



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

**MARINA MARTINS**

**INFLUENCIA DA ADIÇÃO DE SURFACTANTE NA FILTRAÇÃO DE  
REJEITO FOSFÁTICO**

**ARAXÁ/MG**

**2017**

**MARINA MARTINS**

**INFLUENCIA DA ADIÇÃO DE SURFATANTE NA FILTRAÇÃO DE REJEITO  
FOSFÁTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira

**ARAXÁ/MG**

**2017**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

MARINA MARTINS

**INFLUENCIA DA ADIÇÃO DE SURFATANTE NA FILTRAÇÃO DE REJEITO  
FOSFÁTICO**

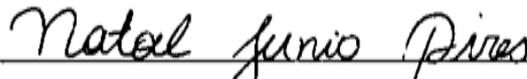
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 21 de junho de 2017.



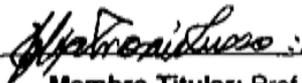
---

**Presidente e Orientador:** Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



---

**Membro Titular:** Prof. Dr. Natal Junio Pires  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



---

**Membro Titular:** Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

*Aos meus pais Valdomiro e Maria.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar, a Deus, pela minha vida, pela força, por me amparar nos momentos mais difíceis e por ter me concedido sabedoria para alcançar este objetivo dando tanta alegria a todos que torceram por mim. Também agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

À minha mãezinha Maria que sempre acreditou em mim e me ensinou a nunca desistir, ao meu pai Valdomiro por todo o amor a mim concebido e ao meu irmão Bruno que sempre me mostrou que as coisas mais lindas e importantes da vida são invisíveis aos olhos. É por vocês tudo o que faço!

À professora Michelly dos Santos Oliveira pela orientação, por todo o carinho e atenção com que me transmitiu os valiosos ensinamentos não só neste trabalho mas em toda trajetória acadêmica, e pela confiança depositada em mim e no meu trabalho. Ao professor Natal Junio Pires pelas orientações quanto a parte de análise estatística deste trabalho e por todo o conhecimento que me foi transmitido, contribuindo grandiosamente para minha formação. Vocês são meus exemplos de profissionais.

Ao meu companheiro de toda essa jornada acadêmica Luis Fernando por toda a paciência, carinho e apoio durante a realização deste trabalho.

Ao técnico João Vitor pelo auxílio e sugestões durante a realização dos testes laboratoriais e à Maria Alice que mesmo após o término do período de estágio continuou me auxiliando nos testes iniciais. Vocês foram essenciais para que este trabalho pudesse ser concluído.

## RESUMO

A deposição de rejeitos provenientes de processos de beneficiamento é um dos grandes problemas enfrentados pela mineração, a filtração desses resíduos pode ser uma medida mitigadora para este problema. Espera-se que a adição de um surfactante na filtração propicie maior eficiência quando comparada a mesma sem adição do reagente, uma vez que diminui a tensão superficial líquido/ar e, como consequência, propicia um melhor desaguamento da torta, menor umidade e menores custos com secagem. Neste trabalho buscou-se a avaliação do uso do surfactante *Flotisor FA 7129* na filtração do rejeito fosfático. Além disso, foi realizada uma otimização da filtração por meio de um planejamento fatorial das variáveis concentração do surfactante, pH da polpa e nível de vácuo, visando uma menor umidade da torta, maior taxa unitária de filtragem e menor turbidez do clarificado. Após a escolha dos melhores parâmetros, foram realizados testes de folha utilizando como meio filtrante o tecido 4400-T, fabricado pela Remae. A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que para um melhor desempenho na filtração do rejeito fosfático, deve-se utilizar uma polpa com pH 6, um nível de vácuo de 400 mm de Hg e sem a adição do surfactante, diferentemente do que se era esperado. Observou-se que das variáveis analisadas, o pH ofereceu maior influências na filtração do rejeito, se sobressaindo ao efeito das outras variáveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Filtração. Rejeito. Fosfato. Surfatante.

## **ABSTRACT**

The deposition of tailings from beneficiation processes is one of the major problems faced by mining, the filtration of this waste can be a mitigating measure for this problem. It is expected that the addition of a surfactant in the filtration will provide greater efficiency when compared to it without addition of the reagent, once it decreases the liquid / air surface tension and, as a consequence, provides better cake dewatering, lower humidity and lower costs with drying. The aim of this work was to evaluate the use of Flotisor surfactant FA 7129 in the filtration of the phosphatic waste. In addition, a filtration optimization was performed by means of a statistical analysis of the variables surfactant concentration, pulp pH and vacuum level, aiming at lower cake moisture, higher unit rate of filtration and lower clarified turbidity. After the choice of the best parameters, tests were performed using the 4400-T tissue as the filter media. For a better performance in the filtration of the phosphate waste, a pulp of pH 6, a vacuum level of 400 mm Hg and without the addition of the surfactant should be used, differently than was expected. It was observed that of the analyzed variables, the pH offered greater influences in the filtration of the tailings.

**KEYWORDS:** Filtration. Tailings. Phosphate. Surfactant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Técnicas de separação sólido-líquido em função do tamanho das partículas ou microorganismo. Fonte: Valadão (2007).....	3
Figura 2.2- Tessituras básicas dos tecidos. Fonte: Chaves (2013). ....	5
Figura 2.3– Filtro de disco. Fonte: Chaves (2013).....	7
Figura 2.4 - Filtro de mesa. Fonte: Chaves (2013). ....	8
Figura 2.5- Filtro de tambor. Fonte: Amarante (2002).....	9
Figura 2.6– Filtros de correia. Fonte: Amarante (2002). ....	10
Figura 2.7- Filtro prensa. Fonte: Metso Materials Technology.....	11
Figura 2.8- Kit de ensaio de filtração. Fonte: Chaves (2013).....	11
Figura 2.9- Primeira etapa do ensaio de teste de folha (formação da torta). Fonte : França e Casqueira (2007).....	12
Figura 2.10- Segunda etapa do ensaio de teste de folha (secagem). Fonte : França e Casqueira (2007).....	13
Figura 2.11 - Teste de folha com alimentação por cima. Fonte: Guimarães (2011) Adaptado.....	13
Figura 2.12 - Representação dupla camada elétrica. Fonte: Adaptado de Paiva (2004) .....	15
Figura 2.13– Potencial zeta conforme o pH para a Hematita. Fonte Pan et al., 2004 ..	16
Figura 2.14 - Curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas. Fonte: Paiva (2004).....	17
Figura 2.15- Curvas de energia de interação entre partículas ultrafinas de rodocrosita: teoria DLVO e teoria X-DLVO. Fonte : Lins e Adamian (2000). ....	18
Figura 2.16 - Mecanismos de agregação com tensoativos: formação de micelas e interação hidrofóbica. Fonte : Oliveira e Rubio (2011).....	19
Figura 2.17 - Fórmula estrutural de um surfactante. Fonte: Dias (2004). ....	19
Figura 2.18 – Esquema de um surfactante. Fonte: Adaptado de Kronberg et al. (2014). ....	20
Figura 2.19 – Influência da concentração do surfactante da tensão superficial. Fonte: Dias et al. (2004). ....	21
Figura 2.20- Influência da adsorção de surfatante no grau de hidrofobicidade na superfície da partícula. Fonte: Dias et al (2004).....	22
Figura 2.21- Efeito da adsorção dos surfactantes no potencial zeta. Fonte: Dias et al.(2004).....	22

Figura 3.1- Amostra geral do rejeito.....	24
Figura 3.2- A: Peneiras selecionadas; B: peneirador suspenso.....	25
Figura 3.3 – Picnômetros.....	26
Figura 3.4- Conjunto utilizado para a realização dos testes de filtração.....	28
Figura 3.5- Turbidímetro.....	29
Figura 3.6 – pHmetro digital.....	32
Figura 3.7– Funis de Buchner utilizados nos testes de filtração.....	35
Figura 4.1 - Análise granulométrica da amostra.....	37
Figura 4.2 - Tempo de formação da torta em função da dosagem do reagente.....	39
Figura 4.3 - Turbidez do filtrado em função da dosagem do surfatante.....	39
Figura 4.4 - Umidade da torta variando com a dosagem do surfatante.....	40
Figura 4.5– Comparação de uma torta com e sem reagente.....	41
Figura 4.6 - Comparações das trincas nas tortas com 60 e 120 g/t de Surfactante Comparações das trincas nas tortas com 60 e 120 g/t de Surfactante.....	42
Figura 4.7 - Gráfico do tempo de formação da torta com variação do pH.....	43
Figura 4.8- Gráfico da turbidez do filtrado em função do pH.....	43
Figura 4.9 - Gráfico da Umidade da torta em função do pH.....	44
Figura 4.10 - Gráfico normal para a influência das variáveis no tempo de formação da torta.....	47
Figura 4.11 - Gráfico dos efeitos principais para o tempo de formação da torta.....	48
Figura 4.12 - Gráfico de interação entre as variáveis para o tempo de formação da torta.....	49
Figura 4.13 - Gráfico de cubo para o tempo de formação da torta.....	50
Figura 4.14 – Gráfico normal para a influência das variáveis na turbidez do filtrado....	52
Figura 4.15- Gráfico dos efeitos principais para a turbidez do filtrado.....	53
Figura 4.16- Gráfico de interação para a turbidez do filtrado.....	54
Figura 4.17- Gráfico de cubo para a turbidez do filtrado.....	55
Figura 4.18- Gráfico normal para a influência das variáveis na umidade da torta.....	57
Figura 4.19 – Efeitos principais para a umidade da torta.....	57
Figura 4.20 – Gráfico de interação para a umidade da torta.....	58
Figura 4.21- Gráfico de cubo para umidade da torta.....	59
Figura 4.22 - Gráfico de Otimização.....	60
Figura 4.23 - Resultados do teste de filtração usando o meio filtrante 4400-T.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Mecanismos de filtração e os principais fornecedores. Fonte : Guimarães (2011).	4
Tabela 2.2- Efeito da trama sobre a filtração. Fonte: Chaves (2013).	6
Tabela 2.3 - Efeito do fio no desempenho da tela. Fonte: Chaves (2013).	6
Tabela 2.4- Classificações dos minerais de acordo com a granulometria. Fonte: Lins e Adamian (2000).	14
Tabela 2.5 – Característica do estado de estabilidade das partículas em função do potencial zeta. Fonte: Riddick (1969) apud Paiva (2004).	16
Tabela 3.1- Características do Flotisor FA-7129. Fonte: Ficha técnica da Clariant.	27
Tabela 3.2 - Parâmetros para preparação da polpa.	28
Tabela 3.3– Condições de dosagens do Surfactante.	31
Tabela 3.4– Matriz do planejamento fatorial.	33
Tabela 4.1 Composição Química da amostra.	36
Tabela 4.2– Resultados dos testes de Picnometria.	36
Tabela 4.3- Análise granulométrica do material	37
Tabela 4.4 – Resultados da variação da dosagem do reagente	38
Tabela 4.5– Resultados dos testes com variação do pH.	42
Tabela 4.6 - Resultados do planejamento fatorial.	45
Tabela 4.7 - Tabela ANOVA para os efeitos (tempo de formação da torta).	46
Tabela 4.8 - Tabela de ANOVA para os efeitos (Turbidez do filtrado).	51
Tabela 4.9– Tabela de ANOVA para os efeitos (Umidade da torta).	56
Tabela 4.10 - Resultados do teste de filtração usando o meio filtrante 4400-T	61

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1.	SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO.....	2
2.2	FILTRAÇÃO.....	4
2.2.1	Meios filtrantes .....	5
2.2.2	Equipamentos para filtração.....	6
2.2.3	Testes de Filtração.....	11
2.3	TRATAMENTO DE PARTÍCULAS COLOIDAS.....	14
2.3.1	Teoria DLVO.....	17
2.4	REAGENTES AUXILIARES DE FILTRAÇÃO.....	19
2.5	PLANEJAMENTO FATORIAL .....	23
3.	METODOLOGIA.....	24
3.1	MATERIAL.....	24
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA .....	24
3.2.2	Análise Química.....	24
3.2.1	Análise Granulométrica.....	25
3.2.3	Determinação da massa específica dos sólidos .....	25
3.3	REAGENTES.....	27
3.4	TESTES DE FILTRAÇÃO .....	27
3.4.1	Dosagem do Reagente .....	31
3.4.2	Interferência da Variação do pH da Polpa .....	32
3.4.3	Planejamento Fatorial a Dois Níveis com Ponto Central.....	32
4.	RESULTADOS .....	35
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA .....	35
4.1.1	Caracterização Química.....	35
4.1.2	Determinação da massa específica dos sólidos .....	36

4.1.3 Análise Granulométrica.....	37
4.2 TESTES DE FILTRAÇÃO .....	38
4.2.1 Avaliação da dosagem do reagente .....	38
4.2.2 Variação do pH da Polpa .....	42
4.2.3 Planejamento Fatorial a Dois Níveis com Ponto Central.....	44
4.2.4 Teste de filtração utilizando o meio filtrante 4400-T.....	60
5. CONCLUSÃO .....	62
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
APENDICE A - RESULTADOS DOS TESTES DE VARIAÇÃO DA DOSAGEM DO SURFATANTE .....	67
APENDICE B - RESULTADOS DOS TESTES DE VARIAÇÃO DO Ph .....	68
APENDICE C - RESULTADOS DOS TESTES PLANEJAMENTO FATORIAL .....	69

## 1. INTRODUÇÃO

Fertilizantes fosfatados são industrializados a partir da rocha fosfática, essencialmente do mineral apatita. A obtenção da rocha fosfática é feita pela indústria mineral. São necessárias várias etapas, que passam desde a prospecção e pesquisa geológica até a lavra e beneficiamento do minério (KULAIF, 1999).

Durante a etapa de beneficiamento dos minérios são gerados rejeitos e a disposição desses rejeitos é vista como um grande problema em razão do impacto ambiental gerado pelas barragens que requerem áreas amplas e geram altos custos de monitoramento (SILVA *et al.*, 2015).

A progressiva exploração de jazidas com baixos teores tem causado um aumento no volume de rejeitos da mineração, intensificando assim a necessidade de barragens maiores para comportá-los. A pressão da população tal como as preocupações ambientais, dificultam o licenciamento de áreas para a construção de barragens. Uma alternativa viável pode ser a deposição dos rejeitos em forma de pilhas, neste processo a polpa antecipadamente adensada poderia ser filtrada e a torta proveniente desta filtração disposta em pilhas, até mesmo junto com o estéril da mina (GUIMARÃES *et al.*, 2012).

O uso de reagentes auxiliares de filtração permite um melhor desaguamento da torta, diminuição de custos com secagem térmica, e uma melhor recuperação do filtrado (CHAVES, 1996). Esses reagentes auxiliares possuem surfactantes como elemento ativo.

Este trabalho teve como objetivo avaliar por meio de testes de folha o desempenho do auxiliar de filtragem Flotisor FA 7129 para o rejeito fosfático. Dentre os objetivos específicos busca-se encontrar as condições ótimas de pH para a filtração do rejeito, bem como por meio de análise estatística, otimizar a dosagem do surfatante, o pH da polpa e nível de vácuo e verificar o desempenho do tecido 4400-T, selecionado em trabalho anterior.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

A água tem sido um recurso cada vez mais escasso e oneroso, tornando ainda mais importante o processo de separação sólido-líquido, visto que os minérios requerem em sua maioria processamento a úmido e a recuperação e recirculação da água torna-se uma operação que requer muita atenção. As operações de filtração e espessamento são as operações de separação sólido-líquido mais importantes para a indústria mineral (AMARANTE, 2002).

Nas usinas de processamento mineral a separação sólido-líquido é uma etapa crítica, apresentando alto custo monetário e em alguns casos representando de 15 a 40% do consumo energético total de uma usina (VALADÃO, 2007).

No caso de polpas minerais, a separação sólido-líquido deve ser escolhida observando as características da polpa. Polpas que apresentam baixa porcentagem de sólidos precisam na maioria das vezes de algum tipo de pré-tratamento (concentração) antes de serem desaguadas (LUZ *et al.*, 2010)

São utilizadas nas operações de desaguamento vários equipamentos, como peneiras DSM, classificadores espirais, cones desaguadores, pilhas e silos de drenagem. Os espessadores e filtros a vácuo são os equipamentos mais empregados na separação sólido-líquido (CHAVES, 2013).

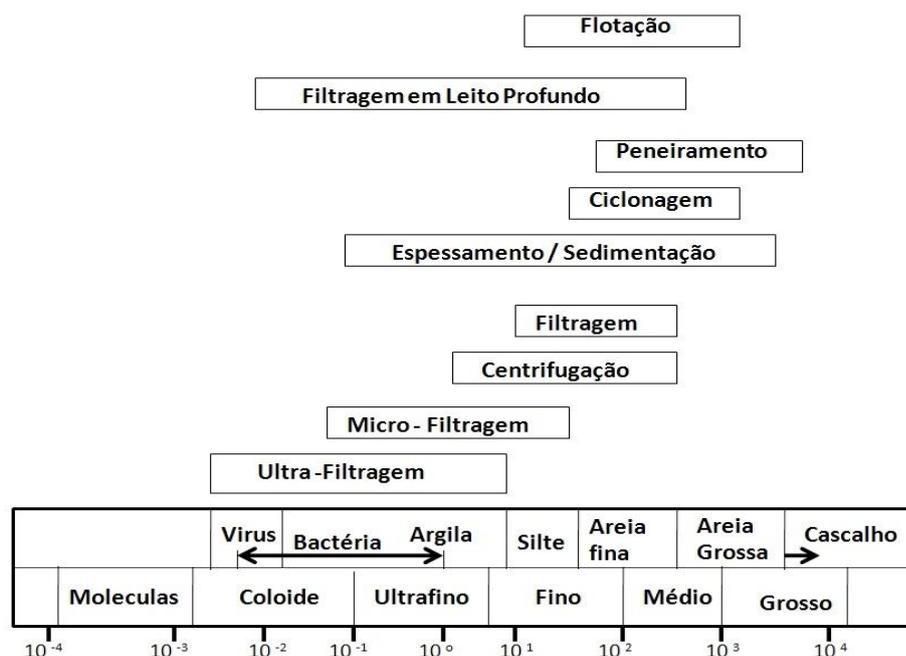
Normalmente a separação sólido-líquido é realizada utilizando a combinação de espessamento e filtração. Na etapa de espessamento obtém-se polpas em média de 55 a 60 % de sólidos. Para que se consiga obter polpas com percentagens de sólido ainda mais elevadas, é necessária a filtração do material após espessado.

De acordo com Luz *et al.*, (2010) e Valadão (2007), alguns fatores podem influenciar no processo de separação sólido-líquido, como por exemplo:

- *Distribuição de tamanhos das partículas*: partículas muito finas ( $<2 \mu\text{m}$ ) apresentam grande dispersão quando em meio fluído, diminuindo assim a eficiência do espessamento e podem causar umidade elevada nas tortas provenientes do processo de filtração. Sendo necessário um pré

tratamento para a aglomeração dessas partículas (coagulação e floculação). A figura 1.1 apresenta as técnicas de separação sólido-líquido em função do tamanho das partículas ou microorganismo.

- *Porcentagem de sólidos na polpa*: em polpas com baixas porcentagens de sólidos, se faz necessário uma concentração antecedente ao desaguamento. Rodrigues (2016) como exemplo, verificou que para a filtração de rejeito fosfático, o aumento da porcentagem de sólidos na polpa gerou tortas com menores umidades e maiores taxas unitárias de filtração.
- *Capacidade requerida*: nos processos que requerem alta capacidade é indicado o espessamento ao invés da filtração, mesmo que os espessadores necessitem de grandes áreas para serem instalados. Pois essa operação requer menor demanda operacional e de manutenção, bem como apresenta menores custos operacionais quando comparado a filtração.
- *Forma da partícula*: partículas não esféricas, como as com geometria lamelar, podem trazer problemas para filtros industriais.
- *Viscosidade da polpa*: polpas com temperaturas mais elevadas apresentam geralmente menor viscosidade, o que é um ponto positivo no processo de separação sólido-líquido.



**Figura 2.1-** Técnicas de separação sólido-líquido em função do tamanho das partículas ou microorganismo. Fonte: Valadão (2007).

## 2.2 FILTRAÇÃO

A filtração pode ser definida como a separação de sólidos contidos em uma suspensão quando o líquido atravessa um meio poroso que retém as partículas sólidas. O líquido que percola através do meio poroso recebe o nome de filtrado, já as partículas sólidas que ficam retidas nesse meio são chamadas de torta (CHAVES, 2013).

De acordo com Pereira (1999), a filtração no tratamento de minérios proporciona a separação sólido-líquido de concentrados e também de rejeitos, que posteriormente irão passar por operações de secagem, homogeneização, transporte ou disposição no meio ambiente, no caso de rejeitos.

Para ser possível a filtração é necessário que haja uma força incidente sobre as partículas, que pode ser conseguida através de gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação (VALADÃO, 2007). Guimarães (2011) Classifica os mecanismos de filtração com relação a força sobre as partículas conforme a tabela 2.1.

**Tabela 2.1-** Mecanismos de filtração e os principais fornecedores. Fonte: Guimarães (2011).

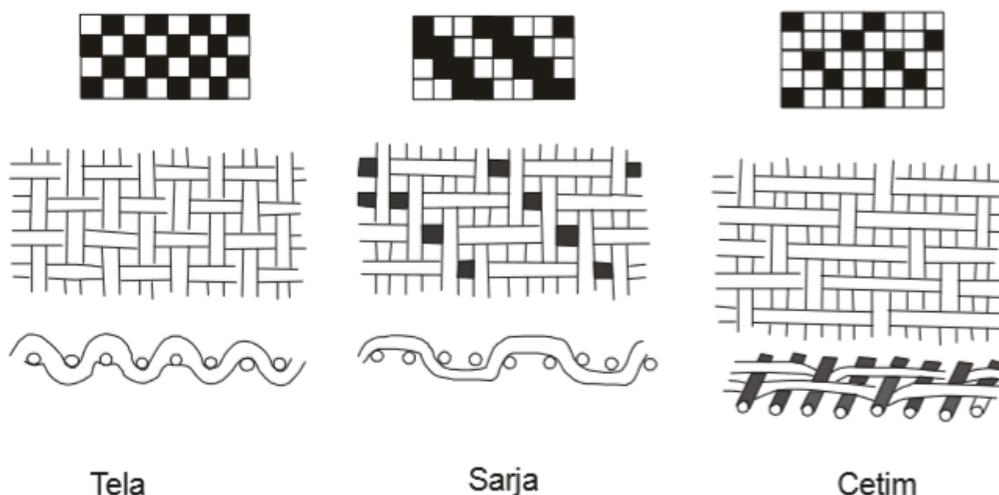
Tipos	Características	Modelos de Filtros	Principais Fornecedores
Filtração a vácuo	Criada uma pressão negativa abaixo do meio filtrante	Filtro de tambor, de disco convencional, filtro horizontal de mesa e filtro horizontal de correia	Andritz, FLSmidth, Larox, Delkor, Gaudfrin
Filtração sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, filtro prensa vertical	Andritz, FLSmidth (Pneumapress), Larox
Filtração centrífuga	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters	Andritz, GEA (Westfalia), Alfa Laval
Filtração hiperbárica	Em que se combinam vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico	Andritz, Bokela, Gaudfrin
Filtragem capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec	Larox

Alguns fatores podem influenciar na filtração, como a viscosidade, temperatura e densidade da polpa, além da espessura da torta. Quanto maior for a viscosidade da polpa menor é a produtividade da filtração. A temperatura da torta pode influenciar na viscosidade ou alterar as propriedades do meio filtrante, já a espessura da torta tem fundamental importância no ciclo de operação (FRANÇA E CASQUEIRA, 2007).

### 2.2.1 Meios filtrantes

Na indústria mineral a escolha do meio filtrante se restringe a tecidos, esses meios devem atender a duas condições básicas: propiciar baixa turbidez do filtrado e oferecer mínima resistência ao fluxo, fornecendo baixa umidade final da torta e elevadas taxas de filtração. Os meios filtrantes não devem ter tendência ao cegamento e têm de oferecer boas características de descarga da torta, permitir a limpeza por água ou ar e apresentar boa resistência mecânica, química e biológica (AMARANTE, 2002)

A tessitura do tecido pode ser feita de várias maneiras, as mais importantes são a trama simples ou tela, sarja, e cetim. A figura 2.2 mostra as diferentes tessituras dos tecidos. A trama dos meios filtrantes também afeta de maneira significativa nos resultados da operação. Na tabela 2.2 é indicado em ordem decrescente o efeito da trama sobre a filtração. Quando o objetivo é a máxima limpidez do filtrado e/ou a facilidade de descarga, a tela é a mais indicada. Já o cetim é mais indicado quando se objetiva menor umidade da torta. Como pode ser observado na tabela 2.2.



**Figura 2.2-** Tessituras básicas dos tecidos. Fonte: Chaves (2013).

**Tabela 2.2-** Efeito da trama sobre a filtração. Fonte: Chaves (2013).

Máxima limpidez do filtrado	Mínima resistência ao escoamento	Mais fácil descarga da torta	Máxima vida da tela	Mínima tendência a cegar	Umidade mínima da torta
tela	cetim	tela	cetim	cetim	cetim
sarja	sarja	sarja	tela	sarja	sarja
cetim	tela	Cetim	sarja	tela	tela

As características do fio também podem variar. Segundo Chaves (2013), ele pode ser filamental como se fosse uma linha de pesca ou felpudo quando as fibras naturais são fiadas em conjunto gerando fios com grande quantidade de felpas. A tabela 2.3 mostra o efeito do fio no desempenho da tela, indicando que quando se objetiva na operação de filtração tortas com menores umidades, mínima tendência a cegar, maior facilidade na descarga e mínima resistência ao escoamento o meio filtrante mais indicado é o monofilamentar. Já o tecido felpudo garante máxima vida da tela.

**Tabela 2.3 -** Efeito do fio no desempenho da tela. Fonte: Chaves (2013)

Máxima limpidez do filtrado	Mínima resistência ao escoamento	Mais fácil descrga da torta	Máxima vida da tela	Mínima tendência a cegar	Umidade mínima da torta
felpudo	mono	mono	felpudo	mono	mono
multi	multi	multi	multi	multi	multi
mono	felpudo	felpudo	mono	felpudo	felpudo

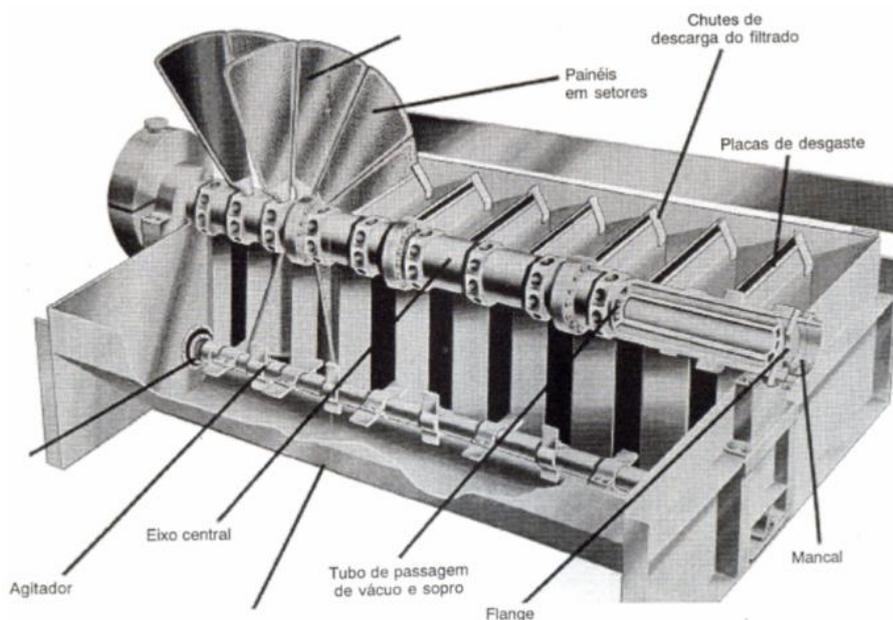
### 2.2.2 Equipamentos para filtração

A filtração é baseada na diferença de pressão que deve existir através da torta, que é diretamente relacionada com a porosidade, sendo função da distribuição de tamanho das partículas. Portanto, quanto menores os espaços interparticulares (poros), maior será a queda de pressão através da torta. Se a diferença de pressão requerida na operação for menor do que 1 Bar, os filtros a vácuo têm aplicação destacada. Para diferenças de pressão maiores, os filtros

indicados passam a ser os filtros de pressão, segundo França e Massarani (2010).

### *Filtros de disco*

De acordo com Valadão (2012), este tipo de filtro é composto por uma série de painéis (discos) que comunicam com tubulações de ar comprimido e vácuo e que se conectam a um eixo central. É realizado o movimento de rotação, em um tanque que contém a polpa a ser desaguada. A torta forma-se devido à aspiração da polpa às telas (meios filtrantes) que recobrem o disco, ocorrendo então a passagem do filtrado. Após a torta ser formada acontece a secagem e a descarga da mesma por meio de calhas existentes no próprio tanque. A Figura 2.3 mostra um esquema de um filtro de discos.



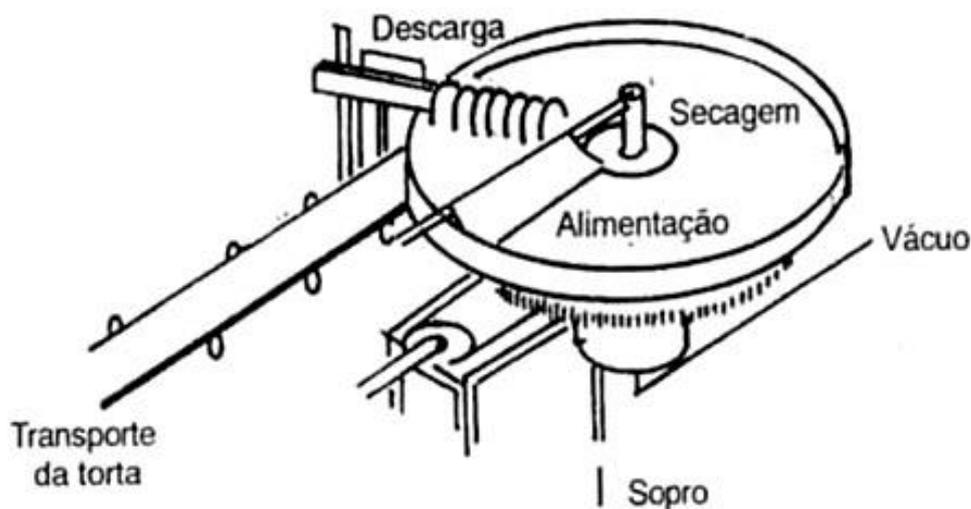
**Figura 2.3**– Filtro de disco. Fonte: Chaves (2013).

### *Filtros de mesa*

São filtros utilizados para a filtração de polpas heterogêneas contendo sólidos que não podem ser mantidos em suspensão apenas com o auxílio de agitadores. São basicamente construídos de uma superfície horizontal circular que gira em torno de um eixo vertical. A tela onde é alimentada a polpa fica apoiada nesta superfície horizontal, que é dividida em setores que por sua vez

se comunicam com a câmara de vácuo do filtro e com uma câmara de ar comprimido no momento da descarga da torta. O filtro gira enquanto o filtrado atravessa o meio filtrante e a torta vai sendo formada. O ar comprimido na descarga da torta além de soltar a torta da tela, tem a função de desentupir os poros da tela (Oliveira, 2004).

É basicamente uma superfície horizontal que gira segundo um eixo vertical e sobre onde é apoiado o meio filtrante. A superfície circular é composta por vários setores que tem comunicação com a câmara de vácuo e a câmara de ar comprimido na descarga (CHAVES, 2013). Na figura 2.4 está representado um filtro de mesa.



**Figura 2.4** - Filtro de mesa. Fonte: Chaves (2013).

### *Filtros de tambor*

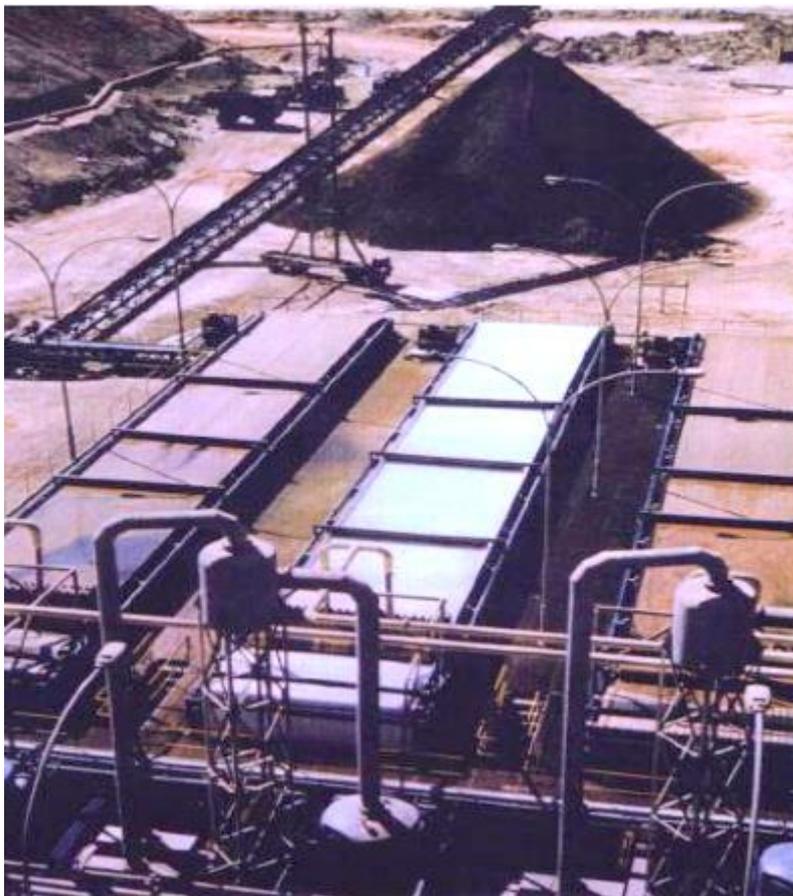
Este tipo de filtro representa um cilindro que gira solidário ao eixo longitudinal que é conectado a uma válvula automática. A alimentação é feita em uma bacia de polpa que fica posicionada de maneira que possibilite que a parte inferior do cilindro fique submersa. O meio filtrante encontra-se apoiado sobre a superfície do tambor, uma vantagem deste tipo de filtro é lavagem do meio filtrante que permite sua desobstrução (VALADÃO,2012;AMARANTE,2002). Na figura 2.5 é apresentado um filtro do tipo tambor.



**Figura 2.5-** Filtro de tambor. Fonte: Amarante (2002).

### *Filtros de correia*

Os filtros de correia (ilustrados na figura 2.6), nada mais são que correias transportadoras adaptadas a servir de apoio a um meio filtrante, admitir o escoamento de ar através da tela e permitir o filtrado escoar por sobre a correia. A polpa é desaguada a partir da extremidade da correia onde é alimentada até o ponto de descarga que é a outra extremidade do transportador. Este equipamento é muito eficiente quando se trata de polpas heterogêneas e processa vazões de sólidos impossíveis de serem tratadas nos outros tipos de filtro. A tela pode se sempre desentupida, pois este equipamento permite a lavagem da tela (CHAVES, 2013).



**Figura 2.6**– Filtros de correia. Fonte: Amarante (2002).

### *Filtros prensa*

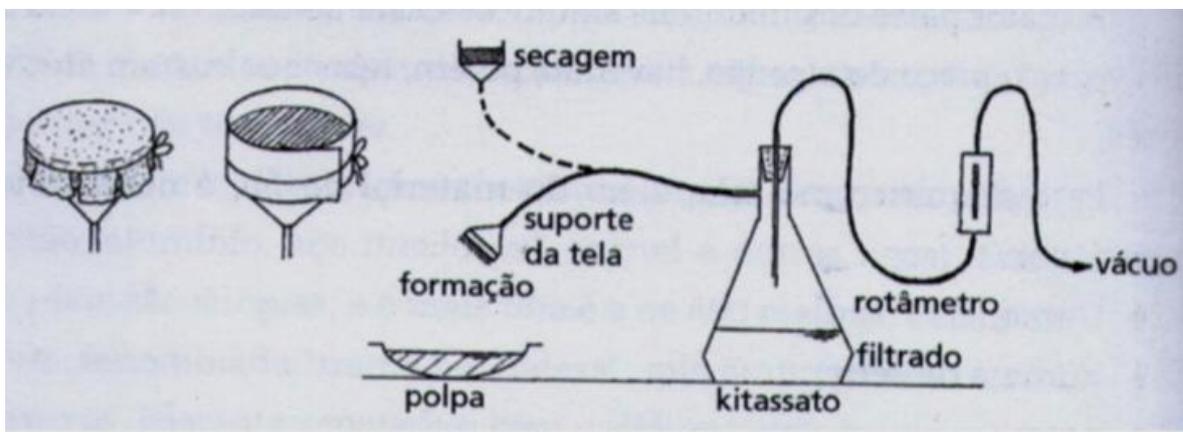
São equipamentos que trabalham de forma descontínua, produzem tortas com umidades baixas e possuem baixo custo operacional, em contrapartida, estes filtros apresentam alto custo de investimento. Possuem numerosas placas verticais espaçadas umas das outras e revestidas pelo meio filtrante. O espaço entre uma placa e outra é preenchido pela polpa que sofre uma pressão fazendo com que o filtrado passe por entre o meio filtrante e seja recolhido em uma calha. A torta tem a opção de ser lavada e secada, é descarregada mediante a abertura das placas uma a uma. Após a tela ser lavada individualmente o filtro é fechado e pode ser alimentado novamente para um novo ciclo (GUIMARÃES, 2011). A figura 2.7 apresenta a imagem de um filtro prensa.



**Figura 2.7-** Filtro prensa. Fonte: Metso Materials Technology.

### 2.2.3 Testes de Filtração

Para reprodução da filtração industrial, bem como para dimensionamento de filtros, o método mais prático e intensamente utilizado é o chamado teste de folha (*filter leaf test*), esse é um método empírico. Na figura 2.8 é possível ver os principais equipamentos utilizados para o ensaio de filtração.

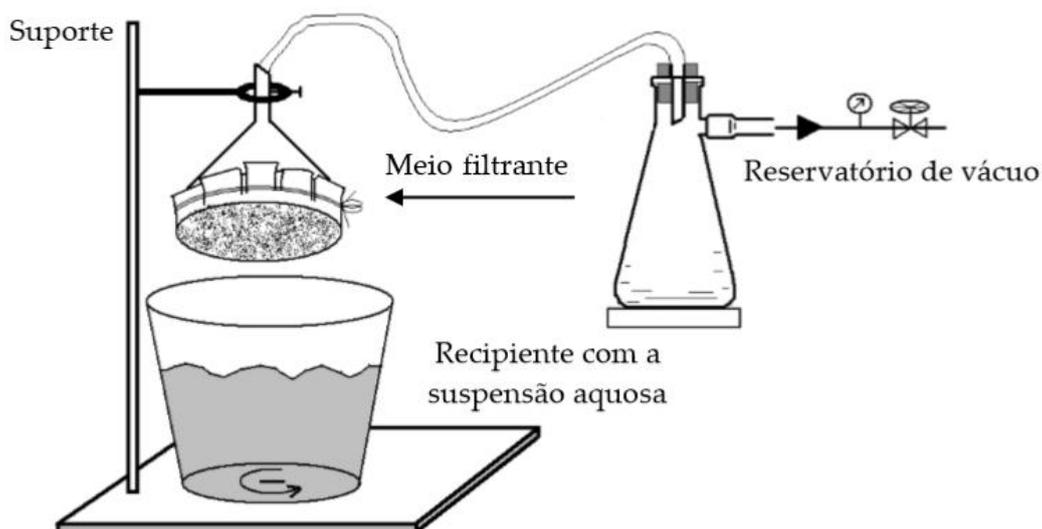


**Figura 2.8-** Kit de ensaio de filtração. Fonte: Chaves (2013).

De acordo com Chaves (2013) o ensaio deve ser realizado utilizando-se um suporte de filtragem padrão, de área  $1/10 \text{ ft}^2$ , revestido com o meio filtrante mais adequada à polpa a ser filtrada. Guimarães (2011) relata que o teste pode ser efetuado com a polpa sendo alimentada por cima ou por baixo. Nos ensaios com a alimentação feita por baixo, a polpa é mantida sobre agitação em um

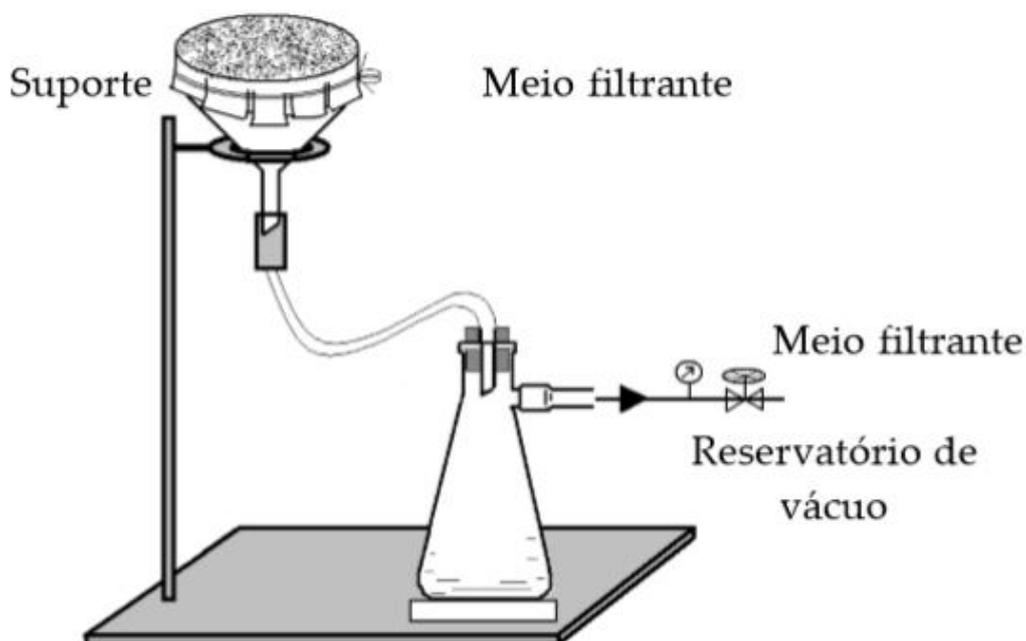
recipiente onde é introduzido o meio filtrante durante um tempo pré-determinado sob a ação do vácuo destinado à formação da torta.

Após esse tempo o dispositivo é retirado do recipiente contendo a polpa e mantido na posição vertical. Após o tempo de secagem a torta é descarregada com o auxílio de um sopro de ar comprimido no tubo de drenagem. As figuras 9 e 10 representam respectivamente as etapas de formação da torta e secagem para o teste com alimentação por baixo. (FRANÇA e CASQUEIRA, 2007 e GUIMARÃES 2011). Nas figuras 2.9 e 2.10 são representadas a primeira etapa de um teste de filtração com alimentação por baixo e a segunda etapa, secagem, respectivamente.

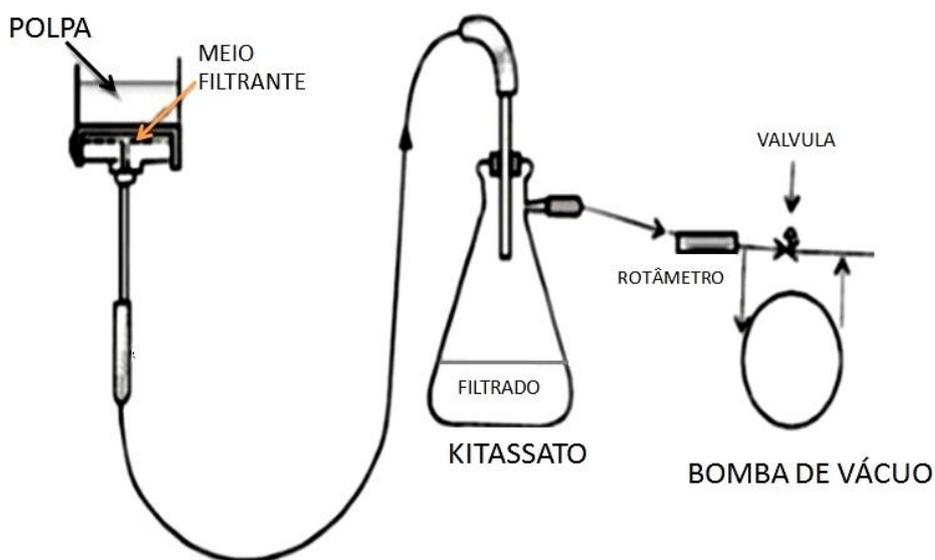


**Figura 2.9-** Primeira etapa do ensaio de teste de folha (formação da torta). Fonte : França e Casqueira (2007).

Quando o ensaio ocorre com a alimentação da polpa feita por cima, o meio filtrante utilizado é fixado em um anteparo (que pode ser um funil de Buchner) que contém a polpa que é alimentada por cima. O tempo de formação da torta se dá pelo tempo em que não é mais possível visualizar nenhuma lâmina de água sobre a torta. Já o tempo de secagem, é considerado aquele tempo em que se tem apenas um pequeno gotejamento do filtrado no recipiente coletor (GUIMARÃES, 2011). Na figura 2.11 pode-se observar a montagem do teste de folha com alimentação feita por cima.



**Figura 2.10-** Segunda etapa do ensaio de teste de folha (secagem). Fonte : França e Casqueira (2007).



**Figura 2.11 -** Teste de folha com alimentação por cima. Fonte: Guimarães (2011) Adaptado.

As variáveis normalmente avaliadas nos ensaios de filtração são: temperatura da polpa, concentração de sólidos em suspensão, tratamento prévio da polpa com a adição de agentes auxiliares, nível de vácuo e a lavagem do tecido. O

tempo total de filtração, o volume do filtrado, a espessura e a uniformidade da torta e o nível do vácuo são os principais dados obtidos, que são expressos como razão de filtração ou taxa unitária de filtração que corresponde à produtividade do processo. (FRANÇA E CASQUEIRA, 2007).

### 2.3 TRATAMENTO DE PARTÍCULAS COLOIDAS

Cada vez mais os minérios tendem a apresentar menores granulometrias para conseguirem ser liberados, consequência dos teores baixos das jazidas. O tratamento de minerais muito finos é um desafio muito grande para a indústria mineral (LINS e ADAMIAN, 2000). Na tabela 2.4 são apresentadas as classificações dos minerais de acordo com a granulometria.

**Tabela 2.4-** Classificações dos minerais de acordo com a granulometria. Fonte: Lins e Adamian (2000).

Classificação	Granulometria
Grossos	> 500 $\mu\text{m}$
Médios	< 500 $\mu\text{m}$
Finos	< 100 $\mu\text{m}$
Superfinos/pré-coloidais	< 20 $\mu\text{m}$
Ultrafinos/quase-coloidais	< 10 $\mu\text{m}$
Coloidais	< 1 $\mu\text{m}$
Supercoloidais	< 0,2 $\mu\text{m}$

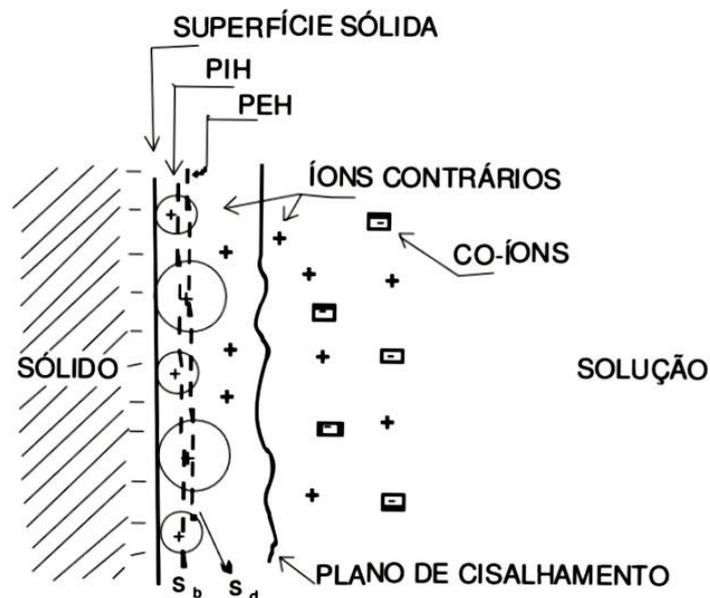
As forças de natureza física tornam-se desprezíveis conforme as partículas vão diminuindo sua granulometria, enquanto as forças de superfície crescem de importância e passam a determinar o comportamento dos sistemas coloidais. (BALTAR, 2010).

Para o tratamento de partículas coloidais deve-se abordar os fenômenos envolvidos nos processos de acordo com a teoria DLVO de estabilidade coloidal e a teoria X-DLVO ou DLVO estendida que é uma versão mais moderna e precisa da teoria DLVO, será abordada posteriormente (LINS e ADAMIAN, 2000).

De acordo com Baltar (2010) é de fundamental importância para as etapas de desaguamento que se entenda os mecanismos envolvidos na agregação das partículas de dimensões coloidais que segundo Santos (2013) apresentam grande estabilidade em razão da sua reduzida dimensão e possuem cargas superficiais que promovem a sua repulsão.

Se tratando de partículas coloidais, é importante que alguns termos sejam esclarecidos, como:

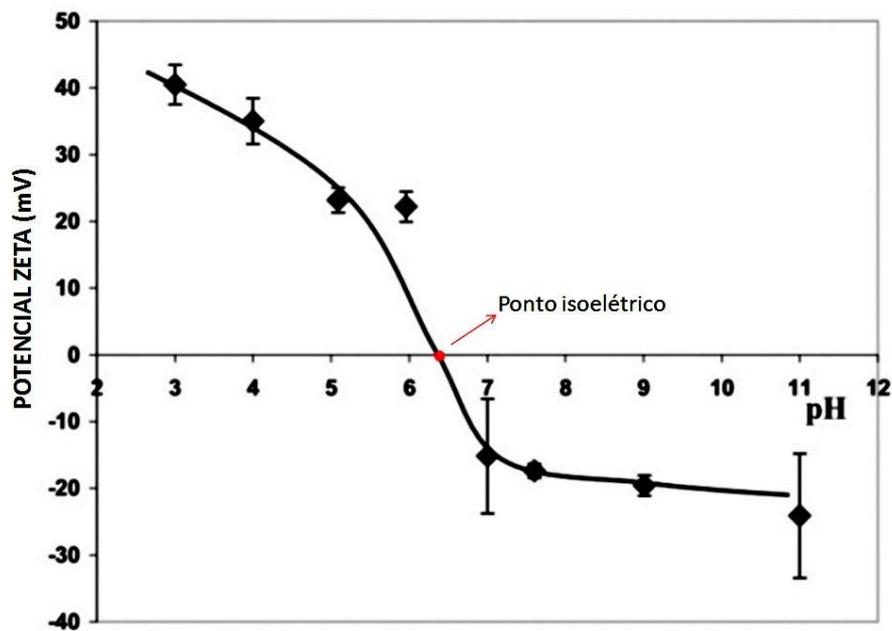
- *Dupla camada elétrica (DCE)* é o nome da superfície gerada na interface sólido-líquido. A superfície das partículas atrai uma “atmosfera” de íons de carga contrária, denominados contra-íons. Parte dessa atmosfera é difusa, e o conjunto carga de superfície-carga difusa é designado Dupla Camada Elétrica. Na figura 2.12 é mostrado a representação da dupla camada elétrica.
- *Íons determinadores de potencial (IDP)* são os íons responsáveis pela carga de superfície.



**Figura 2.12** - Representação dupla camada elétrica. Fonte: Adaptado de Paiva (2004)

O potencial medido no plano de cisalhamento entre a partícula e a solução, quando os dois estão em movimento relativo, na presença de um campo

elétrico é chamado de potencial zeta, este potencial sofre grande influência com a variação do pH do meio assim como pode ser visto na Figura 2.13 (Monte e Peres, 2010; Henriques, 2012). Outra definição importante é o ponto isoelétrico (PIE), ponto em que a carga líquida no plano de cisalhamento (ponto zeta) vale zero, ou seja, potencial zeta nulo, PIE da figura 2.13 seria no pH igual a 6,4. A estabilidade das dispersões pode ser classificada em função da magnitude do potencial zeta conforme indicado na tabela 2.5.



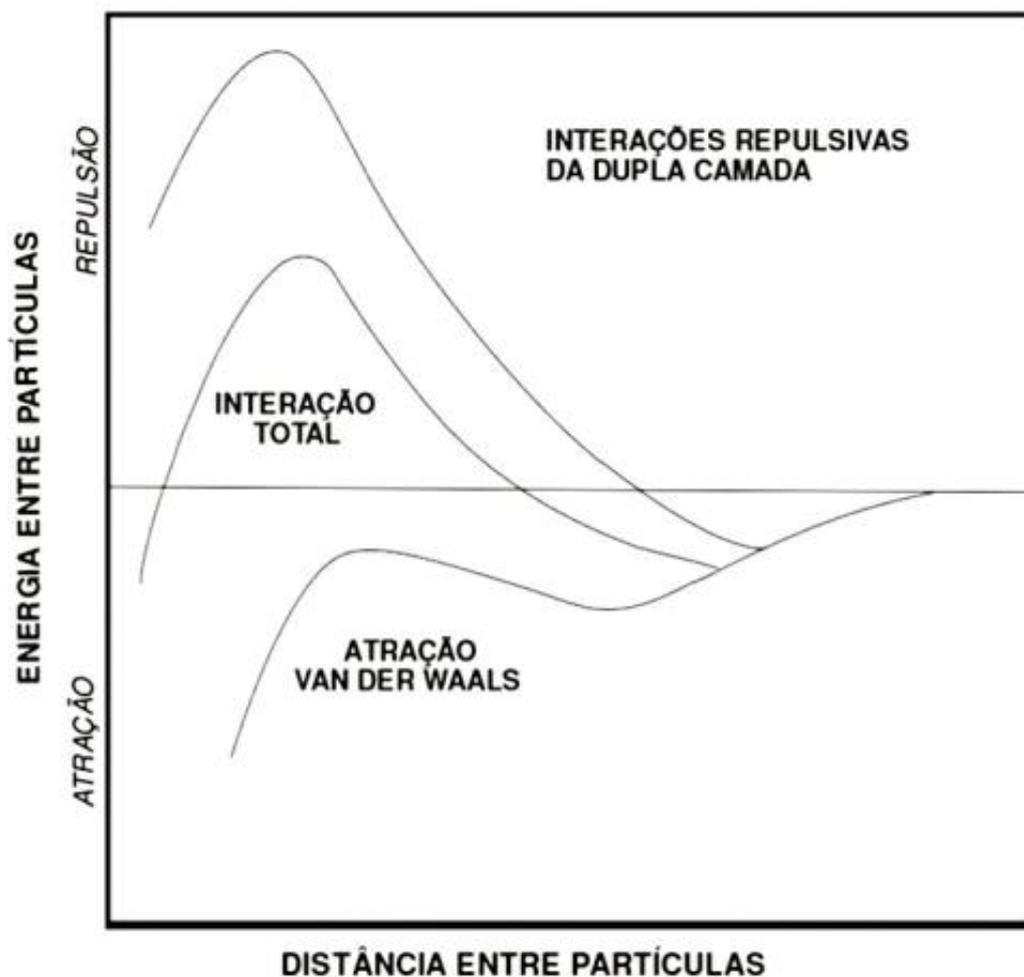
**Figura 2.13**– Potencial zeta conforme o pH para a Hematita. Fonte Pan *et al.*, 2004

**Tabela 2.5** – Característica do estado de estabilidade das partículas em função do potencial zeta. Fonte: Riddick (1969) *apud* Paiva (2004).

Características do estado de estabilidade	Potencial zeta (mV)
Faixa de agregação máxima	+3 a 0
Faixa de agregação forte	+5 a -5
Limite de agregação	-10 a -15
Limite de estabilidade	-16 a -30
Faixa de estabilidade moderada	-31 a -40
Faixa próxima a uma boa estabilidade	-41 a -60
Faixa de estabilidade muito boa	-61 a -80
Faixa extremamente boa de estabilidade	-81 a -100

### 2.3.1 Teoria DLVO

A agregação e a dispersão de partículas de granulometria coloidal são normalmente influenciadas pelas forças de Van de Waals (atrativas) e as forças entre as duplas camadas elétricas (repulsivas). A energia total de interação ( $V_T$ ) é dada pela soma das forças de Van der Waals ( $V_W$ ) e as forças elétricas ( $V_E$ ). (LINS e ADAMIAN, 2000). A figura 2.14 mostra curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.

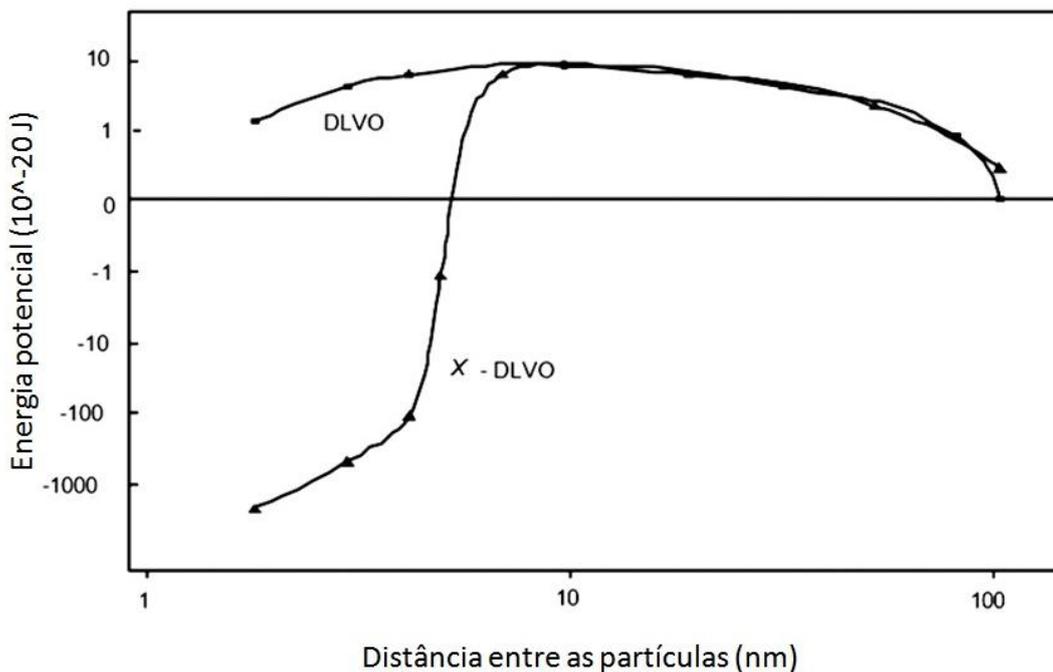


**Figura 2.14** - Curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas. Fonte: Paiva (2004).

Paiva (2004) salienta ainda que a intensidade da barreira energética que se opõe à agregação das partículas depende de fatores como a magnitude do potencial da superfície mineral e do alcance das forças de repulsão.

Além das forças de Van de Waals e das forças elétricas, conforme referido por Lins e Adamian (2000), a energia total ( $V_T$ ) de interação entre partículas minerais envolve também a influência de outras forças como por exemplo das forças de interação hidrofóbica (repulsiva) ou hidrofílica (atrativa), denominadas  $V_s$ , da componente  $V_{ASS}$  oriunda da associação hidrofóbica das cadeias orgânicas dos coletores adsorvidos nas partículas, da interação procedente de forças magnéticas entre partículas expostas à ação de um campo magnético  $V_M$  e também do efeito de repulsão, resultante da interação entre as partes externas de polímeros adsorvidos. Sendo assim a equação 2.1 representa a energia total de interação entre as partículas de acordo com a teoria X-DLVO (LINS e ADAMIAN, 2000). Na figura 2.15 está representada a teoria DLVO em comparação a teoria X-DLVO.

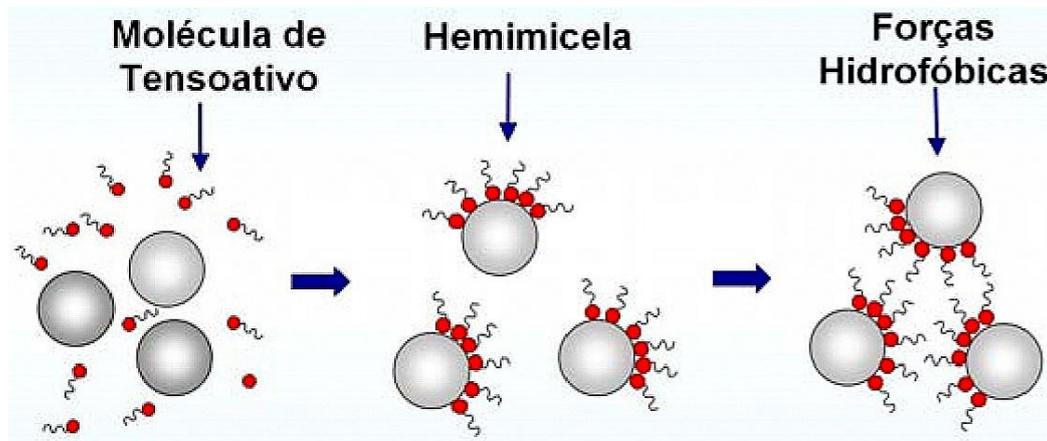
$$V_T = [V_W + V_E] + V_S + V_{Ass} + V_M + V_{Est} + \dots \quad (2.1)$$



**Figura 2.15-** Curvas de energia de interação entre partículas ultrafinas de rodocrosita: teoria DLVO e teoria X-DLVO. Fonte : Lins e Adamian (2000).

De acordo com Oliveira e Rubio (2011), a desestabilização de partículas em meio aquoso pela adição de reagentes tensoativos é decorrente da adsorção destes reagentes na interface sólido-líquido, tornando as partículas

hidrofóbicas, propiciando uma aproximação e, assim, uma agregação. A figura 2.16 apresenta os mecanismos de agregação com tensoativos.

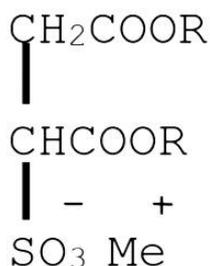


**Figura 2.16** - Mecanismos de agregação com tensoativos: formação de micelas e interação hidrofóbica. Fonte : Oliveira e Rubio (2011).

## 2.4 REAGENTES AUXILIARES DE FILTRAÇÃO

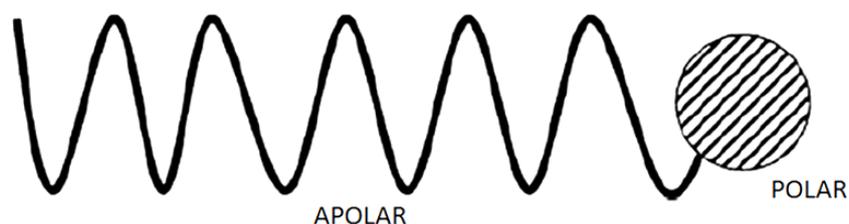
Reagentes que auxiliam a filtração são compostos que aumentam a velocidade de filtração ou de centrifugação devido a redução da tensão superficial da interface sólido-líquido ou podem agir como floculantes aumentando a permeabilidade da torta. Quando este tipo de reagente é adicionado a polpa que será filtrada espera-se ter uma torta com estrutura aberta, livre de finos que podem porventura preencher os poros da torta ou entupir o meio filtrante (CHAVES, 2013).

Os reagentes auxiliares de filtração mais utilizados na indústria mineral são os surfactantes do grupo dos sulfossuccinato que tem a fórmula estrutural representada na figura 2.17 em que R é o grupo hidrocarbônico e Me<sup>+</sup> pode ser o Na<sup>+</sup> ou o K<sup>+</sup> (DIAS *et al.*, 2004).



**Figura 2.17** - Fórmula estrutural de um surfactante. Fonte: Dias (2004).

Surfactante é um termo amplamente utilizado para um agente tensoativo e significa de forma literal “ativo em uma superfície”. O termo superfície ativa quer dizer que o surfactante diminui a energia livre de superfícies e interfaces. Pode-se afirmar que estes reagentes reduzem as tensões das interfaces. Os surfactantes são moléculas anfifílicas, ou seja, estimam tanto um ambiente polar quanto um ambiente apolar. Este fato deve-se a sua estrutura que apresenta parte hidrofílica (a cabeça) e parte hidrofóbica (a cauda), por isso eles tendem a agir nas interfaces (KRONBERG *et al.*, 2014). Na figura 2.18 é possível observar um esquema ilustrativo de um surfactante.



**Figura 2.18** – Esquema de um surfactante. Fonte: Adaptado de Kronberg *et al.* (2014).

Existem dois mecanismos para a atuação do surfatante na filtração. Estes reagentes podem atuar na interface sólido/líquido tornando a superfície do mineral hidrofóbica e também podem agir na interface líquido/ar diminuindo a tensão superficial, fazendo com que as forças que retêm água nos capilares da torta sejam diminuídas (DIAS *et al.*, 2004).

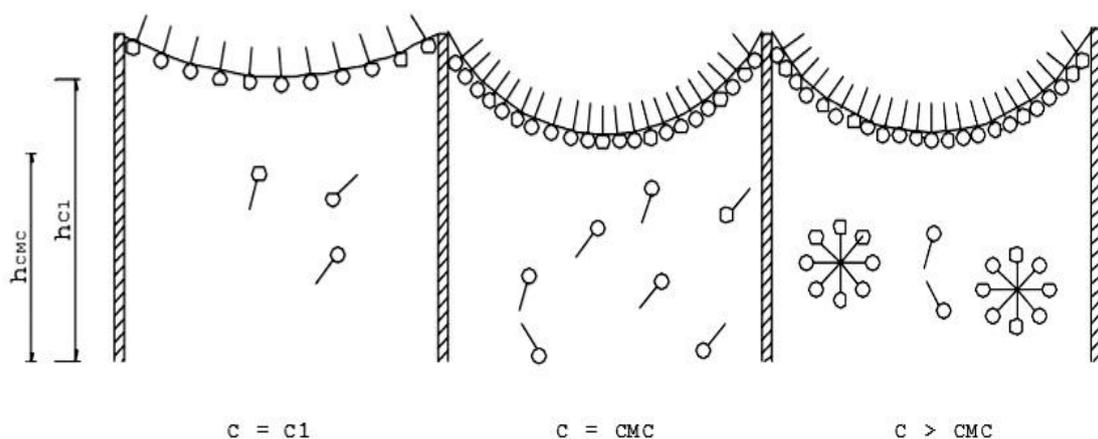
O mecanismo responsável da ação de surfatantes em suspensões minerais aquosas na redução da tensão superficial é dado pela equação de Laplace-Young, dada a seguir (SINGH, 1999)

$$h = \frac{\gamma_{lg} \cos \theta_{sl}}{g \rho r} \quad (2.2)$$

Em que  $h$  é a pressão capilar,  $\gamma_{lg}$  é a tensão superficial líquido-ar,  $\theta_{sl}$  é o ângulo de contato líquido-ar,  $r$  é o raio capilar,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\rho$  é a densidade do líquido. Ainda sobre a diminuição da tensão superficial da

interface líquido/ar, Chaves (2013) aponta que a pressão capilar tende a prender o líquido dentro do leito, e diminuindo este parâmetro tem-se um melhor escoamento do líquido.

Dias *et al.* (2004) admite que, à medida que a concentração de surfactante é aumentada, há uma diminuição da tensão superficial do líquido, ocorrendo até uma concentração igual a concentração micelar crítica, após essa concentração tende a se formar micelas. Este processo pode ser visualizado na figura 2.19



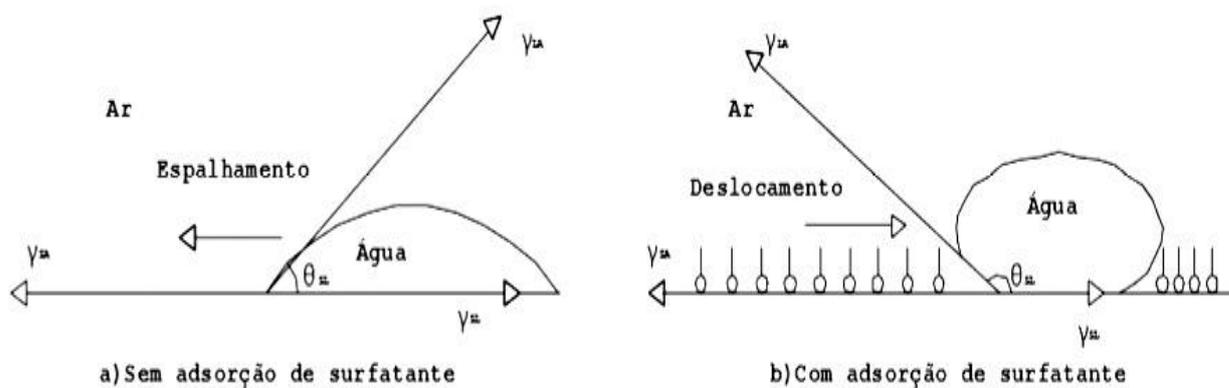
**Figura 2.19** – Influência da concentração do surfactante da tensão superficial. Fonte: Dias *et al.* (2004).

De acordo com Singh (1998), os surfatantes podem adsorver em partículas < 2  $\mu\text{m}$  fazendo com que não seja possível a ação de reduzir a tensão superficial.

Quanto ao grau de hidrofobicidade das partículas, Dias *et al.* (2004) sugerem que os surfatantes obedecem a lei de Dupre-Young.

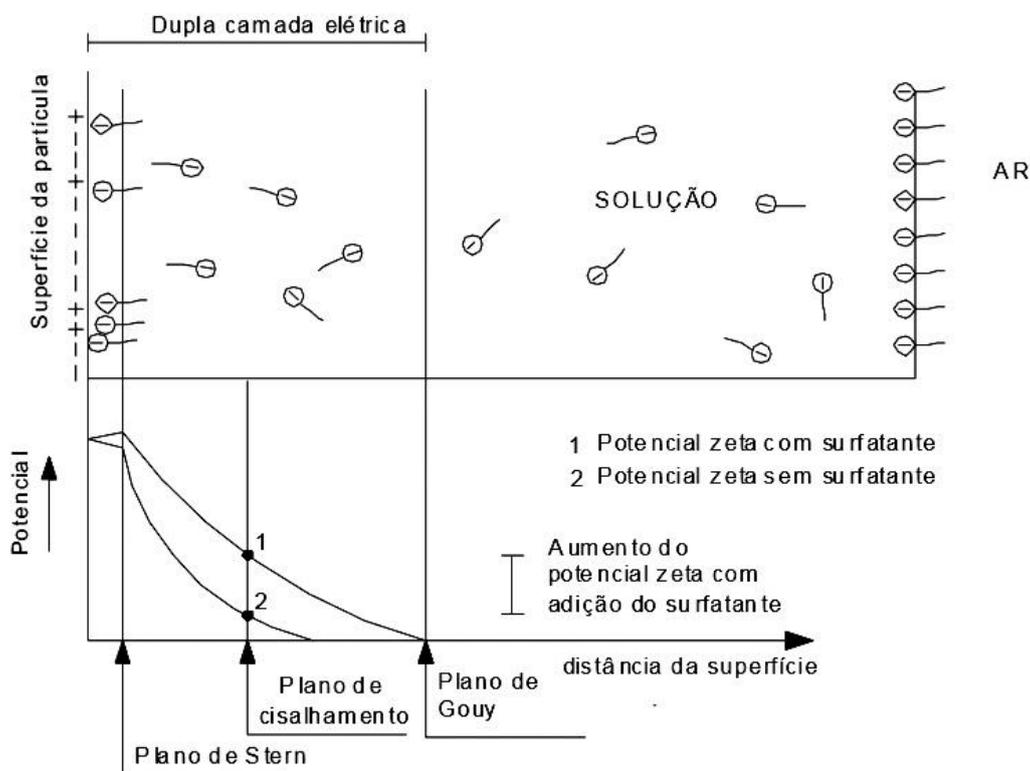
$$W_{aSL} = \gamma_{LA} \cdot (1 + \cos \theta_{SL}) \quad (2.3)$$

onde  $W_{aSL}$  é o trabalho de adesão sólido/líquido,  $\gamma_{LA}$  é a tensão superficial na interface líquido ar e  $\theta_{SL}$  = ângulo de contato. A figura 2.20 representa a influencia da adsorção de surfatante no grau de hidrofobicidade na superfície da partícula. Com a presença do reagente ocorreu o aumento do ângulo de contanto, ou seja, a partícula torna-se hidrofóbica.



**Figura 2.20-** Influência da adsorção de surfatante no grau de hidrofobicidade na superfície da partícula. Fonte: Dias *et al* (2004).

Dias *et al.* (2004) relatam que surfatantes aniônicos podem adsorver em partículas carregadas negativamente através dos sítios positivos da partícula ou por meio de agentes de ligação, ocasionando em um aumento no potencial zeta, tornando a polpa mais dispersa. Como mostrado na figura 2.21



**Figura 2.21-** Efeito da adsorção dos surfactantes no potencial zeta. Fonte: Dias *et al.*(2004).

## 2.5 PLANEJAMENTO FATORIAL

Avaliar a influência entre as variáveis dos processos é um grande desafio, para isso, uma das possibilidades é a utilização da técnica do planejamento fatorial, que tem como objetivo obter uma resposta satisfatória variando todas os parâmetros em conjunto. Para que seja possível a realização do planejamento é necessário que se defina quais fatores e respostas serão analisadas. Os fatores são na maioria das vezes variáveis controláveis, já as respostas são as variáveis de saída do sistema (GONÇALVES, 2016; BARROS NETO *et al.*, 2010).

O planejamento experimental é a especificação detalhada de todas as operações experimentais que devem ser realizadas, com base no objetivo que se pretende atingir (BARROS NETO *et al.*, 2010).

O planejamento fatorial a dois níveis ( $2^k$ ) é a técnica mais utilizada e mais simples para identificar as influências entre as variáveis de um sistema. O planejamento fatorial  $2^k$  utiliza k fatores analisados em 2 diferentes níveis, um nível máximo (+1) e um nível mínimo (-1) (GONÇALVES, 2016 e BARROS NETO *et al.*, 2010).

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os métodos utilizados para a realização dos ensaios de filtração, bem como da análise do material.

#### 3.1 MATERIAL

O material utilizado neste trabalho é um rejeito da flotação de minério fosfático que se encontrava no Laboratório de tratamento de minérios do CEFET-MG Unidade Araxá. A amostra original passou por processos de secagem e homegeinização, operações de cominuição, deslamagem e, por fim, concentração via flotação. Na figura 3.1 é possível ver a amostra (aproximadamente 6 kg) disposta em uma lona.



**Figura 3.1-** Amostra geral do rejeito.

#### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

##### 3.2.2 Análise Química

Os teores das espécies químicas da amostra do rejeito foram determinados utilizando-se a técnica de Fluorescência de raios-X (FRX). O equipamento

utilizado para a análise foi Shimadzu, modelo EDX-720, que se encontra no laboratório de Engenharia de materiais do CEFET MG Campus I.

### 3.2.1 Análise Granulométrica

Para que fosse possível o conhecimento da granulometria do rejeito foi realizado um peneiramento a úmido utilizando o peneirador suspenso (CDC, modelo PV-08), peneiras das marcas Granutest e Brozinox e uma amostra de 200g de material disposta em uma polpa com 50% de sólidos. A polpa foi transferida para a série de peneiras pré-selecionada: 0,209 mm (65#); 0,148 mm (100#); 0,105 mm (150#); 0,074 mm (200#); 0,052 (270#); 0,044 (325#) e 0,037 mm (400#). As peneiras bem como o peneirador utilizado nos testes, podem ser visualizados na figura 3.2.



**Figura 3.2-** A: Peneiras selecionadas; B: peneirador suspenso

Seguindo os passos descritos por Sampaio e Silva (2007), quando nenhuma partícula era passante na peneira de menor abertura, e a água que era coletada na saída era tão limpa quando a água nova foi então cessado o processo de peneiramento. O material retido em cada peneira foi secado em estufa a 100°C por 24 horas, após foi pesado para posteriores cálculos.

### 3.2.3 Determinação da massa específica dos sólidos

Para a determinação da massa específica da amostra, utilizou-se da técnica da picnometria. De acordo com Sampaio (2007) essa é a técnica mais utilizada no

mundo para este fim. Toma-se como base para o cálculo da densidade do sólido a equação 3.1 descrita a seguir.

$$\rho_s = \frac{A_2 - A_1}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad 3.1$$

Onde:

$\rho_s$  = densidade do sólido;

A1 = massa do picnômetro;

A2 = massa do picnômetro + amostra;

A3 = massa do picnômetro + amostra + água;

A4 = massa do picnômetro + água.

Inicialmente pesou-se os picnômetros secos e tampados obtendo assim o valor A1. Foi colocado dentro do picnômetro uma certa quantidade representativa da amostra até que se tampasse o fundo do picnômetro e a massa do conjunto foi aferida, obtendo-se o valor A2, neste conjunto foi adicionado água até completar todo o volume do picnômetro e novamente a massa do sistema foi aferida, para que se obtivesse o valor A3. Por fim o picnômetro foi lavado e preenchido totalmente com água e o valor da massa do picnômetro mais água foi aferida, obtendo-se o valor A4. A figura 3.3 mostra os picnômetros contendo A1, A2, A3 e A4.



**Figura 3.3 – Picnômetros**

Por fim, com posse dos valores de A1, A2, A3 e A4 e empregando-se a equação 4.1 foi possível obter a densidade da amostra. As massas foram devidamente pesadas em uma balança semi-analítica (Gehaka, precisão 0,01 g).

### 3.3 REAGENTES

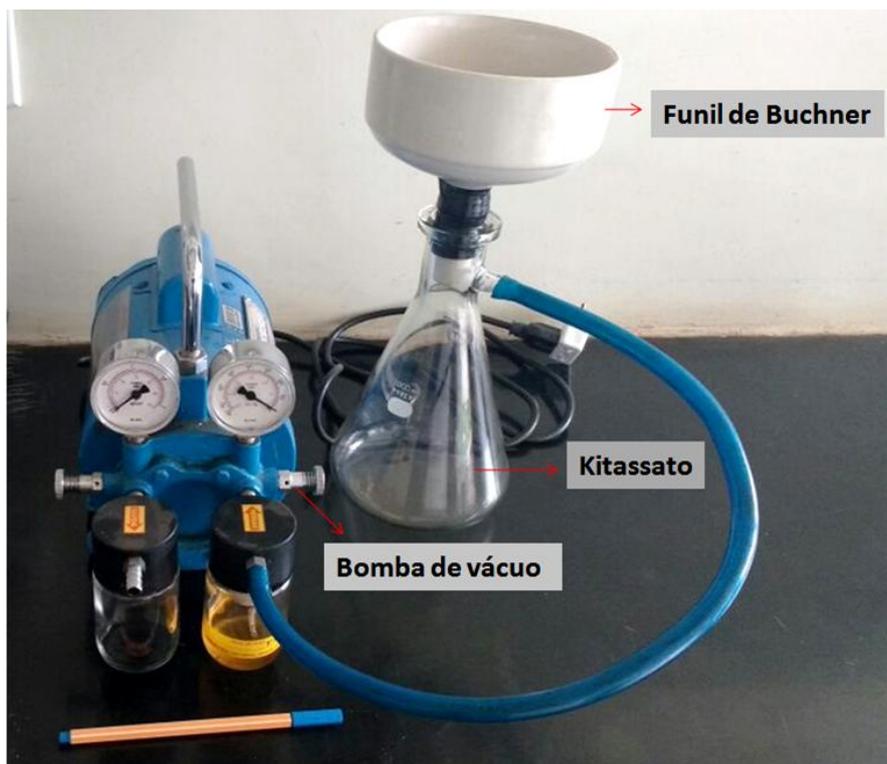
O reagente, denominado auxiliar de filtração, utilizado nos testes de filtração foi o Flotisor FA 7129 em uma solução de 0,5% (m/V). A tabela 3.1 apresenta as características físicas do surfatante.

**Tabela 3.1-** Características do Flotisor FA-7129. Fonte: Ficha técnica da Clariant.

Composição	Di-isocitilsulfossuccinato de sódio
Aparência	Líquido incolor ligeiramente amarelado
pH (1% em água)	6,0 – 7,5
Ionicidade	Aniônico
Solubilidade	Miscível com água em qualquer proporção, mas soluções claras são obtidas apenas em baixas concentrações <ul style="list-style-type: none"> <li>• A 20°C solução a 1%</li> <li>• A 40°C solução a 2,5%</li> </ul>
Observações:	O reagente permanece ativo em ácido para suspensão mineral fracamente alcalina, dentre um intervalo de pH de 1 a 10. Em polpas altamente alcalinas sofre hidrólise perdendo sua eficácia

### 3.4 TESTES DE FILTRAÇÃO

O teste de folha, de acordo com França e Casqueira (2007), é o método de filtração em escada de bancada usado universalmente para dimensionamento de filtros industriais. Neste trabalho utilizou-se o teste de folha com a alimentação feita por cima, como descrita no item 2.2.3 (Testes de filtração). O conjunto utilizado para a realização dos testes está representado na figura 3.4. Ele é composto por um funil de Buchner contendo o meio filtrante e uma bomba de vácuo conectada a um kitassato por meio de uma mangueira de borracha.



**Figura 3.4-** Conjunto utilizado para a realização dos testes de filtração.

Para a realização dos testes, inicialmente foi preparada uma polpa de rejeito fosfático com 60% de sólidos em peso. Esta porcentagem de sólidos foi escolhida com o intuito de reproduzir em escala laboratorial a realidade industrial. Levando-se em consideração que, a filtração é uma etapa subsequente ao espessamento, e este processo é finalizado com uma polpa em média com 60% de sólidos. Os parâmetros gerados para a preparação da polpa estão apresentados na tabela 3.2.

**Tabela 3.2 -** Parâmetros para preparação da polpa.

Volume da polpa (mL)	Massa de sólidos (g)	Massa de água (g)
100	96,6	64,4
200	193,2	128,8

Com o auxílio de um bastão de vidro manteve-se a polpa em agitação por um minuto, após este tempo foi adicionado o reagente destinado a cada teste

(reguladores de pH ou o surfactante). Posteriormente a polpa de rejeito foi transferida ao funil de Buchner contendo o meio filtrante e aberto ao ambiente. Imediatamente o vácuo foi acionado e então se iniciou a cronometragem. O tempo de formação da torta foi medido a partir do acionamento do vácuo até o momento em que não era possível se observar nenhuma lâmina d'água sobre o meio filtrante.

Parametrizou-se para os testes, um tempo total de ciclo de 15 minutos. Este tempo foi estabelecido a partir de testes preliminares, em que manteve-se o nível de vácuo constante e cronometrou-se o tempo a partir do momento do acionamento do vácuo até que o gotejamento do filtrado fosse cessado.

Após o término do ciclo de filtração, o filtrado foi transferido do kitassato para um béquer e pesou-se o conjunto béquer mais filtrado sendo assim possível a aferição do volume do filtrado. Para a determinação da turbidez do filtrado, fez-se uso do turbidímetro HI93703 da marca Hanna Instruments, que pode ser observado na figura 3.5. Uma menor turbidez do filtrado, garante, neste caso que o filtrado contenha menores quantidades de sólido.



**Figura 3.5-** Turbidímetro

A torta formada foi pesada e os valores da massa úmida devidamente anotados. Após este procedimento ela foi submetida a uma secagem em estufa a 100°C por 24 horas para que assim pudesse obter a massa seca da torta. Com a torta seca pode-se por fim, utilizando a equação 3.2 determinar a umidade final da torta.

$$Umidade\ base\ úmida(w) = \frac{\sum massa\ úmida - \sum massa\ seca}{\sum massa\ úmida} \times 100 \quad (3.2)$$

Em posse da massa da torta úmida e seca e do tempo total do ciclo é possível expressar a Taxa unitária de filtração (TUF), determinada a partir da equação 4.3.

$$TUF = t/h/m^2 \frac{massa\ da\ torta\ seca\ (g) * 3600}{1000000 * \text{área da folha} (m^2) * \text{tempo de ciclo} (s)} \quad (3.3)$$

A área da folha corresponde a área circular interna do funil de buchner, ocupada pelo meio filtrante é definida a partir da equação 4.4.

$$A = \pi r^2 \quad (3.4)$$

Os resultados dos testes de filtração realizados foram tabulados e expressos em tempo de formação da torta, tempo total do ciclo de filtração, volume e turbidez do filtrado, massa úmida e massa seca da torta, umidade da torta e taxa unitária de filtração (TUF).

Como o tempo total de ciclo foi mantido constante (15 minutos) para todos os testes, a taxa unitária de filtração, obtida pela equação 3.3, não apresentou variações relevantes. Entretanto, levando-se em consideração que o tempo total de ciclo se dá pela soma do tempo de formação da torta adicionado ao tempo de secagem, pode-se afirmar que para menores tempos de formação da torta tem-se, conseqüentemente, menores tempos de ciclo e assim, uma maior taxa unitária de filtração (TUF). Portanto durante os testes foi analisado o tempo de formação da torta

A fim de estabelecer os melhores parâmetros para a filtração do rejeito fosfático, os testes realizados neste trabalho foram divididos em três etapas

sendo a primeira etapa a avaliação da dosagem do reagente na polpa. A segunda etapa consistiu na análise da interferência da variação do pH da polpa e na terceira foram realizados testes seguindo um planejamento fatorial a dois níveis com ponto central. As variáveis investigadas no planejamento foram o pH da polpa, a dosagem do surfactante e o nível de vácuo e as respostas avaliadas foram tempo de formação da torta, turbidez do filtrado e umidade da torta.

### 3.4.1 Dosagem do Reagente

Nesta primeira etapa, foi avaliado o desempenho do surfatante *Flotisor FA 7129* fornecido pela *Clariant* (concentração 0,5% p/v) na filtração do rejeito fosfático. Para isto foram realizados testes de filtração com diferentes dosagens do reagente, a fim de analisar a interferência nos resultados finais.

A tabela 3.3 mostra as condições geradas para os testes de acordo com a variação da dosagem do reagente.

**Tabela 3.3–** Condições de dosagens do Surfactante.

Dosagem do Reagente (g/t)	Massa da solução (g) para polpa de 100 mL	Massa da solução (g) para polpa de 200 mL
20	0,39	0,78
40	0,78	1,56
60	1,16	2,32
80	1,56	3,12
120	2,32	4,64

Após a preparação da polpa, o reagente foi adicionado e mantido em condicionamento por 2 minutos, nos quais a polpa era mantida sob agitação manual como auxílio de um bastão de vidro. Após o tempo de condicionamento, o teste de filtração foi conduzido seguindo os mesmos métodos descritos anteriormente.

### 3.4.2 Interferência da Variação do pH da Polpa

A segunda etapa dos testes de filtração, consistiu em ajustar o pH da polpa, para que assim pudesse ser avaliada a interferência do pH nos resultados finais, bem como definir um pH ideal para a filtração do rejeito fosfático. Foram avaliados os resultados finais dos testes de filtração com pHs em um intervalo de 3 a 10. Para o ajuste do pH utilizou-se soluções de HCl e NaOH. A medição do pH foi realizada com o pHmetro digital da marca Hanna devidamente calibrado, mostrado na figura 3.6. Após a obtenção do pH desejado, os testes de filtração foram conduzidos assim como os testes anteriores.



Figura 3.6 – pHmetro digital.

### 3.4.3 Planejamento Fatorial a Dois Níveis com Ponto Central

Como o objetivo deste trabalho é definir os melhores parâmetros para a filtração de rejeito fosfático, foram escolhidos dois valores distintos de pH, dosagem de reagente e nível de vácuo para a análise de seus efeitos nos resultados dos testes. Para a otimização do processo de filtração têm-se a intenção de minimizar os valores das variáveis analisadas, que foram tempo de formação da torta, turbidez do filtrado e umidade da torta.

As dosagens de reagente utilizadas no planejamento foram determinadas a partir da análise dos resultados obtidos nos testes de variação da dosagem do reagente. Para o valor mínimo adotou-se o teste em branco, ou seja sem

adição do reagente, já para o valor máximo escolheu-se a dosagem que apresentou melhores resultados na filtração, 60g/t. Os níveis de pH utilizados também foram determinados a partir da análise dos testes de filtração variando o pH.

O ponto central (0) foi introduzido no planejamento a fim de fazer a estimativa de erro nos resultados dos ensaios. Este método foi adotado ao contrário da duplicata dos testes prevendo a maior facilidade de trabalhar com os mesmos valores em todas as replicatas deste ponto. Os valores das variáveis no ponto central (nível 0) são equivalentes ao ponto médio entre os níveis 1 e -1 e dessa forma, melhorou a confiabilidade em se fazer inferências sobre a população a partir do conjunto de amostras.

Os níveis e as variáveis estudadas podem ser observados na matriz do planejamento expressa na tabela 3.4

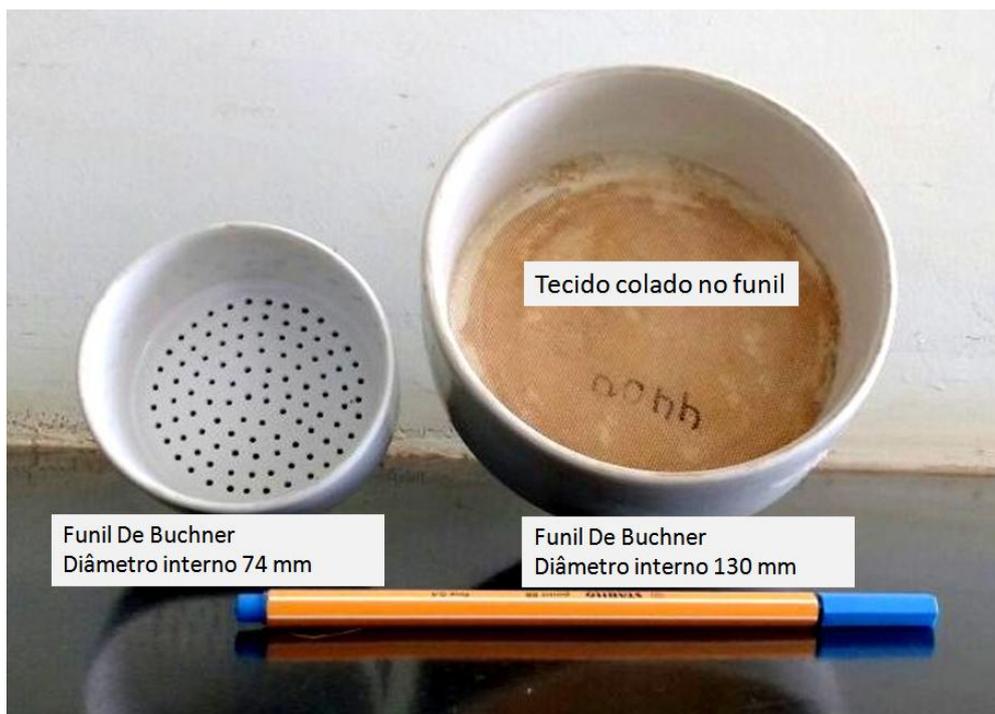
**Tabela 3.4–** Matriz do planejamento fatorial.

Teste	X1 (pH)	X2 (Dosagem do Reagente g/t)	X3 (vácuo mm de Hg)	X1	X2	X3
1	6	0	150	-1	-1	-1
2	9	0	150	1	-1	-1
3	6	60	150	-1	1	-1
4	9	60	150	1	1	-1
5	6	0	400	-1	-1	1
6	9	0	400	1	-1	1
7	6	60	400	-1	1	1
8	9	60	400	1	1	1
9	7,5	30	275	0	0	0
10	7,5	30	275	0	0	0
11	7,5	30	275	0	0	0
12	7,5	30	275	0	0	0
13	7,5	30	275	0	0	0

### **3.5 TESTE DE FILTRAÇÃO UTILIZANDO O MEIO FILTRANTE 4400-T**

Após estabelecidos os melhores parâmetros, os testes foram conduzidos utilizando como meio filtrante o tecido 4400-T fornecido pela Remae e escolhido por Rodrigues (2016) como o melhor meio filtrante para o rejeito fosfático. Nesses testes variou-se o pH da polpa em 6 (melhor resultado do planejamento) e 7,5 (natural) e o tempo de secagem foi mantido constante (10 minutos) ao invés do tempo do ciclo, com isso, uma alteração no tempo de formação da torta acarreta uma variação no tempo do ciclo e na tuf.

Foi preparado 200 ml de polpa com 60% de sólidos em massa para a filtração do rejeito. Se fez necessária a utilização de um funil de Buchner maior do que o utilizado nos testes anteriores, pois o funil de diâmetro interno 74 mm não fornecia capacidade suficiente para uma polpa de 200 mL. O tecido foi cortado de forma circular com diâmetro de 130 mm para que pudesse ser introduzido ao funil. Percebeu-se que diferente do papel filtro, o tecido não se prendia ao funil quando molhado. Para resolver este problema, colou-se o tecido no funil utilizando uma cola de silicone e aguardou 24 horas para que a cola estivesse totalmente seca. Na figura 3.7 é possível ver o tecido colado no funil de Buchner e a diferença de tamanhos entre os funis.



**Figura 3.7**– Funis de Buchner utilizados nos testes de filtração.

## 4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos testes de caracterização da amostra e de filtração.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

#### 4.1.1 Caracterização Química

O resultado da análise química da amostra, realizada pelo método de Fluorescência de Raios-X, está expresso na tabela 4.1. A tabela de composição química indica que a maior parte da amostra (47,622%) é composta por  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e que também uma quantidade considerável (21,503) é composta por  $\text{SiO}_2$ . Também é relevante constatar que a porcentagem de apatita  $\text{P}_2\text{O}_5$  é relativamente pequena (1,53%), pois o material analisado é o rejeito de uma etapa de flotação de fosfato.

**Tabela 4.1** Composição Química da amostra

<b>Espécie Química</b>	<b>Composição (%)</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47,62
SiO <sub>2</sub>	21,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,08
TiO <sub>2</sub>	8,09
K <sub>2</sub> O	3,74
CaO	2,42
BaO	2,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,53
MnO	0,85
ZrO <sub>2</sub>	0,60
NbO	0,18
SrO	0,17
CuO	0,11
ZnO	0,08
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03

#### 4.1.2 Determinação da massa específica dos sólidos

Os resultados obtidos para a densidade do material utilizando a técnica da picnometria estão expressos na tabela 4.2. A média das densidades foi igual a 2,7 g/cm<sup>3</sup>, adotada durante todo o trabalho.

**Tabela 4.2**– Resultados dos testes de Picnometria.

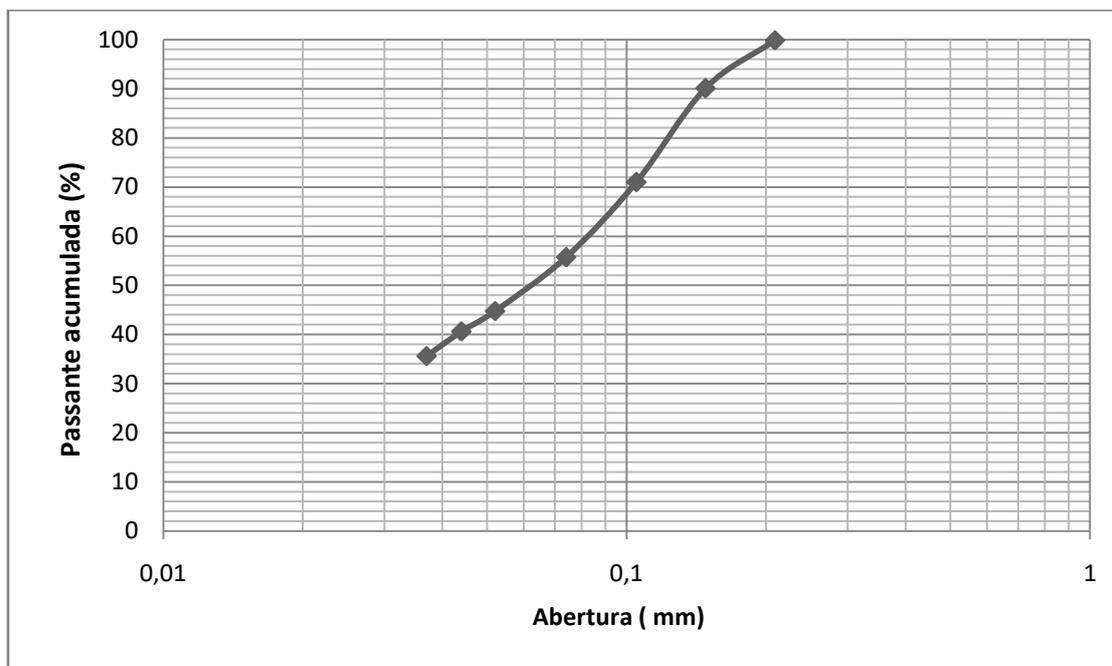
Teste	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	Densidade dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )
1	30,69	32,75	81,52	80,25	2,61
2	29,77	31,96	81,09	79,72	2,67
3	35,48	41,84	92,61	88,52	2,80
4	30,66	34,4	83,33	80,98	2,70
5	30,71	36,7	84,08	80,22	2,80
6	29,78	33,13	81,72	79,65	2,67

### 4.1.3 Análise Granulométrica

A distribuição granulométrica do material está representada na tabela 4.3 e na figura 4.1. A partir da análise da figura 4.1 pode-se observar que o material possui um  $d_{50}$  igual a 0,062 mm e também que a amostra apresenta uma quantidade significativa (35,61%) de material abaixo de 0,037 mm.

**Tabela 4.3-** Análise granulométrica do material

Abertura (#)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Retido simples (%)	Retido Acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
65	0,209	0,31	0,16	0,16	99,84
100	0,148	19,05	9,77	9,93	90,07
150	0,105	37,25	19,1	29,03	70,97
200	0,074	29,76	15,26	44,29	55,71
270	0,052	21,35	10,95	55,24	44,76
325	0,044	8,1	4,15	59,39	40,61
400	0,037	9,77	5	64,39	35,61
Fundo	-	69,51	35,63	100	0
Total	-	195,1	100	-	-



**Figura 4.1 -** Análise granulométrica da amostra.

## 4.2 TESTES DE FILTRAÇÃO

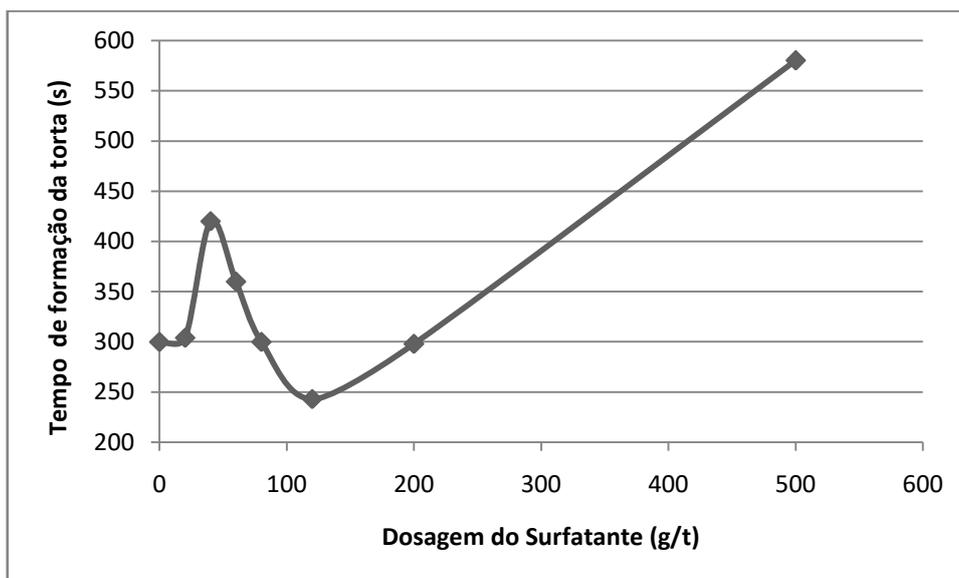
### 4.2.1 Avaliação da dosagem do reagente

A primeira etapa dos testes de filtração consistiu em analisar a influência da dosagem do surfactante na filtração do rejeito fosfático. Os testes foram realizados em duplicata e a média entre os valores encontrados para os parâmetros tempo de formação da torta, turbidez do filtrado e umidade da torta. A tabela 4.4 e as figuras 4.2 a 4.4 apresentam os resultados obtidos nos testes de folha com a variação da dosagem do auxiliar de filtragem. O pH da polpa em todos os testes foi mantido natural, em média possuía um valor de 7,5, e manteve-se um vácuo de 400 mm de Hg.

O tempo de formação da torta, quando comparado aos demais parâmetros analisados, apresentou maior influência pela variação da dosagem do surfactante, mostrando maior valor para a dosagem de 550 g/t (580 segundos) e o menor valor para 120 g/t (243 segundos). A adição de *Flotisor Fa 7129* até a dosagem de 40 g/t ocasionou um aumento no tempo de formação da torta em relação ao teste sem a adição do reagente. A partir de 60g/t houve uma queda no tempo de formação da torta, até que com 120 g/t este tempo apresentou uma pequena redução em relação ao tempo de formação da torta sem a adição do surfactante (- 57s).

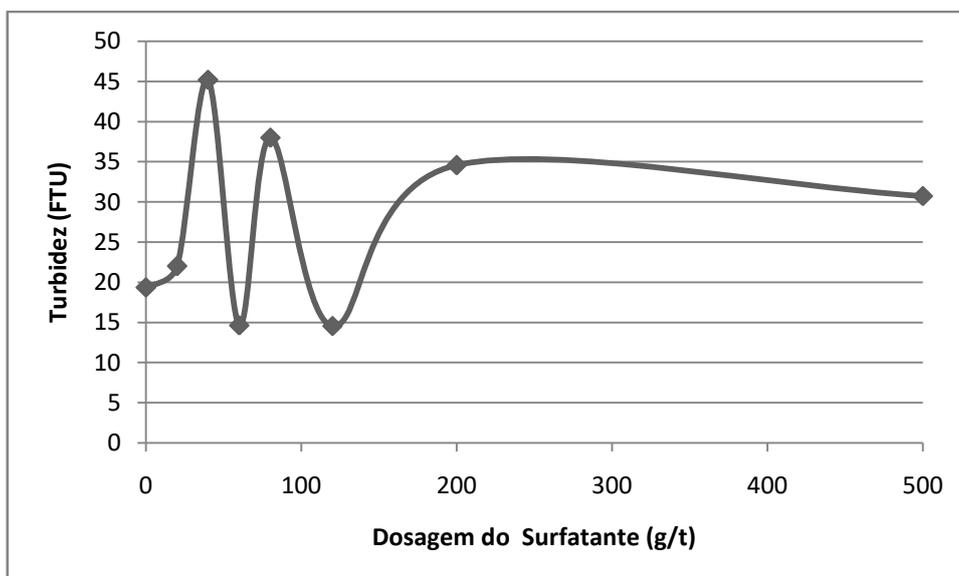
**Tabela 4.4 – Resultados da variação da dosagem do reagente**

Dosagem de reagente (g/t)	Tempo de formação da torta (segundos)	Turbidez do filtrado (FTU)	Umidade (%)
0	300	19,35	29,39
20	304	22	28,88
40	420	45,17	30,93
60	360	14,64	28,8
80	300	68	26,94
120	243	14,56	29,08
200	298	34,56	33,26
500	580	30,72	40

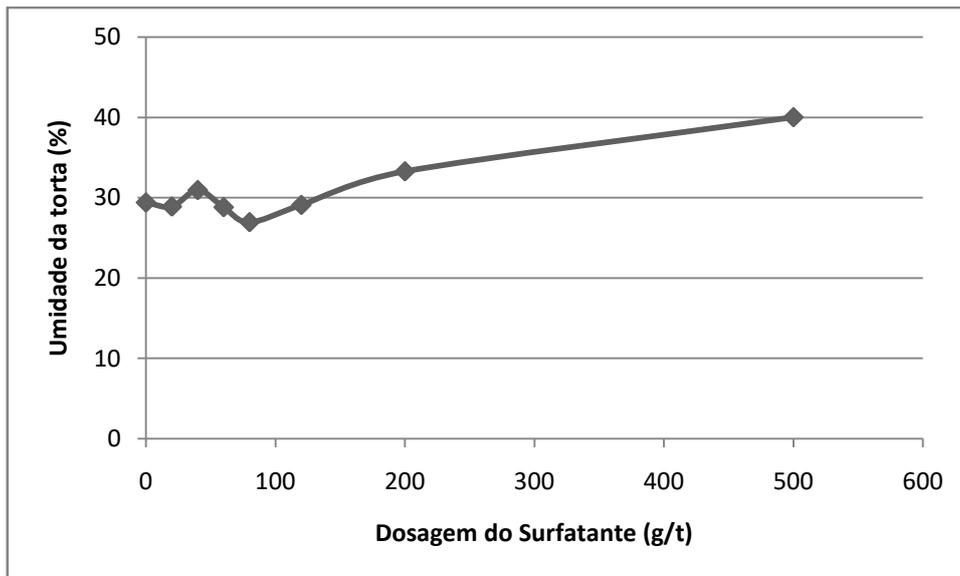


**Figura 4.2** - Tempo de formação da torta em função da dosagem do reagente.

A curva de turbidez do filtrado, figura 4.3, não apresentou uma tendência com o aumento da dosagem do reagente, apresentou o valor mais alto quando a dosagem do reagente foi de 80 g/t e menor valor para a dosagem de 120 g/t.



**Figura 4.3** - Turbidez do filtrado em função da dosagem do surfatante.



**Figura 4.4** - Umidade da torta variando com a dosagem do surfatante.

Com a adição do reagente na polpa, a umidade final da torta não apresentou variações significativas, permanecendo praticamente constante em todos os testes realizados, cerca de 30%, exceto no teste com 500 g/t que apresentou uma umidade de 40%. Estes resultados negativos não eram esperados, esperava-se que a adição do surfactante aumentasse a eficiência da filtração, reduzindo a umidade da torta, como obtido por Martins *et al.* (2015) para o desaguamento de *sinter feed*. No entanto, Dias *et al.* (2004) concluíram que a adição de surfactante no processo de filtração de produtos finos de ferro, ocasionou um aumento no tempo de formação da torta, uma diminuição na tensão superficial do filtrado e não interferiu significativamente na umidade final da torta. Pode-se dizer que os resultados deste trabalho se assemelham aos do trabalho em questão. Apesar de não ter sido possível quantificar a tensão superficial do filtrado, foi possível observar durante a realização dos testes que quando se condicionava a polpa acrescida do surfactante, esta apresentava menor viscosidade. Este fato leva a concluir que a tensão superficial na interface líquido/ar mostrou uma diminuição, quando comparada a polpa sem o reagente.

A adição do surfactante propiciou a formação de trincas na torta, fazendo com que o vácuo não pudesse ser mantido constante durante os testes. A figura 4.5

mostra uma torta formada no processo sem adição do reagente e outra formada quando se adicionou 120 g/t do reagente à polpa.



**Figura 4.5–** Comparação de uma torta com e sem reagente

Aparentemente nos testes realizados com 120g/t de reagente os resultados foram mais satisfatórios, gerando menor valor para o tempo de formação da torta (243 s) e o menor valor para turbidez do filtrado (11,56). Entretanto foi escolhida a dosagem de 60 g/t para os próximos ensaios do planejamento fatorial, pois quando comparados os resultados aos de 120g/t, estes não apresentaram variações significativas, e uma menor quantidade de reagente utilizada garante menores custos na operação. Outro fator relevante foi a análise da trinca das tortas, a menor dosagem de reagente gerou uma menor formação de trincas, esta comparação pode ser observada na figura 4.6



**Figura 4.6** - Comparações das trincas nas tortas com 60 e 120 g/t de Surfactante  
 Comparações das trincas nas tortas com 60 e 120 g/t de Surfactante.

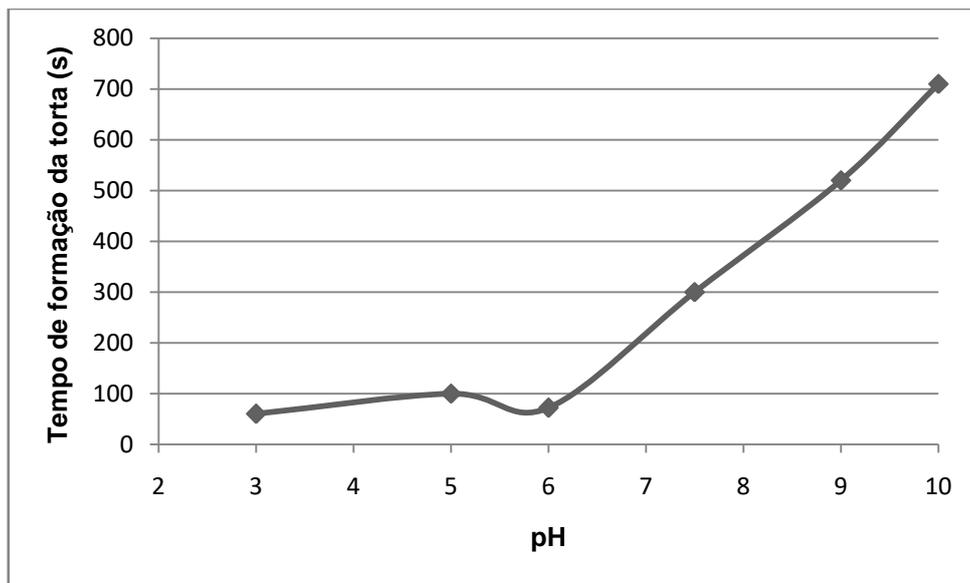
#### 4.2.2 Variação do pH da Polpa

Nesta etapa os testes foram conduzidos variando-se o pH da polpa de 3 a 10 e assim como na etapa anterior foram analisados os resultados do tempo de formação da torta, turbidez do filtrado e umidade da torta, que estão apresentados na tabela 4.5. As figuras 4.7, 4.8 e 4.9 representam graficamente os resultados dos testes realizados nesta etapa para tempo de formação da torta, turbidez e umidade, respectivamente.

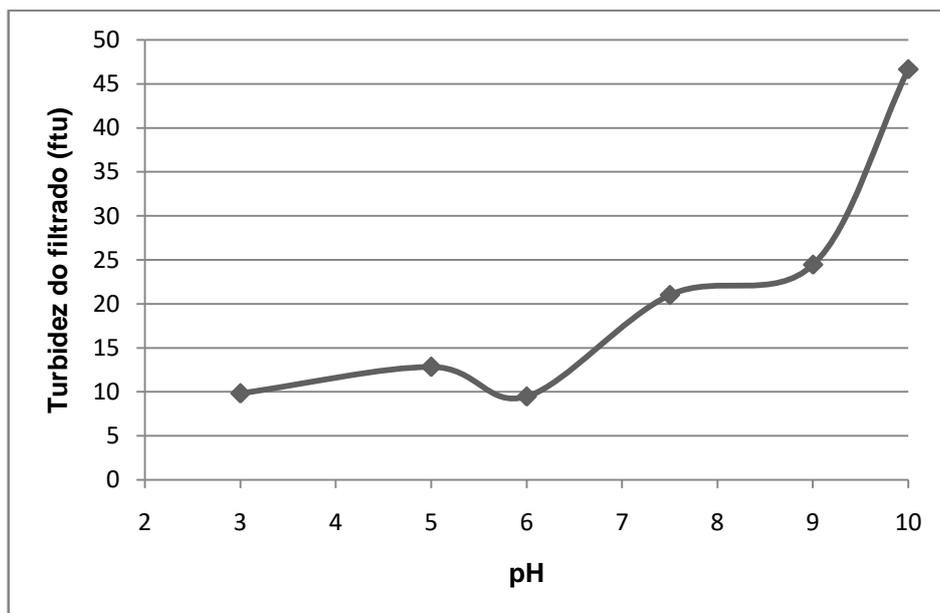
**Tabela 4.5**– Resultados dos testes com variação do pH.

pH	Tempo de formação da torta (segundos)	Turbidez (ftu)	Umidade (%)
3	60	9,82	23,19
5	100	12,83	24,77
6	72	9,48	24,64
7,5	300	21	30,9
9	520	24,46	29,8
10	710	46,64	29,15

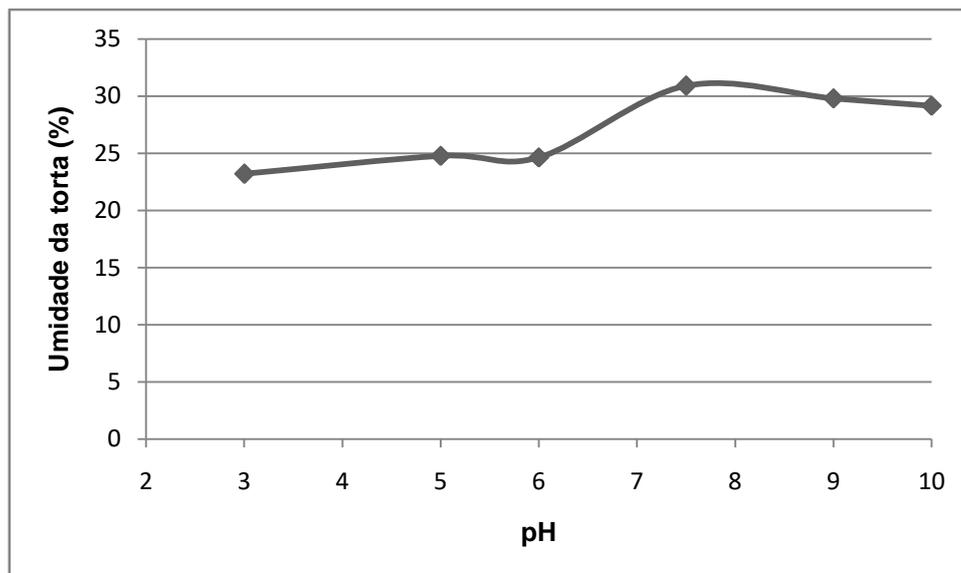
A partir dos gráficos exibidos nas figuras 4.7, 4.8 e 4.9 é possível perceber que o aumento do pH interfere consideravelmente no tempo de formação da torta, na turbidez do filtrado, e na umidade da torta. Para todos os parâmetros analisados observou-se que o aumento do pH provocou aumento nos valores dos resultados. Entretanto na faixa de pH de 3 a 6 essas variações não foram tão significativas quando comparadas as faixas de pH 7,5 a 10.



**Figura 4.7** - Gráfico do tempo de formação da torta com variação do pH.



**Figura 4.8**- Gráfico da turbidez do filtrado em função do pH.



**Figura 4.9** - Gráfico da Umidade da torta em função do pH

O ponto isoelétrico de um sistema é dado no valor de pH em que o potencial zeta é zero, neste ponto as forças repulsivas são praticamente nulas, predominando as forças de Van der Waals, que são forças altamente atrativas (Henriques, 2012). O fato de os menores valores para os parâmetros analisados tenham ocorrido em pH 6, pode ser explicado antevendo que o ponto isoelétrico do material utilizado nos testes seja próximo a este valor de pH, causando a aglomeração das partículas e tornando mais eficiente a filtração do material. Em contrapartida, quando o pH foi elevado a filtração mostrou menor eficiência, uma vez que a medida que o pH aumenta, o potencial zeta também se eleva, ou seja, as partículas apresentam um excesso de carga negativa favorecendo assim a dispersão da polpa. O que pode ser explicado pelo fato da interação da dupla camada elétrica das partículas com cargas superficiais idênticas, fazendo com que predomine a repulsão entre as partículas.

Como o pH 6 forneceu os resultados mais satisfatórios nos testes, foi designado que o nível -1 do planejamento fatorial seria 6 e o nível máximo seria pH 9.

#### **4.2.3 Planejamento Fatorial a Dois Níveis com Ponto Central**

Os resultados obtidos nos testes do planejamento fatorial são apresentados na tabela 4.6. Os resultados para o tempo de formação, umidade da torta e

turbidez do filtrado foram tratados individualmente com o software *Minitab 17 Statistical Software*.

**Tabela 4.6 - Resultados do planejamento fatorial**

Teste	pH (X1)	Dosagem do Surfatante (g/t) (X2)	Vácuo (mm Hg) (X3)	Tempo de formação da torta (segundos)	Turbidez do filtrado (FTU)	Umidade (%)
1	6	0	150	74	18,30	28,89
2	9	0	150	660	28,58	34,23
3	6	60	150	80	12,45	29,75
4	9	60	150	722	34,58	34,76
5	6	0	400	72	9,48	24,64
6	9	0	400	520	24,46	29,8
7	6	60	400	72	37,8	25,3
8	9	60	400	420	22,75	28,07
9	7,5	30	275	530	12,62	27,11
10	7,5	30	275	568	15,3	31,4
11	7,5	30	275	482	17,95	27,28
12	7,5	30	275	495	16,28	26,83
13	7,5	30	275	489	14,96	27,24

#### 4.2.3.1. Tempo de formação da torta

Para a variável tempo de formação da torta, têm-se a partir do valor de  $R^2$ , dado pelo programa, que 99,24% da variação dos resultados são explicados, ou seja, apenas 0,76% da variação das respostas não se ajustam ao modelo de regressão apresentado um pouco mais adiante (Equação 5.1). A tabela 4.7 mostra os valores dos coeficientes codificados, que representam a influência das variáveis analisadas no resultado do tempo de formação da torta.

**Tabela 4.7** - Tabela ANOVA para os efeitos (tempo de formação da torta).

Termo	Efeito	Coeficiente	SE Coeficiente	Valor T	Valor P
Constante	-	327,5	12,7	25,75	0
pH	507,5	253	12,7	19,9	0
Dosagem do reagente	-6,5	-4	12,7	-0,31	0,769
Nível de vácuo	-111,5	-56,5	12,7	-4,44	0,011
pH* Dosagem do reagente	-12,5	-5,5	12,7	-0,43	0,688
pH*nível de vácuo	-109,5	-54	12,7	-4,25	0,013
Dosagem do reagente * nível de vácuo	-43,5	-21	12,7	-1,65	0,174
pH*Dosagem do reagente * nível de vacuo	-37,5	-19,5	12,7	-1,53	0,200
Ct Pt		185,3	20,5	9,04	0,001

Levando em consideração que os efeitos são estatisticamente significativos quando seus valores-p na tabela de coeficientes codificados são menores do que  $\alpha$  — e neste estudo usamos um  $\alpha$  padrão de 0,05 —, pode-se concluir que apenas os efeitos das variáveis isoladas pH, nível de vácuo e a interação entre pH e nível de vácuo foram estatisticamente significativos. Assim pode-se resumir a equação de regressão em unidades codificadas na equação 4.1.

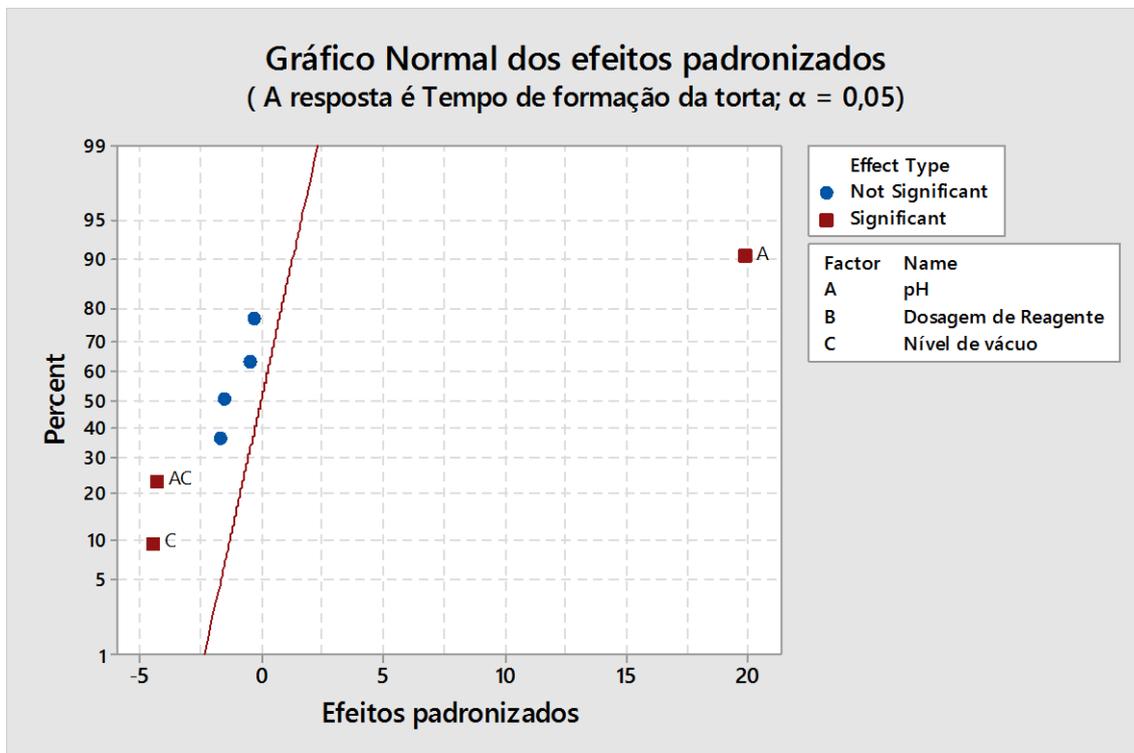
$$\text{Tempo de formação da Torta} = 327,5 + 253 X_1 - 56,5 X_3 - 54 X_1 \times X_3 \quad (4.1).$$

As variáveis foram estatisticamente codificadas utilizando a equação 4.2.

$$X_{\text{codificado}} = \frac{X_{\text{real}} - X_{\text{médio}}}{\frac{\Delta X}{2}} \quad (4.2)$$

O gráfico de probabilidade normal (figura 4.10) compara a significância e magnitude estatística dos efeitos principais e dos efeitos de interação do experimento. Do lado direito da linha do gráfico localizam-se os efeitos

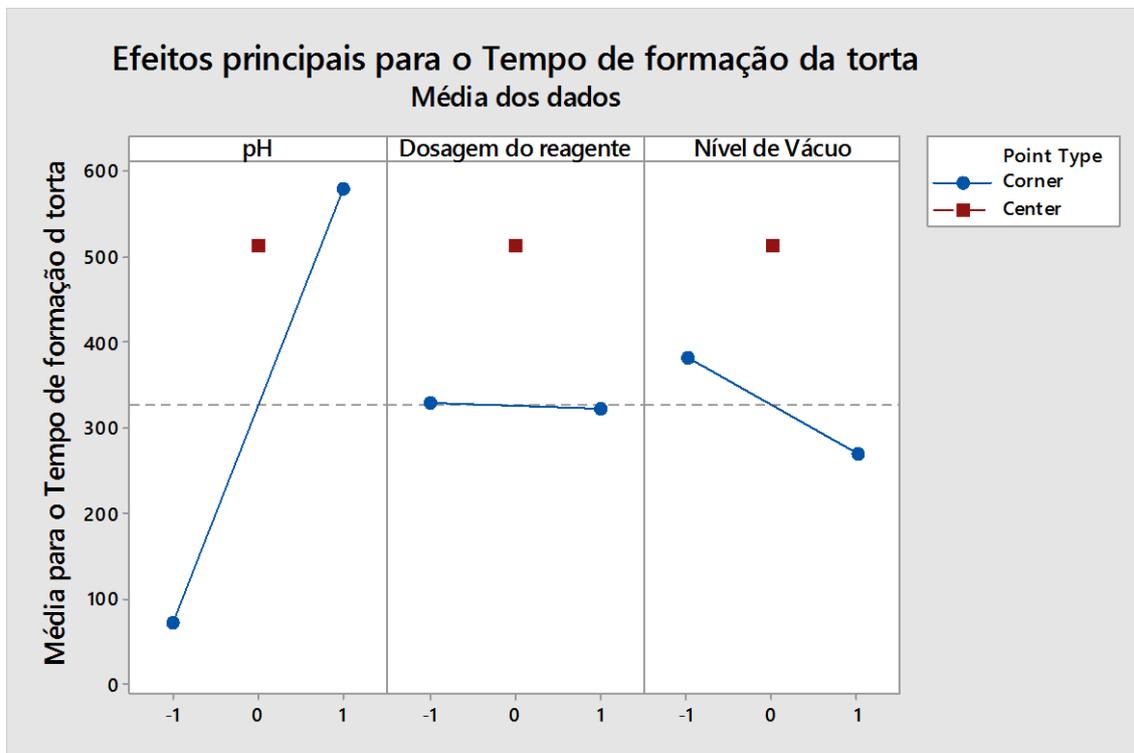
significativos positivos, ou seja, que interferem para que a resposta alcance um maior valor e do lado esquerdo estão representados os efeitos que influenciam negativamente no resultado.



**Figura 4.10** - Gráfico normal para a influência das variáveis no tempo de formação da torta.

Observa-se que apenas as variáveis isoladas pH e nível de vácuo, bem como a interação entre essas variáveis, interferem de maneira estatisticamente significativa no tempo de formação da torta, notando-se que a influência do pH isoladamente se sobressai à influência dos demais fatores. Do ponto de vista estatístico, o nível de vácuo bem como sua interação com o pH influenciam de maneira negativa no sistema, o que favorece o processo de filtração já que diminui o tempo de formação da torta. Já o pH quando se passa do nível -1 (pH 6) para o nível +1 (pH 9) exerce uma influência positiva no sistema, tornando assim o tempo de formação da torta mais acentuado, o que não é favorável para a filtração.

O gráfico de efeitos principais examina as diferenças entre a média dos níveis para os fatores analisados. O gráfico para o tempo de formação da torta é apresentado na figura 4.11.



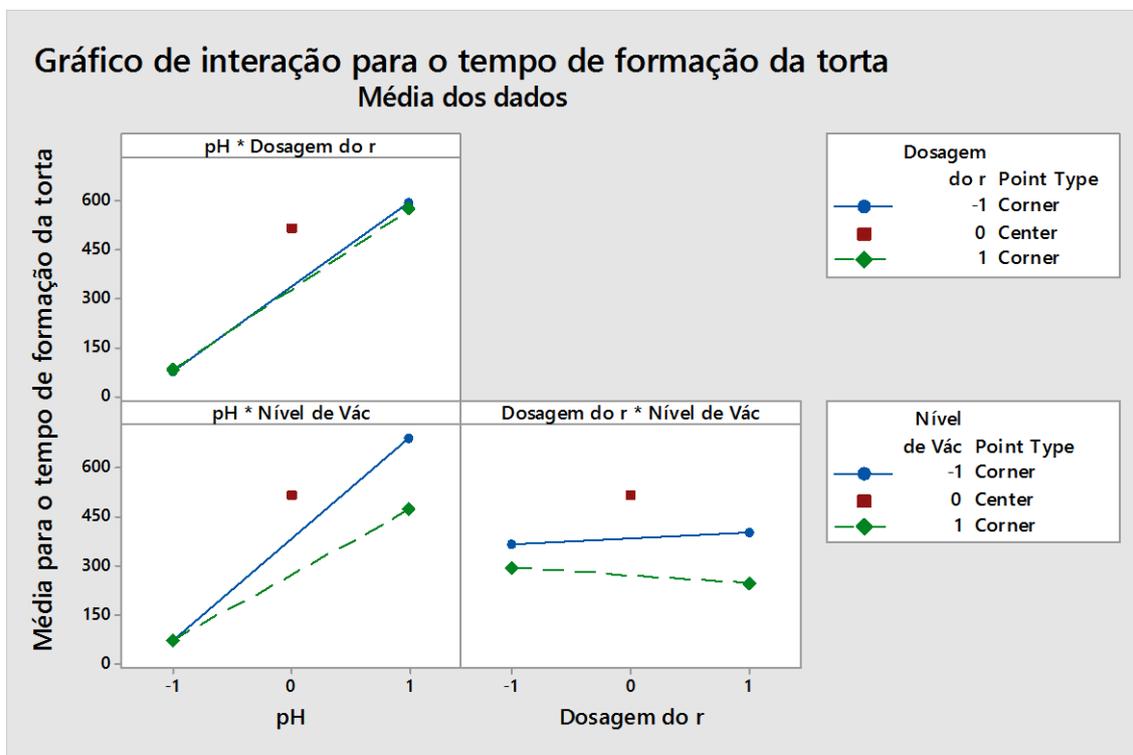
**Figura 4.11** - Gráfico dos efeitos principais para o tempo de formação da torta.

A inclinação positiva do gráfico indica que passando-se do nível mínimo (-1) para o nível máximo (+1) ocorre um aumento no tempo de formação da torta, já a inclinação negativa da reta mostra que a mudança de nível mínimo para o nível máximo provoca uma diminuição no tempo de formação da torta.

Como a inclinação da reta para o efeito do pH é positiva, entende-se que o nível mínimo (pH 6) deve ser utilizado para que haja um menor tempo de formação da torta. A reta para a variável nível de vácuo apresenta inclinação negativa o que gera um menor tempo de formação da torta quando se utiliza o nível máximo vácuo (400 mm de Hg). Já a reta para umidade da torta não apresentou inclinação significativa, levando a crer que esta variável não tem

influência significativa no tempo de formação da torta dentro da faixa explorada.

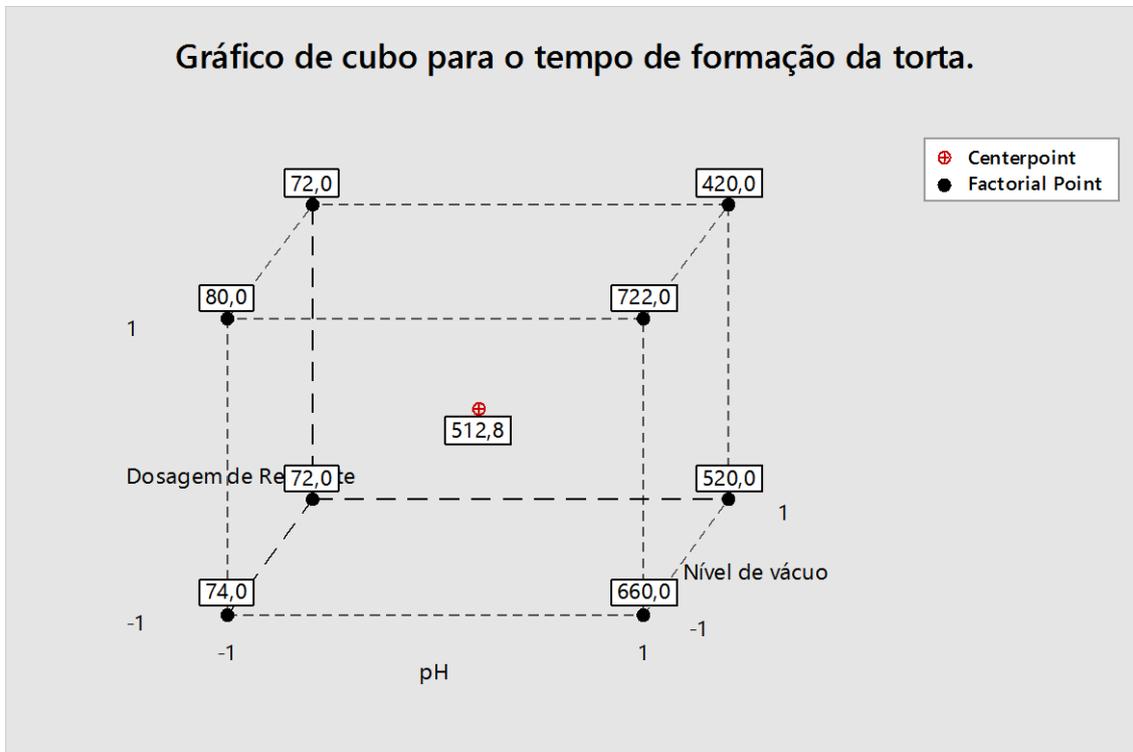
A interação dos fatores pode ser analisada através do gráfico de interação apresentado na figura 4.12.



**Figura 4.12** - Gráfico de interação entre as variáveis para o tempo de formação da torta.

No gráfico de interação, quando as linhas são paralelas é um indício de que as variáveis não possuem interação. Quanto maior for a diferença de inclinação das linhas maior é a possibilidade de efeito interativo entre as variáveis. Analisando o gráfico de interação da figura 4.12 percebe-se que as interações entre o pH e a dosagem do reagente, e a interação entre dosagem do reagente com o nível de vácuo, podem ser consideradas desprezíveis visto que as retas são praticamente paralelas. Tal resultado é confirmado em termos de análise do valor-p, conforme apresentado anteriormente. Já a interação entre o pH e o nível de vácuo apresenta certa significância de acordo com gráfico, logo que as retas possuem uma diferente inclinação, também conforme nos indica a ANOVA em termos de valor-p.

O gráfico de cubo, apresentado na figura 4.13, apresenta a relação entre os fatores analisados com a devida resposta. Este gráfico é importante para que se tenha uma visão geométrica da organização do experimento.



**Figura 4.13** - Gráfico de cubo para o tempo de formação da torta.

Conforme apresentado no gráfico, o menor tempo de formação da torta foi de 72 segundos. Este tempo foi obtido com duas diferentes combinações de níveis -1 (6) , -1 (sem reagente) , +1 (400 mm Hg) e -1(6) , +1 (60g/t surfatante) , +1 (400 mm Hg) para pH, dosagem de reagente e vácuo, respectivamente. Percebe-se que o mesmo resultado foi obtido tanto para o nível mínimo como para o nível máximo do fator dosagem do reagente, confirmando assim que este fator não apresenta influência significativa no tempo de formação da torta.

#### 4.2.3.2 Turbidez do filtrado

Para o parâmetro turbidez do filtrado, têm-se que 98,34% da variação das respostas podem ser explicadas pelo modelo obtido. Os coeficientes

codificados das variáveis analisadas na influência da turbidez do filtrado estão expressos na tabela 4.8.

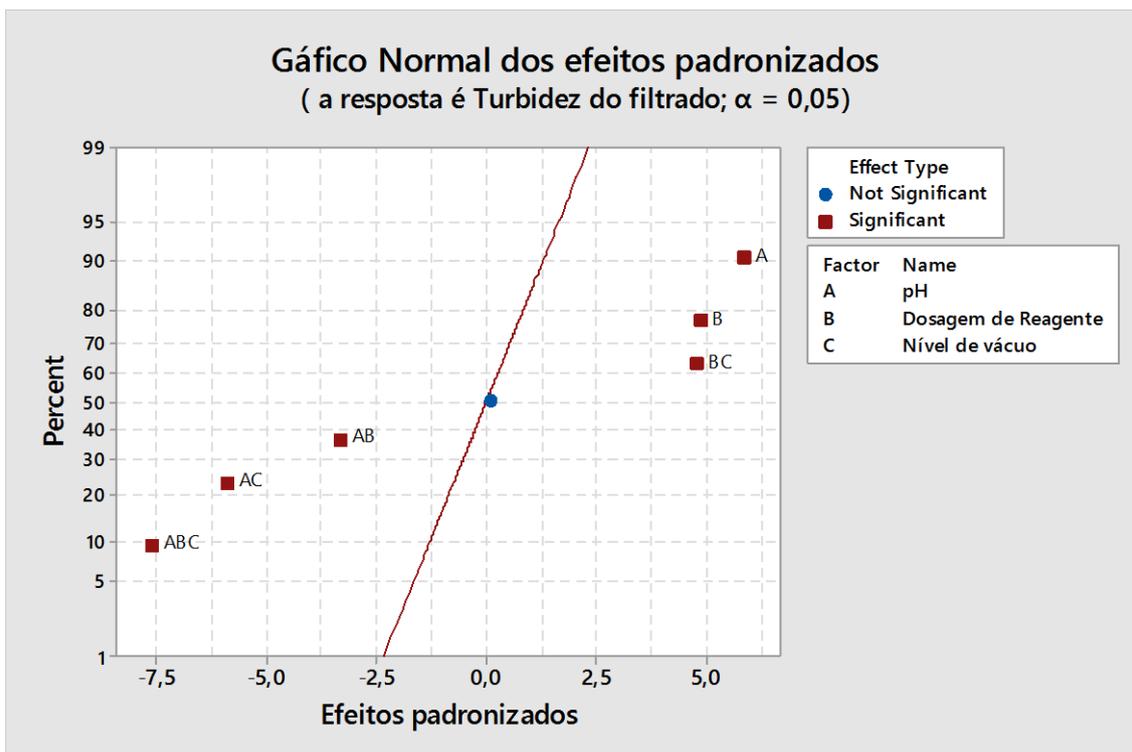
**Tabela 4.8** - Tabela de ANOVA para os efeitos (Turbidez do filtrado).

Termo	Efeito	Coeficiente	SE Coeficiente	Valor T	Valor P
Constante		23,55	0,689	34,16	0
pH	8,085	4,042	0,689	5,86	0,004
Dosagem do reagente	6,69	3,345	0,689	4,85	0,008
Nível de vácuo	0,145	0,073	0,689	0,11	0,921
pH* Dosagem do reagente	-4,545	-2,273	0,689	-3,3	0,03
pH*nível de vácuo	-8,12	-4,06	0,689	-5,89	0,004
Dosagem do reagente * nível de vácuo	6,615	3,307	0,689	4,8	0,009
pH*Dosagem do reagente * nível de vacuo	-10,47	-5,235	0,689	-7,59	0,002
Ct Pt		-8,23	1,11	-7,31	0,002

A tabela dos coeficientes codificados indica que a turbidez do filtrado é significativamente influenciada pelos fatores isolados pH e dosagem do reagente, mas que a interação entre todos os fatores apresenta uma grande relevância no resultado para a turbidez do filtrado. Como a variável nível de vácuo não representa relevância significativa na resposta em questão, a equação de regressão em unidades codificadas pode ser representada bem como a equação 4.3.

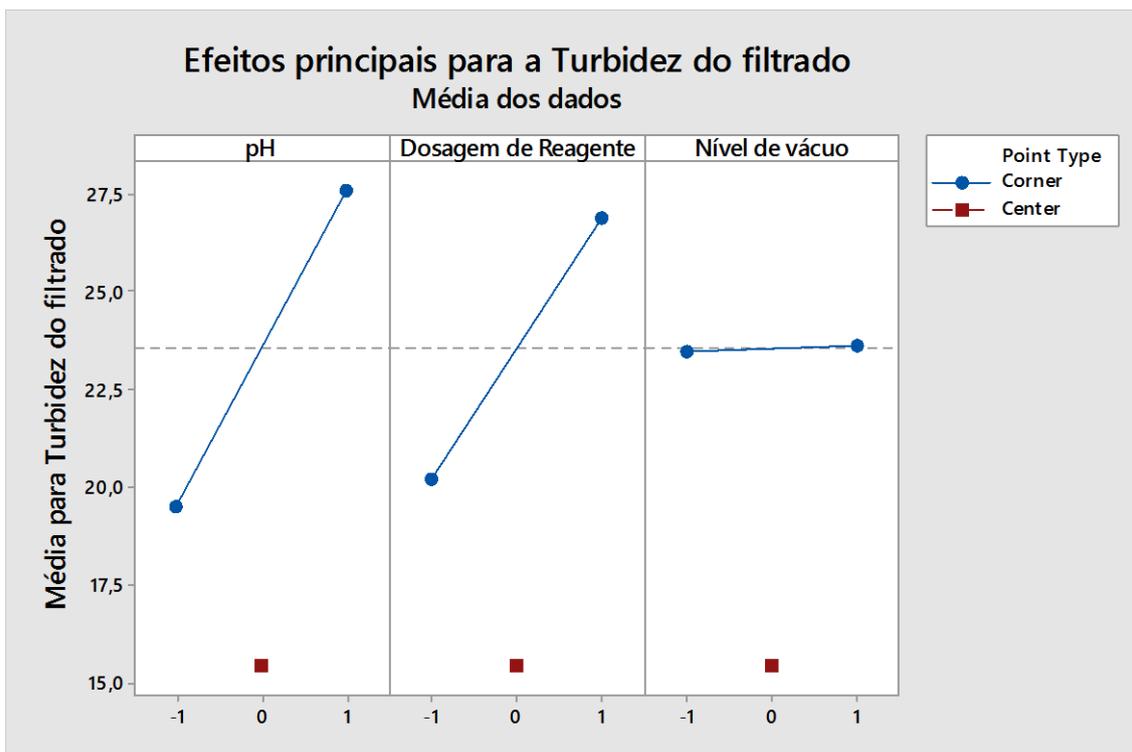
$$\begin{aligned} \text{Turbidez do filtrado} = & 23,55 + 4,042X_1 + 3,345 X_2 - 2,273 X_1 * X_2 - \\ & 4,06 X_1 * X_3 + 3,307 X_2 * X_2 - 5,235 X_1 * X_2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

O gráfico normal para a turbidez do filtrado está apresentado na figura 4.14.



**Figura 4.14** – Gráfico normal para a influência das variáveis na turbidez do filtrado.

A partir da análise do gráfico normal é possível observar, que das variáveis isoladas, apenas o nível de vácuo(C) não apresentou nenhuma influência no resultado, entretanto sua interação com os demais fatores apresentou significativa importância no resultado da turbidez do filtrado. Percebe-se também que os fatores A (pH), B (dosagem do reagente) e a interação entre dosagem de reagente e nível de vácuo, se encontram ao lado direito do gráfico, mostrando que a influência desses fatores foi positiva para o sistema, resultando em um aumento da turbidez do filtrado. Já as interações entre o pH e a dosagem de reagente, pH com o nível de vácuo e a interação entre os três fatores interferem de maneira negativa no sistema, tornando menor a turbidez do filtrado. Na figura 4.15 é apresentado o gráfico dos efeitos principais para a turbidez do filtrado.

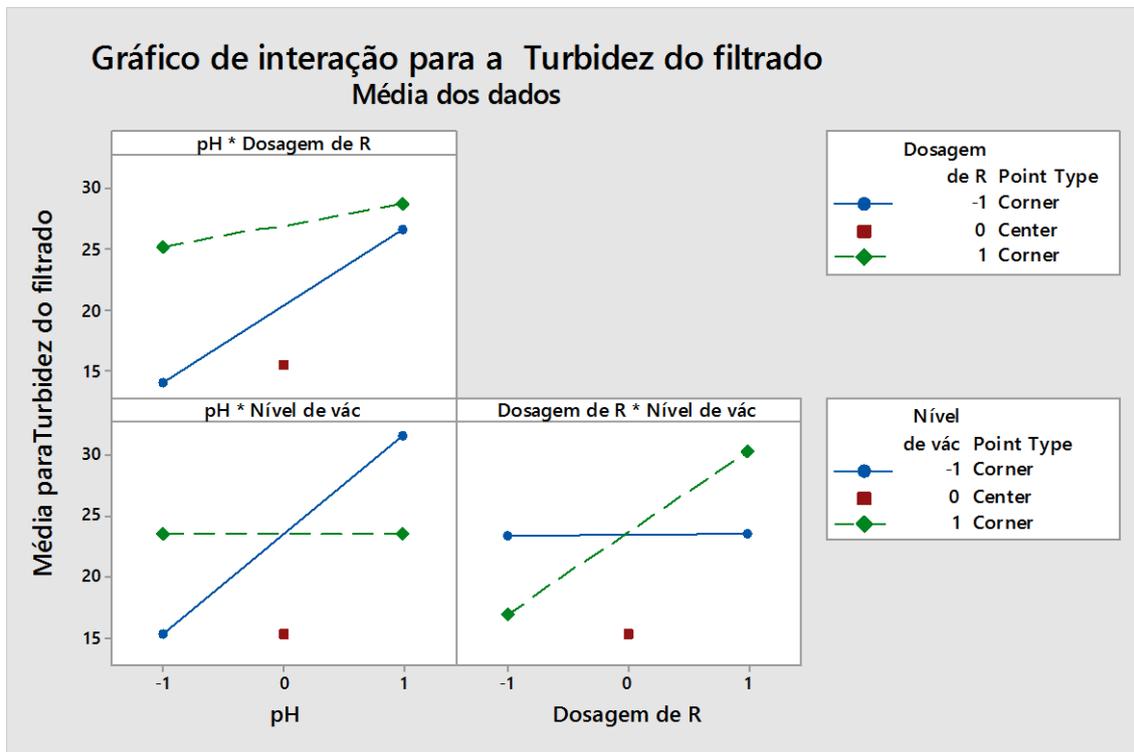


**Figura 4.15-** Gráfico dos efeitos principais para a turbidez do filtrado.

O gráfico de efeitos principais, apresentado na figura 4.15, mostra que o aumento do pH de 6 para 9, nível -1 para o nível +1, acarretou o aumento da turbidez do filtrado. A dosagem do reagente apresenta o mesmo comportamento do pH, a inclinação positiva da reta indica que o nível máximo de dosagem provoca uma maior turbidez do filtrado. Já o fator nível de vácuo, assim como observado pela análise dos coeficientes codificados, apresentou influência desprezível no resultado da turbidez do filtrado visto que a reta que representa esta influência, possui inclinação praticamente nula no gráfico de efeitos principais. Tal conclusão é facilmente confirmada pela análise do valor-p obtido na ANOVA.

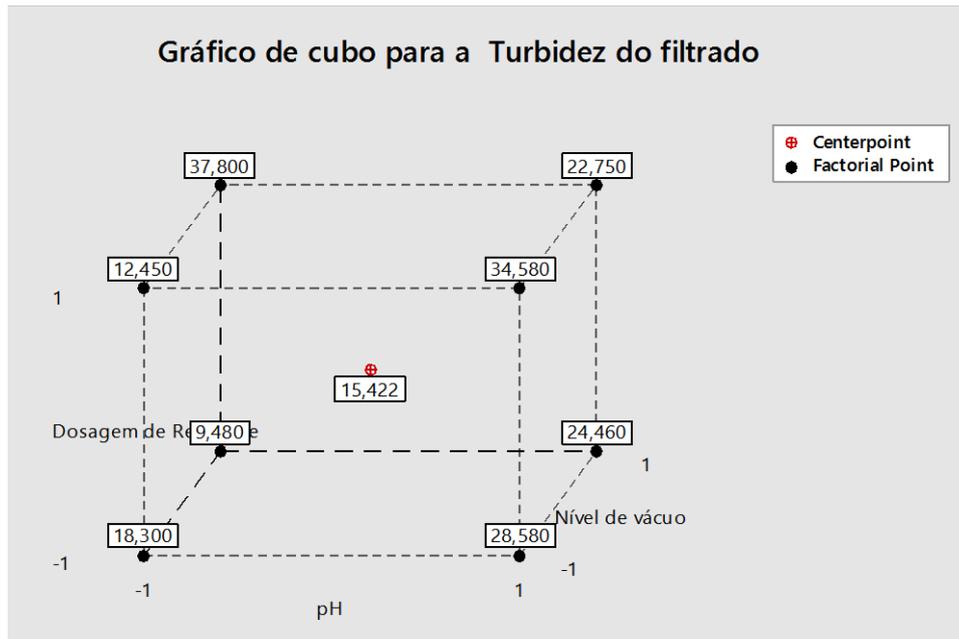
A variação da turbidez do filtrado em função das interações entre as variáveis, pode ser observada na figura 4.16. Com base no gráfico em questão, é possível afirmar que as interações entre as variáveis analisadas apresentam influência significativa na turbidez do filtrado, sendo que as interações entre o pH e o nível de vácuo e a dosagem do reagente e o nível de vácuo

apresentam maior relevância quando comparadas à interação do pH com a dosagem do reagente.



**Figura 4.16-** Gráfico de interação para a turbidez do filtrado.

Na figura 4.17 é apresentado o gráfico de cubo para a turbidez do filtrado. Neste gráfico é possível observar que o menor valor para a turbidez do filtrado (9,48 FTU) é dado para a combinação entre os níveis -1 (6), -1 (0) e 1 (400 mmHg) para o pH, a dosagem do reagente e o nível de vácuo, respectivamente.



**Figura 4.17-** Gráfico de cubo para a turbidez do filtrado.

#### 4.2.3.2 Umidade da torta

O coeficiente  $R^2$  para a resposta umidade da torta indica que 87,14% da variação dos resultados da umidade da torta são explicados pelo modelo proposto. Considerando que quanto maior este valor, melhor os dados se ajustam ao modelo de regressão obtido, este resultado foi o menos satisfatório quando comparado às respostas para a turbidez do filtrado e o tempo de formação da torta. Ainda assim, este é um resultado interessante do ponto de vista do emprego de estratégias de otimização.

A partir da análise dos coeficientes codificados apresentada na tabela 4.9, percebe-se que apenas as variáveis isoladas pH e nível de vácuo apresentam influência significativa na umidade da torta, logo que seus “valores-p” são inferiores ao valor de significância dos testes ( $\alpha=0,05$ ).

A equação de regressão em unidades codificadas pode ser expressa como mostrado na equação 4.4, levando em consideração que apenas os valores isolados de pH e nível de vácuo foram significativos no resultado da umidade da torta.

$$\text{Umidade da torta} = 29,430 + 2,285 X1 - 2,477X3 \quad (4.4)$$

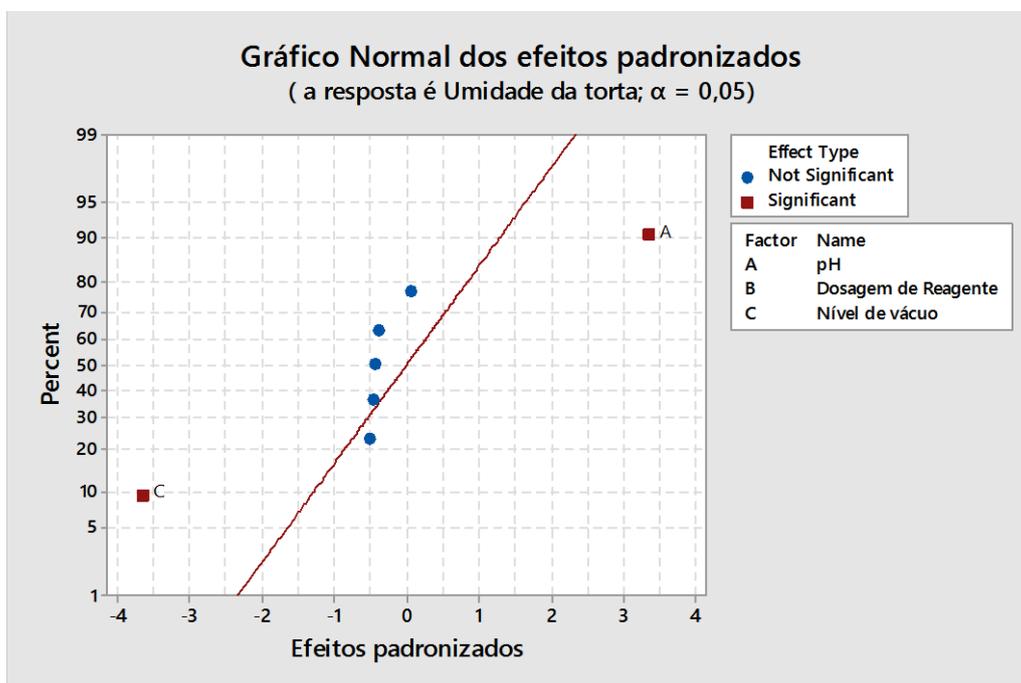
**Tabela 4.9**– Tabela de ANOVA para os efeitos (Umidade da torta).

Termo	Efeito	Coeficiente	SE Coeficiente	Valor T	Valor P
Constante		29,43	0,68	43,26	0
pH	4,57	2,285	0,68	3,36	0,028
Dosagem do reagente	0,08	0,04	0,68	0,06	0,956
Nível de vácuo	-4,955	-2,477	0,68	-3,64	0,022
pH* Dosagem do reagente	-0,68	-0,34	0,68	-0,5	0,644
pH*nível de vácuo	-0,605	-0,302	0,68	-0,44	0,68
Dosagem do reagente * nível de vácuo	-0,615	-0,308	0,68	-0,45	0,675
pH*Dosagem do reagente * nível de vácuo	-0,515	-0,258	0,68	-0,38	0,724
Ct Pt		-1,46	0,68	-1,33	0,255

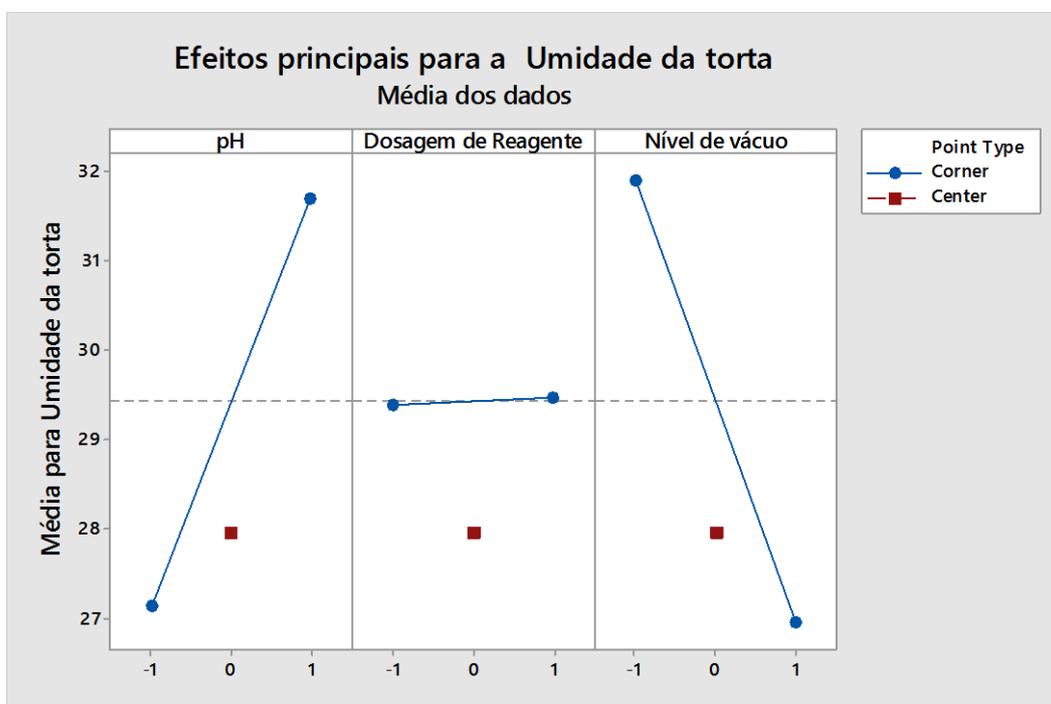
O gráfico normal, apresentado na figura 4.18, assim como a equação de regressão, mostra que do ponto de vista estatístico a variável pH tem influência positiva significativa no resultado da umidade da torta e a variável C (nível de vácuo) apresenta influência negativa neste resultado. Os demais fatores e interações não apresentaram influencia significativa do ponto de vista estatístico sobre a umidade da torta.

Os efeitos principais da influência de cada variável na umidade da torta são representados pelo gráfico de efeitos principais na figura 4.19. Com base neste gráfico pode-se afirmar que o nível -1 de pH diminuiu a umidade da torta, logo o nível máximo contribui para uma maior umidade da torta. A reta que representa o efeito da dosagem do reagente apresenta uma inclinação desprezível, o que indica que do ponto de vista estatístico este fator não exerce influência significativa na umidade da torta. A inclinação negativa da reta que representa o nível de vácuo indica que o nível mínimo de vácuo contribui para

que a torta apresente uma maior umidade, e utilizando o nível máximo desta variável têm-se uma menor umidade da torta.



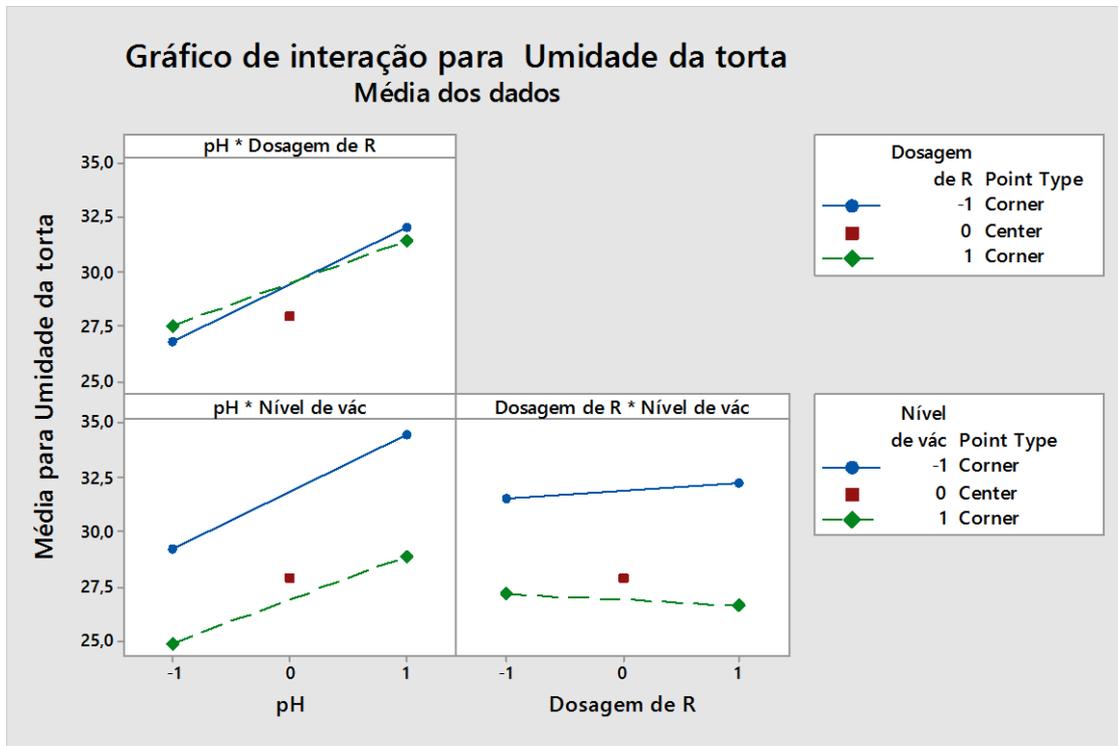
**Figura 4.18-** Gráfico normal para a influência das variáveis na umidade da torta.



**Figura 4.19 –** Efeitos principais para a umidade da torta.

As interações entre os fatores puderam ser analisadas duas a duas no gráfico de interação, apresentado na figura 4.20. As interações entre o pH e nível de

vácuo, bem como a interação entre a dosagem do reagente e o nível vácuo, não influenciam estatisticamente na umidade da torta. Já para a interação entre o pH e a dosagem do reagente existe uma leve influência na umidade da torta.

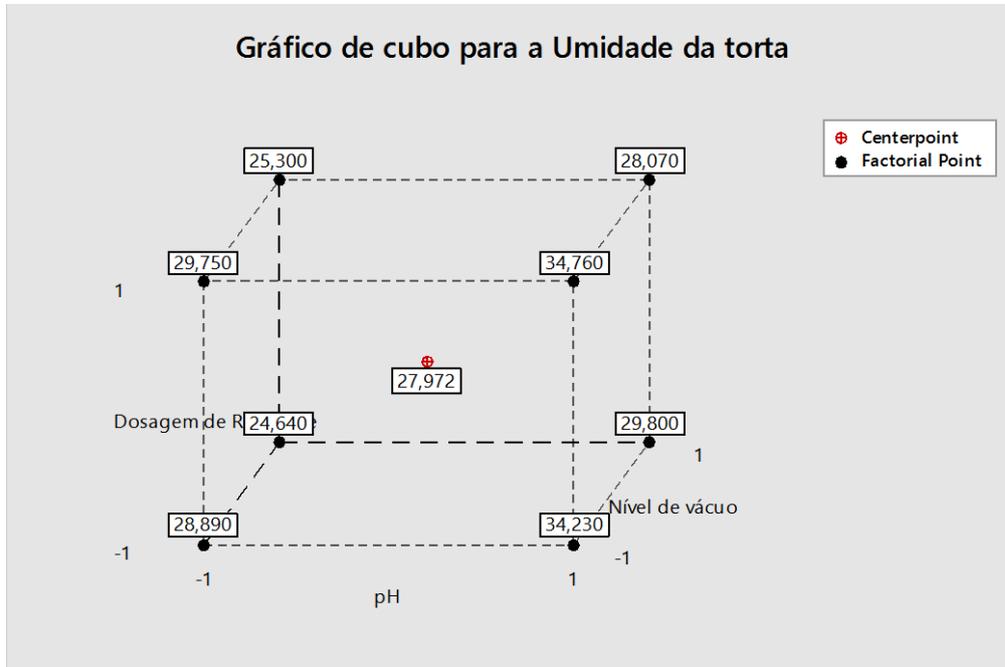


**Figura 4.20** – Gráfico de interação para a umidade da torta.

Conforme indicado no gráfico de cubo (figura 4.21), a menor umidade da torta (24,64%) foi obtida pela combinação entre o nível mínimo (6) de pH, o máximo de vácuo (400 mmHg) e o mínimo valor para a dosagem do reagente.

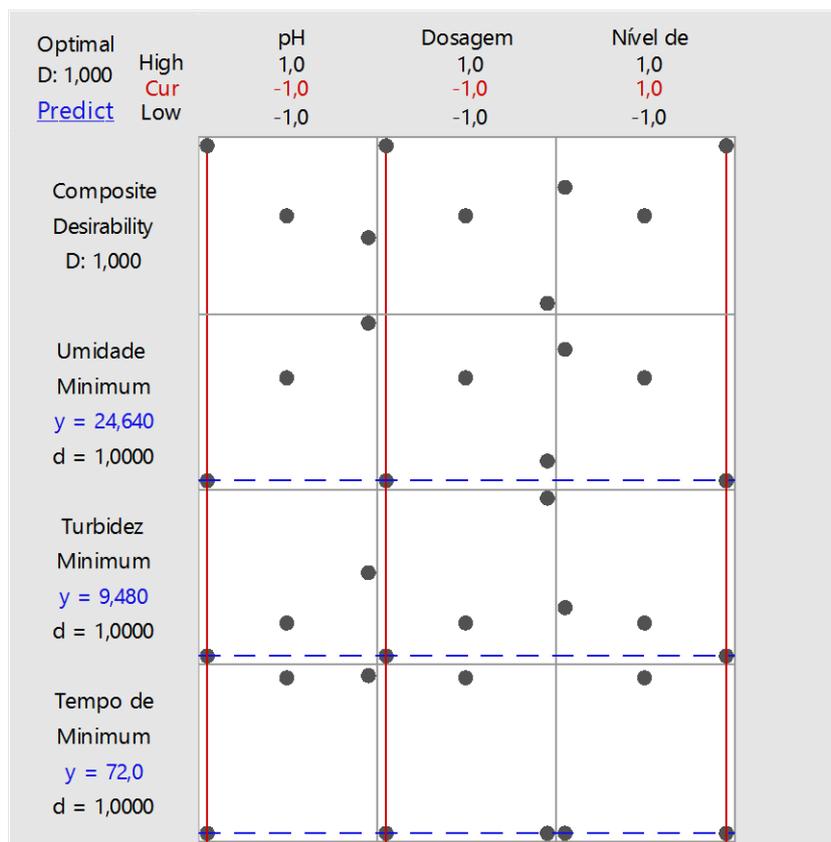
Em todos os testes do planejamento fatorial percebeu-se que o aumento do nível de vácuo favoreceu o processo de filtração, proporcionando menores tempos de formação da torta bem como tortas menos úmidas, estes resultados se devem ao fato da torta ter recebido uma maior sucção facilitando assim a passagem da água presente na polpa pelo meio filtrante. O pH em seu menor nível (6) também mostrou uma grande influência positiva para a filtração do rejeito fosfático, indicando que o ponto isoelétrico do material é próximo a este pH, o que favorece a aglomeração das partículas. Quanto ao surfactante *Flotisor fa 7129*, pode-se perceber que este não apresentou influência positiva

nos testes, já que quando adicionado acarretou em maiores tempos de formação da torta, turbidez do filtrado e umidade da torta.



**Figura 4.21-** Gráfico de cubo para umidade da torta.

Visando otimizar o processo de filtração do rejeito fosfático, os melhores parâmetros de acordo com a análise do planejamento fatorial são: pH 6 ( nível -1), nível de vácuo 400 mmHg (+1) e nenhuma adição do surfactante *Flotisor FA 7129* (-1). Estes parâmetros puderam ser obtidos através do gráfico de otimização do planejamento que está apresentado na figura 4.22. Neste gráfico a desejabilidade (D) apresentou valor 1, indicando que a combinação de variáveis satisfaz 100% as metas definidas para as respostas.



**Figura 4.22 - Gráfico de Otimização.**

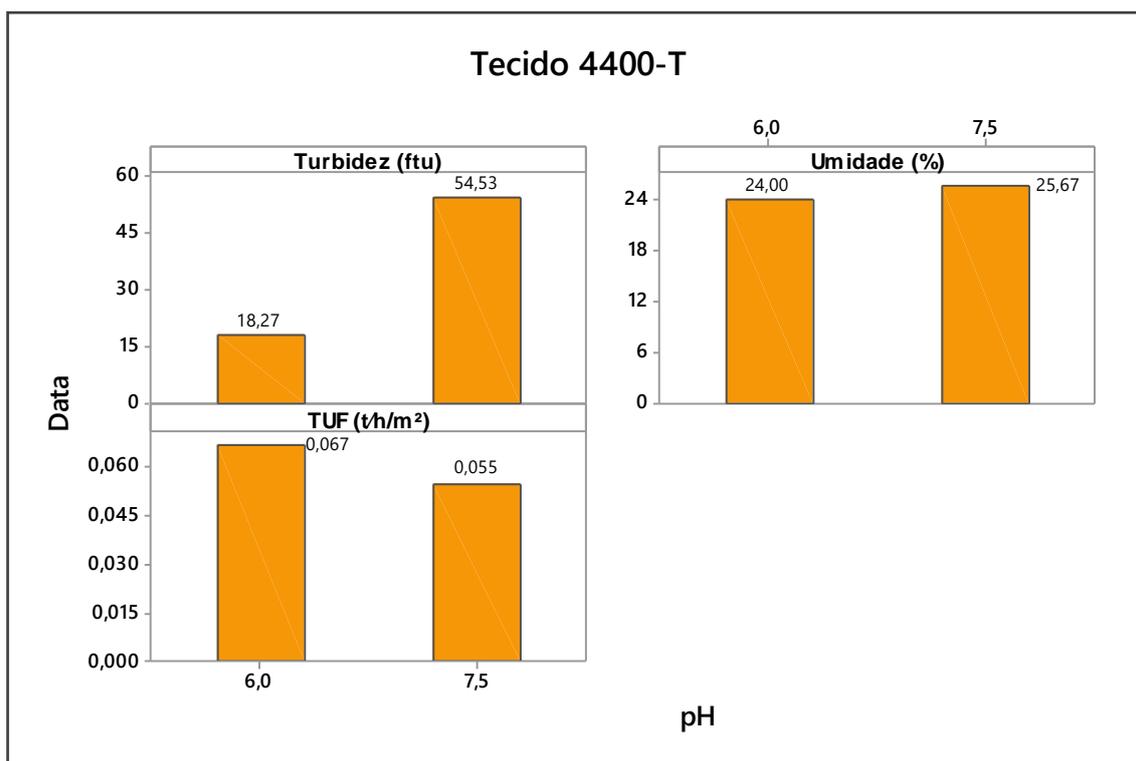
#### 4.2.4 Teste de filtração utilizando o meio filtrante 4400-T

Conhecendo os melhores parâmetros operacionais para a filtração de rejeito fosfático, foram realizados testes de filtração utilizando como meio filtrante o tecido 4400-T fornecido pela Remae e constatado por Rodrigues (2016) como o melhor meio filtrante para o material em questão.

Nestes testes ao contrário dos testes anteriores, o tempo total de ciclo não foi constante, podendo assim analisar a TUF (taxa unitária de filtragem). Foram comparados os resultados para os ensaios utilizando os parâmetros obtidos pelo planejamento fatorial (pH 6, nível de vácuo 400mmHg e sem adicionar o surfactante) contra os resultados dos testes com a polpa em pH natural (7,5). Os resultados dos ensaios estão apresentados na tabela 5.10 e na figura 4.23.

**Tabela 4.10** - Resultados do teste de filtração usando o meio filtrante 4400-T

pH	Tempo total de ciclo (s)	Turbidez (FTU)	Umidade (%)	TUF (t/h/m <sup>2</sup> )
6	720	18,32	23,9	0,067
6	715	18,22	24,1	0,067
7,5	914	71	25,75	0,054
7,5	903	38,06	25,6	0,056

**Figura 4.23** - Resultados do teste de filtração usando o meio filtrante 4400-T

A figura 4.23 indica que, os resultados dos testes utilizando o pH 6 são significativamente mais satisfatórios quando comparados aos ensaios realizados com a polpa em pH natural (7,5). Assim como nos testes descritos no item 4.2.2, a diminuição do pH ocasionou novamente uma diminuição considerável na turbidez do filtrado. Percebe-se também que a taxa unitária de filtragem foi maior (0,0076 t/h/m<sup>2</sup>) em pH 6 contraposto a uma TUF de 0,055 t/h/m<sup>2</sup> em pH natural, apontando que a produtividade do processo de filtração de rejeito fosfático teve um aumento de 24 % utilizando os parâmetros otimizados.

## 5. CONCLUSÃO

O surfactante *Flotisor FA 7129* mostrou uma influência negativa na filtração do rejeito fosfático, contribuindo para maiores tempos de formação da torta, maiores valores de turbidez do filtrado e umidade da torta. Deste modo não se aconselha a utilização do referido surfactante para a filtração desse rejeito..

O processo de filtração se mostrou mais satisfatório quando em valores de pH próximos a 6, acredita-se que o pH do ponto isoelétrico do material é em torno desse valor, dessa forma as forças atrativas (Van der Waals) estão predominando na superfície das partículas favorecendo a aglomeração e possibilitando menores tempos de formação da torta, menor turbidez do filtrado e menor umidade final da torta.

O aumento do nível de vácuo favoreceu o processo de filtração, permitindo menores tempos de formação da torta bem como tortas menos úmidas. Estes resultados devem-se ao fato da torta ter recebido uma maior sucção facilitando assim a passagem da água presente na polpa pelo meio filtrante.

Os valores de  $R^2$  dos testes que envolveram o planejamento fatorial foram próximos a 100% indicando que as respostas obtidas são altamente confiáveis. A otimização do processo indicou que os melhores parâmetros para a filtração do rejeito fosfático são pH 6, nível de vácuo 400 mmHg e nenhuma adição do auxiliar de filtragem *Flotisor FA – 7122*. Dessa forma, pode-se afirmar que utilizando os parâmetros otimizados a operação garantirá menores tempos de formação da torta, menores valores de turbidez do filtrado e tortas menos úmidas.

O tecido 4400-T indicado em trabalho anterior como melhor meio filtrante para a filtração do rejeito fosfático mostrou melhores resultados quando foram utilizados os parâmetros pH da polpa, dosagem do surfatante e nível de vácuo otimizados, apresentando um aumento de 24 % na taxa unitária de filtração, garantindo assim uma melhor produtividade da operação.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a realização de novos testes de filtração utilizando o surfatante *Flotacor FA-7129* utilizando outro tipo de material, já que para o rejeito fosfático este reagente não se mostrou eficiente.

Outra sugestão é adicionar à polpa antes da adição do surfatante, um floculante, para que seja possível avaliar se assim os resultados serão mais satisfatórios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARANTE, S. C. **Filtragem de minérios de ferro - comparação entre métodos de filtragem de laboratório**: Testes de Folha e de Funil de Büchner. (Dissertação de mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002, 137 p.
- BALTAR, C. A. M. **Processos de agregação**. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p. 559-594.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 4 ed. ARTMED, 2010. 413p.
- CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. 4.ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 2, 2013, 240 p.
- DIAS, C. D. L. P., SILVA, L. M. D., PERES, A. E. C. & VALADÃO, G. E. S. **Utilização de reagentes auxiliares na filtragem**. Revista Escola de Minas: Ouro Preto, 2004, p. 229-234.
- FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, G. R. **Ensaio de filtragem 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.
- FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. **Separação sólido-líquido**. In: LUZ, A.B., SAMPAIO, J. A. e ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). Tratamento de Minérios. 4. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p. 411-422.
- GONÇALVES. T. C. **Avaliação da dosagem de coletor na flotação do minério fosfático de tapira/MG utilizando o planejamento fatorial**. (Trabalho de conclusão de curso). CEFET-MG, Araxá, 2016, 54 p.
- GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. (Dissertação de mestrado). UFMG, Belo Horizonte, 2012. 114 p.
- GUIMARÃES, N. C., VALADÃO, G. E. S., Peres, A.E.C.. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas**. Revista Escola de Minas: Ouro Preto, 2012, p 543-548.
- HENRIQUES A. A. B. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita**. (Tese de doutorado). UFMG, Belo Horizonte, 2012. 208 p.
- KULAIF, Y. **A nova configuração de fertilizantes fosfatos no Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPQ, 1999. 241 p.

LINS, F. F.; ADAMIAN, R. **Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais**. Série Tecnologia Mineral, v. 78. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, 29 p.

MARTINS, M.; MONTE, M. B. M.; ALMEIDA F. M. F.; SILVA W.; BICALHO L. S. **Efeito da adição de surfactante no desaguamento de *sinter feed***. Encontro Nacional de Tratamento de Minérios: Poços de Caldas, 2015. p. 12-22.

MONTE, M. B. M.; PERES, A. E. C. **Química de Superfície na Flotação**. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p. 339-407.

OLIVEIRA, C.; RUBIO, J. **Mecanismos, técnicas e aplicações da agregação no tratamento mineral e ambiental**. Série Tecnologia Ambiental, v. 60. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011, 69 p.

OLIVEIRA, M. L. M. D.; LUZ, J. A. M. D.; LACERDA, C. M. M. **Filtragem**. Apostila de espessamento e filtragem. Ouro Preto, UFOP, 2004, 122 p.

PAIVA, C.T. **Melhoria da Qualidade da Água em Bacias de Decantação Localizadas em Área de Extração de Areia**. (Dissertação de mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. 125 p.

PAN, Z.; SOMASUNDARAN N. J., TURRO, N. J., STEFFEN, J. Interactions of cationic dendrimers with hematite mineral. *Colloids and Surfaces A*. 2004, p 123–126.

PEREIRA, L.G. **Aplicação de Aditivos Químicos à Filtragem de Polpas Minerais**. (Dissertação de Mestrado) USP, São Paulo, 1999.

RABOCKAI, T. Físico-Química de Superfícies. Secretaria Geral da OEA, 1979, 128 p. *apud* PAIVA, C.T. **Melhoria da Qualidade da Água em Bacias de Decantação Localizadas em Área de Extração de Areia**. (Dissertação de mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. 125 p.

RODRIGUES, G. R. **Avaliação de meios porosos na filtração de rejeito fosfático de Tapira-MG**. (Trabalho de conclusão de curso). CEFET MG, Araxá, 2016. 91 p.

SANTOS, M. A. **O problema da água recirculada para a flotação de apatita: a flotação por ar dissolvido como alternativa ao tratamento de efluente mineral visando ao reuso e à melhoria do processo de concentração de fosfato**. (Tese de doutorado). Faculdade de Engenharia Química. UFU, Uberlândia 2013. 162 p.

SILVA A. C.; SILVA S. E. M; JUNIOR, A. P. S.; ARRUDA, J. P. A.; VAZ V.R.A. **Mineral paste production from phosphate rock tailings**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 2015, p. 103-108.

SINGH, B. P. **The role of surfactant adsorption in the improved dewatering of fine coal**. Revista Fuel: Bhubaneswar, 1999, p 501-506.

SOARES, V. F. 2009. **Dispersão e estabilização de partículas submicrométricas de óxido de alumínio em sistemas líquidos destinados à produção de materiais refratários.** (Dissertação de mestrado). Departamento de Química, UFMG, Belo Horizonte. 2009, 117 p.

VALADÃO, G. E. S. **Separação sólido- líquido.** In: Ufmg (Ed.). Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte, 2012, v.2., p.141-161.

VALADÃO, G. E. S.; SILVA, J. C. F.; AMARANTE, S.C. **Tortas de filtração simuladas em 3D** Encontro Nacional de Tratamento de Minérios: Rio de Janeiro 2001. p. 113-117.

## APENDICE A - RESULTADOS DOS TESTES DE VARIAÇÃO DA DOSAGEM DO SURFATANTE

**Tabela A.1 – Resultados dos testes de variação da dosagem do Surfatante.**

Dosagem de reagente (g/t)	pH da polpa	Temperatura da polpa(°C)	Vácuo (mmHg)	Tempo de formação da torta (segundos)	Turbidez (ftu)	volume do filtrado (mL)	Espessura da torta (cm)	Umidade (%)
0	7,52	26,5	400	300	21	28,07	1,9	30,9
0	7,53	26,6	400	300	17,7	27,61	1,7	27,87
20	7,44	27,6	400	304	37,8	30,68	1,7	28,88
40	7,55	26,6	400	420	51	29,1	1,6	29,66
40	7,56	26,6	400	420	39,34	28,55	1,6	32,2
60	7,53	27,7	400	360	16,09	29,08	1,4	29,3
60	7,53	27,1	400	360	13,19	30,37	1,6	28,29
80	7,53	26,8	400	300	68	30,68	1,5	26,94
120	7,42	27,2	400	242	9,08	31,8	1,5	28,19
120	7,51	27,4	400	244	14,04	31,95	1,3	29,97
200	7,53	26,8	400	240	33,95	32,28	1,6	34,92
200	7,52	26,9	400	356	35,18	32,03	1,6	31,6
500	7,6	27,2	400	580	30,72	36,7	1,7	40

## APENDICE B - RESULTADOS DOS TESTES DE VARIAÇÃO DO Ph

**Tabela B.1** – Resultados dos testes de variação do pH

pH	Temperatura da torta(°C)	Vácuo (mmHg)	Tempo de formação da torta (segundos)	Turbidez (FTU)	Espessura da torta ( cm)	volume do filtrado	Umidade (%)
3	26,8	400	60	10,3	1,6	30,1	22,78
3	26,8	400	60	9,34	1,6	29,1	23,6
5	26,5	400	100	13,5	1,7	28,8	24,9
5	26,4	400	100	12,16	1,6	29,8	24,64
6	26,4	400	74	8,36	1,7	29	24,58
6	26,4	400	73	10,6	1,7	30,2	24,7
7,5	26,5	400	300	15	1,9	27,5	30,7
7,5	25,48	400	300	27	1,9	28,9	31,03
9	27,3	400	520	26,3	1,7	28,01	30,12
9	27,3	400	520	22,62	1,7	26,83	29,48
10	27,2	400	710	62,28	1,7	27,39	28,8
10	27,2	400	710	31	1,7	26,57	29,15

## APENDICE C - RESULTADOS DOS TESTES PLANEJAMENTO FATORIAL

Tabela C.1 – Resultados dos testes do planejamento fatorial.

Teste	pH (X1)	Concentração (g/t) (X2)	Vácuo(mm Hg) (X3)	Temperatura da torta(°C)	Tempo de formação da torta (segundos)	Volume filtrado (mL)	Turbidez (ftu)	Espessura da torta (cm)	Umidade (%)
1	6	0	150	26	68	23,93	18,3	1,6	28,89
2	9	0	150	26,7	660	21,03	28,58	1,4	34,23
3	6	60	150	26,2	80	25,01	12,45	1,7	29,75
4	9	60	150	26,2	722	21,77	34,58	1,5	34,76
5	6	0	400	26,4	72	22,4	9,48	1,7	24,64
6	9	0	400	27,3	520	21,67	24,46	1,7	29,8
7	6	60	400	26,7	72	23,34	37,8	1,6	25,3
8	9	60	400	26,6	420	31,06	22,75	1,5	28,07
9	7,5	30	275	26,8	530	25,72	12,62	1,6	27,11
10	7,5	30	275	26,8	568	26,37	15,3	1,6	31,4
11	7,5	30	275	26,4	482	27,02	17,95	1,6	27,28
12	7,5	30	275	26,3	495	26,8	16,28	1,6	26,83
13	7,5	30	275	26,6	489,5	25,86	14,69	1,6	27,24

