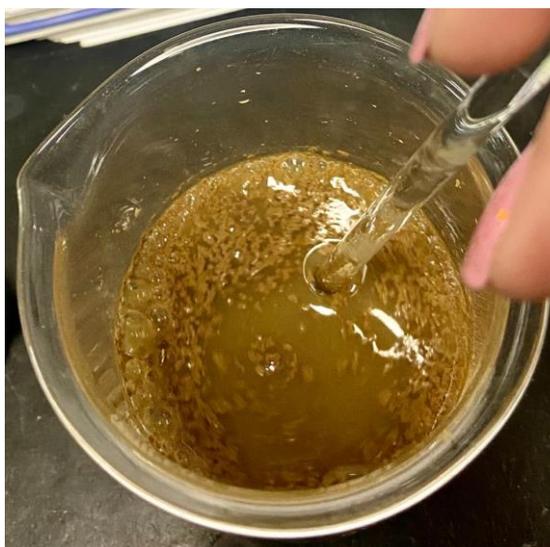
Figura 25 - Não houve formação da torta ao utilizar o Floticor RM 19400.



Fonte: Próprio autor.

Na interpretação dos resultados, verificou-se que, como o Magnafloc 351 trata-se de uma poliacrilamida aniônica, apresenta elevado peso molecular, bem como provável carga elétrica de mesmo sinal da superfície das partículas. Sendo assim, o mecanismo de floculação deve ocorrer por pontes de ligação, formando flocos grandes com elevada quantidade de água em seu interior, o que pode ser visualizado na Figura 26.

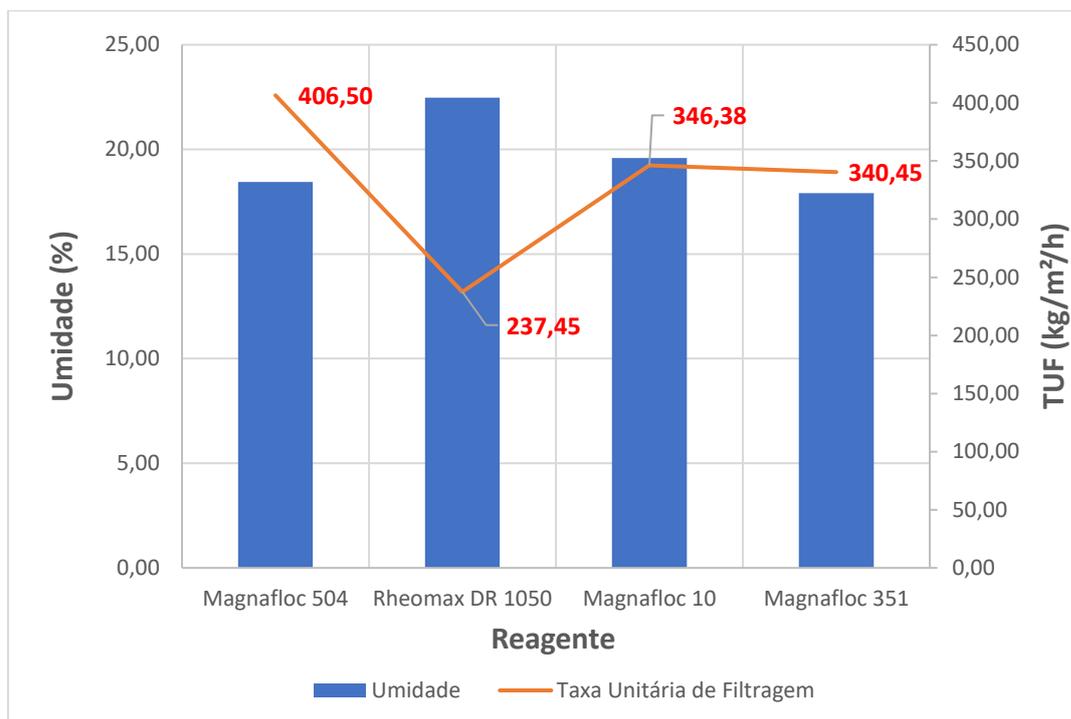
Figura 26 – Formação de flocos pelo mecanismo de Floculação por Pontes.



Fonte: Próprio autor.

Já o Magnafloc 504 refere-se a uma poliacrilamida catiônica, que possui baixo peso molecular e provável carga elétrica de sinal contrário ao sinal da superfície das partículas. Diante disso, o mecanismo de floculação deve ser dado por meio da Reversão Localizada de Carga, formando assim, flocos pequenos, que apresentam menor retenção de líquido, logo menor umidade da torta, maior velocidade e maior taxa unitária de filtragem, conforme ilustrado na Figura 27. Diante de tais informações, espera-se que o floculante catiônico apresenta um comportamento similar ao coagulante.

Figura 27 – Desempenho dos floculantes utilizados na filtração.



Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.2. TESTES EFETIVOS

Após selecionar os reagentes que apresentaram melhores resultados, foi possível definir os níveis do planejamento experimental, com o intuito de avaliar quais variáveis apresentaram maior influência no processo e se houve interação entre elas nos experimentos. Na Tabela 12 é possível visualizar os resultados obtidos nos experimentos.

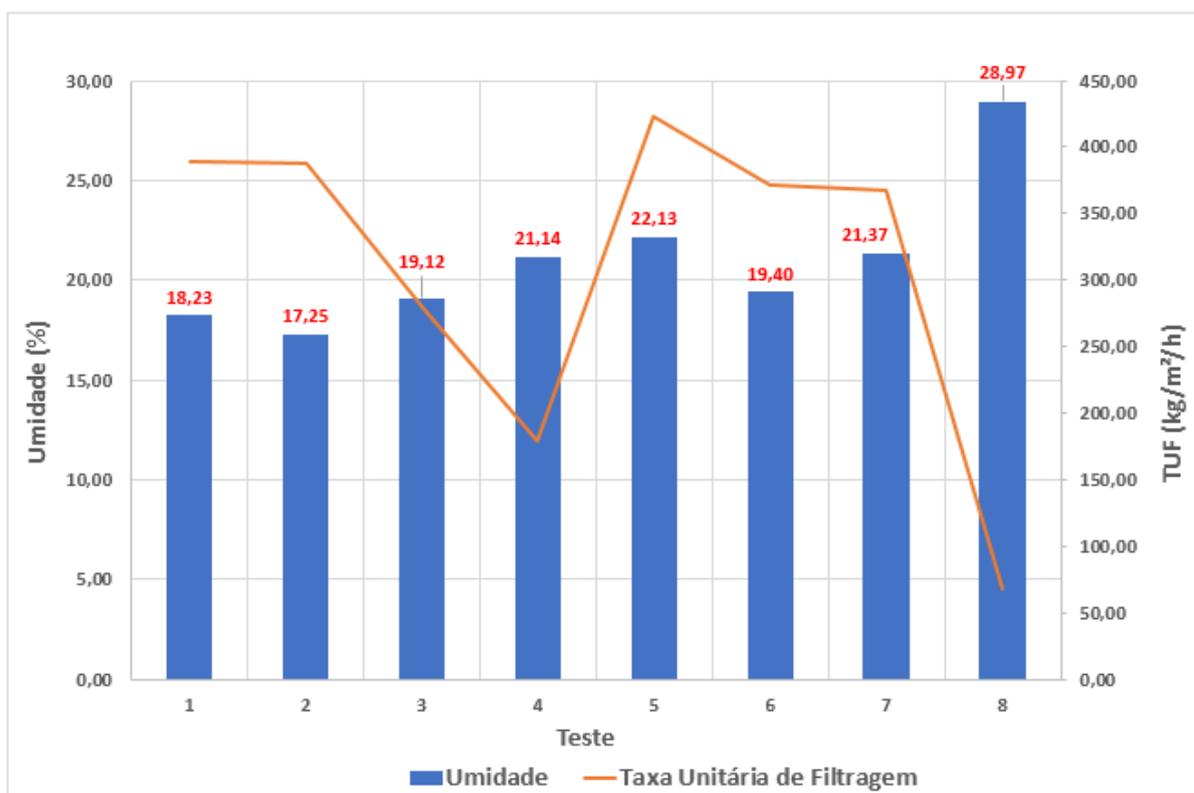
Tabela 12 – Resultados obtidos no Planejamento Experimental.

Teste	Tipo de Reagente	pH	Dosagem (g/t)	Formação (s)	Umidade (%)	TUF (Kg/m²/h)
1	Magnafloc 504	6,0	30	60	18,93	384,08
2	Magnafloc 351	6,0	30	60	17,47	386,54
3	Magnafloc 504	9,5	30	130	19,32	278,91
4	Magnafloc 351	9,5	30	266	21,34	179,77
5	Magnafloc 504	6,0	80	40	21,36	435,3
6	Magnafloc 351	6,0	80	67	19,3	371,83
7	Magnafloc 504	9,5	80	70	20,4	367,27

8	Magnafloc 351	9,5	80	900	28,82	68,15
9	Magnafloc 504	6,0	30	57	17,52	394,29
10	Magnafloc 351	6,0	30	60	17,03	387,77
11	Magnafloc 504	9,5	30	130	18,91	279,12
12	Magnafloc 351	9,5	30	268	20,93	178,98
13	Magnafloc 504	6,0	80	50	22,89	410,27
14	Magnafloc 351	6,0	80	68	19,49	370,89
15	Magnafloc 504	9,5	80	70	22,34	367,5
16	Magnafloc 351	9,5	80	925	29,11	66,47

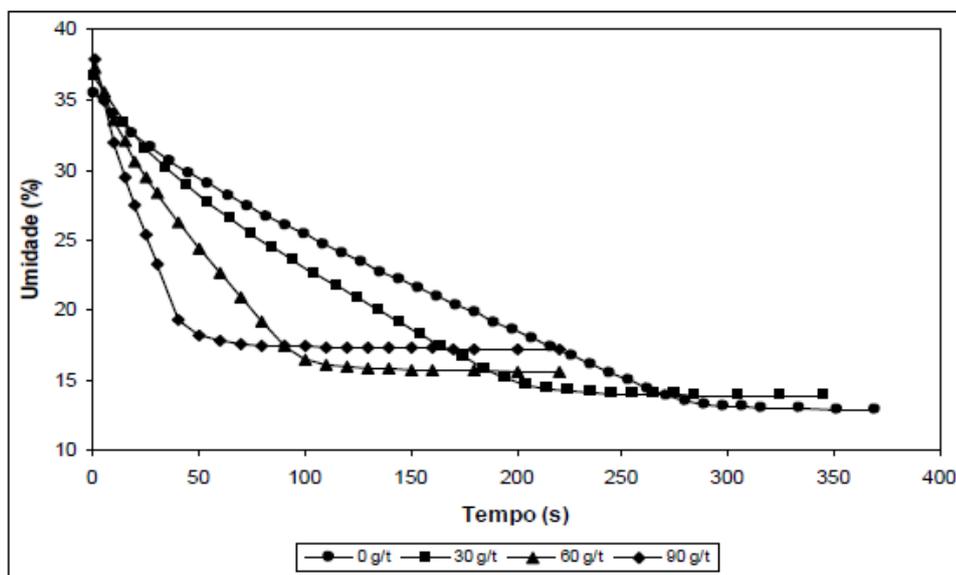
Conforme apresentado na Figura 28, é possível verificar que, ao fazer a média dos testes, o Magnafloc 504 em pH ácido e elevada dosagem (testes 5 e sua réplica, teste 13) apresentou a maior TUF. Tais resultados comprovam o que já havia sido enfatizado por Dias *et al.* (2004), que o aumento da dosagem proporciona redução no tempo de ciclo, o que causa o aumento na TUF, no entanto a umidade final da torta é maior. Dessa forma, conclui-se que, quanto menor a dosagem do reagente, menor será a umidade da torta, o que pode ser visualizado na Figura 29.

Figura 28 – Desempenho dos reagentes mediante a condições distintas.



Fonte: Próprio autor.

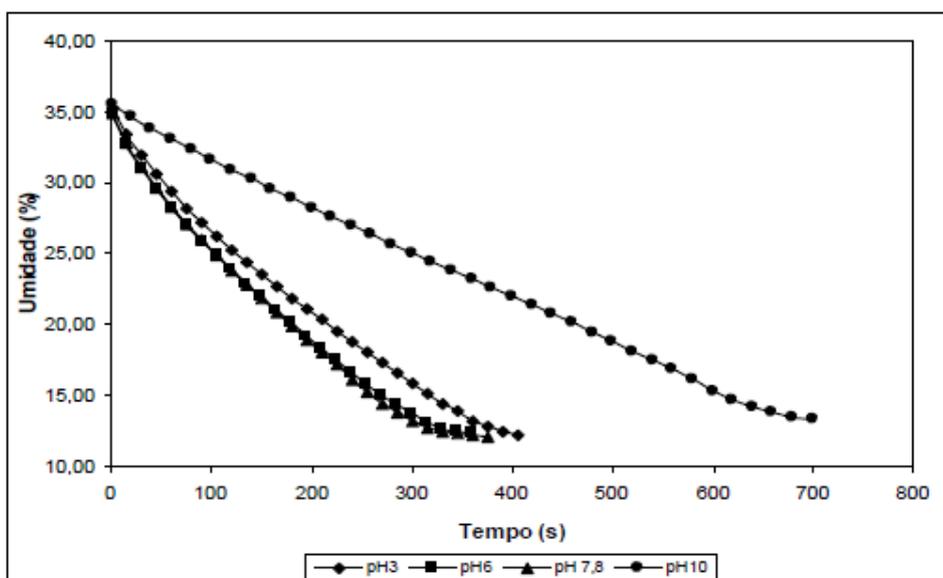
Figura 29 – Curva de desaguamento em diversas concentrações de floculante.



Fonte: Dias *et al.* (2004).

Já o Magnafloc 351, em menor dosagem e em pH ácido (teste 2 e sua réplica, teste 10) apresentou menor umidade quando comparado com os demais testes. Valores de pH ácidos propiciam menor umidade, enquanto que pHs básicos apresentam maior umidade, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Curva de desaguamento em diversas faixas de pH de coagulante.



Fonte: Valadão *et al.* (2007).

O motivo da umidade ter apresentado menor teor em pH 6, pode ser explicado pelo fato do potencial isoelétrico do rejeito fosfático ser próximo a este valor, visto que o potencial isoelétrico de um determinado sistema é dado no pH em que o potencial zeta (mineral puro) ou carga residual (conjunto de minerais) é igual a zero. Nesse momento as forças repulsivas presentes nas partículas são nulas, prevalecendo, assim, as forças atrativas, o que promove a agregação das partículas, tornando mais eficiente a filtração. Por outro lado, verificou-se que ao elevar o pH, a umidade aumentou. Isso ocorre porque a carga residual, dos minerais que compõem o rejeito fosfático, também se eleva, havendo, assim, um excesso de carga negativa na superfície da partícula, promovendo a dispersão da polpa.

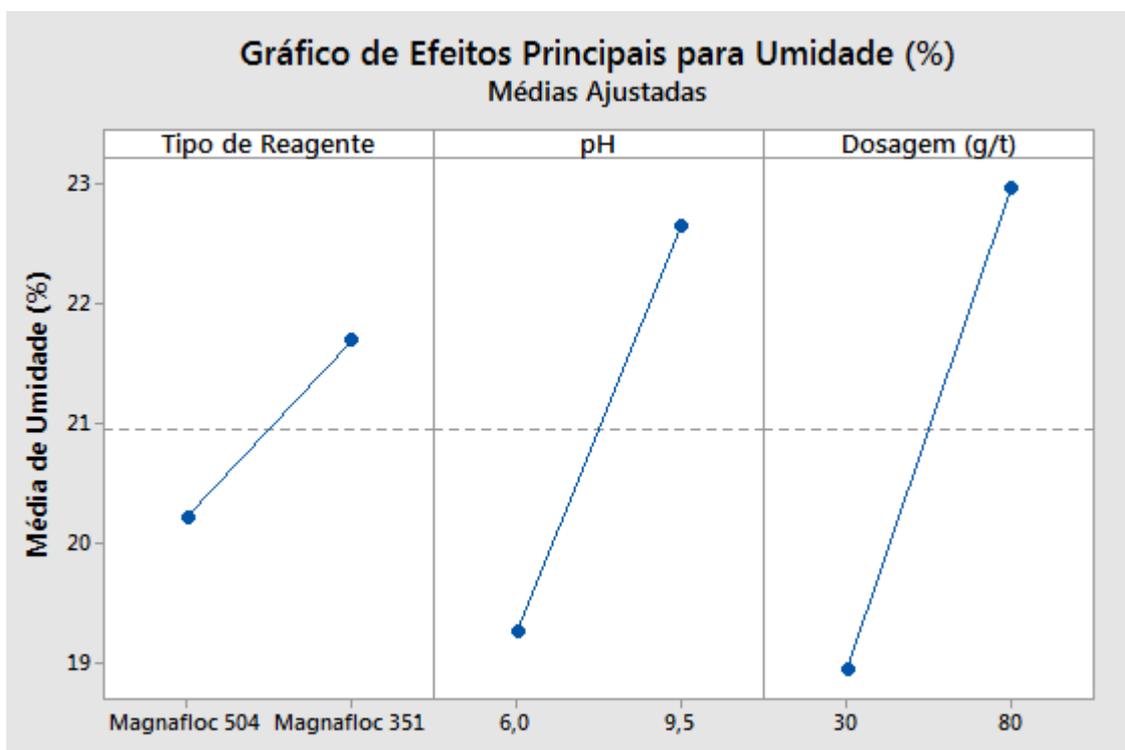
### **4.3. Planejamento Fatorial a Dois Níveis**

Neste tópico serão abordados a influência que as variáveis de processo e a interação entre elas ocasionaram na umidade da torta e na taxa unitária de filtragem. Ressalta-se que, as variáveis independentes utilizadas foram o tipo de reagente, a dosagem e o pH. Além disso, ressalta-se que os dados obtidos são provenientes do software *Minitab 17 Statistical Software*. As respostas são umidade da torta e a taxa unitária de filtragem ou razão de filtragem.

#### **4.3.1. UMIDADE DA TORTA**

O gráfico de Efeitos Principais para Umidade apresenta as diferenças entre a média dos níveis para os fatores analisados, conforme demonstra a Figura 31.

Figura 31 – Gráfico dos efeitos principais para umidade da torta.



Fonte: Próprio autor.

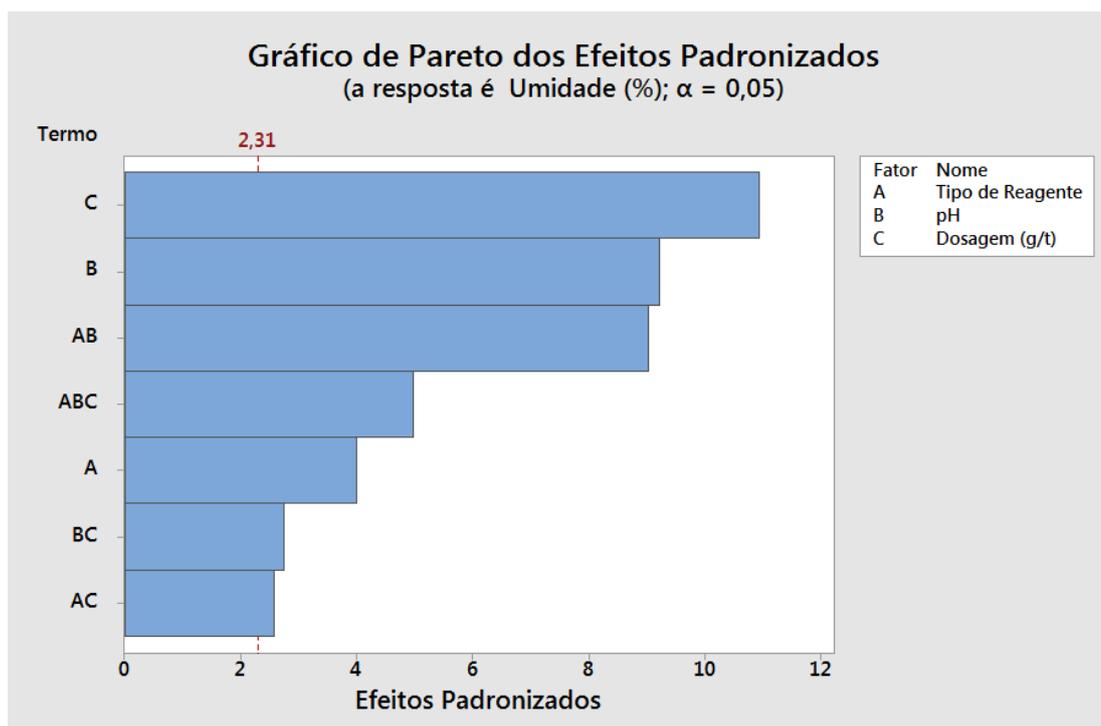
A inclinação positiva do gráfico aponta que ocorreu um aumento da umidade média ao passar do Magnafloc 504 para o Magnafloc 351. Tal fato pode ser justificado em razão do ensaio 16, utilizando o Magnafloc 351 com alta dosagem de reagente, em pH básico, ter apresentado alto teor de umidade, o que impactou diretamente na média.

Paralelamente a isso, a inclinação positiva para o efeito do pH indica que para obter uma menor umidade da torta deve-se utilizar o nível mínimo, isto é, pH 6. Tal resultado pode ser explicado pelo fato do potencial isoelétrico dos minerais que compõe o rejeito fosfático apresentarem carga residual próximo a esse pH, o que reduz as forças repulsivas entre as partículas, prevalecendo as forças atrativas, o que impacta positivamente na filtração.

Já a reta que corresponde ao efeito da dosagem também possui inclinação positiva, evidenciando que, a menor umidade é obtida quando utiliza-se o nível mínimo de dosagem, isto é, 30 g/t. O aumento na umidade da torta quando utiliza-se uma maior dosagem pode ser explicado pela água retida no interior do floco.

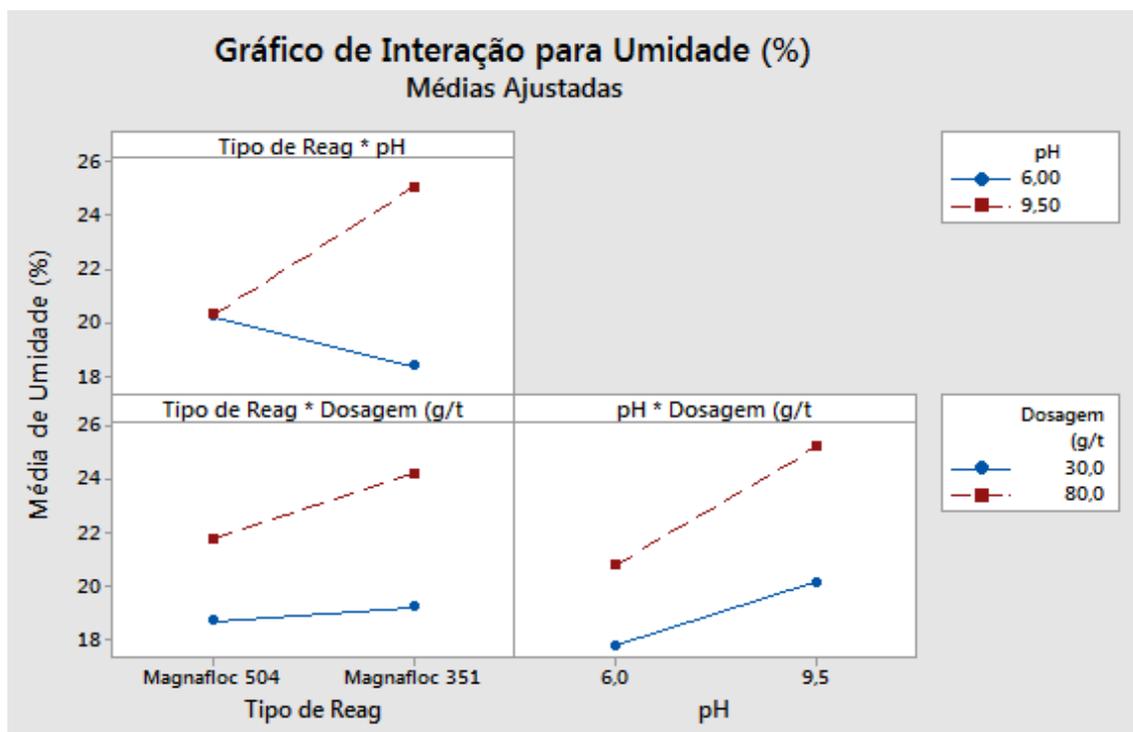
Por fim, destaca-se que, a variável que apresentou maior influência com relação a umidade da torta foi a dosagem, seguida pelo pH e a que apresentou menor impacto foi o tipo de reagente. Tais afirmações podem ser comprovadas por meio do Gráfico de Pareto, representado na Figura 32.

Figura 32 - Gráfico de Pareto para Umidade.



Já com relação ao gráfico de interação, linhas paralelas indicam que não houve interação entre as variáveis. Dessa forma, quanto maior for a diferença de inclinação das linhas maior interação entre as variáveis. A interação entre os fatores analisados pode ser visualizada no gráfico de interação para umidade, apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Gráfico de interações entre os fatores para umidade da torta.



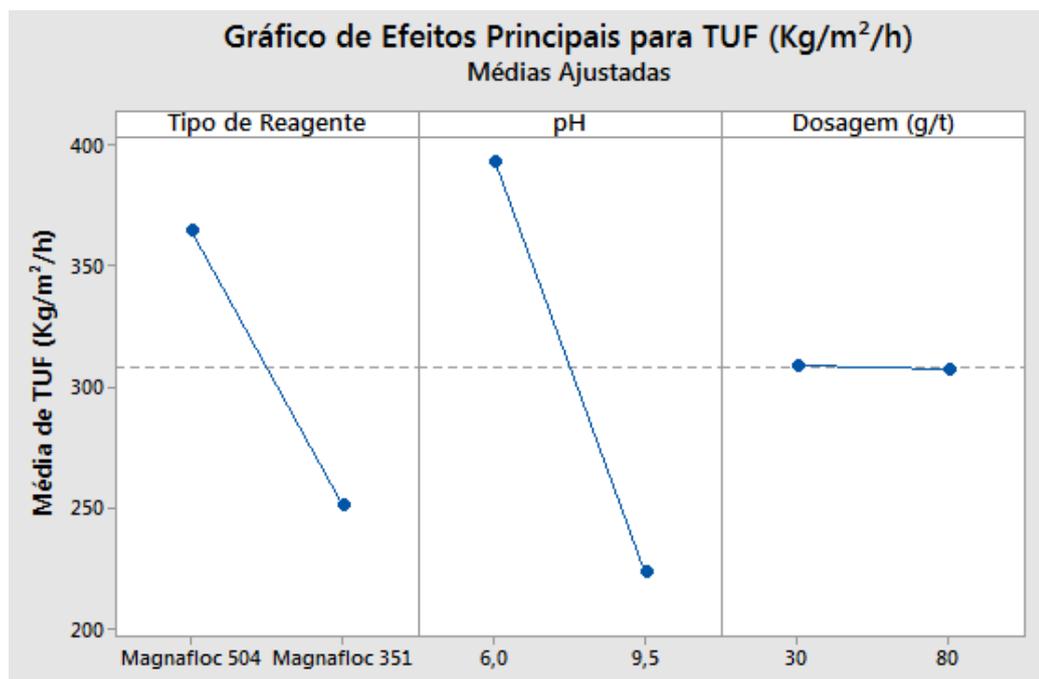
Fonte: Próprio autor.

Ao analisar o gráfico, conclui-se que, há uma menor interação entre o pH e a dosagem, bem como tipo de reagente e dosagem, já que as retas são praticamente paralelas. Já a interação entre tipo de reagente e pH é expressiva, visto que as retas possuem inclinações distintas. Tais afirmações também podem ser comprovadas por meio do Gráfico de Pareto, representado na Figura 32.

#### 4.3.2. TAXA UNITÁRIA DE FILTRAGEM

Conforme apresentado na Figura 34, a inclinação negativa do gráfico aponta que ocorreu um aumento da TUF ao utilizar ao Magnafloc 504, o que pode ser justificado em virtude do reagente tratar-se de um poliacrilamida catiônica, portanto o mecanismo de floculação refere-se a Reversão Localizada de Carga. Tal mecanismo propicia a formação de flocos pequenos, que apresentam menor retenção de líquido e são mais estáveis, o que favorece a filtração.

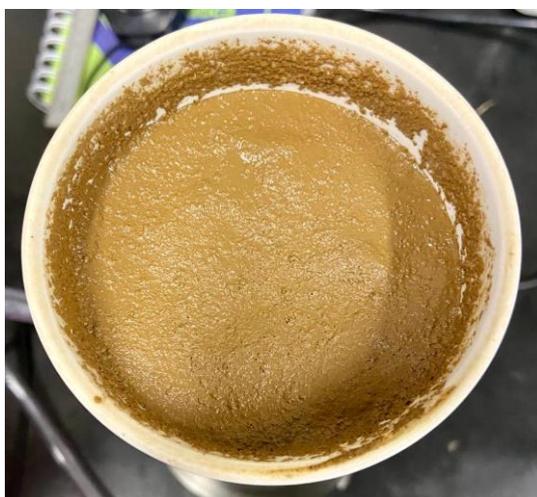
Figura 34 - Gráfico dos efeitos principais para TUF.



Fonte: Próprio autor.

Paralelamente a isso, a inclinação negativa para o efeito do pH indica que para obter uma maior TUF deve-se utilizar o pH 6. Durante a realização dos testes notou-se que, utilizando pH 9,5, houve uma redução no nível de vácuo gradativamente até atingir -400 mmHg, formando tortas mais úmidas (Figura 35), o que aumentou o tempo de formação da torta e, conseqüentemente, o tempo de ciclo, reduzindo a TUF. Tal afirmação pode ser verificada na Tabela 12.

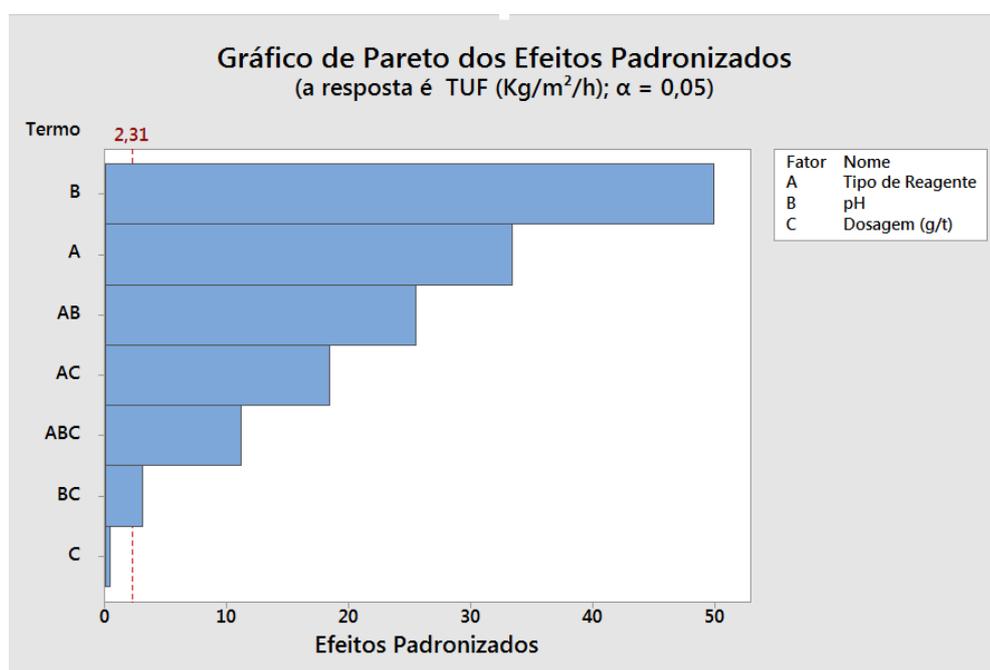
Figura 35 – Formação de torta com maior umidade utilizando pH 9,5.



Fonte: Próprio autor.

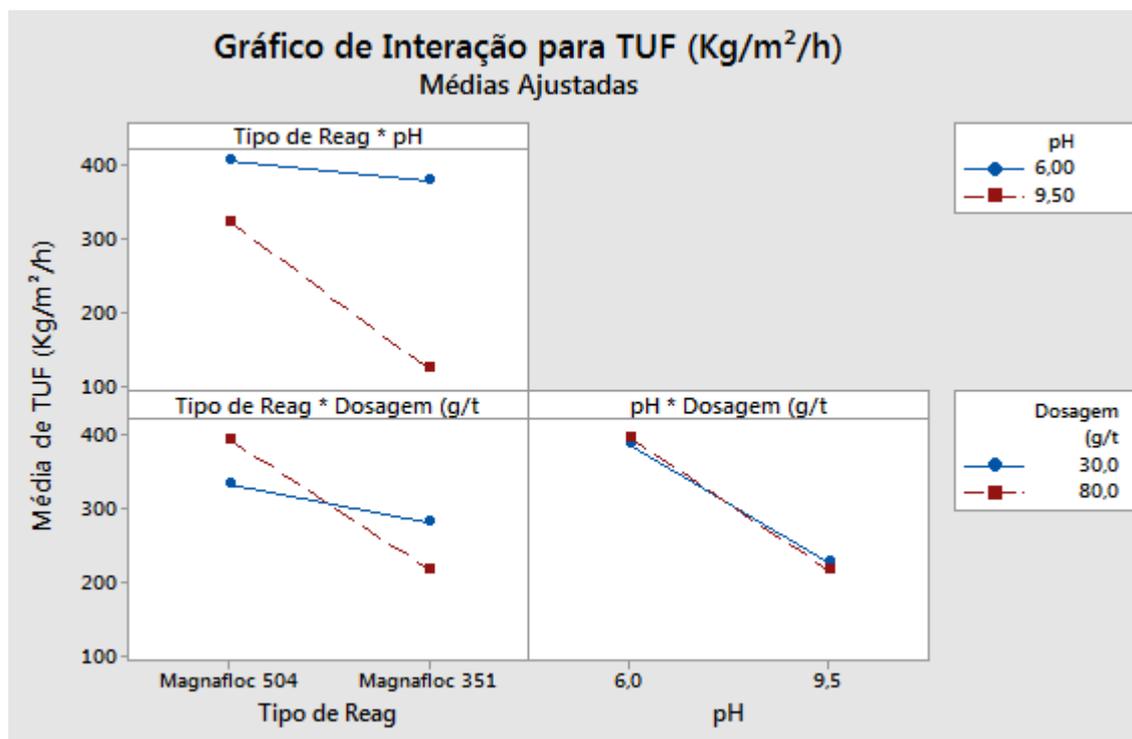
Já a reta referente ao efeito da dosagem não apresentou inclinação significativa (Figura 34). Dessa forma, concluiu-se que, essa variável não apresentou influência significativa na TUF dentro da faixa testada. Por fim, destaca-se que, a variável que apresentou maior influência com relação a TUF foi o pH, seguida pelo tipo de reagente. Tais afirmações podem ser comprovadas pelo Gráfico de Pareto representado na Figura 36.

Figura 36 - Gráfico de Pareto para Taxa Unitária de Filtragem.



Com relação ao gráfico de interação para TUF, verifica-se que a interação entre pH e dosagem é pouco significativa, já que as retas estão praticamente paralelas. Já a interação entre tipo de reagente e pH, e a interação entre tipo de reagente e dosagem foram mais significativas, visto que as retas apresentam inclinações distintas, o que pode ser visualizado na Figura 37. Essas informações podem ser comprovadas ao analisar o Gráfico de Pareto representado na Figura 36.

Figura 37 – Gráfico de Interações entre os fatores para TUF.



Fonte: Próprio autor.

Com o intuito de otimizar a filtração do rejeito fosfático, os parâmetros ideais conforme a análise do planejamento fatorial, utilizando o gráfico de otimização de resposta, são: Magnafloc 351, pH 6 e dosagem de 30 g/t. Tais dados estão apresentados na Figura 38.

Figura 38 - Parâmetros definidos e solução ideal para o processo de filtração.

### Otimização da Resposta: TUF (Kg/m<sup>2</sup>/h); Umidade (%)

#### Parâmetros

Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior	Peso	Importância
TUF (Kg/m <sup>2</sup> /h)	Máximo	66,4709	435,299		1	1
Umidade (%)	Mínimo		17,035	29,1080	1	1

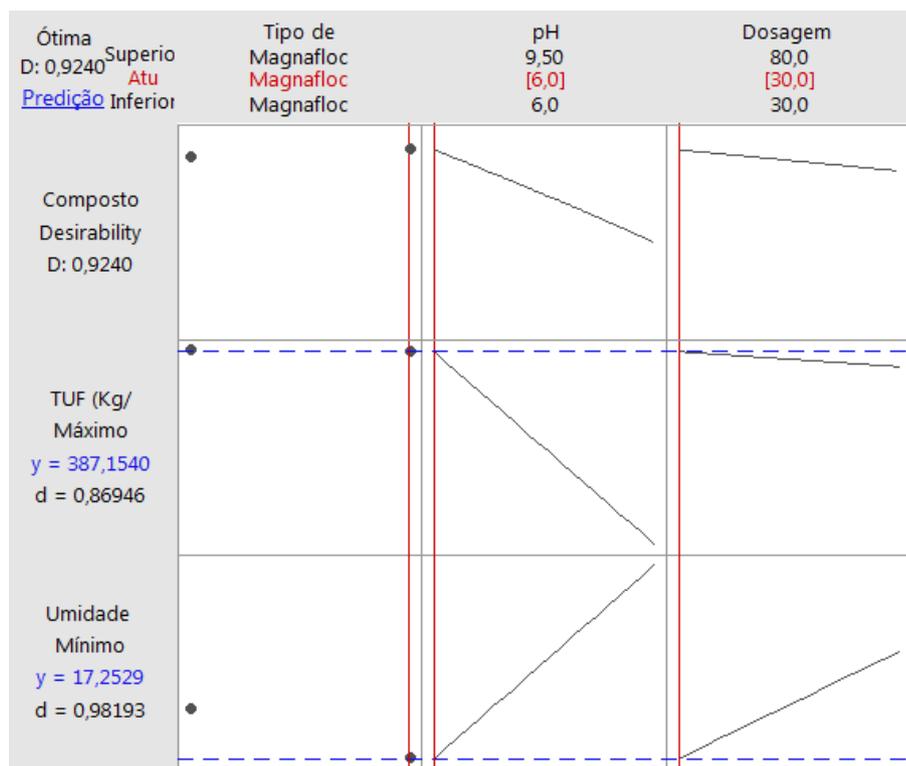
#### Solução

Solução	Tipo de Reagente	pH	Dosagem (g/t)	TUF	Umidade (%)	Desirability Composta
				(Kg/m <sup>2</sup> /h) Ajuste		
1	Magnafloc 351	6	30	387,154	17,2529	0,923985

Fonte: Próprio autor.

Paralelamente a isso, o gráfico apontou que a desejabilidade (D) dos resultados foi igual à 0,9240, o que indica que a combinação dos fatores analisados satisfaz 92,40% das metas definidas. O gráfico obtido por meio da ferramenta de otimização de resposta pode ser visualizado na Figura 39.

Figura 39 - Otimização de resposta.



Fonte: Próprio autor.

#### 4.4. Viabilidade Econômica

Outro ponto a considerar, é que o Magnafloc 504 também apresentou resultados com baixa umidade e próxima ao Magnafloc 351. Entretanto, ao realizar uma pesquisa sobre os reagentes, verificou-se que, o Magnafloc 504, por se tratar de uma poliacrilamida catiônica, tende a apresentar um custo muito elevado, frente a uma poliacrilamida aniônica, como é o caso do Magnafloc 351. Em vista disso, tal pesquisa também viabiliza a escolha pelo reagente aniônico.

## 5. CONCLUSÃO

Os reagentes testados não alcançaram a umidade alvo para o empilhamento do rejeito fosfático, de 11,59% em base úmida, conforme determinado no Ensaio de Proctor. Entretanto, tanto o Magnafloc 351 quanto o Magnafloc 504, foram capazes de reduzir a umidade da torta e propiciaram elevadas TUFs. Nesse sentido, o Magnafloc 351, em pH 6 e em uma dosagem de 30 g/t, apresentou melhor influência na filtração do rejeito fosfático, contribuindo para menores tempos de formação da torta, maiores TUF e menores umidades da torta, sendo que a turbidez do clarificado se manteve mínima em todos os testes realizados.

Diante disso, a filtração apresentou resultados mais satisfatórios utilizando reagente aniônico, pH ácido e menor dosagem de reagente, sendo que a dosagem foi o fator que mais impactou a umidade da torta. Já o pH foi o fator que mais influenciou na TUF, sendo que a maior taxa foi obtida ao utilizar o reagente catiônico, pH ácido, em qualquer uma das dosagens testadas, visto que tal fator não apresentou influência na taxa de filtragem. Tais conclusões foram obtidas ao analisar os fatores que apresentaram maior influência no processo, bem como por meio de uma análise econômica entre os reagentes.

A desejabilidade dos testes efetivos, que envolveram o planejamento experimental, foi de 92,40%, o que presume que o nível de confiabilidade é elevado. Em vista disso, a ferramenta de otimização de resposta apontou que os melhores resultados para filtração do rejeito fosfático foram obtidos utilizando o reagente Magnafloc 351, pH 6 e dosagem de 30 g/t. Seguindo tais premissas o processo apresentará tortas com menores umidades, menores tempos de formação para torta, maiores TUF e baixa turbidez do filtrado.

## 6. REFERÊNCIAS

AMARANTE, S. C. et al. **Cake dewatering of some iron ore products industrial.** Minerals & Metallurgical Processing, v.19, n.3, p. 161-164, 2002.

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de Rejeito Filtrado: A Expansão de uma Alternativa para Substituição de Barragens.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

ARAÚJO JUNIOR, A. M. **Influência das variáveis de processo na filtração cerâmica de polpas de minério de ferro.** (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

BRAGA, Frederic Yann Armache. **Utilização de Tecnologias de Filtração de Rejeitos para Empilhamento a Seco.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

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

CONCHA, F. **Solid-Liquid Separation in the Mining Industry.** Switzerland: Springer International Publishing, 2014.

DIAS, C. L. P. et al. **Utilização de Reagentes Auxiliares na Filtração.** REM. Revista Escola de Minas (Impresso), Ouro Preto, v. 57, n.4, p. 229-234, 2004.

FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, G. R. **Ensaio de filtração em filtro de folha (leaf test).** In: LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A. e ALMEIDA, S.L.M. (Ed.). Tratamento de Minérios. Práticas Laboratoriais. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2007, p. 573-607.

GOMES, R. B. et al. **Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil.** Journal of Materials Research and Technology. Vol. 5, p. 339–344, 2016.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** (Dissertação de mestrado). UFMG, Belo Horizonte, 2011. 114 p.

GUIMARÃES, N. C. et al. **COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS DE FILTRAGEM APLICADAS A REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO.** *Redução de Minério de Ferro & Tecnologia Mineral.* p. 460 – 468, 2011.

HAHN, J 2019. **Tailings dewatering with increased filtration rates and lowest filter cake moisture for filtered tailings stacking.** AJC Paterson, AB Fourie & D Reid (eds), *Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 245-257.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO: *IBRAM.* (2016). *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração.* (1a ed). Brasília.

LEMONS JUNIOR, M. A. **Estudos para avaliação da capacidade de reservatório de rejeitos de nióbio.** 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

Les, G.B., Leon, C.S., John, E. (2011). **Development and Pilot-Scale Demonstration of Deep Cone Paste Thickening Process for Phosphatic Clay Disposal: Phase II.** Institute of Phosphate Research.

LUZ, A. B. *et al.* **Tratamento de minérios.** 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2018.

MARTINS, M. **Influência da Adição de Surfactante na Filtração de Rejeito Fosfático.** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá, 2017.

Moura, M. J., e Figueiredo, M. M. (2002). **Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de *E. globulus*.** Universidade de Coimbra. Departamento de Engenharia Química, Pinhal de Marrocos, 3000 COIMBRA.

OLIVEIRA, M.L.M.; LUZ, J.A.M.; LACERDA, C.M.M. **Espessamento e Filtragem**. Apostila DEMIN UFOP, 2004.

PERES, A. E. C. **Fenômenos Interfaciais**. Apostila PPGEM – UFMG, 2005.

PERES, A. E., & ARAUJO, A. C. **Aspectos básicos da flotação**. Em A.P. CHAVES, A Flotação no Brasil (pp. 9-39). Cubatão, SP: Oficina de Textos. 2013

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

Revista In the Mine. Disponível em: <[www.inthemine.com.br](http://www.inthemine.com.br)>. Acesso em: 26 de maio de 2022.

ROCHA FILHO, A. C. **Alternativas para Desaguamento e Disposição dos Rejeitos do Complexo Mineral de Tapira**. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

RODRIGUES, R. G. **Avaliação de Meios Porosos na Filtração de Rejeito Fosfático de Tapira**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá, 2016.

SANTOS, E. J. A.; MATIOLO, E. **Estudo de Concentração de Apatita em Amostra de Minério de Fosfato**. X Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CETEM. 2021

SMITH, D., 1996. **Characterization of Lactose by Helium Pycnometer**. In Stephens, K. (ed.), The Microreport: News and Ideas for Decision Makers, 2nd Quarter, 7(2) Micro-meritics Instrument Corporation, USA.

SVAROVSKI, L. **Solid-liquid separation**. 3. ed. London: Butterworths Stoneham, 1990.

Qi Y., Thapa K., Hoadley A. (2011). **Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties – A review**. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, 171, 373-384.

Tão, D., Parekh, B.K., Honaker, R. (2008). **Development and Pilot-Scale Demonstration of Deep Cone Paste Thickening Process for Phosphatic Clay Disposal: Phase I**. *Institute of Phosphate Research*, 1-17.

VALADÃO, G. E.S.; BARREDA, R. H. O. **Polímeros Desaguadores para Disposição de Rejeitos Adensados**. *Universid Arturo Prat, Universidade Federal de Minas Gerais. HOLOS*, Ano 36, v.8, e10884, 2020.

VALADÃO, G. E. S.; CHAVES, A. P.; VIEIRA FILHO, S. A. ARAUJO, A. C. VIANA, P.R.M.. **A Influência de Surfactantes na Filtragem de Polpas de Hematita**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais.

VIEIRA, José Eustáquio. Filtros de disco a vácuo reaproveitam até 46% da água utilizada no processo. **Revista Minérios & Minerale**s. 2015. Disponível em: <<https://revistaminerios.com.br/filtros-de-disco-a-vacu-reaproveitam-ate-46-da-agua-utilizada-no-processo/>>. Acesso em: 26 de maio de 2022.

WEBB, P.A., ORR, C., 1997. **Analytical Methods in Fine Particle Technology**. Micromeritics Instrument Corporation, USA, 301 pp.

Wei H., Gao B., Ren J., Li A., Yang, H. (2018) **Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review**. *Water Research Elsevier*, 143, 608-631.

ZAJIC, J. E., 1971. **Water Pollution – Disposal and Reuse**, 2 ed. New York, Marcel Dekker.