

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

Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas

Mestrado profissional

Dissertação de Mestrado

MARINA MARTINS

**EFEITO DE FLOCULANTES NO ESPESSAMENTO E REOLOGIA DE  
POLPAS DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

Orientadora: Profa. Dra. Michelly dos Santos Oliveira

Co-orientador: Dr. Francisco Gregianin Testa

ARAXÁ/MG  
2022

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

Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas

Mestrado profissional

Dissertação de Mestrado

MARINA MARTINS

**EFEITO DE FLOCULANTES NO ESPESSAMENTO E REOLOGIA DE  
POLPAS DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

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

Orientadora: Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira.

Co-orientador: Dr. Francisco Gregianin Testa.

ARAXÁ/MG  
2022

M386e Martins, Marina  
Efeito de flocculantes no espessamento e reologia de polpas de rejeito de minério de ferro / Marina Martins. – 2022.  
108 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Michelly dos Santos Oliveira.  
Co-orientador: Dr. Francisco Gregianin Testa.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2022.  
Bibliografia.

1. Minérios de ferro - Rejeitos – Teses. 2. Reologia – Teses. 3. Desaguamento – Teses. 4. Espessamento – Teses. I. Oliveira, Michelly dos Santos. II. Testa, Francisco Gregianin. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 622.341:622'17

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ter me proporcionado saúde e sabedoria para concluir essa etapa tão importante e difícil.

A minha orientadora, professora Michelly dos Santos Oliveira, por todos os ensinamentos, pela paciência e respeito que sempre teve comigo. Obrigada por acreditar e me fazer acreditar no meu trabalho. Muito obrigada por tudo que fez por mim durante toda a jornada acadêmica.

Ao meu coorientador, Francisco Gregianin Testa, pela confiança, paciência e suporte fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao professor Natal Junio Pires pelo apoio e ensinamentos compartilhados, não só neste trabalho, mas em toda minha passagem pelo CEFET.

Aos meus pais por sempre me apoiarem, por se orgulharem de mim e terem feito o possível para minha formação.

Um especial agradecimento ao meu companheiro de vida, Luis Fernando, a pessoa que mais acreditou e me incentivou durante esses anos. Você é parte disso!

A BASF pelo fornecimento dos reagentes e ao CEFET-MG por ter cedido o laboratório e materiais para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O armazenamento de rejeitos em forma de polpa diluída, tem sido uma questão crítica para a indústria mineral, logo que as barragens de rejeito apresentam alto custo e difícil monitoramento. Diante disto, o desaguamento dos rejeitos torna-se uma alternativa para que as barragens possam conter menores volumes de água. O espessamento é a principal operação para o desaguamento dos rejeitos, sendo que, o uso de flocculantes nesta etapa é fundamental para que as partículas finas possam sedimentar com maior eficiência. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes flocculantes no desaguamento e reologia de um rejeito de minério de ferro. Para isso, foram realizados ensaios de sedimentação em proveta com o intuito de obter a velocidade de sedimentação, turbidez do clarificado e % de sólidos no *underflow*. Para se avaliar a influência dos reagentes na reologia do material, foram realizados ensaios reológicos de *slump* e em um reômetro rotacional. Os reagentes avaliados foram as poliacrilamidas da linha Magnafloc®, Alclar® e Rheomax® da BASF e um amido residual de batata. Os resultados mostraram que os reagentes interferiram positivamente na sedimentação e reologia do rejeito. Dentre os reagentes sintéticos, o Rheomax 1050 na dosagem de 30g/t foi o que proporcionou melhores resultados com uma máxima velocidade de sedimentação de 0,76 cm/s, turbidez mínima do clarificado de 60,5 NTU e 53,75% de sólidos no *underflow*. A tensão máxima de escoamento da polpa de rejeito, 141 Pa, também foi conseguida para este mesmo reagente e na concentração mássica de sólidos de 75%, classificando o espessado como rejeito de alta densidade.

**Palavras-chave:** Reologia; Desaguamento; Flocculação; Rejeitos; Espessamento.

## **ABSTRACT**

The storage of tailings in the form of diluted pulp has been a critical issue for a mineral, as tailings dams are difficult and costly to monitor. In view of this, the dewatering of the tailings becomes an alternative so that the dams can contain smaller volumes of water. Thickening is the main process for dewatering the tailings, and the use of flocculants at this stage is essential so that the fine particles can settle more efficiently. This work aimed to evaluate the influence of different flocculants on the dewatering and rheology of an iron ore tailings. For this, sedimentation tests were carried out in proof in order to obtain the sedimentation velocity, turbidity of the clarified and % of solids in the underflow. To evaluate the influence of the reagents on the rheology of the material, rheological slump tests were carried out in a rotational rheometer. The accumulated reagents were polyacrylamides from the Magnafloc, Alclar and Rheomax lines from BASF and also a residual potato starch. The results showed that the reagents positively interfered in the sedimentation and rheology of the tailings. Among the improved synthetic reagents, Rheo 1050 at a dosage of 30g/t was the one that clarified the best results with a maximum sedimentation velocity of 0.76 cm/s, a minimum turbidity of 60.5N and 53.75% solids no underflow. The maximum yield stress of the tailings slurry, 141 Pa, was also achieved for this same reagent and in the mass concentration of solids of 75%, classifying the thickened tailings as high density waste.

**Keywords:** Rheology; Dewatering; Flocculation; Tailings.

## Lista de tabelas

Tabela 2.1: Características dos tipos de Rejeitos. ....	20
Tabela 2.2: Classificação dos polímeros.....	31
Tabela 3.1: Equipamentos e técnicas para a caracterização da amostra.....	54
Tabela 3.2: Descrição dos reagentes sintéticos. ....	54
Tabela 3.3: Caracterização química do amido. ....	55
Tabela 3.4: Termos codificados e reais .....	58
Tabela 3.5: Matriz do planejamento experimental .....	59
Tabela 3.6:Matriz planejamento 2 <sup>2</sup> . ....	60
Tabela 3.7: Termos reais e codificados para os ensaios de slump. ....	64
Tabela 3.8: Ensaios potencial zeta. ....	65
Tabela 4.1: Resultados relatório picnometria.....	66
Tabela 4.2: Caracterização química do rejeito.....	67
Tabela 4.3: Matriz do planejamento com resultados .....	70
Tabela 4.4: ANOVA para velocidade de sedimentação.....	71
Tabela 4.5: ANOVA para a turbidez do clarificado .....	73
Tabela 4.6: ANOVA do percentual de sólidos no underflow.....	75
Tabela 4.7: Nova tabela de ANOVA após “limpeza” do modelo.....	76
Tabela 4.8: Comparação entre sumários dos modelos.....	77
Tabela 4.9: ANOVA para a velocidade de sedimentação .....	79

Tabela 4.10: ANOVA para a turbidez do clarificado. ....	81
Tabela 4.11: ANOVA para percentual de sólidos no underflow. ....	82
Tabela 4.12: Ensaios de sedimentação preliminares com Rheomax.....	88
Tabela 4.13: ANOVA para a tensão de escoamento.....	94
Tabela 4.14: ANOVA para a porcentagem de abatimento.....	94

## Lista de figuras

Figura 2.1: Comparação da consistência em polpa e pasta. ....	21
Figura 2.2: Diferença do rejeito em relação ao teor de sólidos. ....	21
Figura 2.3: Comportamento de polpas versus pastas em diferentes superfícies .....	22
Figura 2.4: Interferência do teor de sólidos e da inclinação da superfície no ângulo de repouso. ....	23
Figura 2.5: Esquema do processo para empilhamento de rejeito filtrado. ....	24
Figura 2.6: Representação da dupla camada elétrica. ....	26
Figura 2.7: Potencial zeta conforme o pH, para uma partícula de Hematita. ....	27
Figura 2.8: Curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas. ....	27
Figura 2.9: Curvas de energia de interação entre partículas ultrafinas de rodocrosita: teoria DLVO e teoria X-DLVO .....	28
Figura 2.10: Flocculação por reversão localizada de carga. ....	29
Figura 2.11: Flocculação por pontes. ....	30
Figura 2.12: Polimerização e hidrólise dos monômeros amidas. ....	32
Figura 2.13: Estrutura química da poliacrilamida aniônica. ....	32
Figura 2.14: Monômeros que compõem a estrutura polimérica da poliacrilamida catiônica. ....	33
Figura 2.15: Estrutura química da amilose .....	33
Figura 2.16: Estrutura química da amilopectina. ....	34
Figura 2.17: Experimento de Newton de fluxo de placas paralelas. ....	35

Figura 2.18: Classificação dos fluidos.....	37
Figura 2.19: Comportamento reológico dos fluidos relacionando tensão e taxa de cisalhamento. ....	38
Figura 2.20: Comportamento reológico dos fluidos relacionando a taxa de deformação com a viscosidade.....	40
Figura 2.21: Tensão de escoamento em função da % de sólidos para diferentes amostras de bauxita.....	41
Figura 2.22: Tensão de escoamento em função do adensamento. ....	42
Figura 2.23: Esquema de um teste de abatimento – slump test. ....	43
Figura 2.24: Altura de slump em função da tensão de escoamento para diferentes suspensões.....	44
Figura 2.25: Diferença da tensão de escoamento com a concentração de sólidos para diferentes rejeitos. ....	45
Figura 2.26: Resultados slump test para tensão de escoamento em função do percentual de sólidos.....	46
Figura 2.27: Resultados ensaios de slump. ....	47
Figura 2.28: Tensão de escoamento em função do percentual de sólidos. ....	47
Figura 2.29: Relação entre a tensão de escoamento e a quantidade de partículas finas..	48
Figura 2.30: Abatimento em relação a granulometria da partícula. ....	49
Figura 2.31: Tensão de escoamento em função do pH .....	49
Figura 2.32: Tensão de escoamento em função da dosagem de floculante. ....	50
Figura 2.33: Gráfico do potencial zeta e viscosidade aparente em função da quantidade de nitrato de estrôncio.....	51
Figura 3.1: Esquema da execução do trabalho.....	52

Figura 3.2: Amostra do rejeito utilizado nos ensaios.....	53
Figura 3.3: Amido gelatinizado.....	55
Figura 3.4: Teste de sedimentação.....	56
Figura 3.5: Polpa agitada no Jar Test.....	61
Figura 3.6: Sedimentador de pastas.....	62
Figura 3.7: Analisador de umidade.....	62
Figura 3.8: Aparatos utilizados na realização dos testes de slump.....	63
Figura 4.1: Curva Granulométrica da amostra.....	67
Figura 4.2: Carga superficial resultante do rejeito.....	68
Figura 4.3: Gráfico da velocidade de sedimentação em função da dosagem do floculante. .....	71
Figura 4.4: Gráfico da Turbidez em função da dosagem do reagente floculante.....	73
Figura 4.5: % de sólidos no underflow em função do floculante.....	74
Figura 4.6: tamanho do floco para dosagens diferentes.....	75
Figura 4.7: Otimização das respostas.....	78
Figura 4.8: Gráfico da velocidade de sedimentação em função da dosagem de amido de batata.....	80
Figura 4.9: Gráfico da turbidez em função da dosagem de amido.....	81
Figura 4.10: Percentual de sólidos em função da dosagem de amido.....	83
Figura 4.11: Otimização da resposta.....	84
Figura 4.12: Velocidade de sedimentação em função da dosagem de Magnafloc 351 na mistura.....	85
Figura 4.13: Turbidez em função da dosagem de Magnafloc 351 na mistura.....	85

Figura 4.14: Gráfico percentual de sólidos no underflow em função da dosagem de Magnafloc 351 na mistura.....	86
Figura 4.15: Otimização da resposta para a mistura de amido com Magnafloc 351 .....	87
Figura 4.16: Gráfico normal dos efeitos padronizados .....	89
Figura 4.17: Otimização da resposta para Rheomax .....	89
Figura 4.18: Resultados de % de sólidos no underflow do sedimentador de pastas.....	90
Figura 4.19: Carga superficial resultante do rejeito puro e na presença de reagentes ....	91
Figura 4.20: Mecanismos de adsorção da poliacrilamida aniônica.....	92
Figura 4.21 Conformação vertical da macromolécula.....	92
Figura 4.22: Ensaio de slump em 65,70 e 75% de sólidos sem flocculante.....	93
Figura 4.23: Gráfico da tensão de escoamento em função do percentual de sólidos.....	95
Figura 4.24: Gráfico do abatimento em função do percentual de sólidos. ....	96
Figura 4.25: Abatimento amido e Rheomax.....	97
Figura 4.26: Tensões de escoamento para os ensaios de slump e reômetro .....	98
Figura 8.1: Curva de sedimentação Magnafloc 351 120 g/t.....	107
Figura 8.2: Curva de sedimentação Rheomax 1050 30 g/t.....	108
Figura 8.3: Curva de sedimentação Amido de batata120 g/t.....	108

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Disposição de Rejeitos.....	19
2.1.1	Rejeitos espessados.....	20
2.1.2	Rejeitos filtrados.....	24
2.2	Agregação das partículas .....	25
2.2.1	Floculação.....	28
2.2.2	Reagentes floculantes.....	30
2.2.3	Poliacrilamidas .....	31
2.2.4	Amido.....	33
2.3	Reologia.....	34
2.3.1	Viscosidade e tensão de cisalhamento.....	35
2.3.2	Tensão de escoamento.....	36
2.3.3	Classificação reológica dos fluidos .....	37
2.3.4	Comportamento reológico das polpas .....	40
2.4	Teste de abatimento – <i>slump test</i> .....	42
2.4.1	Tensão de escoamento a partir do abatimento.....	43

2.5	Influência de variáveis no comportamento reológico dos fluidos .....	45
2.5.1	Concentração de sólidos.....	45
2.5.2	Tamanho da partícula.....	48
2.5.3	Características químicas e uso de reagentes.....	49
3	METODOLOGIA .....	52
3.1	Origem e preparação da amostra .....	53
3.1.1	Caracterização da amostra.....	53
3.2	Reagentes.....	53
3.3	Ensaio de sedimentação.....	55
3.3.1	Planejamento dos ensaios de sedimentação em proveta.....	58
3.3.2	Ensaio de sedimentação no sedimentador de pastas.....	60
3.4	Ensaio Reológico.....	63
3.4.1	Ensaio de abatimento <i>slump test</i> .....	63
3.4.2	Ensaio reômetro .....	64
3.5	Testes de potencial zeta .....	65
4	RESULTADOS .....	66
4.1	Caracterização da amostra.....	66
4.1.1	Massa específica.....	66
4.1.2	Caracterização Química.....	66
4.1.3	Análise granulométrica.....	67
4.2	Potencial zeta do rejeito.....	68

4.3	Ensaio de sedimentação em proveta.....	68
4.3.1	Análise da primeira etapa (Magnafloc e Alclar).....	69
4.3.2	Análise segunda etapa (Amido de batata).....	78
4.3.3	Análise da terceira etapa (Rheomax).....	87
4.4	Ensaio de sedimentação no sedimentador de pastas .....	90
4.5	Potencial zeta do rejeito na presença dos reagentes .....	90
4.6	Ensaio reológico.....	93
4.6.1	Ensaio de abatimento ( <i>slump test</i> ) .....	93
4.6.2	Ensaio Reômetro .....	97
5	CONCLUSÕES .....	99
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	101
7	REFERÊNCIAS.....	102
8	APÊNDICE .....	107

## 1 INTRODUÇÃO

O beneficiamento de minérios, ou processamento mineral como também é denominado, segundo Valadão *et al.* (2012), pode ser conceituado como o conjunto de operações básicas que são realizadas em uma matéria-prima mineral (minério bruto) com o objetivo de se obter sua adequação, ou seja, produtos comercializáveis. Durante este processo são geradas grandes quantidades de resíduos que de acordo com Luz e Lins (2010), podem ser denominadas de rejeito podendo ser caracterizado como o material sem valor econômico proveniente do processo mineral.

De acordo com a lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, o armazenamento destes rejeitos deve ser em locais ambientalmente apropriado, conduzido por normas operacionais específicas, com a intenção de minimizar danos ambientais e ameaças a saúde pública. As indústrias minerais utilizam, na grande maioria das vezes as barragens de rejeito para a disposição desses materiais, por ser até então um método economicamente mais vantajoso.

Contudo, as barragens de rejeito além de apresentarem dificuldade e alto custo de monitoramento, são uma fonte de risco de desastre para localidades próximas. Problemas de instabilidade de grandes barragens e a possibilidade de uma falha ameaçam a segurança das pessoas e da propriedade industrial, além de causar efeitos ambientais substanciais (MREJEN *et al.*, 2020 e OWEN *et al.*, 2020).

A crescente demanda dos recursos minerais e, conseqüentemente, a exploração progressiva de jazidas com baixos teores, vem acarretando a geração descomunal de rejeitos, que por sua vez, necessitam de barragens cada vez maiores para sua disposição. Yilmaz *et al.* (2017) aponta que a maior parte do produto alimentado nas etapas de concentração dos minérios é rejeito (que também são chamados de finos), desse montante de rejeito tem-se ainda que mais de 90% do volume é água utilizada durante o processo.

Algumas catástrofes que envolvem falhas nas barragens de rejeito aconteceram nos últimos anos, como por exemplo o desastre ocorrido em 2015, na barragem de Fundão localizada em Mariana que deixou 20 pessoas mortas, além dos 43 milhões de toneladas de lama terem afetado todo o ecossistema do Rio do Doce, chegando até o Oceano Atlântico. Em 2019, também no Brasil, outro rompimento significativo de barragem aconteceu em

Brumadinho MG, o evento causou perdas significativas de vidas, até janeiro de 2020 o número de mortos era de 259, enquanto 11 pessoas ainda continuavam desaparecidas (ROTTA *et al.*, 2020).

Diante do cenário atual, é de fato necessário a adoção de métodos mais eficientes, que indiquem menores impactos ambientais e econômicos, para a disposição de rejeitos. Técnicas de desaguamento dos rejeitos vem sendo progressivamente buscadas como formas alternativas de desaguamento para posterior disposição desses materiais. A prática mais comum para o desaguamento de rejeitos é o espessamento, que pode produzir polpas de alta densidade e até mesmo pastas (FITTON e ROSHDIEH, 2013).

As polpas de alta densidade e também as pastas aparecem como grandes atrativos a serem estudados, pois estes materiais apresentam menor volume de água para a mesma massa de sólidos, comparados aos rejeitos descartados de forma tradicional. Assim, uma menor volume de resíduos pode ser disposto em menores áreas. Bisco (2009), ressalta que é muito importante que seja estudado o comportamento reológico destas suspensões, principalmente quando se considera o bombeamento de polpas. Propriedades como a viscosidade, tensão e taxa de cisalhamento destes materiais podem ser modificadas com a adição de reagentes auxiliares, mais precisamente os floculantes.

### **1.1 Justificativa**

Baseando-se nos recentes acontecimentos que envolvem as barragens de rejeitos, as empresas mineradoras buscam por maior eficiência, segurança e economia no processamento e disposição dos rejeitos, envolvendo assim as operações de separação sólido-líquido.

A produção de polpas adensadas e pastas tem sido uma alternativa promissora já que, proporcionam maior estabilidade nas barragens e possibilitam o reuso da água de processo. De acordo com Boger (2013), as pastas quando dispostas de forma suave apresentam drenagem insignificante de água e mínima permeabilidade.

Alguns fatores podem interferir no desaguamento e nas propriedades reológicas das polpas, como a densidade de carga, percentual de sólidos, a dosagem e o tipo do polímero utilizado como floculante. O uso de floculantes pode contribuir na diminuição das áreas de espessadores, no aumento da velocidade de sedimentação e ainda pode melhorar a qualidade da água recuperada no processo. Estes reagentes também podem interferir na tensão de

escoamento do material, que é um parâmetro de fundamental importância para a disposição de rejeitos na forma de pastas. Por isso, o estudo desses fatores é imensamente propício para as futuras demandas de disposições de rejeitos.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como propósito, avaliar o efeito de diferentes flocculantes na sedimentação e nas características reológicas de polpas de minério de ferro.

Os objetivos específicos são:

- Determinar as características físicas e químicas da amostra utilizada nos ensaios, como a composição química, granulometria e densidade.
- Analisar em diferentes concentrações de sólidos e dosagens de reagentes, a velocidade de sedimentação do material e as características reológicas como a porcentagem de abatimento (*slump*) e a tensão de escoamento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

### 2.1 Disposição de Rejeitos

O beneficiamento de minérios é realizado na grande maioria das vezes em meio aquoso, sendo assim, os rejeitos ao final do processo estão em forma de polpa, com grande quantidade de água em relação aos sólidos. Por este motivo, as polpas de rejeitos tendem a apresentar pouca ou nenhuma resistência ao cisalhamento. Desta forma, este material precisa ser disposto ou contido em condições econômicas e ambientais favoráveis, também é necessário e de extrema importância que seja estudada uma forma segura para este descarte (ALVES, 2020).

Portes (2013), declara que as mineradoras brasileiras apresentam uma preferência, dentre os diversos métodos de disposição de rejeitos, a disposição em superfície na forma de polpa, utilizando as barragens de contenção de rejeitos. De acordo com a Fundação Estadual do Meio Ambiente (2018), em Minas Gerais mais de 90% dos rejeitos gerados dentro da mineração são depositados em barragens.

A adoção de métodos alternativos para a disposição de rejeitos vem sendo progressivamente mais empregados, pois além da preocupação da segurança e responsabilidade ambiental e geotécnica, ainda existe o fator da escassez de água, que tem sido um recurso cada vez mais carecente. Técnicas de desaguamento dos rejeitos vem sendo progressivamente mais buscadas como formas alternativas de desaguamento para posterior disposição desses materiais.

Fitton e Roshdieh (2013) citam que a prática mais comum para o desaguamento de rejeitos é o espessamento que pode ter uma variedade de formas, variando de espessadores convencionais até espessadores de alta densidade. Os rejeitos espessados podem se apresentar em forma de polpa, polpa de alta densidade ou como pastas. Outra técnica também muito utilizada no desaguamento dos minérios e também dos rejeitos é a filtração, que geralmente resulta na maior recuperação de água, mas o produto do processo não é mais um fluido, em vez disso, é um material com baixa umidade conhecido como torta. Na tabela 2.1 são listadas algumas características dos tipos de rejeitos.

Tabela 2.1: Características dos tipos de Rejeitos.

<b>Tipo de Rejeito</b>	<b>Tensão de escoamento (Pa)</b>	<b>Equipamentos necessários</b>
Em polpa concencional	0	Nenhum – o produto da planta de processamento, sem desaguamento
Espessado	0-40	Espessadores convencionais e floclantes
Alta densidade	40-200	Espessadores de alta densidade e floclantes
Pasta	>200	Espessador de cone profundo ou combinação Espessamento e filtragem
Filtrado	-	Filtro a vácuo ou pressão

### 2.1.1 Rejeitos espessados

A técnica de disposição de rejeitos espessados, também dita *TTD (Thickned Tailings Disposal)* foi introduzida por Robinsky em 1968, resume-se no desaguamento do rejeito e consequente aumento da concentração de sólidos e maior tensão de escoamento, por meio do espessamento. Os espessadores são equipamentos utilizados para esta finalidade, eles funcionam separando as partículas sólidas do líquido através da ação da gravidade.

Enquanto os rejeitos convencionais variam entre 20 a 50% de sólidos, os rejeitos espessados estão entre 55 a 75% de sólidos, essas concentrações variam de acordo com a forma e granulometria da partícula, bem como com a adição de reagentes que auxiliam no desaguamento, como os coagulantes e floclantes (FRANKS *et al.*, 2011). Para a produção deste material é exigido um alto investimento financeiro, contudo, a longo prazo, influenciam em menores custos com monitoramento e construção de barragens e reduzem significativamente o uso de água, que é um recurso cada vez mais escasso em todo o mundo.

Os rejeitos espessados, podem ser caracterizados como polpas com altas densidades e/ou pastas. Contudo, Peixoto (2012) afirma que o limite entre esses dois aspectos dos materiais é indefinido, já que uma pasta pode apresentar grande variedade de umidade e viscosidade para uma mesma consistência. Este mesmo autor ainda ressalta que, a granulometria do material interfere na umidade das pastas, como exemplo, as polpas que contem partículas finas possuem, geralmente, maior grau de umidade, pois essas partículas apresentam maiores áreas superficiais

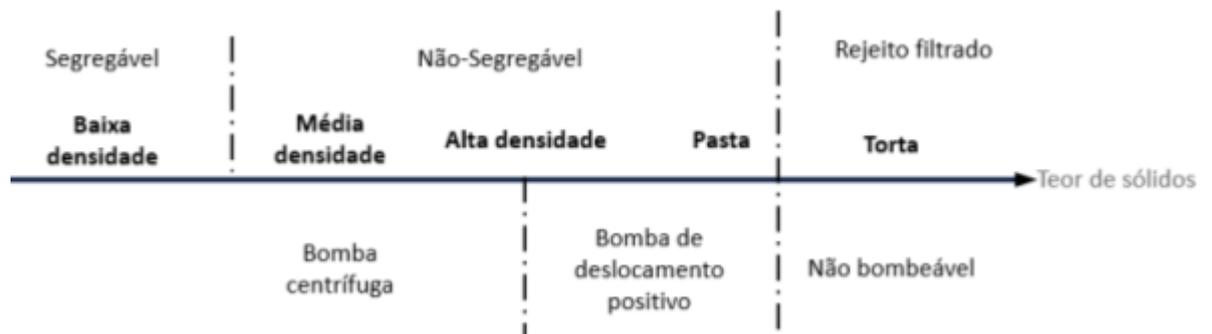
quando comparada as mais grossas. Na figura 2.1 está apresentado a diferença da consistência entre polpa e pasta. Já na figura 2.2 é apresentado esquematicamente as diversas consistências dos materiais produzidos pelos espessadores com progressivo aumento do percentual de sólidos.

Figura 2.1: Comparação da consistência em polpa e pasta.



Fonte: França e Trampus (2018) e Slotee *et al.* (2005).

Figura 2.2: Diferença do rejeito em relação ao teor de sólidos.

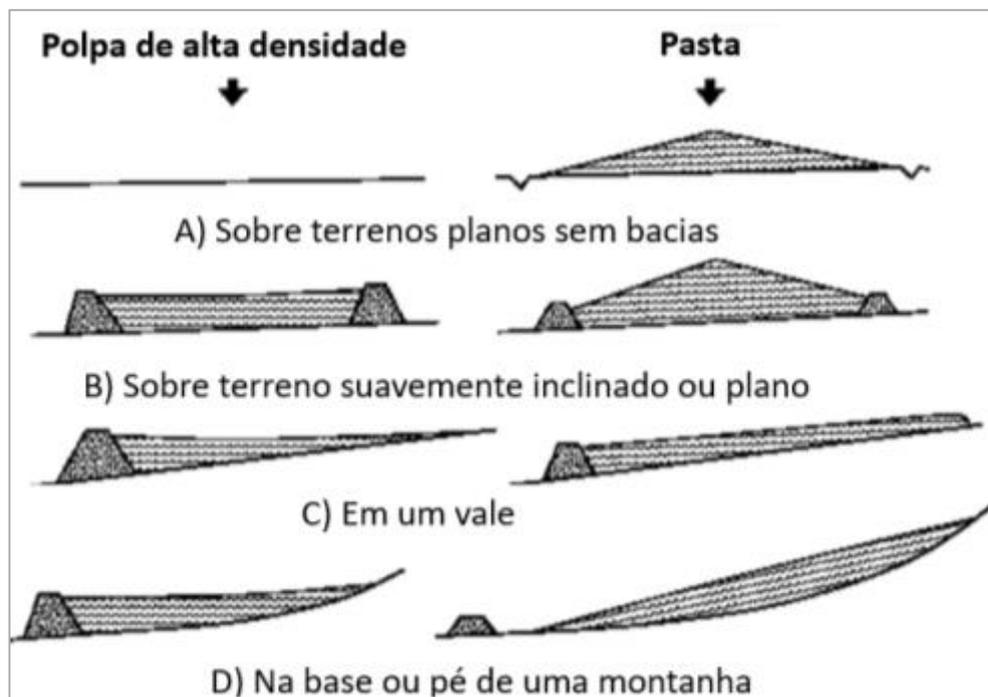


Fonte: Portes (2013). Adaptada

Juntamente com o aumento do teor de sólidos da polpa, tem-se o aumento da densidade do material, bem como mostrado na figura 2.2. Quando o rejeito ainda se encaixa nas condições de polpa desaguada, existe a liberação de água, mesmo que em baixa quantidade, desta forma, o bombeamento é dado conforme a velocidade crítica deste material. Ainda na figura 2.2 pode-se observar o comportamento de uma pasta, que de acordo com Barreda *et al.* (2011), pode ser considerada como um sistema em que partículas (finas), constituem um fluido homogêneo em

que não existe a segregação e também não acontece a drenagem de água quando disposto em uma superfície estável. Na figura 2.3 é possível observar o comportamento de polpas e pastas quando dispostas em diferentes superfícies.

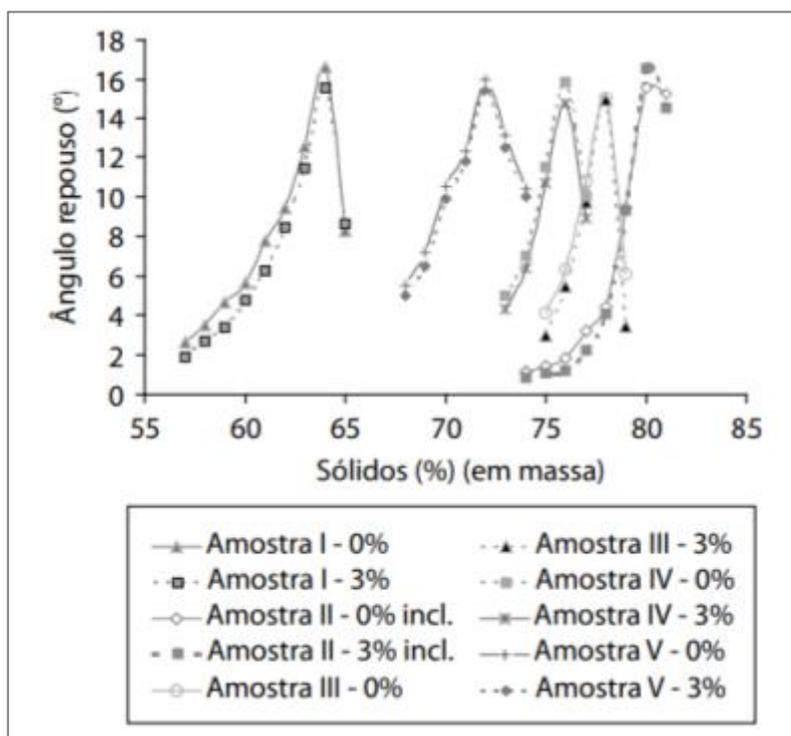
Figura 2.3: Comportamento de polpas versus pastas em diferentes superfícies



Fonte: Tessaroto (2015).

O ângulo em que o material irá repousar é muito importante, espera-se que com o aumento do teor de sólidos, este ângulo de repouso aumente e desta forma se consiga depositar maior volume de material. Osorio *et al.* (2008) afirmam que em diferentes amostras de minério de ferro, tanto o aumento da inclinação da superfície onde o rejeito será depositado, quanto o aumento do adensamento do material, interferem no ângulo de repouso do rejeito. Assim como pode-se observar na figura 2.4.

Figura 2.4: Interferência do teor de sólidos e da inclinação da superfície no ângulo de repouso.



Fonte: Osorio *et al.* (2008).

Portes (2013) cita algumas vantagens do adensamento de rejeitos em relação aos métodos tradicionais, como por exemplo a redução de água depositada juntamente ao material sólido, que traz menores volumes das barragens e menores custos de monitoramento. Ainda sobre a água o autor cita que a possibilidade de recirculação é uma característica vantajosa, bem como a redução da área em planta necessária para depositar o material, reduzindo o tempo de reabilitação ambiental da área utilizada.

Mesmo com grandes vantagens, quando comparados aos métodos tradicionais de disposição, Portes (2013) relata em seu trabalho, que o uso do adensamento de rejeitos no Brasil é baixo quando comparada ao âmbito internacional, França e Trampus (2018) também ressaltam que um empecimento a esse método, é no que se trata do manuseio e transporte desse material contendo elevada concentração de sólidos com alta eficiência e baixo custo.

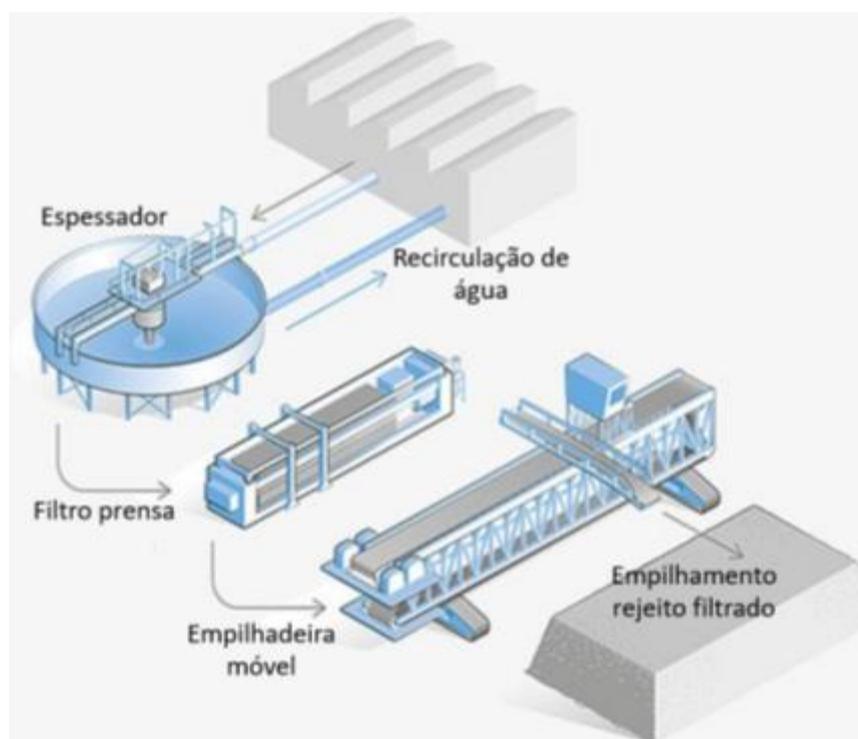
Em seu trabalho, Souza *et al.* (2005), utilizando espessadores de pastas conseguiram resultados bastante promissores na produção de rejeitos adensados de minério de ferro de Capão Xavier, com uma porcentagem de sólidos de 75 % e ainda uma recuperação de água de 200m<sup>3</sup>/h.

### 2.1.2 Rejeitos filtrados

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.

De acordo com Alves (2020), na técnica de empilhamento de rejeitos filtrados, esse material é previamente espessado para garantir uma quantidade de sólidos idealizada, em seguida é realizada a etapa de filtração, utilizando filtros a vácuo ou de pressão. A água que foi retirada no processo pode ser reaproveitada na usina. O produto final da filtração é chamado de torta (*cake*) e o teor de umidade final desta torta é o fator mais importante para o posterior empilhamento do material. Na figura 2.5 está representado um esquema típico para o processo de empilhamento do rejeito filtrado.

Figura 2.5: Esquema do processo para empilhamento de rejeito filtrado.



Fonte: Takraf.com (2022).

Os rejeitos filtrados, saem das instalações de processo dentro de uma faixa de umidade previamente prescrita para cada material, indicada através de testes piloto preliminares. A torta (material filtrado) é então transportada por esteiras ou por caminhões, em seguida é espalhada e compactada para que se formem as “pilhas” que não necessitam de barragens para retenção de água. Esses rejeitos, algumas vezes são erroneamente chamados de secos, contudo eles são na verdade insaturados, o ideal é que seja em torno de 90% o grau de saturação.

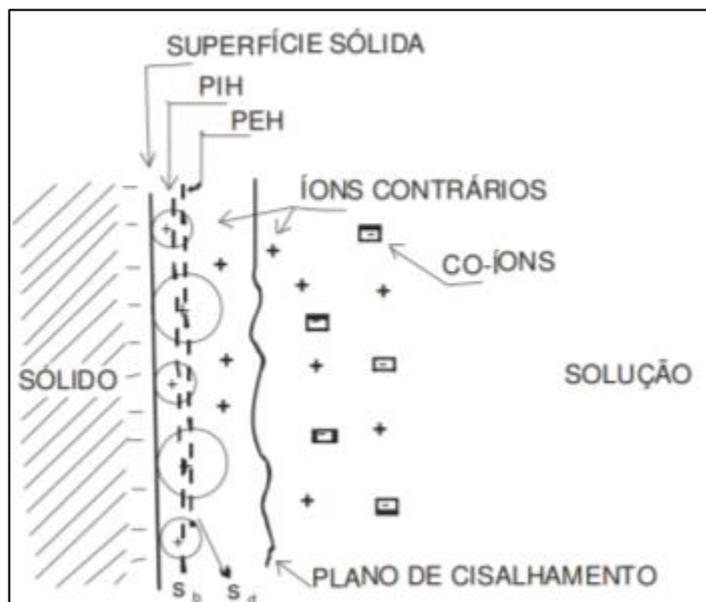
Gomes *et al.* (2016), estudaram a implantação de uma planta inovadora de desaguamento de rejeitos de minério de ferro na mina de Pau Branco, localizada no Quadrilátero Ferrífero-MG, contribuindo para melhorar sua sustentabilidade. O processo analisado pelos autores, apresentou viabilidade técnica e econômica. Foi conseguida uma umidade final de 15% da torta, utilizando filtração com filtro-prensa, esta umidade foi considerada adequada para o empilhamento a seco, garantindo uma pilha matematicamente sem chances de falha. Além disso, foram obtidos gastos sete vezes menores em comparação ao valor inicial investido na barragem implantada na empresa em questão.

## **2.2 Agregação das partículas**

As forças de natureza física, como por exemplo a gravidade, tornam-se desprezíveis conforme as partículas sofrem redução de tamanho, enquanto as forças de superfície crescem de importância e passam a determinar o comportamento dos sistemas coloidais. É bastante relevante para o processo de desaguamento que se entenda os mecanismos envolvidos na agregação das partículas de dimensões coloidais que apresentam grande estabilidade em razão da sua reduzida dimensão e possuem cargas superficiais que promovem a sua repulsão. (BALTAR, 2010; SANTOS, 2013).

Para o melhor entendimento do tratamento das partículas coloidais em meio aquoso, é importante entender o funcionamento da dupla camada elétrica que nada mais é que a superfície gerada na interface sólido-líquido. A partícula mineral hidrofílica adquire uma carga elétrica superficial quando em contato com um meio polar devido a interação das espécies iônicas da superfície e as moléculas de água. Essa superfície das partículas carregada atrai uma “nuvem” de íons de carga contrária, denominados contra-íons. Parte dessa nuvem é difusa, e o conjunto carga de superfície-carga difusa é designado dupla camada elétrica. Na figura 2.6 está apresentada uma representação da dupla camada elétrica.

Figura 2.6: Representação da dupla camada elétrica.

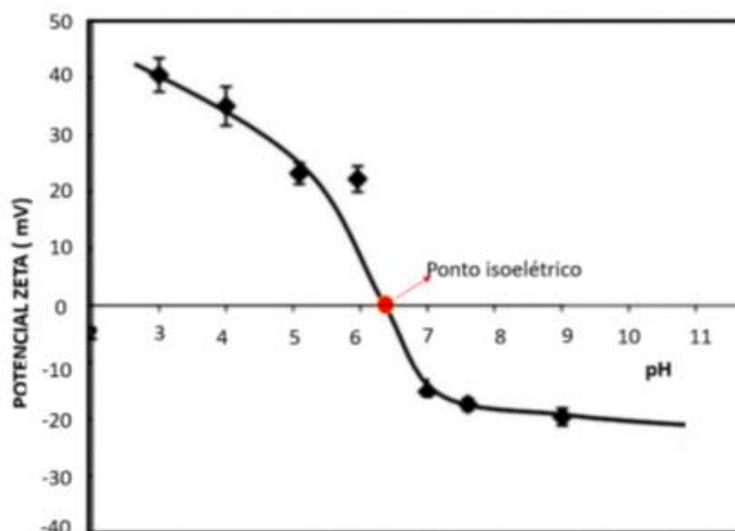


Fonte: Paiva (2004).

Observando a figura 2.6, é possível identificar o plano de cisalhamento que é uma linha traçada de maneira figurativa para delimitar o sistema solução/partícula. O potencial medido quando ambos estão em movimento e na presença de um campo elétrico é conhecido como potencial zeta, que é diretamente influenciado conforme o pH do meio em que o sistema se encontra, conforme mostrado na figura 2.6. Quando a carga medida no plano de cisalhamento é nula, ou seja, o potencial zeta é igual a zero, pode-se dizer, que este é o ponto isoelétrico deste sistema, assim como mostrado na figura 2.7 onde o ponto isoelétrico é em pH de aproximadamente 6,4, neste ponto a agregação das partículas é mais propícia (MONTE e PERES, 2010; HENRIQUES, 2012).

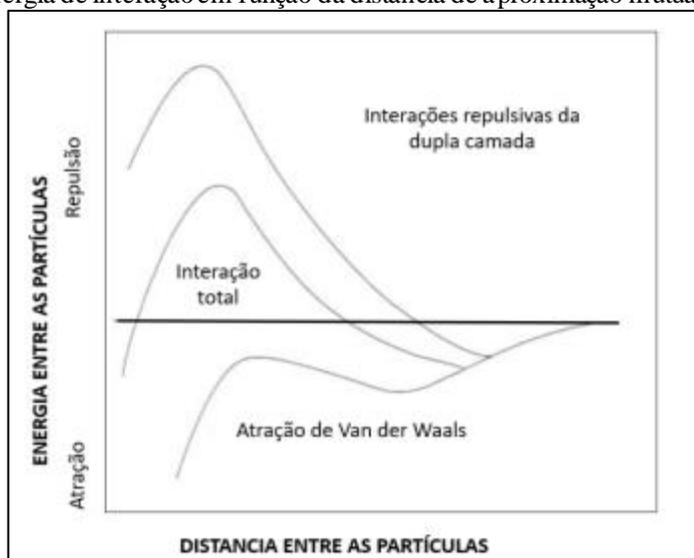
De acordo com LINS e ADAMIAN (2000), a agregação e a dispersão de partículas de granulometria coloidal sofrem influência das forças de Van de Waals (atrativas) e as forças entre as duplas camadas elétricas (repulsivas). Convencionalmente, a atração é considerada negativa e a repulsão positiva. A energia total de interação ( $V_T$ ) é dada pela soma das forças de Van der Waals ( $V_w$ ) e das forças elétricas ( $V_E$ ). A figura 2.8 mostra curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.

Figura 2.7: Potencial zeta conforme o pH, para uma partícula de Hematita.



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

Figura 2.8: Curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.



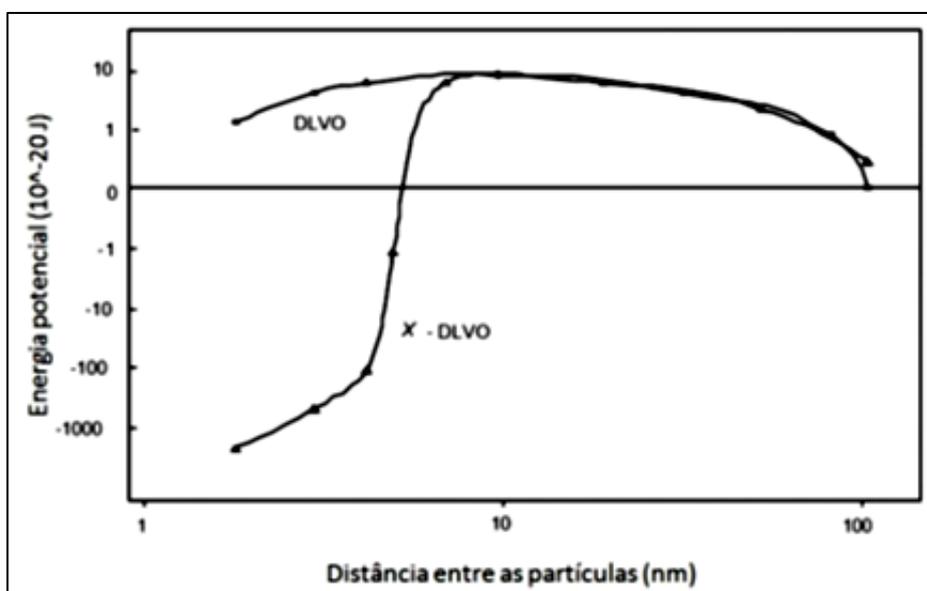
Fonte: Paiva (2004).

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  $V_s$  (estrutural), 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 1.1 representa a energia total de interação entre as partículas de acordo com a teoria X-DLVO (LINS e ADAMIAN, 2000). Na figura 2.9 está representada a teoria DLVO em comparação a teoria X-DLVO, onde percebe-se que quando se levou em conta a  $V_S$  e  $V_{Ass}$  a interação total começa a decrescer a uma distância de separação aproximada de 8 nm, já quando não se leva em conta essas componentes (teoria DLVO) a interação resultante leva a uma repulsão das partículas.

$$V_T = [V_W + V_E] + V_S + V_{Ass} + V_M + V_{Est} + \dots \quad [1.1]$$

Figura 2.9: Curvas de energia de interação entre partículas ultrafinas de rodocrosita: teoria DLVO e teoria X-DLVO



Fonte: Lins e Adamian (2000).

### 2.2.1 Flocculação

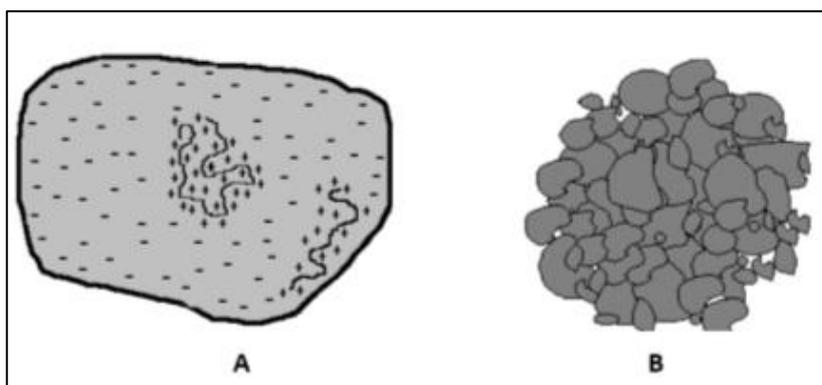
Baltar (2010) afirma que existem três principais mecanismos de agregação: a coagulação que ocorre quando as forças atrativas superam as repulsivas na superfície da partícula, formando assim os coágulos. A flocculação que é um mecanismo dependente da ação de um polímero que adsorve na superfície das partículas de forma simultânea, formando os flocos. Já a aglomeração é a formação do aglomerado, que acontece quando as partículas são aglomeradas devido a ação

de um líquido imiscível, como por exemplo um óleo. Neste trabalho serão abordados os flocculantes, por isso uma atenção maior será dada a estes reagentes neste capítulo.

O termo 'floculação', de acordo com Svarovsky (2000), pode ser usado para definir os processos em que pequenas partículas, ou pequenos grupos de partículas formam grandes agregados. Na floculação as partículas ultrafinas se agregam por meio de uma macromolécula. Essa macromolécula é um polímero denominado de flocculante, que pode simultaneamente se adsorver na superfície de várias partículas. O agregado formado é chamado de floco. (BALTAR, 2021).

Existem dois principais mecanismos de floculação, que são a floculação por pontes e a floculação por reversão localizada de carga. Na floculação por reversão localizada de carga, tem-se um mecanismo muito parecido com o da coagulação, pois os polieletrólitos com médias ou baixas densidades de cargas conseguem neutralizar a carga da superfície mineral (carga oposta). Dessa forma, a superfície contará com uma disposição heterogênea de cargas, assim como apresentado na figura 2.10 A, dando início a formação de um floco (CHAVES,2013; BALTAR, 2010). Os flocos formados por este mecanismo, são pequenos, densos e rígidos, conforme apresentado na figura 2.10 B, neste tipo de estrutura existe o contato direto partícula-partícula.

Figura 2.10: Floculação por reversão localizada de carga.

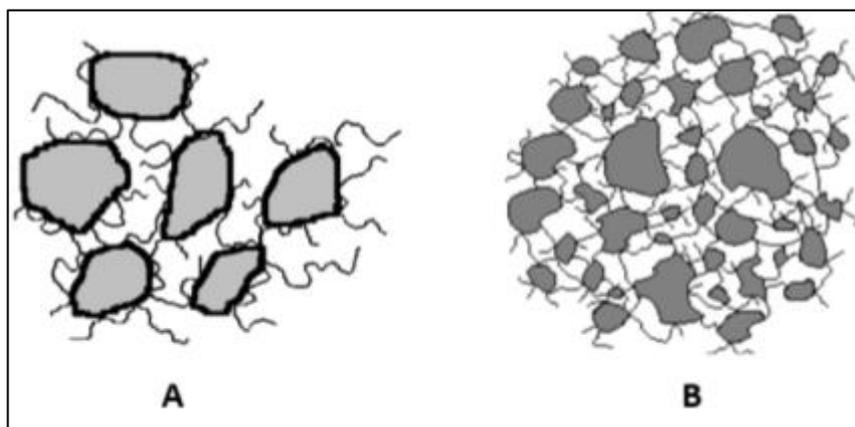


Fonte: Baltar (2010).

Já nos polímeros de elevados pesos moleculares, é predominante a floculação por pontes. Estes polímeros podem ser não iônicos, ou com carga elétrica de mesmo sinal da superfície mineral. Somente uma parte da molécula do reagente comunica-se com o sólido, sendo que o restante da cadeia polimérica fica livre para se ligar a outras partículas, exercendo a função de pontes. Assim como mostra a figura 2.11 A. Esse tipo de floculação comumente gera flocos

grandes e de estrutura aberta conforme apresentado na figura 2.11 B, onde as partículas não se tocam, estas estruturas retêm bastante água em seu interior. O crescimento dos flocos é rápido e apesar da água retida no interior diminuir a densidade média, os flocos formados neste mecanismo possuem alta velocidade de sedimentação (CHAVES, 2013 e BALTAR, 2010).

Figura 2.11: Floculação por pontes



Fonte: Baltar (2010).

### 2.2.2 Reagentes floculantes

Os reagentes utilizados na floculação, são chamados de floculantes, eles podem ser naturais, modificados ou sintéticos; neutros, aniônicos ou catiônicos e de baixa, média ou elevada massa molecular, conforme listado na tabela 2.2. De acordo com Baltar (2010), os floculantes mais usados e eficientes nas operações de espessamento são os polieletrólitos aniônicos com cadeia linear e elevada massa molecular (de  $10^6$  a  $10^7$ ).

De acordo com Chaves (2013), vários compostos podem agir como floculantes, como poliacrilamida, carboximetilcelulose, polietilanimina, amido, entre outros. O autor cita ainda que dentre os compostos utilizados, o grupo das poliacrilamidas são os mais empregados. As poliacrilamidas (PAM) não são iônicas em si, mas por meio da copolimerização com acrilatos ou aminas, elas podem se tornar respectivamente aniônicas ou catiônicas.

Tabela 2.2: Classificação dos polímeros.

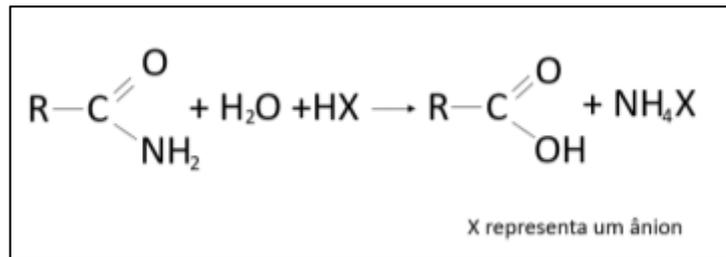
CARACTERÍSTICA	CLASSIFICAÇÃO	EXEMPLOS
Natureza	Naturais	A maioria dos polímeros comerciais
	Sintéticos	Poliacrilamidas, biopolímeros
Carga	Catiônico	Radicais $\text{NH}_3$ (poliaminas)
	Aniônico	Radicais $-\text{COOH}^-$ (Policarboxilatos)
	Não iônico	Polióxido de etileno, Poliacrilamidas
	Anfótero	Poliacrilamidas semi hidrolisadas
Hidrofobicidade	Hidrofóbicos; semi hidrofóbicos	Polióxido de etileno, álcool, polivilínico
	Hidrofílico	A maioria dos polímeros
Peso molecular	Baixo	$< 10^5$ g/mol
	Médio	Entre $10^5$ g/mol e $10^6$ g/mol
	Alto	$> 10^6$ g/mol
Estrutura	Linear	
	Ramificada	

Fonte: Boltoe Gregory (2007).

### 2.2.3 Poliacrilamidas

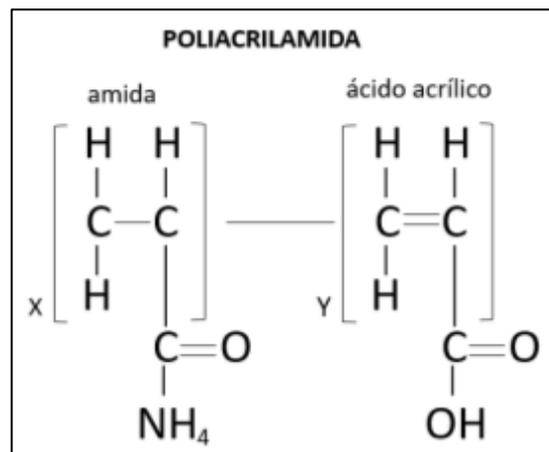
As poliacrilamidas são os floculantes sintéticos largamente utilizados, e de acordo com Molyneux (1983), apresentam vantagens como composição química determinada, estrutura que permite modificações e maior estabilidade química. As poliacrilamidas de elevado peso molecular ( $> 10^6$ ) são utilizadas durante o espessamento, logo que quanto maior o tamanho da molécula, maior será a capacidade de ela adsorver em um número grande de partículas e formar flocos grandes. As poliacrilamidas de peso molecular baixo são mais usadas na filtração. No espessamento é usual a utilização das poliacrilamidas aniônicas, essas macromoléculas podem ser obtidas por meio da polimerização e hidrólise de parte dos monômeros da amida em meio ácido, conforme reação apresentada na figura 2.12. Outra forma de obtenção da poliacrilamida aniônica é a copolimerização da amida com o ácido acrílico ou seus sais acrilatos, como apresentado na figura 2.13 (BALTAR, 2021).

Figura 2.12: Polimerização e hidrólise dos monômeros amidas.



Fonte: Baltar (2021)

Figura 2.13: Estrutura química da poliacrilamida aniônica.

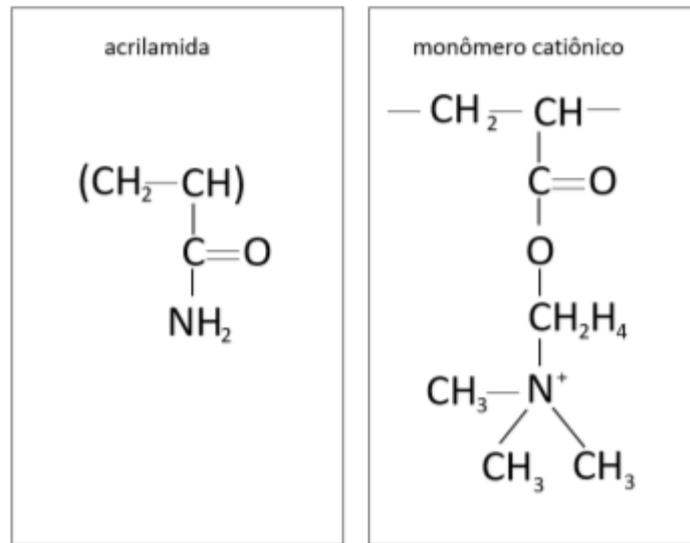


Fonte: Baltar (2021)

As poliacrilamidas catiônicas são mais comumente utilizadas na filtragem, pois proporcionam flocos mais fechados e com menor retenção de água. Elas se adsorvem na superfície mineral de maneira geral por interações eletrostáticas quando a superfície e o reagente apresentam cargas contrárias. Este tipo de poliacrilamida é originado pela copolimerização da amida com um monômero catiônico, conforme representado na figura 2.14 (ADAMS *et al.*, 1986; BALTAR, 2021).

A presença de segmentos ionizados provoca o estiramento da molécula de poliacrilamida em função da repulsão eletrostática resultante, possibilitando a formação de flocos e aumento na viscosidade da solução. Graus de ionização baixos podem não ser suficientes para o necessário estiramento da molécula, fundamental para a formação dos flocos. Contudo, se a densidade iônica for muito elevada pode gerar repulsão eletrostática, dificultando a adsorção do polímero em superfícies de mesmo sinal (BALTAR, 2010; OLIVEIRA, 2016).

Figura 2.14: Monômeros que compõem a estrutura polimérica da poliacrilamida catiônica.

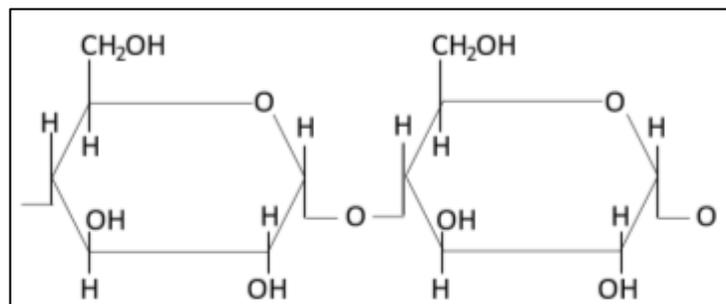


Fonte: Baltar (2021).

#### 2.2.4 Amido

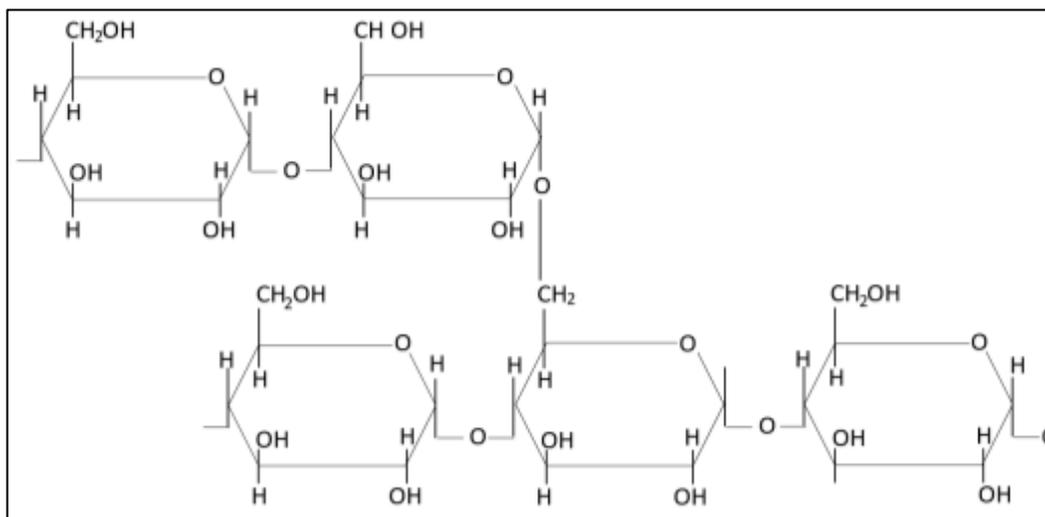
Denardin e Silva (2009) definem os amidos estruturalmente como um homopolissacarídeo composto por cadeias de amilose e amilopectina como mostra a figura 2.15 e 2.16, respectivamente. Nas moléculas de amido existe grande quantidade de grupos “hidroxi”, o que faz com que estes polímeros possuam características hidrofílicas e estabeleçam ligações de hidrogênio com a água.

Figura 2.15: Estrutura química da amilose



Fonte: Baltar (2021).

Figura 2.16: Estrutura química da amilopectina



Fonte: Baltar (2021).

A eficiência do amido varia de uma fonte vegetal pra outra, logo que este polímero pode ser formado por diversas fontes como a batata, mandioca, arroz, dentre outros. O amido é originalmente um polímero não iônico, mas quando adicionado em solução aquosa se torna aniônico. Em sua forma natural, o amido não é solúvel em água a temperatura ambiente, sendo necessária a gelatinização deste polímero para que ele possa fornecer suas propriedades floculantes (BALTA, 2021).

A utilização de amido como opção de floculante pode apresentar diversas vantagens quando comparado às poliacrilamidas, como por exemplo baixo custo e grande abundância por ser obtido por diversos tubérculos. Além disso são reagentes estáveis logo que são obtidos em sua forma pura e são biodegradáveis, não apresentando toxicidade ambiental (LEITE, 2019).

### 2.3 Reologia

A reologia pode ser entendida como a ciência que estuda deformação e fluxo. Esta ciência proporciona entendimento acerca de um líquido em um fluxo e o comportamento de um sólido que sofre deformação. Grandes deformações concebidas por forças cisalhantes fazem com que muitos materiais possam fluir (MEZGER, 2006).

No tratamento de minérios as partículas são dispostas, na grande maioria das vezes, em suspensões aquosas, que são denominadas de polpa, logo as operações são diretamente

influenciadas pela capacidade dessas suspensões em se deformar ou fluir quando forem submetidas a esforços de cisalhamento ou pressão, assim o entendimento da reologia é de grande importância para o processamento de minérios e de rejeitos (FERREIRA *et al.*, 2005).

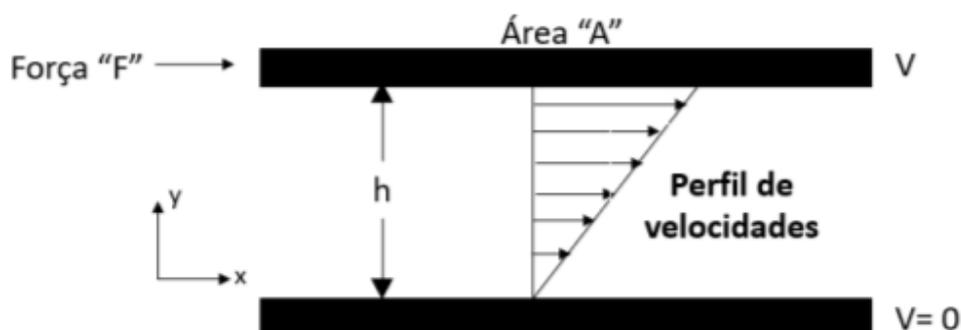
Ribeiro (2015) afirma ainda que a reologia pode ser entendida como uma ciência que estuda como a matéria se comporta (deforma ou escoar), quando os fluidos são submetidos a ação de uma força externa. Bisco (2009) cita que a viscosidade e a tensão de escoamento são as principais medidas da reologia. A reologia das polpas desempenha um papel muito importante em diversas etapas do processamento mineral, tais como moagem, espessamento, filtração e disposição de rejeitos.

### 2.3.1 Viscosidade e tensão de cisalhamento

A viscosidade pode ser compreendida como a característica do fluido em relação a resistência de deformação, ou melhor dizendo, a viscosidade é a resistência do fluido ao cisalhamento quando forçado por forças tangenciais. Fluidos de elevada viscosidade fluem lentamente enquanto fluido pouco viscosos fluem em uma maior velocidade (BARNES, 2000).

Newton, em 1687, definiu a viscosidade de um fluido como a resistência ao deslizamento de suas moléculas devido a fricção interna, quanto maior o grau de fricção interna, maior a velocidade do fluido. Newton definiu o conceito de viscosidade através de experimentos realizados com fluidos entre duas placas paralelas, conforme mostra a figura 2.17.

Figura 2.17: Experimento de Newton de fluxo de placas paralelas.



Fonte: Ribeiro (2015).

O experimento de Newton, demonstra que a força ( $F$ ) requerida por unidade de área ( $A$ ) para que se mantenha uma diferença de velocidade entre as placas, é a *tensão de cisalhamento*,

que pode ser expressa matematicamente seguindo a equação 2.2, onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento, dada em Pascal.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [2.2]$$

Relacionando a diferença das velocidades ( $dv$ ) entre as placas com a distância entre elas ( $dy$ ), tem-se a taxa de cisalhamento, dada pela equação 2.3.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad [2.3]$$

Alguns fluidos irão apresentar uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, estes são denominados de fluidos Newtonianos e sua viscosidade está representada pela equação 2.4, já os fluidos que não possuem essa linearidade são chamados de não-Newtonianos, tendo sua viscosidade em função de uma certa taxa de cisalhamento, sendo então chamada de viscosidade aparente, representada pela equação 2.5 (IRGENS, 2014).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [2.4]$$

$$\eta = \eta(\dot{\gamma})\tau \quad [2.5]$$

### 2.3.2 Tensão de escoamento

De acordo com Boger (2015; 2013), a tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) pode ser definida como a tensão de cisalhamento mínima necessária para que o fluido sofra deformação e fluxo irreversíveis. Quando tensões abaixo da tensão limite de escoamento são aplicadas, o fluido se deforma de forma elástica, voltando ao estado inicial após a aplicação da tensão. Tensões aplicadas acima da tensão limite de escoamento fazem com que as partículas se comportem como um fluido viscoso. Outros autores pontuam a tensão de escoamento como o limite das deformações elásticas, definindo o ponto em que se inicia o escoamento como sendo a tensão de escoamento dinâmica ou *flow point* (MEZGER, 2006).

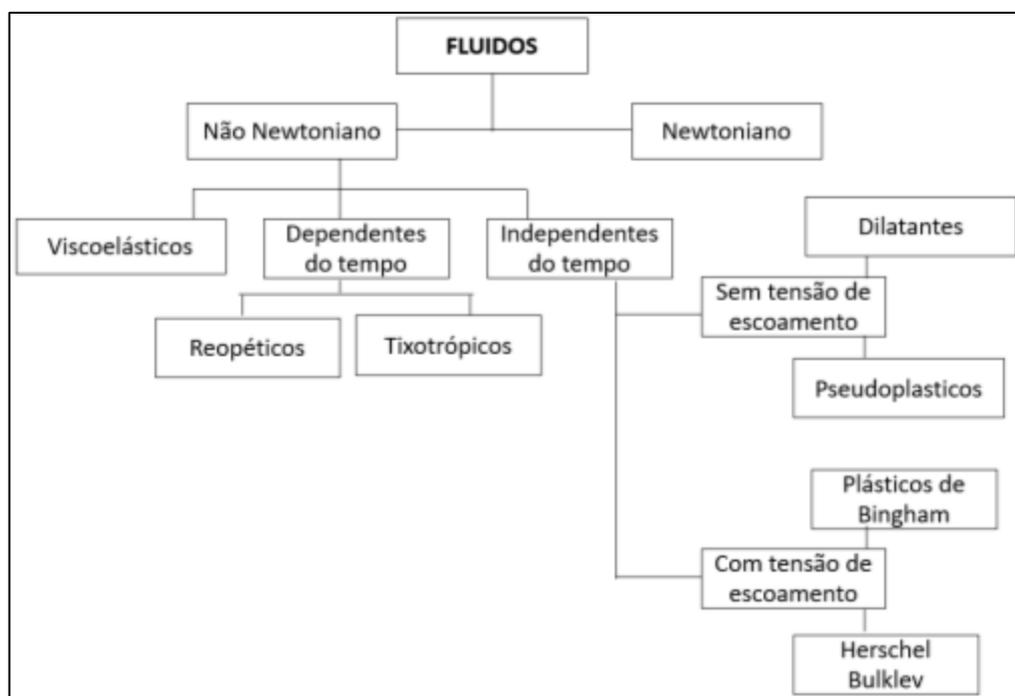
Como as polpas, tanto de minérios quanto de rejeitos são uma combinação de partículas sólidas com água, pode-se assim dizer, que esse material ao ser exposto ao meio ambiente e submetidos a forças externas se comporta como um fluido a partir do ponto em que é superada

a tensão limite de escoamento. Assim sendo, é importante que se entenda a classificação dos fluidos viscosos (BISCO, 2009; SANTOS, 2016).

### 2.3.3 Classificação reológica dos fluidos

Por via de regra, os fluidos podem ser classificados de acordo com seu comportamento reológico. Ribeiro (2015) aponta uma classificação dos fluidos como fluidos ideais e reais, desse modo, os fluidos ideais não desenvolvem tensão de cisalhamento conforme o movimento da massa, possuem variação de viscosidade igual a zero. Já os fluidos reais podem ser subdivididos em Newtonianos e não-Newtonianos. Boger (2006) afirma que as polpas de rejeitos minerais apresentam o comportamento de fluido Não-Newtoniano. A figura 2.18 apresenta a classificação reológica dos fluidos.

Figura 2.18: Classificação dos fluidos



Fonte: Steffe (1996).

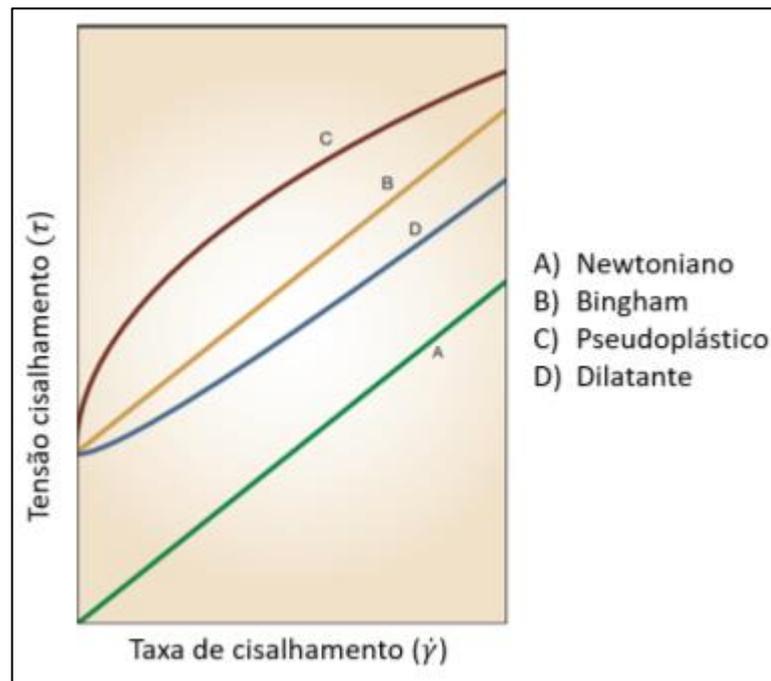
- Fluidos Newtonianos

Os fluidos Newtonianos apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) aplicada e a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ), como representado na figura 2.19. O fluxo é iniciado

assim que a tensão de escoamento, é aplicada. A linearidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento indicam uma viscosidade constante (BOGER, 2006).

Para Tanner (1988), a viscosidade para os fluidos Newtonianos é denominada de viscosidade absoluta e é afetada apenas pela temperatura e pressão, não sofrendo influência da tensão e taxa de cisalhamento. Santos (2016) aponta que a viscosidade newtoniana diminui com o aumento da temperatura, quanto maior a viscosidade do fluido maior é essa dependência com a temperatura.

Figura 2.19: Comportamento reológico dos fluidos relacionando tensão e taxa de cisalhamento.



Fonte: Boger (2006).

- Fluidos não-Newtonianos

Quando não existe linearidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento em um fluido, este pode ser descrito como um fluido não-Newtoniano. Então, ao contrário dos fluidos Newtonianos, os não-Newtonianos apresentam variação na sua viscosidade, conforme a tensão e a taxa de cisalhamento são alteradas (FERREIRA *et al.*, 2005).

Santos (2016) cita que os fluidos não-Newtonianos podem ser divididos em três grupos, sendo eles: fluidos viscoelásticos, dependentes do tempo e independentes do tempo.

a) Fluidos Viscoelásticos

De acordo com Galindo (2013), estes materiais apresentam comportamento duplo, tanto de sólido como de líquido. Eles conseguem obter uma recuperação elástica parcial após a deformação (GALINDO, 2013).

b) Fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo

i) Tixotrópicos

As interações moleculares presentes nesse tipo de material são fracas e se rompem quando sujeitas a uma tensão de cisalhamento prolongada. A viscosidade deste fluido diminui progressivamente até atingir uma determinada taxa de cisalhamento (BISCO, 2009).

ii) Reopéticos

Ao contrário do comportamento dos fluidos tixotrópicos, os fluidos com comportamento reopéticos são caracterizados por terem a viscosidade aumentada durante um período submetido a uma força de cisalhamento. A viscosidade volta ao normal quando o fluido retorna ao repouso. Gonçalves (2014) aponta que este tipo de comportamento em um material é muito inconveniente no tratamento de minérios devido à grande variação da viscosidade.

c) Fluidos não-Newtonianos independentes do tempo

i) Dilatante

Nesses materiais a viscosidade apresenta uma proporcionalidade direta com a taxa de cisalhamento, sendo assim a viscosidade desses fluidos aumenta progressivamente com o aumento da taxa de cisalhamento (FERREIRA *et al.*, 2005). Este comportamento, de acordo com Santos (2016), é característico de suspensões com altas concentrações de sólidos.

ii) Pseudoplástico

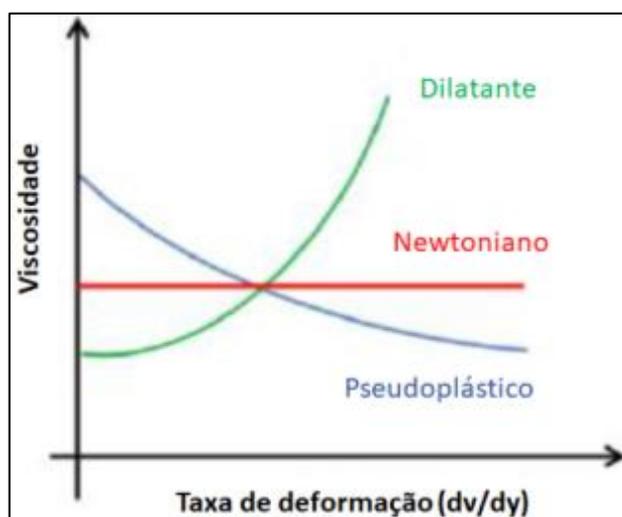
Diferentemente dos fluidos dilatantes, os pseudoplásticos tem seus valores de viscosidade diminuídos com o aumento da taxa de cisalhamento. Ferreira *et al.* (2005) apontam que este

fato ocorre por exemplo para um sistema agregado onde a diminuição da quantidade de líquido retido pelos agregados se dá pela quebra desses agregados através da agitação provocando a diminuição da viscosidade.

### iii) Bingham

Este tipo de material, necessita de uma tensão de cisalhamento inicial chamada de *yield stress* ou tensão de escoamento para começarem a escoar. Após atingida a tensão de escoamento, obtém-se uma proporcionalidade direta entre a taxa e a tensão de cisalhamento (GONÇALVES, 2014). Esse tipo de comportamento é característico de suspensões pseudo-homogêneas de partículas finas ou ultrafinas (FERREIRA *et al.*, 2005). Na figura 2.20 a taxa de deformação está apresentada relacionada a viscosidade.

Figura 2.20: Comportamento reológico dos fluidos relacionando a taxa de deformação com a viscosidade.



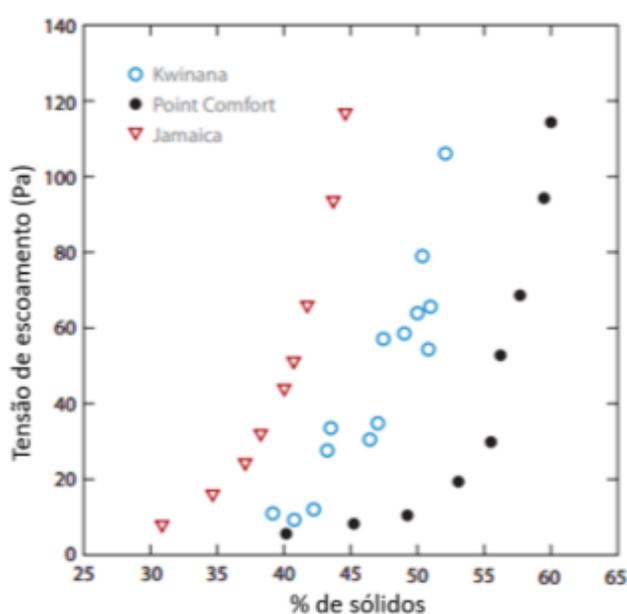
Fonte: Santos (2016).

### 2.3.4 Comportamento reológico das polpas

As propriedades reológicas de maior influência para as suspensões minerais são a viscosidade e a tensão limite de escoamento, pois elas influenciam diretamente em algumas etapas como, por exemplo, no consumo de energia da moagem a úmido e no transporte e bombeamento de polpas (NASCIMENTO, 2008).

Sofrá e Boger (2002) apontam que a tensão de escoamento do fluido aumenta com a concentração de sólidos no fluido, desta forma tomando como base rejeitos provenientes de processos da mineração, pode-se dizer que polpas adensadas ou com maior concentração de sólido irão consequentemente apresentar uma maior tensão de escoamento. Na figura 2.21 está representada a relação da tensão de escoamento para diferentes concentrações de sólidos de amostras de bauxita de localidades diferentes.

Figura 2.21: Tensão de escoamento em função da % de sólidos para diferentes amostras de bauxita.



Fonte: Boger (2013).

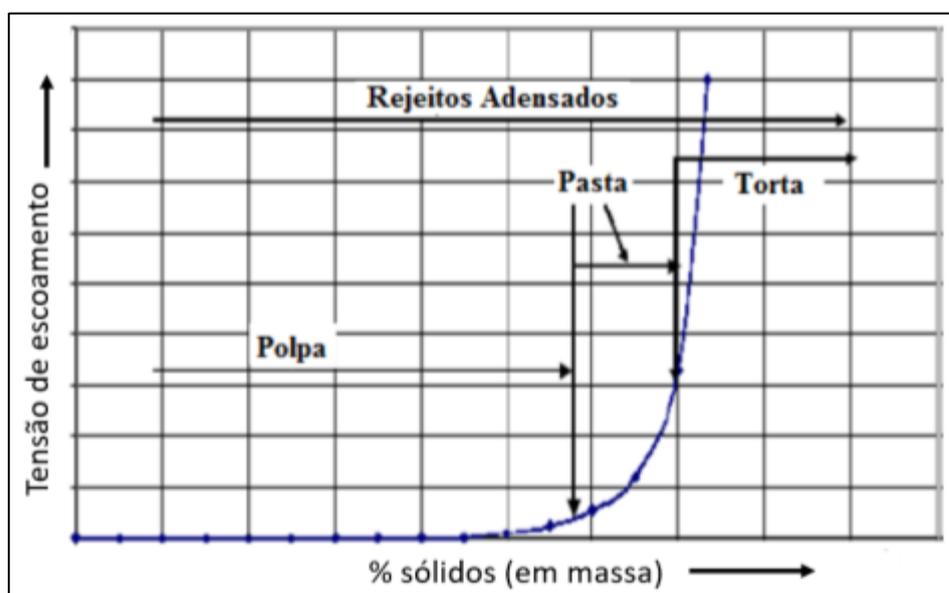
Alguns autores como Fitton e Seddon (2013) defendem que as pastas minerais apresentam como característica principal a tensão limite mínima de escoamento de 200 Pa, podendo assim fazer uma transição entre polpas e pastas. Desta forma, o monitoramento da tensão limite de escoamento é um fator muito importante na indústria, principalmente no que se refere a disposição de rejeitos.

Polpas convencionais apresentam, na maior parte das vezes, baixa porcentagem de partículas sólidas, representando caracteristicamente um fluido Newtoniano. Contudo, com o aumento da quantidade de sólidos presentes na polpa, esse material passa a apresentar comportamento de um fluido não-Newtoniano, apresentando tensão limite de escoamento. Diversos autores consideram que para um fluido ser considerado pastoso, ele deve apresentar

uma tensão mínima de escoamento de 100 Pa (BARREDA e VALADÃO, 2020; FRANÇA e TRAMPUS, 2018).

A tensão limite de escoamento das polpas minerais é frequentemente expressa em função da concentração de sólidos no sistema, pequenas mudanças na porcentagem de sólidos fazem com que haja grande mudança no comportamento reológico da polpa. O adensamento e a tensão de escoamento são fatores importantes para caracterizar o fluido como pasta, polpa ou torta, já que não existe uma concentração de sólidos definida para estabelecer esse limite entre as fases (FRANÇA e TRAMPUS, 2018). Olcay (2020) em seu estudo, onde caracterizou reologicamente pastas de rejeito fosfático, representou esquematicamente a tensão de escoamento em função do adensamento do material conforme apresenta a figura 2.22.

Figura 2.22: Tensão de escoamento em função do adensamento.



Fonte: Olcay *et al.* (2020).

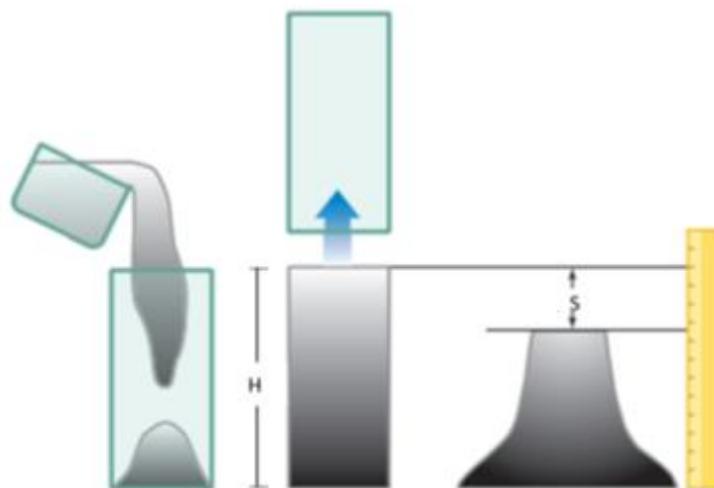
#### 2.4 Teste de abatimento – *slump test*

O *Slump test* foi originalmente utilizado para determinar a consistência do concreto fresco sendo então adaptado para a indústria mineral. O teste de *slump* encontra extensiva aplicação para monitoramento da consistência de rejeitos nas operações de disposição (CLAYTON *et al*, 2003).

A altura de abatimento é utilizada como um parâmetro de controle para a avaliação da consistência de pastas, na mineração esse resultado pode não ser suficiente para a avaliação da consistência de um sistema (BARREDA, 2008). Ainda de acordo com o mesmo autor, o teste de abatimento foi originalmente criado para que fosse realizado em cones com o raio da base sendo o dobro da altura. Contudo, algumas vantagens são observadas quando se utiliza a geometria cilíndrica do tubo na realização dos testes, algumas das vantagens é a determinação mais precisa da tensão de escoamento, com respeito à simetria do cone; - o formato cilíndrico, é matematicamente mais fácil para o desenvolvimento de modelos; - maior facilidade para o enchimento com menor quantidade de bolhas de ar que podem afetar os resultados.

O modelo cilíndrico vem sendo utilizado por diversos autores e de acordo com Barreda *et al.* (2011), deve apresentar a medida do diâmetro do tubo (que geralmente é feito de PVC) igual a altura. Um esquema demonstrado este tipo de ensaio é apresentado na figura 2.23.

Figura 2.23: Esquema de um teste de abatimento – *slump test*.



Fonte: Boger (2013)

#### 2.4.1 Tensão de escoamento a partir do abatimento

Phasias e Boger (1996), desenvolveram em seu trabalho uma equação, provando que a partir do ensaio de *slump*, é possível obter a tensão de escoamento do material. Na equação 2.6 tem-se que a altura de abatimento é proporcional a tensão de escoamento do material.

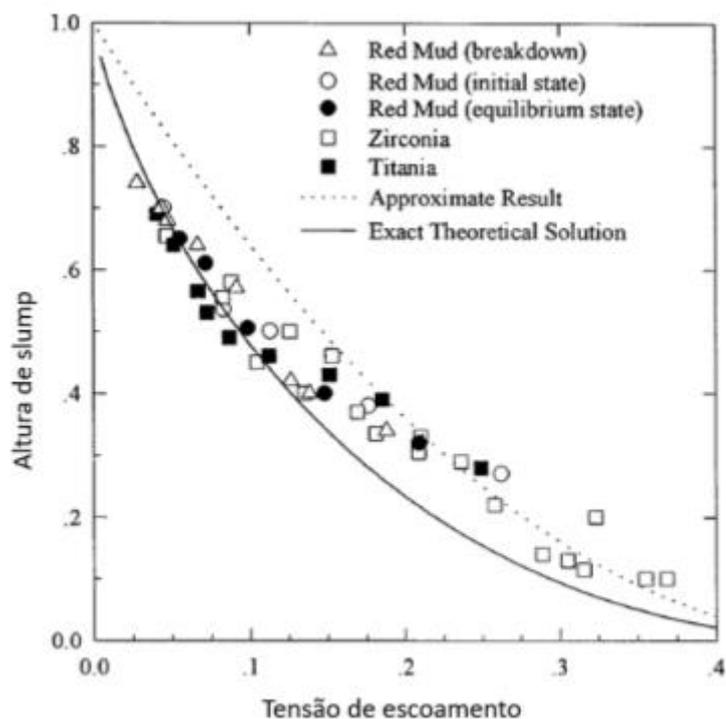
$$\tau_{y'} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{S'} \quad [2.6]$$

Onde:

- **S** é o *slump* adimensional obtido pela razão do “*slump*” real pela altura da amostra dada pela equação ( $S' = S/H$ );
- $\tau_{y'}$  é a tensão de escoamento adimensional obtida através da equação ( $\tau_y = \tau_{y'}/\rho gH$ );
- **H** é a altura da amostra;
- $\rho$  é a massa específica do fluido;
- **g** é a aceleração da gravidade;

Na figura 2.24 está apresentado um gráfico que representa os resultados dos estudos de Phasias e Boger (1996). Com esses resultados os autores mostram que a tensão de escoamento diminui conforme a altura de abatimento do material aumenta, ou seja, essas duas variáveis são proporcionais. Também é possível afirmar que os resultados obtidos experimentalmente e teoricamente utilizando a equação 2.6, desenvolvida pelos autores mostraram a mesma tendência.

Figura 2.24: Altura de *slump* em função da tensão de escoamento para diferentes suspensões.



Fonte: Phasias e Boger (1996).

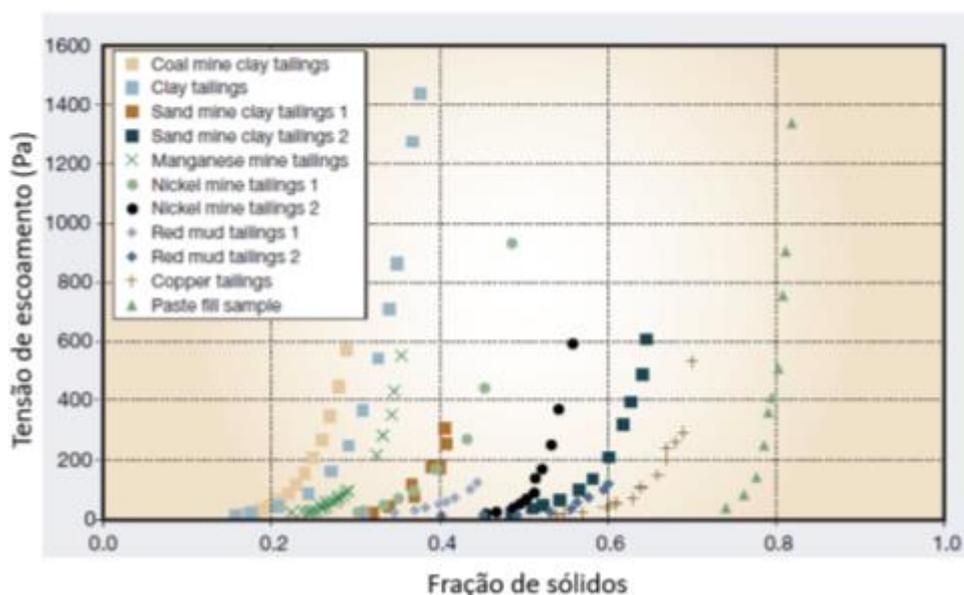
## 2.5 Influência de variáveis no comportamento reológico dos fluidos

Alguns estudos mostram que algumas variáveis podem interferir na viscosidade e tensão de escoamento dos fluidos. Algumas dessas variáveis, como a concentração de sólidos, tamanho das partículas, as características químicas e uso de reagentes, estão dispostas neste tópico.

### 2.5.1 Concentração de sólidos

Boger (2006) relata que a maioria das suspensões de rejeitos minerais exibem um aumento exponencial da tensão de escoamento com o aumento da concentração de sólidos. À medida que a concentração de sólidos aumenta em um sistema, as interações entre as partículas vão se tornando relevantes, o que faz com que elas passem a se comportar como um fluido não-Newtoniano. A figura 2.25 apresenta a diferença da tensão de escoamento para diferentes rejeitos em algumas concentrações de sólidos.

Figura 2.25: Diferença da tensão de escoamento com a concentração de sólidos para diferentes rejeitos.

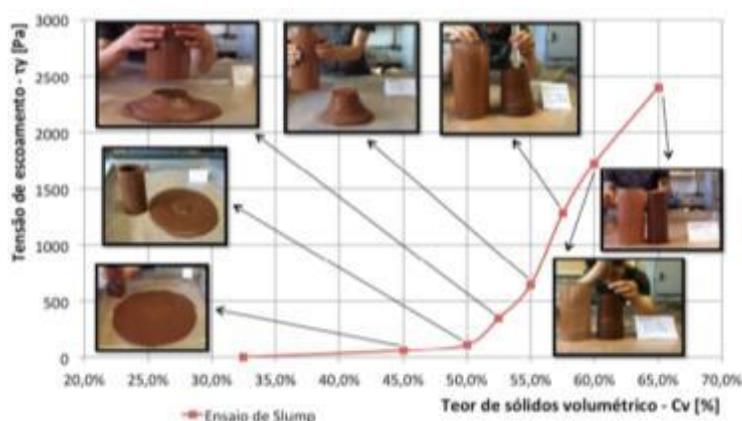


Fonte: Boger (2006).

Ribeiro (2015), em seu trabalho adotou a metodologia descrita por Pashias e Boger (1996), afirmando que o método descrito no item 2.4 deste trabalho, onde utilizam o abatimento do material para se obter a tensão de escoamento, seria um bom método para o ponto de partida dos ensaios. Utilizando um rejeito de minério de ferro, os resultados dos ensaios de *slump test*, para diferentes concentrações de sólidos, obtidos pelo autor, estão apresentados na figura 2.26.

Observa-se que, conforme o teor de sólidos na polpa foi aumentando, a altura de abatimento foi, conseqüentemente, diminuída e a tensão de escoamento aumentada.

Figura 2.26: Resultados *slump test* para tensão de escoamento em função do percentual de sólidos.

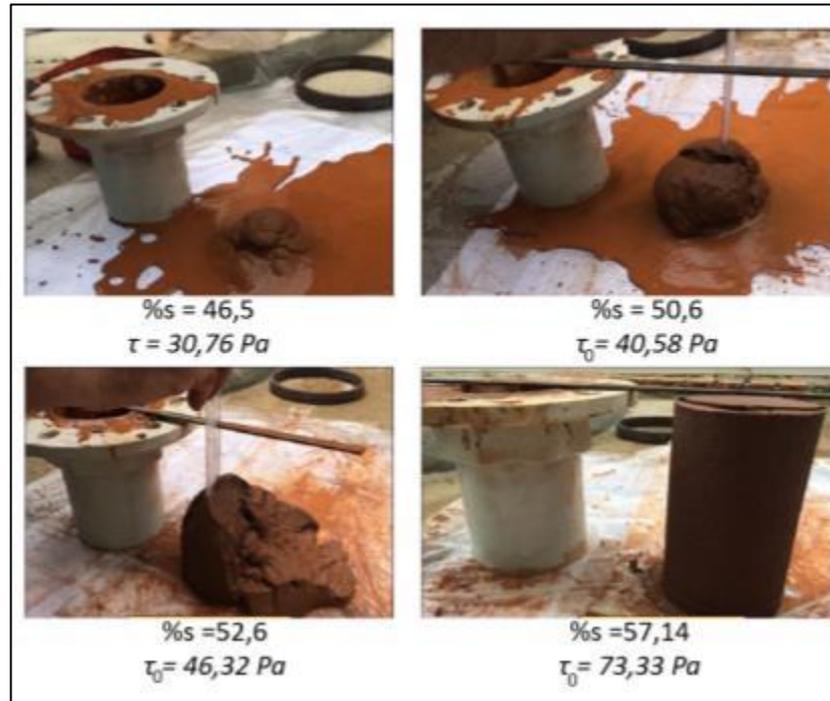


Fonte: Ribeiro (2015).

Da mesma forma, Santos (2016) também realizou testes de abatimento utilizando o método proposto por Pashias e Boger (1996). Em ambos os trabalhos é possível observar que o aumento da concentração de sólidos acarreta no aumento da tensão limite de escoamento do material e na diminuição da altura de abatimento. A figura 2.27 apresenta os resultados dos testes de *slump* obtidos por Santos (2016), apontando a diferença do abatimento e tensão de escoamento em função do percentual de sólidos.

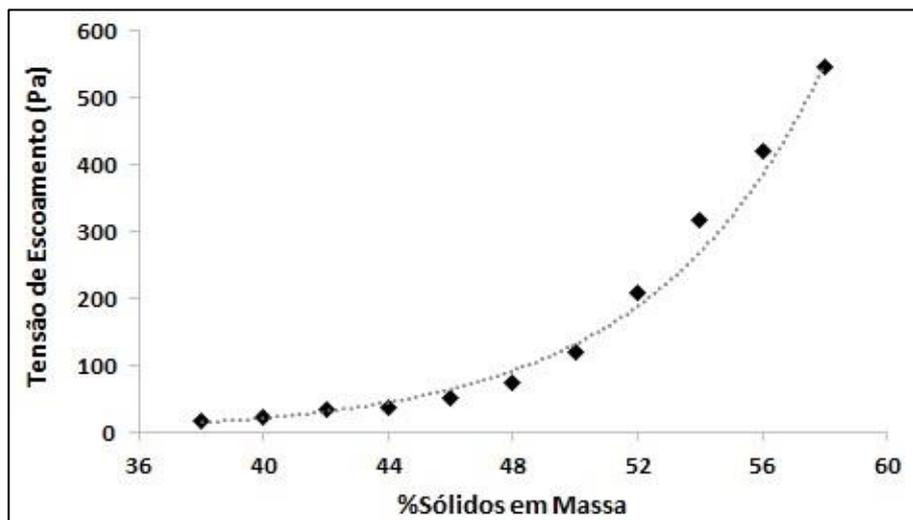
Barreda e Valadão (2020) também fizeram análise dessa variável em um rejeito fosfático, utilizando o método de Bingham, obtendo os resultados apresentados na figura 2.28. Observa-se que a partir de 46% de sólidos (p/p) se tem um notável incremento na tensão de escoamento da amostra, para 52% de sólidos em massa se forma pasta mineral com um valor da tensão de escoamento em torno a 210 Pa.

Figura 2.27: Resultados ensaios de slump.



Fonte: Santos (2016).

Figura 2.28: Tensão de escoamento em função do percentual de sólidos.

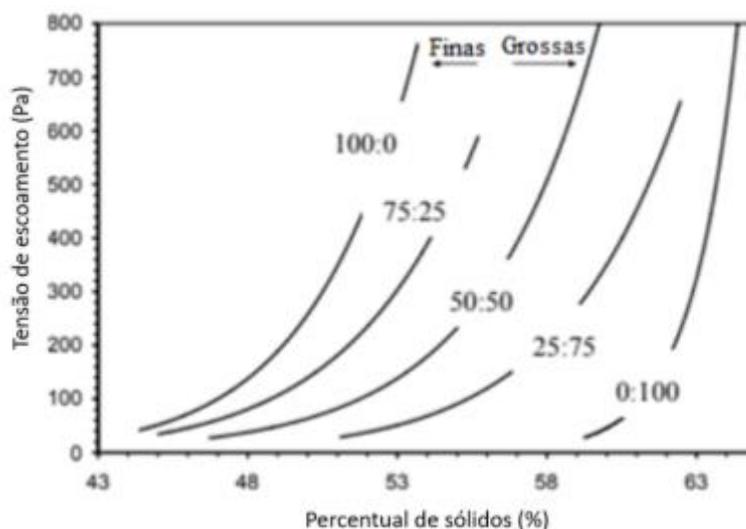


Fonte: Barreda e Valadão (2020).

### 2.5.2 Tamanho da partícula

As partículas finas são frequentemente encontradas nas polpas de concentrados e também dos rejeitos. Boger (2006) aponta que, quando a granulometria é a única diferença do material, pode-se afirmar que o material mais fino terá uma maior tensão de escoamento e maior viscosidade em uma determinada concentração de sólidos, conforme mostra a figura 2.29. Este fato se deve a característica das partículas com menores granulometrias apresentarem maiores superfícies de contato estando sujeitas a maiores interações de superfície.

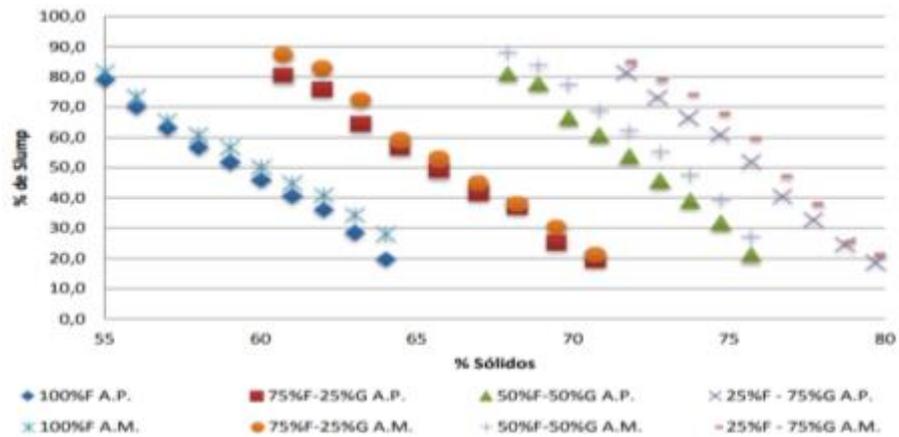
Figura 2.29: Relação entre a tensão de escoamento e a quantidade de partículas finas.



Fonte: Adaptado de Boger (2015).

Hernandez *et al.* (2015) em seu trabalho analisou as propriedades reológicas de um rejeito de cobre, proveniente do processo de flotação de uma indústria no Chile. Primeiramente os autores realizaram o teste de *slump*, mostrando que quando o material era 100% grosso ( $>37\mu\text{m}$ ), o teste não funcionou, pois, as partículas foram muito heterogêneas e acabaram sofrendo segregação. Os resultados dos ensaios de *slump* (% abatimento do material) *versus* % de sólidos estão apresentados na figura 2.30. Conforme pode-se observar que tanto para a água do mar (A.M) quanto para a água potável (A.P), o aumento da concentração de partículas grossas no rejeito acarreta no aumento da concentração de sólidos, logo rejeitos com partículas mais finas irão produzir pastas com maior quantidade de água.

Figura 2.30: Abatimento em relação a granulometria da partícula.

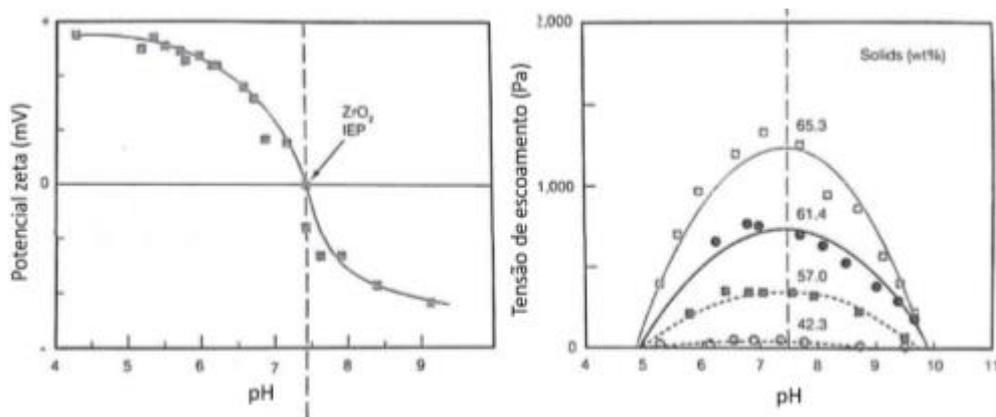


Fonte: Hernandez(2015).

### 2.5.3 Características químicas e uso de reagentes

Outro fator que é bastante relevante na reologia das polpas é o efeito da química de superfície das partículas, que pode ser avaliada medindo o potencial zeta. No ponto isoelétrico, que é ponto onde para um determinado valor de pH, o potencial zeta é zero a tensão de escoamento é máxima. Longe deste ponto, as partículas são repelidas eletrostaticamente e o sistema está mais disperso, com uma menor tensão de escoamento (CHACARA, 2020). Na figura 2.31 está apresentado um exemplo da interferência do pH na tensão de escoamento, onde o ponto isoelétrico é em pH 7,5 e a tensão de escoamento é máxima para o material.

Figura 2.31: Tensão de escoamento em função do pH

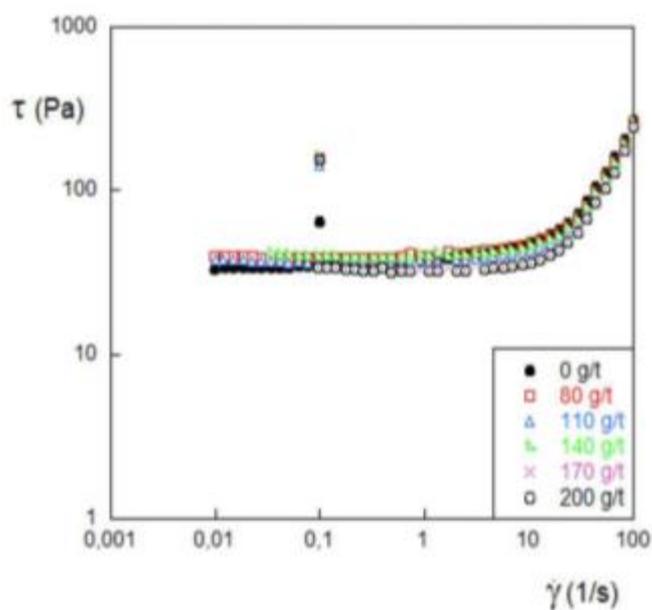


Fonte: Boger (2015).

Para a agregação das partículas finas presentes nas polpas, são utilizados diversos tipos de reagentes, como floculantes, coagulantes e modificadores de pH, estes reagentes auxiliam no desaguamento e formam polpas com maiores concentrações de sólidos.

Trampus e França (2019) avaliaram o desempenho de um floculante catiônico para um rejeito de lama vermelha. A figura 2.32, apresenta os resultados obtidos pelas autoras utilizando polpas com 30 % de sólidos. Pode-se observar que  $\tau_0$  (tensão de escoamento inicial) é elevada com a adição do floculante, entretanto o aumento da dosagem do floculante não altera a tensão estática. Desta maneira, as autoras inferem que a adição do floculante permitiu, a princípio, maior adensamento, pois agregou as partículas sólidas gerando maior acúmulo de água no interior do floco, e conseqüentemente, a elevação da  $\tau_0$  estática. Assim, conclui-se que 80 g/t do polieletrólito catiônico são suficientes para alcançar o máximo de neutralização das cargas e formação dos flocos, possibilitando avaliar dosagens menores, que acarretará na redução de custos.

Figura 2.32: Tensão de escoamento em função da dosagem de floculante.

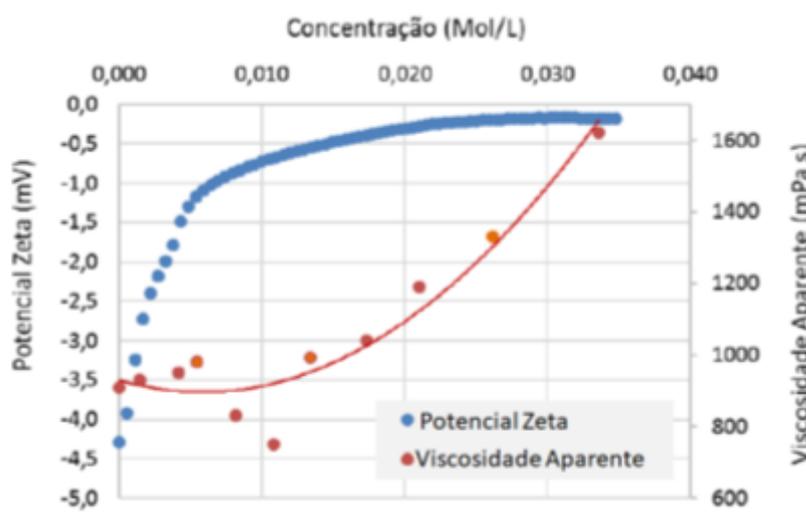


Fonte: Trampus e França (2019)

Ainda analisando as tensões estática e dinâmica de escoamento com a adição de floculante, França e Trampus (2019) apontam que é de grande importância observar este fenômeno, pois simula a possível destruição dos flocos devido ao bombeamento do rejeito, do sedimentador até o local de deposição.

Piazon e Ortega (2016) apontam que à medida que são adicionados eletrólitos a uma solução há uma maior tendência à floculação do sistema, logo que o potencial zeta é reduzido. Os autores avaliaram a adição de cloreto de magnésio e nitrato de estrôncio a uma solução de alumina. Na figura 2.33 está apresentado um gráfico mostrando a influência do aumento da concentração de nitrato de estrôncio na viscosidade e potencial zeta da suspensão.

Figura 2.33: Gráfico do potencial zeta e viscosidade aparente em função da quantidade de nitrato de estrôncio.



Piazon e Ortega (2016).

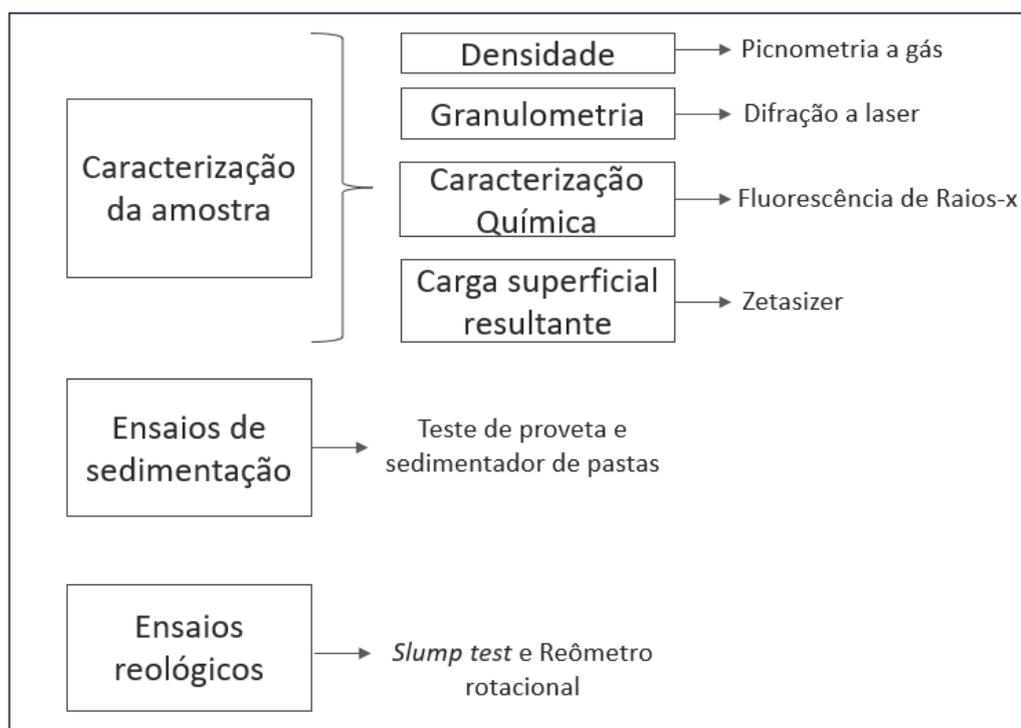
Observando a figura 2.33, é possível perceber que o aumento da concentração de nitrato de estrôncio faz com que a viscosidade da suspensão aumente mais rapidamente, devido a um processo de coagulação das partículas causado pela redução do potencial zeta. Conforme aumentamos a concentração da solução há um aumento da viscosidade da suspensão.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os procedimentos metodológicos utilizados na execução do trabalho. Se tratando da metodologia de pesquisa, pode-se dizer que o método utilizado foi o hipotético dedutivo, logo que foram realizados testes experimentais para que seja comprovada a hipótese inicial, tem-se também como finalidade, uma pesquisa aplicada, já quanto aos objetivos, tem-se uma pesquisa explicativa. Neste estudo foi abordado, quanto aos campos da ciência, uma pesquisa interdisciplinar e no que diz respeito a abordagem da pesquisa, é uma pesquisa quantitativa com cunho experimental. No que se refere aos procedimentos, tem-se uma pesquisa bibliográfica logo que foi feito um levantamento teórico baseado em trabalhos e estudos já publicados referentes ao assunto. Também é uma pesquisa experimental pois envolve testes laboratoriais para obtenção dos resultados a serem analisados.

Sobre a metodologia experimental, a figura 3.1 apresenta um esquema das etapas de execução do trabalho. As principais operações foram a caracterização da amostra do rejeito, ensaios de sedimentação, ensaios de reologia e medição da carga superficial resultante.

Figura 3.1: Esquema da execução do trabalho.



Fonte: Própria autora.

### 3.1 Origem e preparação da amostra

Para a realização deste trabalho foram utilizadas amostras de rejeito de minério de ferro provenientes do Quadrilátero Ferrífero, no município de Itatiaiuçu - MG. No estudo foram utilizadas amostras do material que alimenta o espessador de rejeitos. Para devida representatividade da amostra, foi realizado um processo de homogeneização, onde foram separadas e ensacadas alíquotas de aproximadamente 0,5 kg. As amostras foram então separadas para os posteriores ensaios e caracterização. Na figura 3.2 está apresentada uma imagem da amostra utilizada nos ensaios.

Figura 3.2: Amostra do rejeito utilizado nos ensaios



Fonte: Própria autora.

#### 3.1.1 Caracterização da amostra

O material foi caracterizado quanto a composição química, granulometria e densidade. Na tabela 3.1 estão exibidas as técnicas e equipamentos utilizados na etapa de caracterização.

### 3.2 Reagentes

Foram utilizados nos ensaios deste trabalho 7 diferentes flocculantes sintéticos (poliacrilamidas) fornecidos pela empresa BASF, também foi analisado como reagente flocculante, um amido residual de batata. Esse reagente é um dos resíduos gerados no processo

de produção de batatas de uma empresa localizada nos municípios mineiros de Araxá e Perdizes.

Tabela 3.1: Equipamentos e técnicas para a caracterização da amostra.

PROPRIEDADE	TÉCNICA	EQUIPAMENTO
Granulometria	Difração a laser	Bettersize S3 plus
Composição química	Fluorescência de raios -X	Shimadzu - EDX-720
Peso específico	Picnometria a gás	Picnômetro a gás ACP <i>Instruments (Autodensity 100)</i>

Para os flocculantes da linha Magnafloc®, Alclar® 662, Rheomax®DR foram preparadas soluções em concentrações de 0,05% (m/m) para utilização nos ensaios. Para isso, os reagentes que se encontravam na forma de um pó branco, foram pesados utilizando-se um béquer, em uma balança analítica de alta precisão e transferidos com o auxílio de um funil de vidro para um balão volumétrico de 200 ml. Para o preparo da solução foi utilizada água destilada, que também foi pesada na balança de alta precisão e transferida para o balão contendo o reagente. A solução foi cuidadosamente agitada de forma manual para que não ocorresse a quebra dos flocos. Na tabela 3.2 estão descritos os reagentes citados.

Tabela 3.2: Descrição dos reagentes sintéticos.

Reagente	Fornecedor	Caracterização química
Magnafloc® 611	BASF	Poliacrilamida aniônica
Magnafloc® 919	BASF	Poliacrilamida aniônica
Magnafloc® 10	BASF	Poliacrilamida aniônica
Alclar® 662	BASF	Poliacrilamida aniônica
Magnafloc® 351	BASF	Poliacrilamida aniônica
Rheomax® 1010	BASF	Poliacrilamida aniônica
Rheomax® 1050	BASF	Poliacrilamida aniônica

Fonte: Própria autora.

Já para o amido residual de batata, foi realizada a gelatinização de acordo com o procedimento descrito por Alves *et al.* (2016) em uma solução de 3% de concentração (m/m) e proporção 4:1 de amido/soda. Para isso, foram pesados 5g do amido, 45 g de água, 12,5 g de

uma solução de 10% (m/v) de NaOH e mais 104,16 g de água de diluição. Em um béquer de 600 mL foram adicionados o amido, a água e a solução de NaOH, misturados por 10 minutos em um agitador magnético, após esse tempo foi adicionada a água de diluição e a solução foi agitada por mais 10 minutos. A figura 3.3 apresenta uma imagem do amido gelatinizado no agitador magnético. Já a tabela 3.3 apresenta a caracterização química deste reagente.

Tabela 3.3: Caracterização química do amido.

Carboidrato %	Fibra Alim. %	Proteína %	Cinzas %	Lipídios %	Amilose %	Amilopectina %
84,82	3,72	1,64	0,37	0,10	23,09	76,91

Fonte: própria autora.

Figura 3.3: Amido gelatinizado.



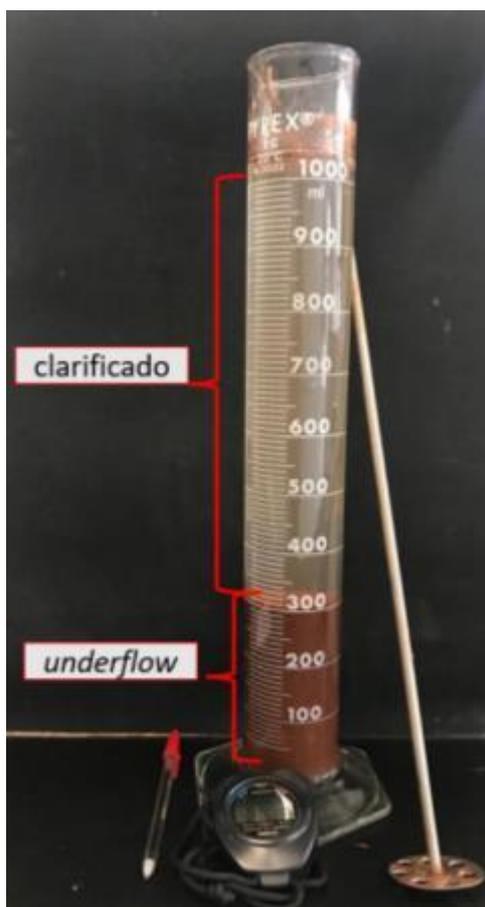
Fonte: Própria autora.

### 3.3 Ensaios de sedimentação

Os ensaios de sedimentação descontínua em proveta seguiram conforme as orientações clássicas de Fitch (1966) e França e Casqueira (2007). Desta forma em uma proveta de 1000 mL foi adicionada a água e o material em quantidades ideais para a formação da polpa com percentual de sólidos desejado, essas quantidades foram calculadas utilizando a equação 3.1. Foram realizados, inicialmente, ensaios sem adição de reagente, com a polpa em seu pH natural, de aproximadamente 6,5. O pH não foi alterado nestes ensaios pois o material avaliado se trata

de um rejeito, e a alteração do pH implica em gastos financeiros. Nestes primeiros ensaios, foram utilizadas polpas contendo 15, 20, 30 e 40% de sólidos. Com a ajuda de um agitador manual, em todos os ensaios a polpa foi homogeneizada por 1 minuto, garantindo assim, que todas as partículas estivessem em suspensão. Nos ensaios com o uso de reagentes, as soluções contendo esses reagentes eram adicionadas imediatamente após o tempo de homogeneização da polpa e se faziam mais sete bateladas (subida e descida) com o agitador manual, para que o reagente pudesse entrar em contato com todas as partículas da polpa, que foi mantida em 20 % de sólidos. A figura 3.4 mostra um teste de sedimentação com os devidos aparatos utilizados.

Figura 3.4: Teste de sedimentação



Fonte: Própria autora.

$$\%S = \frac{\rho_s (\rho_p - \rho_a)}{\rho_p (\rho_s - \rho_a)} \times 100 \quad [3.1]$$

Onde:

$\rho_s$  = densidade do sólido;

$\rho_p$  = densidade da polpa;

$\rho_a$  = densidade da água;

%s = percentual de sólidos.

Para a construção da curva e obtenção da velocidade de sedimentação, foi colada uma fita no exterior da proveta, onde foi marcada a altura inicial da interface após a homogeneização da polpa e imediatamente acionado o cronometro. Em intervalos de tempo pré-determinados a altura da interface era anotada na fita, seguindo essa metodologia até o final do ensaio. A partir de ensaios preliminares, pôde-se estabelecer um tempo fixo de 1 hora para o final dos testes, após esse tempo a fita era retirada e as alturas medidas com uma régua. A velocidade de sedimentação pode ser calculada utilizando a equação 3.2. Onde  $\Delta H$  e  $\Delta t$  são as diferenças de altura e tempo, respectivamente, quando a velocidade de sedimentação é constante.

$$V_s = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad [3.2]$$

Quando se trata de ensaio de sedimentação, um parâmetro importante a ser analisado é o percentual de sólidos no *underflow*, ou seja, o percentual de sólidos contido no material sedimentado na proveta. Para isso, a altura da interface final sedimentada foi medida e utilizando as equações 3.3, 3.4 e 3.5 foi possível obter o valor deste parâmetro (%s).

$$V_u = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad [3.3]$$

$$V_a = V_u - V_s \quad [3.4]$$

$$\%s = \frac{\text{massa sólidos}}{\text{massa água} + \text{massa de sólidos}} \times 100 \quad [3.5]$$

Onde:

$V_u$  = volume do *underflow*;

r = raio da proveta;

h = altura do *underflow*;

$V_a$  = volume de água;

$V_s$  = volume de sólidos.

%s = percentual de sólidos no *underflow*

Ao final do teste, uma alíquota do líquido sobrenadante na proveta era transferido com o auxílio de uma pipeta para o turbidímetro, de onde foi possível obter a turbidez desse material. A pipetagem do líquido se iniciava sempre 15 cm abaixo do volume total da proveta. O turbidímetro utilizado nos ensaios é da marca *Hanna instruments*. Os parâmetros utilizados para análise dos resultados foram a velocidade de sedimentação, o percentual de sólidos no *underflow* e a turbidez do clarificado.

### 3.3.1 Planejamento dos ensaios de sedimentação em proveta

Os ensaios de sedimentação em proveta foram divididos em 3 etapas, na primeira etapa avaliou-se a interferência dos reagentes da linha Magnafloc e Alclar na sedimentação do rejeito, na segunda etapa foi avaliado o amido residual como agente floculante, visto que era necessário buscar outro tipo de reagente, em um segundo momento, foram avaliados os reagentes da linha Rheomax.

Para os ensaios de sedimentação em proveta utilizando-se os floculantes da linha Magnafloc® e Alclar®, foi montado, utilizando o *software* Minitab 21, um experimento fatorial multinível, com 2 fatores em níveis diferentes. Os fatores analisados foram a dosagem do floculante, com 4 níveis (20, 30, 70 e 120 g/t) e o tipo de reagente, com 5 níveis, sendo eles os 4 reagentes da linha Magnafloc e o Alclar. Todos os ensaios foram realizados em duplicata, totalizando 40 ensaios. Para facilitar as análises fornecidas pelo programa, os reagentes e os fatores foram codificados conforme mostra a tabela 3.4. A matriz do planejamento fatorial está apresentada na tabela 3.5.

Tabela 3.4: Termos codificados e reais

Fator codificado	Fator real	Valor codificado	Valor real
A	Dosagem	1	20 g/t
		2	30 g/t
		3	70 g/t
		4	120 g/t
B	Tipo de reagente	1	Magnafloc® 10
		2	Magnafloc® 351
		3	Magnafloc® 611
		4	Magnafloc® 919
		5	Alclar

Fonte: Própria autora.

Tabela 3.5: Matriz do planejamento experimental

Teste	A	B
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	1	5
6	2	1
7	2	2
8	2	3
9	2	4
10	2	5
11	3	1
12	3	2
13	3	3
14	3	4
15	3	5
16	4	1
17	4	2
18	4	3
19	4	4
20	4	5
21	1	1
22	1	2
23	1	3
24	1	4
25	1	5
26	2	1
27	2	2
28	2	3
29	2	4
30	2	5
31	3	1
32	3	2
33	3	3
34	3	4
35	3	5
36	4	1
37	4	2
38	4	3
39	4	4
40	4	5

Fonte: Própria autora.

Nos ensaios de sedimentação onde se analisou o amido residual de batata como agente floculante, o reagente foi avaliado nas dosagens de 70, 120, 500 e 1000 g/t. Também foi avaliada a mistura do amido com o reagente Magnafloc 351, para isso foi adicionado a polpa contendo 120 g/t do amido as quantidades de 10, 20, 30 e 70 g/t da poliacrilamida Magnafloc 351. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

Para os reagentes da linha Rheomax®, a partir de ensaios preliminares, foi montado um planejamento fatorial de dois níveis com duas variáveis, tendo uma réplica para cada ensaio, totalizando assim 8 ensaios. As variáveis analisadas foram o tipo e a dosagem de reagente e os níveis mínimo e máximo estão apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6:Matriz planejamento 2<sup>2</sup>.

Ordem do ensaio	Reagente	Dosagem
1	Rheomax®1010	30
2	Rheomax®1050	30
3	Rheomax®1010	70
4	Rheomax®1050	70
5	Rheomax®1010	30
6	Rheomax®1050	30
7	Rheomax®1010	70
8	Rheomax®1050	70

Fonte: Própria autora.

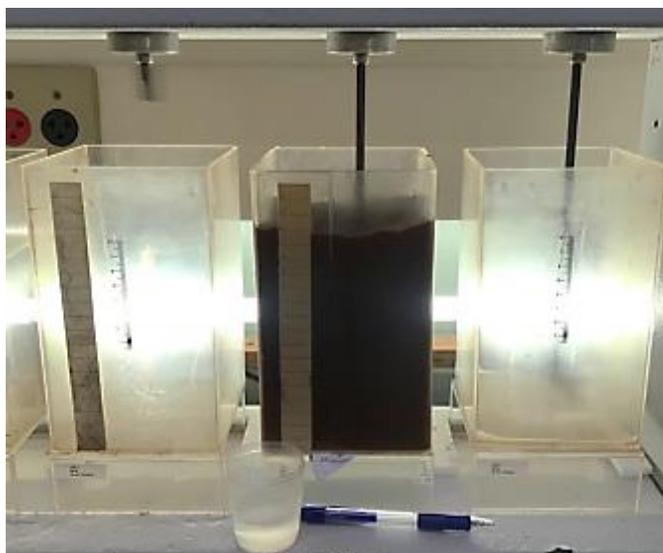
### 3.3.2 Ensaios de sedimentação no sedimentador de pastas

Ensaios de sedimentação foram realizados em um sedimentador de pasta nas condições previamente definidas nos testes de proveta. O intuito desses testes foi avaliar em escala maior se os resultados seriam bem reproduzidos. Desta forma foram realizados ensaios com os Reagentes Rheomax DR 1050 em dosagem de 30 g/t, Magnafloc 351 com 120g/t e Amido de batata com 286,06 g/t e também a sedimentação sem adição de reagentes.

As polpas, com volume de 2 litros e com percentual de sólidos de 20%, foram preparadas no equipamento *jar test* (modelo Nova Ética 218-6) conforme mostra a figura 3.5, onde

permaneceram sobre agitação de 300 rpm durante um minuto, após isso a solução contendo o reagente foi adicionada e a frequência de rotação diminuída para 150 rpm por mais dois minutos.

Figura 3.5: Polpa agitada no *Jar Test*.



Fonte: Própria autora.

Cessado esse tempo o material foi transferido para o sedimentador de pastas, apresentado na figura 3.6, que consiste em um tubo de acrílico de 1 metro de altura e 8,4 cm de diâmetro, este equipamento possui um cone com ângulo de  $45^\circ$  que facilita a remoção do material sedimentado. O tempo de sedimentação foi padronizado para 1 hora para todos os ensaios, após este tempo uma amostra do material sedimentado foi recolhida em um béquer e levada para a aferição da umidade, em um analisador de umidade Ohaus, modelo MB 23, apresentado na figura 3.7.

Figura 3.6: Sedimentador de pastas.



Fonte: Própria autora

Figura 3.7: Analisador de umidade



Fonte: Própria autora

### 3.4 Ensaios Reológicos

Os ensaios reológicos deste trabalho consistem nos ensaios de abatimento (*slump test*) e nos ensaios com o reômetro rotacional. A característica principal a ser analisada é a tensão de escoamento do material, que poderá ser caracterizado como polpa ou pasta a partir da análise deste parâmetro.

#### 3.4.1 Ensaios de abatimento *slump test*

Os testes de *slump*, realizados após os testes de sedimentação em proveta, funcionaram como ensaios preliminares e como comparativos aos próximos ensaios reológicos a serem realizados, utilizando-se um reômetro. Os ensaios foram embasados na metodologia anteriormente mencionada na seção 2.4 deste trabalho e descrita por Pashias e Boger (1996). Eles irão indicar além do abatimento do material em diferentes circunstâncias, a tensão de escoamento da polpa.

Foi utilizado um cilindro de PVC, com 4,74 cm de altura, 4,74 cm de diâmetro e um volume igual a 83,6 cm<sup>3</sup>. A polpa contendo o percentual de sólidos requerido foi preparada artificialmente em um béquer e colocada dentro do cilindro com o auxílio de uma espátula. Quando o cilindro foi retirado, a altura de abatimento foi medida utilizando-se um paquímetro. A figura 3.8 apresenta os aparatos necessários para a realização dos testes. Para analisar a influência dos flocculantes no abatimento, os reagentes foram adicionados na polpa, realizou-se a homogeneização misturando manualmente por 1 minuto, a dosagem fixada para esses ensaios foi de 20g/t para os reagentes sintéticos e 70g/t para o amido.

Figura 3.8: Aparatos utilizados na realização dos testes de *slump*.



Fonte: Própria autora.

Para a análise dos resultados dos ensaios de abatimento (*slump test*), foi montado um planejamento fatorial completo com dois fatores, sendo eles o tipo de reagente e o percentual de sólidos na polpa. Foram analisados 8 diferentes reagentes em polpas com percentuais de sólidos de 70, 72 e 75%. Para facilitar a análise no programa Minitab, os níveis e fatores avaliados foram codificados para letras e números, essas codificações estão apresentadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Termos reais e codificados para os ensaios de *slump*.

	“nível” real	Nível codificado		Nível real	Nível codificado
	<b>Fator A</b> - tipo de reagente	Rheomax 1010		1	<b>Fator B</b> – percentual de sólidos
Rheomax 1050		2	72%	2	
Amido batata		3	75%	3	
Magnafloc 919		4	*	*	
Magnafloc 10		5	*	*	
Magnafloc 611		6	*	*	
Magnafloc 351		7	*	*	
Alclar		8	*	*	

Fonte: Própria autora.

### 3.4.2 Ensaios reômetro

As medidas de tensão de escoamento também foram feitas em um Reômetro *Brookfield* modelo DV3T, com conjunto de sensores do tipo vane em frequência de 0,1rpm e com temperatura ambiente que variou de 23 a 27°C. Foram preparadas 500mL de amostras de polpa em béquer de vidro, preparadas assim como para os ensaios de *slump* a partir de alíquotas do rejeito seco e água do sistema de abastecimento de Araxá e misturadas com bastão de vidro. As medidas de tensão de escoamento foram realizadas diretamente no béquer.

### 3.5 Testes de potencial zeta

O material utilizado neste trabalho trata-se de um rejeito, neste caso não se tem um material puro, mas sim, uma mistura de diferentes minerais. Desta forma não se pode dizer que o que foi medido foi o potencial zeta, mas sim a carga superficial resultante das partículas. Este parâmetro é de fundamental importância para que se possa conseguir explicar o mecanismo de ação dos reagentes em relação a adsorção. O equipamento utilizado para essas aferições é o *Zetasizer Nano* da *Malvern Panalytical*.

Este equipamento possui uma restrição de tamanho de partículas, analisando apenas partículas com granulometria menor que 20  $\mu\text{m}$ , por isso foi necessário que uma pequena quantidade da amostra do rejeito (cerca de 50 g) fosse submetida ao equipamento *McCrone Micronising Mill* da *McCrone Scientific*, para obter uma quantidade do material abaixo da granulometria exigida e, assim, fosse possível os ensaios do potencial zeta. O eletrólito indiferente utilizado em todos os testes foi o KCl ( $10^{-2}$  mol/L), para ajuste do pH foram utilizados HCl e KOH, ambos na concentração de 0,05 mol/L.

Foram realizados 4 diferentes ensaios conforme mostrado na tabela 3.8, os reagentes das linhas Rheomax<sup>®</sup> DR e Magnafloc<sup>®</sup> foram preliminarmente escolhidos a partir dos resultados otimizados dos ensaios de sedimentação em proveta. Para a análise do rejeito na presença dos reagentes, foi realizado a sedimentação em um recipiente de 80 mL, reproduzindo as condições idealizadas para cada reagente individualmente, sendo que o material analisado foi o sobrenadante que continha partículas finas do material.

Tabela 3.8: Ensaios potencial zeta.

Teste 1	Rejeito puro	Sem reagente
Teste 2	Rheomax <sup>®</sup> DR 1010	Sobrenadante do teste de sedimentação
Teste 3	Magnafloc <sup>®</sup> 351	
Teste 4	Amido de batata	

Fonte: Própria autora.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados e discutidos os resultados da caracterização da amostra, dos ensaios de sedimentação e dos ensaios reológicos.

### 4.1 Caracterização da amostra

#### 4.1.1 Massa específica

A análise de picnometria a gás é uma técnica largamente utilizada na mineração logo que apresenta resultados rápidos e com alta precisão. A tabela 4.1 apresenta os resultados das cinco medições, concebidas no relatório fornecido pelo equipamento.

Tabela 4.1: Resultados relatório picnometria

Volume sólido (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	
32,98	2,79	Densidade = 2,82 g/cm <sup>3</sup> Desvio padrão = 0,0152
32,62	2,82	
32,53	2,83	
32,73	2,81	Volume = 32,66 cm <sup>3</sup> Desvio padrão = 0,158
32,60	2,82	

Fonte: Própria autora.

Observando a tabela 4.1 observa-se que o resultado fornecido pelo equipamento, é que o rejeito possui uma densidade igual a 2,82 g/cm<sup>3</sup>, este valor foi utilizado para todos os cálculos envolvendo a densidade do rejeito neste trabalho.

#### 4.1.2 Caracterização Química

A análise por fluorescência de raio X proporcionou a obtenção da composição química da amostra utilizada nos ensaios, esta composição está representada pela Tabela 4.2. A partir dos resultados observados na tabela 4.2, pode-se concluir que o rejeito é composto predominantemente por quartzo (73%) e hematita (18%). Estes resultados se assemelham aos encontrados por Silva (2018), que para um rejeito de do quadrilátero ferrífero encontrou 25,4% de hematita, 73,9% de quartzo.

Tabela 4.2: Caracterização química do rejeito.

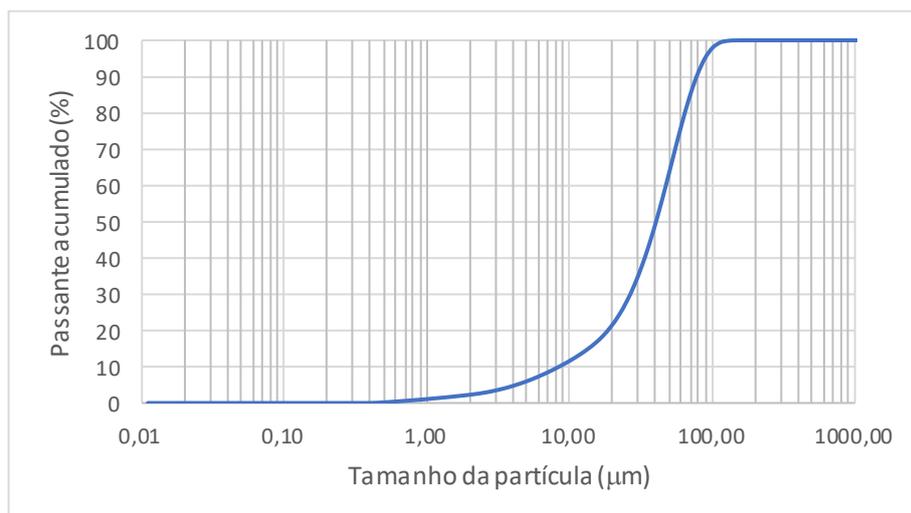
Espécie química	Composição (%)
SiO <sub>2</sub>	72,977
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,941
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,996
MnO	0,484
K <sub>2</sub> O	0,180
SO <sub>3</sub>	0,161
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,147

Fonte: Própria autora.

### 4.1.3 Análise granulométrica

A análise granulométrica realizada pelo equipamento, forneceu os resultados que possibilitaram a construção da curva granulométrica, apresentada na figura 4.1. Também foram fornecidos pelo software do equipamento  $D_{10} = 8,41 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 40,28 \mu\text{m}$  e  $D_{90} = 77,47 \mu\text{m}$ .

Figura 4.1: Curva Granulométrica da amostra.



Fonte: Própria autora.

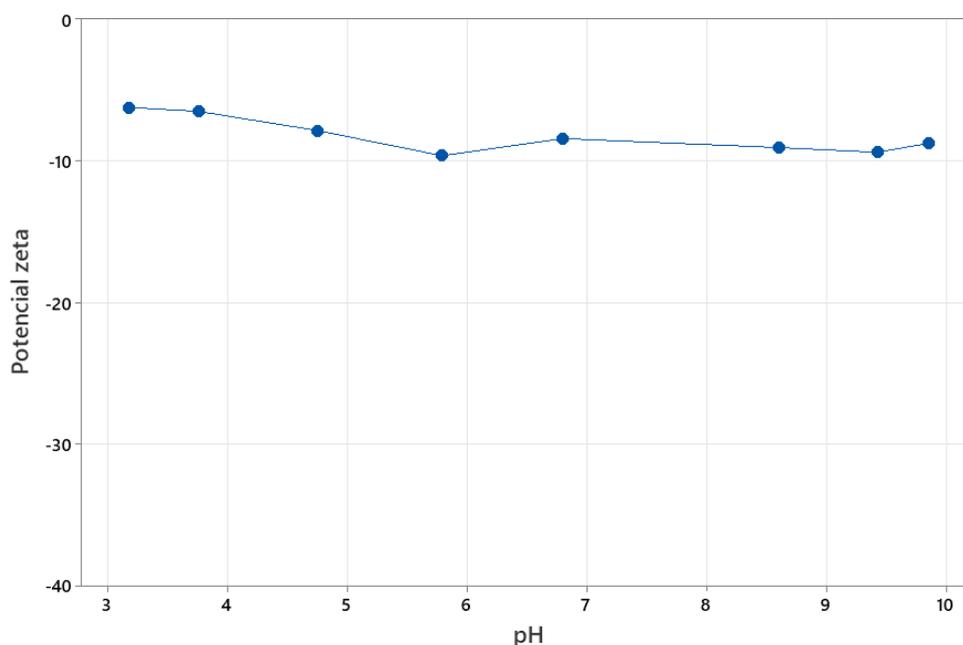
Os resultados da caracterização do rejeito apontam que o material é considerado fino logo que apresenta um  $d_{90} = 77,47 \mu\text{m}$ , outra informação relevante observada é que 21,7% da amostra possui granulometria inferior a  $20 \mu\text{m}$ , mostrando que este rejeito é favorável para a

formação de pasta, levando em consideração que Barreda e Valadão (2020) sugerem que as pastas minerais apresentam ao menos 15 % de material de granulometria abaixo de 20  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2 Potencial zeta do rejeito

A carga superficial resultante do rejeito está apresentada na figura 4.2, onde é possível observar que na faixa de pH entre 3 e 10 a carga residual está negativa. Levando em consideração que o rejeito é composto com 73% de quartzo que possui ponto isoelétrico em 2,7, este resultado é bastante coerente.

Figura 4.2: Carga superficial resultante do rejeito.



Fonte: Própria autora.

#### 4.3 Ensaio de sedimentação em proveta

Foram realizados, inicialmente, ensaios de sedimentação em proveta, sem nenhuma adição de reagente, com a polpa em seu pH natural, de aproximadamente 6,5. Nestes primeiros ensaios, foram utilizadas polpas contendo 15, 20, 30 e 40% de sólidos, em nenhuma concentração de sólidos foi possível identificar a interface do clarificado, impossibilitando assim, aferir a velocidade de sedimentação do material. Os demais ensaios foram realizados

com a polpa em 20% de sólidos e subdivididos em 3 etapas, a primeira com a análise dos flocculantes da linha Magnafloc, juntamente com o Alclar, a segunda etapa onde se analisou a influência do amido de batata como flocculante e por fim os reagentes da linha Rheomax. Como mencionado anteriormente, os parâmetros para análise foram a velocidade de sedimentação, a turbidez do clarificado e o percentual de sólidos no *underflow*

#### 4.3.1 Análise da primeira etapa (Magnafloc e Alclar)

Nesta primeira etapa, foram avaliados 4 diferentes tipos de flocculantes da linha Magnafloc e um flocculante da linha Alclar, todos poliácridamidas aniônicas. A Tabela 4.3 apresenta os resultados do planejamento experimental desta etapa. Os parâmetros velocidade de sedimentação (Figura 4.3), turbidez do clarificado (Figura 4.4) e o percentual de sólidos no *underflow* (Figura 4.5) foram analisados individualmente.

- *Velocidade de sedimentação*

Vale lembrar que, uma maior velocidade de sedimentação promove maior produtividade no espessamento, ao passo que o tempo para a sedimentação do material é reduzido. Na figura 4.3 é possível observar a variação da velocidade de sedimentação em função da dosagem dos flocculantes. Observando as curvas da figura 4.3, nota-se que a maior velocidade de sedimentação, dentre níveis avaliados, foi obtida para o Magnafloc® 351 na dosagem de 120 g/t. Na figura 8.1 do apêndice está representada a curva de sedimentação para o Maganafloc 351 na dosagem de 120 g/t.

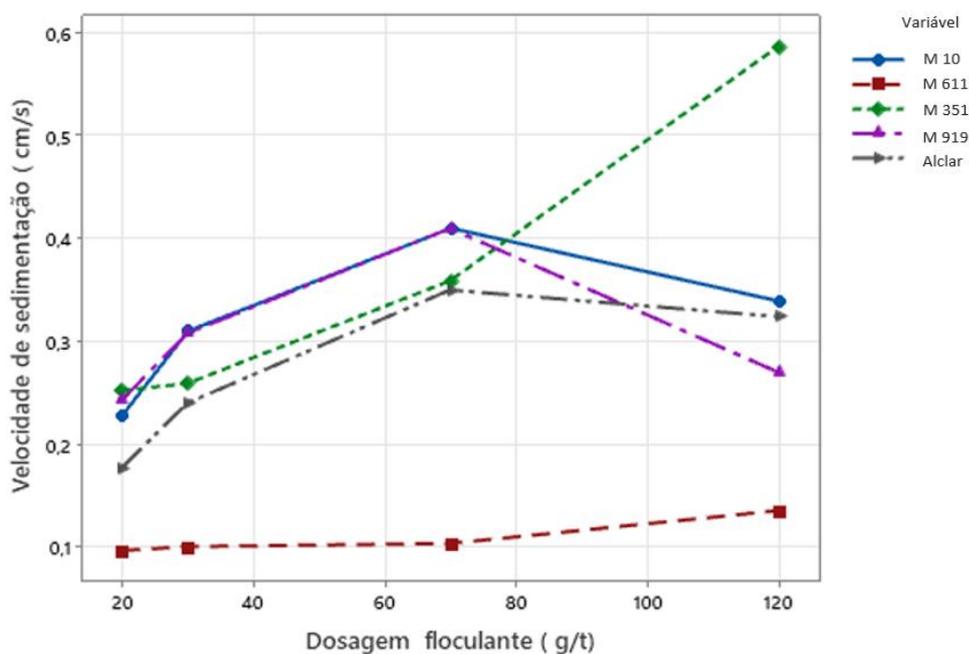
A Figura 4.3 evidencia ainda que para os flocculantes Magnafloc 10, Magnafloc 919 e Alclar, quando se aumenta a dosagem do reagente de 70g/t para 120g/t, têm-se uma queda na velocidade de sedimentação. Com a maior dosagem de flocculante os flocos formados são maiores e a velocidade de sedimentação tende a aumentar, no entanto, um excesso de reagente pode causar a redispersão das partículas. Conforme descrito em 2.2, a teoria X-DLVO, prevê um efeito de repulsão, resultante da interação entre as partes externas de polímeros adsorvidos, segundo Lins e Adamian (2000).

Tabela 4.3: Matriz do planejamento com resultados

Teste	A	B	Velocidade sedimentação (cm/s)	Turbidez (NTU)	%S <i>underflow</i>
1	1	1	0,175	40	56,58
2	1	2	0,25	47,85	62,23
3	1	3	0,09	223	63,2
4	1	4	0,245	38	47,6
5	1	5	0,176	30	45,72
6	2	1	0,2	25,78	55,04
7	2	2	0,26	32,26	55,67
8	2	3	0,1	299	57,79
9	2	4	0,31	18,7	45,21
10	2	5	0,26	47,5	42,81
11	3	1	0,39	27	55,04
12	3	2	0,35	9,5	50,26
13	3	3	0,1	784	56,19
14	3	4	0,42	71	45,21
15	3	5	0,355	59	42,59
16	4	1	0,4	122	50,89
17	4	2	0,59	19,95	50,26
18	4	3	0,13	679	58,63
19	4	4	0,25	185	41,08
20	4	5	0,39	77	45,46
21	1	1	0,178	47,1	57,38
22	1	2	0,25	51	60,83
23	1	3	0,09	220	64,72
24	1	4	0,21	37,1	47,88
25	1	5	0,177	23,7	45,98
26	2	1	0,185	35,1	55,04
27	2	2	0,255	34,02	53,58
28	2	3	0,1	320	58,21
29	2	4	0,31	17	45,21
30	2	5	0,22	60	43,5
31	3	1	0,42	19	53,94
32	3	2	0,25	9,75	51,21
33	3	3	0,1	530	55,42
34	3	4	0,39	75	44,71
35	3	5	0,345	69	42,59
36	4	1	0,426	98	48,74
37	4	2	0,583	37,9	50,57
38	4	3	0,14	872	44,71
39	4	4	0,29	218	45,98
40	4	5	0,258	125	43,98

Fonte: Própria autora.

Figura 4.3: Gráfico da velocidade de sedimentação em função da dosagem do floculante.



Fonte: Própria autora.

O floculante Magnafloc 611 promoveu menor influência na velocidade de sedimentação, em todos os níveis avaliados, tendo seu maior desempenho para a dosagem de 120 g/t (0,140 cm/s), que é 4,16 vezes menor que o maior valor de velocidade de sedimentação obtido (0,583 cm/s). Após processar os dados no software Minitab 21, obteve-se a tabela de ANOVA, tabela 4.4, proveniente da análise estatística do experimento.

Tabela 4.4: ANOVA para velocidade de sedimentação.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	19	0,60	97,21%	0,60	0,03	36,70	0,00
Linear	7	0,45	72,10%	0,45	0,06	73,89	0,00
A	3	0,17	27,68%	0,17	0,05	66,18	0,00
B	4	0,27	44,43%	0,27	0,06	79,68	0,00
Interações de 2 fatores	12	0,15	25,11%	0,15	0,01	15,01	0,00
A*B	12	0,15	25,11%	0,15	0,01	15,01	0,00
Erro	20	0,017	2,79%	0,01	0,00		
Total	39	0,62	100,00%				

Fonte: Própria autora.

Na tabela 4.4, qualquer efeito que apresente valor-p menor ou igual a 0,05, ou seja, menor que o nível de significância de 5%, é considerado, do ponto de vista estatístico significativamente importantes na resposta. Desta forma, pode-se dizer que, tanto o fator A (dosagem do floculante), como B (tipo de floculante), e a interação entre estes fatores (A\*B) são importantes para a velocidade de sedimentação. Com relação a contribuição de cada fator (variável) na variabilidade da resposta, observa-se que B é o fator de maior importância, contribuindo com 44,43% da variabilidade da velocidade de sedimentação. Logo, a variação do tipo de floculante promoveu uma alteração maior na velocidade de sedimentação. Outra informação importante inferida da tabela de ANOVA é no que diz respeito ao erro, pode-se dizer que se trata de um erro relativamente pequeno, já que este fato contribuiu apenas com 2,79% no valor total da resposta.

Para avaliar a qualidade do modelo obtido, pode ser analisado o valor de  $R^2_{(ajustado)}$ , que representa o percentual de variação da resposta que o modelo previsto consegue explicar. Para o sistema analisado, o  $R^2_{(ajustado)}$  foi de 94,56%, mostrando que o modelo está relativamente bem ajustado, ao passo que apenas 5,44% das respostas não se encaixam ao modelo.

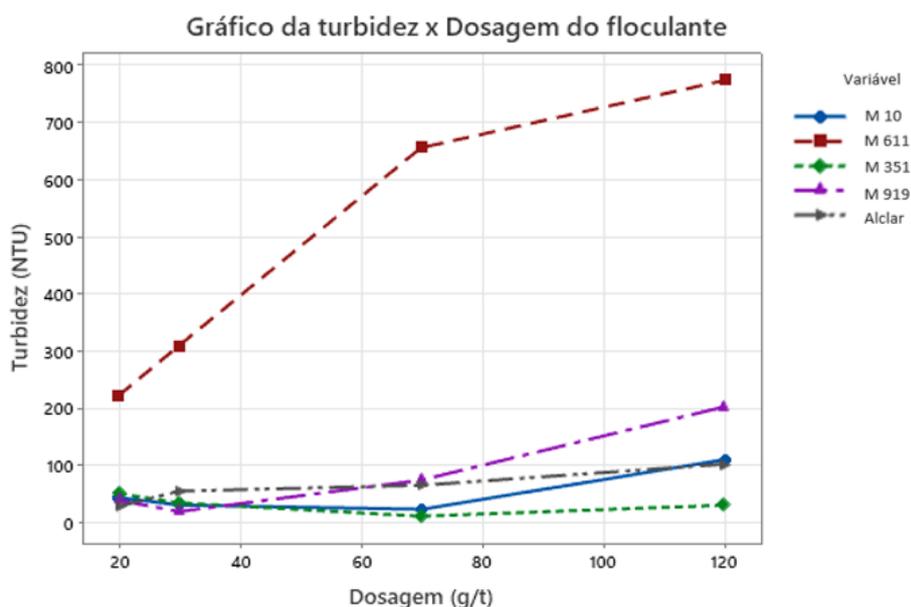
#### ▪ *Turbidez*

A turbidez do clarificado foi aferida após o tempo final dos testes. Os resultados para esse parâmetro estão apresentados graficamente na figura 4.4. Percebe-se observando a figura 4.4 que o aumento da dosagem dos floculantes promoveu uma elevação no valor da turbidez, para o Magnafloc 611 esse efeito é mais intenso. Esse floculante propiciou uma menor captura das partículas finas em todas as dosagens avaliadas neste estudo, gerando valores mais altos para a turbidez do clarificado, este mesmo reagente também promoveu baixas velocidade de sedimentação, o combinado desses resultados pode indicar uma fraca interação entre o reagente e o rejeito. Outro ponto importante a ser ressaltado é que o floculante Magnafloc 351, além de ter fornecido a maior velocidade de sedimentação, foi mais eficiente na adsorção nas partículas mais finas para dosagens maiores que 30g/t.

A tabela 4.5 apresenta os resultados da análise estatística dos ensaios, fornecida pelo tratamento dos dados no Minitab 21, denominada tabela de ANOVA. Nesse caso a participação da variável B na variabilidade da turbidez é de 69,33 % enquanto a variável A (dosagem de floculante) contribui com apenas 10,25 %. Mesmo com menores valores de contribuição no

resultado, tanto a variável A, como a interação AB contribuem de maneira significativa, pois apresentam o valor-p menor que o valor  $\alpha$  (nível de significância) de 5 %. O erro aleatório, contribui com uma fração muito pequena (3,04%) na variação do resultado, atestando a qualidade do experimento. Com relação a métrica  $R^2_{(ajustado)}$ , pode-se dizer que o modelo está bem ajustado e que consegue explicar 94,06% das variações nas respostas de turbidez.

Figura 4.4: Gráfico da Turbidez em função da dosagem do reagente floculante.



Fonte: Própria autora.

Tabela 4.5: ANOVA para a turbidez do clarificado

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM(Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	19	1704753	96,96%	1704753	89724	33,53	0,000
Linear	7	1399142	79,57%	1399142	199877	74,70	0,000
A	3	180172	10,25%	180172	60057	22,44	0,000
B	4	1218971	69,33%	1218971	304743	113,88	0,000
Interações de 2 fatores	12	305611	17,38%	305611	25468	9,52	0,000
A*B	12	305611	17,38%	305611	25468	9,52	0,000
Erro	20	53518	3,04%	53518	2676		
Total	39	1758271	100,00%				

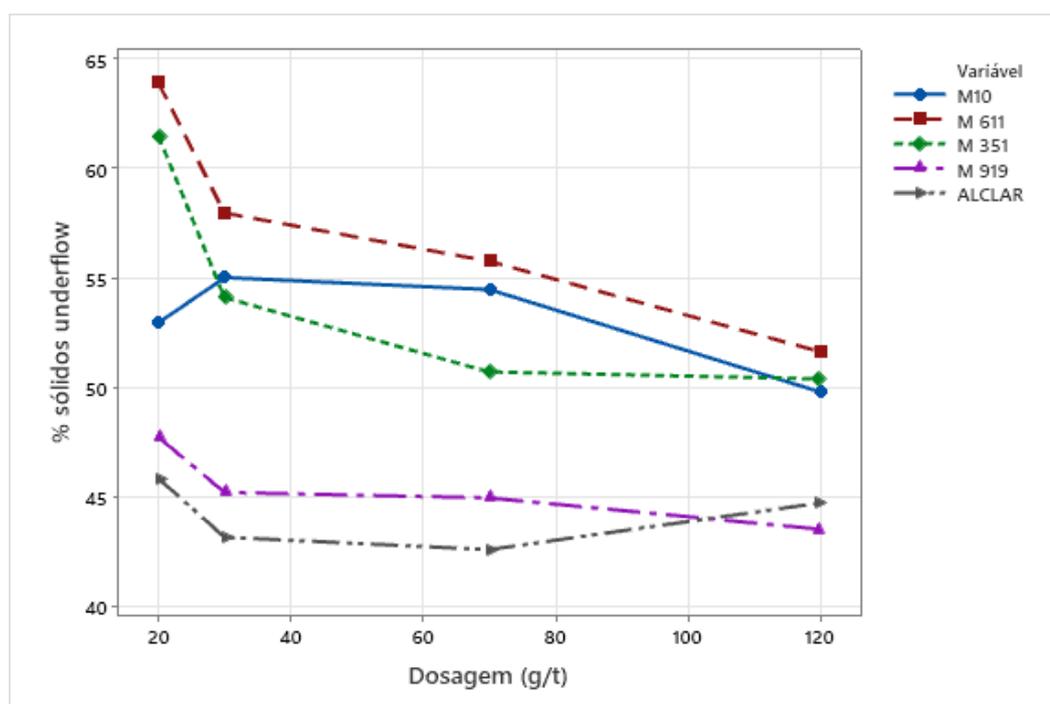
Fonte: Própria autora.

Analisando as tabelas 4.4 e 4.5, observa-se que a variável B (tipo de floculante), tem uma contribuição bem maior para a qualidade do clarificado que para velocidade de sedimentação. Este resultado mostra a importância da escolha do tipo de floculante, uma vez que buscamos tanto alta produtividade do espessamento (velocidade de sedimentação alta) quanto baixa turbidez no clarificado, que será reutilizado no processo.

▪ *Percentual de sólidos no underflow*

O percentual de sólidos no *underflow* foi calculado a partir da medida da altura da interface sólido/líquido ao final dos testes e considerando-se que todo o material sólido foi sedimentado. A figura 4.5 apresenta os resultados dessa variável em função da dosagem e do tipo de floculante.

Figura 4.5: % de sólidos no *underflow* em função do floculante

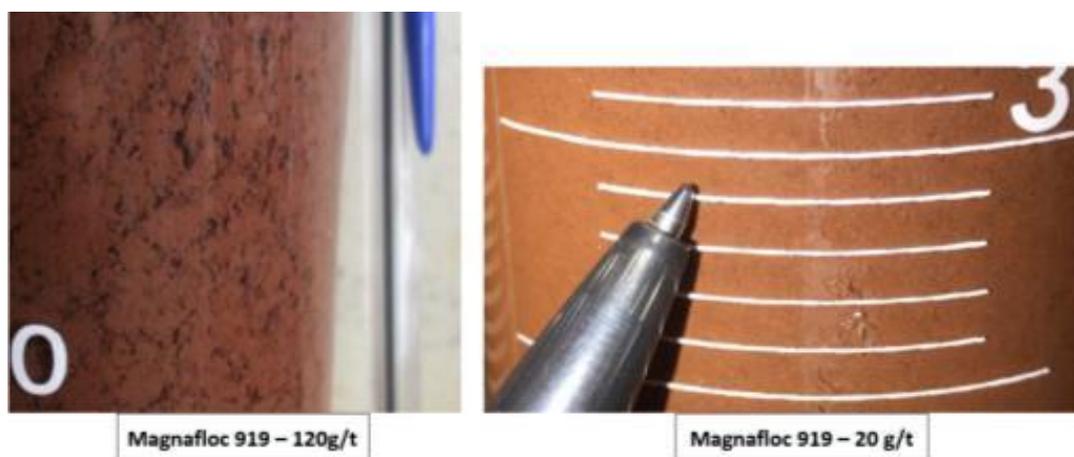


Fonte: Própria autora

A figura 4.5 mostra que para os floculantes Magnafloc 351, Magnafloc 919 e Magnafloc 611, o aumento da dosagem acarretou na diminuição do percentual de sólidos no *underflow*. O

tamanho do floco formado interfere nesse percentual de sólidos, logo que, flocos grandes tem a capacidade de armazenar água em seu interior reduzindo o percentual de sólidos no *underflow*. Na figura 4.6 é possível observar a variação no tamanho dos flocos com a mudança da dosagem do reagente.

Figura 4.6: tamanho do floco para dosagens diferentes



Fonte: Própria autora

A análise estatística dos resultados do planejamento fatorial, forneceu a tabela de ANOVA para a resposta percentual de sólidos no *underflow*. Esses resultados estão dispostos na tabela 4.6.

Tabela 4.6: ANOVA do percentual de sólidos no *underflow*.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	19	1530,5	92,79%	1530,5	80,551	13,55	0,000
Linear	7	1408,0	85,37%	1408,0	201,148	33,85	0,000
A	3	282,5	17,13%	282,5	94,154	15,84	0,000
B	4	1125,6	68,24%	1125,6	281,393	47,35	0,000
Interações de 2 fatores	12	122,4	7,42%	122,4	10,202	1,72	0,138
A*B	12	122,4	7,42%	122,4	10,202	1,72	0,138
Erro	20	118,9	7,21%	118,9	5,943		
Total	39	1649,3	100,00%				

Fonte: Própria autora

Avaliando os resultados da tabela ANOVA (Tabela 4.6), pode-se observar que a variável B (tipo de reagente) tem maior influência na variação do percentual de sólidos do *underflow* do que A (dosagem do reagente), contudo, a interação entre os fatores, dentre os níveis avaliados, não interfere de maneira significativa na resposta (valor-p maior que 0,05). Observa-se agora, que, o valor da contribuição do erro (7,21%) na variação do resultado é relativamente maior quando comparadas as demais respostas avaliadas. Este fato pode ser explicado, levando em consideração que, a altura da interface é medida de forma manual, pelo operador do ensaio, logo, a probabilidade de ocorrer erro na medição é potencialmente maior. O valor de  $R^2$  (ajustado) aponta que o modelo explica 85,95% da variação nas respostas.

Os efeitos (principais e/ou de interação) não significativos são considerados como sendo da magnitude do erro experimental. Uma estratégia comum é retirar os termos não significativos do modelo agrupando-os ao erro na tabela de ANOVA, e assim a tendência é melhorar a qualidade de previsão do modelo obtido. Ao realizar este processo, tem-se outra tabela de ANOVA, a qual é apresentada na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Nova tabela de ANOVA após “limpeza” do modelo.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	1408,0	85,37%	1408,0	201,148	26,68	0,000
Linear	7	1408,0	85,37%	1408,0	201,148	26,68	0,000
A	3	282,5	17,13%	282,5	94,154	12,49	0,000
B	4	1125,6	68,24%	1125,6	281,393	37,32	0,000
Erro	32	241,3	14,63%	241,3	7,540		
Falta de ajuste	12	122,4	7,42%	122,4	10,202	1,72	0,138
Erro puro	20	118,9	7,21%	118,9	5,943		
Total	39	1649,3	100,00%				

Fonte: Própria autora

A nova tabela de ANOVA apresenta agora apenas os efeitos importantes ao nível de significância de 5%. Um fato importante apontado nesta tabela, é que, a falta de ajuste não é

significativa. Um novo valor de sumário também foi gerado e a comparação entre os sumários dos modelos está apresentada na tabela 4.8.

Tabela 4.8: Comparação entre sumários dos modelos.

	$R^2_{\text{(ajustado)}}$	$R^2_{\text{(predição)}}$	AICc
Primeiro modelo	85,95%	71,17%	250,41
Modelo ajustado	82,17%	77,14%	209,40

Fonte: Própria autora.

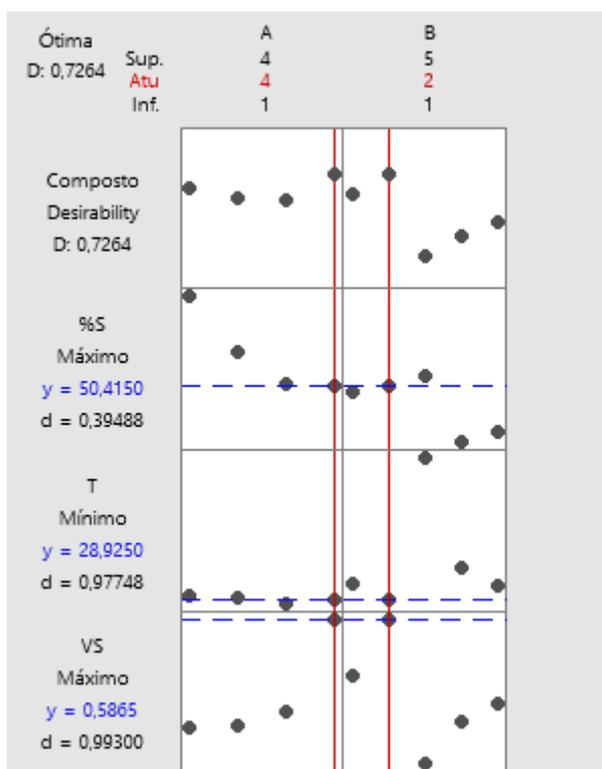
O novo modelo fornece um valor de  $R^2_{\text{(ajustado)}}$  menor que o modelo anterior, mas em compensação tem-se uma redução no valor de AICc, que é uma métrica importante na escolha do modelo, sendo que, quanto menor o valor de AICc, melhor é o modelo. Outro fato importante é que o  $R^2_{\text{(predição)}}$  para o novo modelo também é maior, assegurando que a capacidade de previsão do novo modelo é mais efetiva.

#### ▪ *Otimização da resposta*

Visando uma maior eficiência na sedimentação utilizando-se reagentes flocculantes foi realizada uma otimização das respostas com o Minitab 21. O objetivo é escolher um reagente que proporcione em conjunto maior velocidade de sedimentação e percentual de sólidos, bem como menores valores para a turbidez, já que o tipo de reagente foi a variável mais significativa. A figura 4.7 aponta, dentre as condições avaliadas, os parâmetros ideais para que se possa obter as respostas com melhor alcance.

Conforme evidencia a figura 4.7, deve-se utilizar a variável A (dosagem de reagente) no nível 4 (120 g/t) e a variável B (tipo de reagente) no nível 2 (Magnafloc 351), para se obter os melhores resultados de sedimentação. Neste caso, os parâmetros otimizados fornecem uma velocidade de sedimentação de 0,586 cm/s, uma turbidez de 28,925 NTU e um percentual de sólidos no *underflow* igual a 50,41%.

Figura 4.7: Otimização das respostas



### 4.3.2 Análise segunda etapa (Amido de batata)

Nos ensaios da segunda etapa foi avaliado o uso do amido residual de batata como reagente floculante. A variável analisada foi a dosagem do amido, foi verificado o efeito da dosagem nas três variáveis dependentes: velocidade de sedimentação, turbidez do clarificado e percentual de sólidos no *underflow*.

Como a única variável nesta etapa é a dosagem do reagente, a forma mais fácil de se ver a relação que essa variável tem com as respostas é através da regressão linear. Assim, foi realizada através do Minitab 21 a regressão para cada uma das respostas, as dosagens avaliadas foram 70, 120, 500 e 1000 g/t do amido de batata.

- *Velocidade de sedimentação*

Para a velocidade de sedimentação a equação de regressão (equação 4.1) fornecida pela análise do Minitab 21, aponta que o modelo que melhor se adequa aos resultados é o modelo

quadrático, onde D é a dosagem. O valor de  $R^2$  (ajustado) para este modelo é de 94,49%, o que significa que se tem um modelo bem ajustado.

$$V_s = 0,08551 + 0,000329 D - 0,000000 D^2 \quad [4.1]$$

A tabela de ANOVA, representada pela tabela 4.9, mostra que o termo linear da equação tem contribuição de 68,75% na resposta, enquanto o termo quadrático contribui com 27,31%. Outro dado importante que pode ser observado na tabela é que o valor do erro é relativamente pequeno, interferindo em apenas 3,93% na variação da resposta.

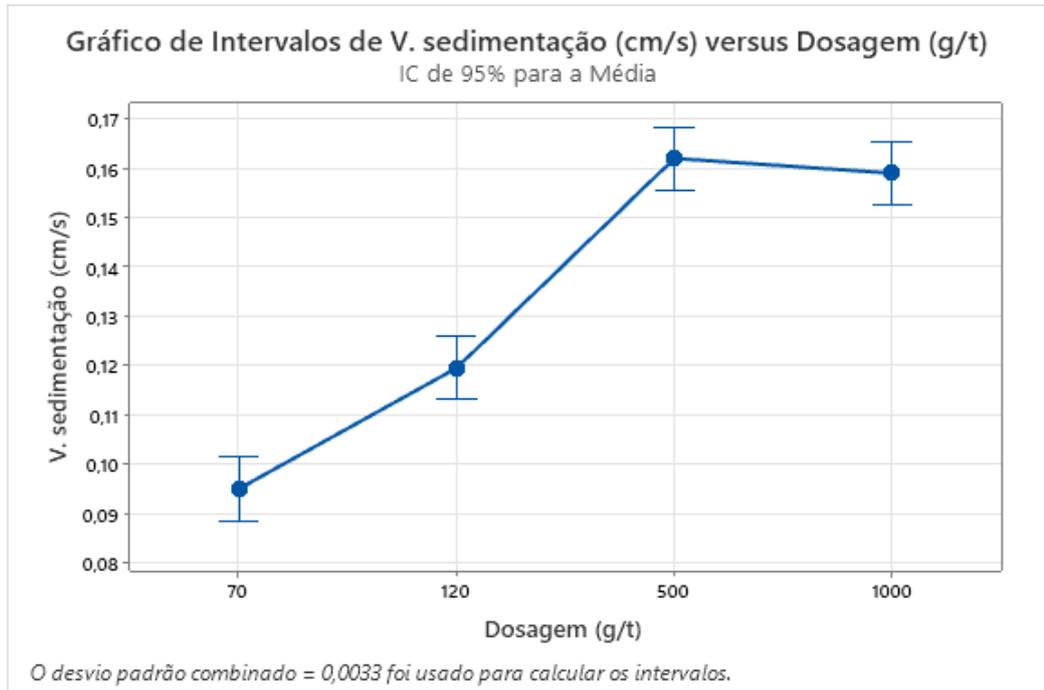
Tabela 4.9: ANOVA para a velocidade de sedimentação

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	0,006074	96,07%	0,006074	0,003037	61,07	0,000
D	1	0,004347	68,75%	0,003018	0,003018	60,68	0,001
D*D	1	0,001727	27,31%	0,001727	0,001727	34,73	0,002
Erro	5	0,000249	3,93%	0,000249	0,000050		
Falta de ajuste	1	0,000206	3,26%	0,000206	0,000206	19,40	0,012
Erro puro	4	0,000043	0,67%	0,000043	0,000011		
Total	7	0,006323	100,00%				

Fonte: Própria autora.

A figura 4.8 apresenta variação da velocidade de sedimentação em função da dosagem do amido. Dentre os níveis estudados, percebe-se que o aumento da dosagem do reagente de 70 até 500 g/t provoca um aumento na velocidade de sedimentação, a partir desse nível de dosagem, percebe-se uma pequena queda na velocidade de sedimentação, a diminuição da velocidade de sedimentação na dosagem mais elevada do amido pode ter sido proporcionada pelo fato do reagente estar super-dosado, causando redispersão das partículas (OLIVEIRA *et al.* 2004).

Figura 4.8: Gráfico da velocidade de sedimentação em função da dosagem de amido de batata.



Fonte: Própria autora.

#### ▪ Turbidez do clarificado

A equação 4.2 representa a equação de regressão para a turbidez do clarificado, analisando esta equação pode-se indicar que, a relação da dosagem de amido com a turbidez do clarificado é uma relação de terceiro grau. O valor de  $R^2$  (ajustado) do modelo é 99,41%, um valor muito próximo de 100%, indicando assim que se tem um modelo bem ajustado

$$T = 866,3 - 8,66 D + 0,02693 D * D - 0,000018 D * D * D \quad [4.2]$$

Observando a tabela de ANOVA (tabela 4.10), oriunda da análise de regressão, é possível observar que o termo linear da equação representa 72,45% da resposta, o termo quadrado contribui com 17,35% e já a relação de terceiro grau apresenta uma contribuição de 9,86%. Outro ponto importante é o pequeno percentual que o erro contribui na resposta (0,34%), reiterando que se tem um modelo bem adequado.

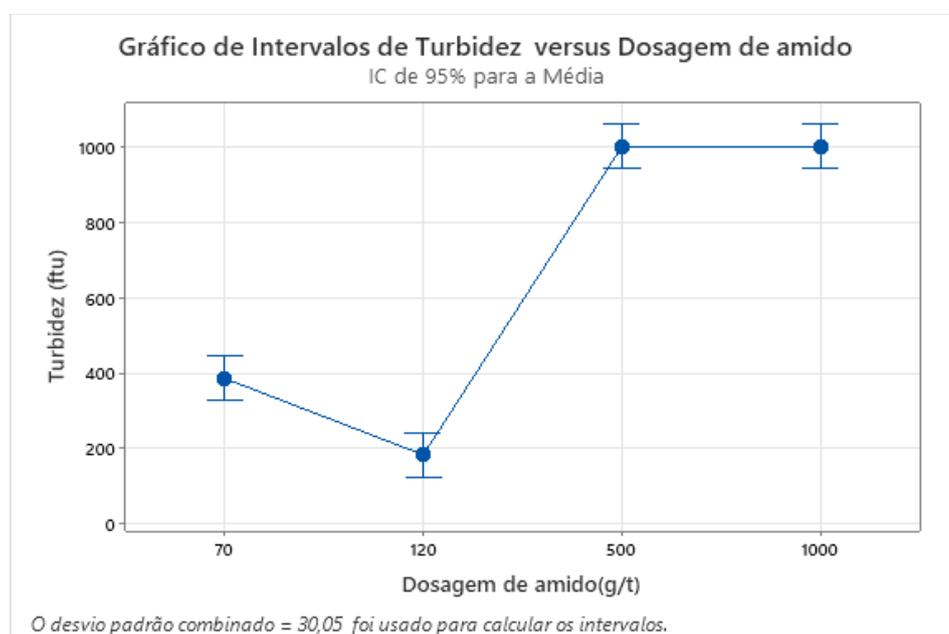
Tabela 4.10: ANOVA para a turbidez do clarificado.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	3	1065602	99,66%	1065602	355201	393,30	0,000
D	1	774634	72,45%	60740	60740	67,26	0,001
D*D	1	185506	17,35%	92992	92992	102,97	0,001
D*D*D	1	105462	9,86%	105462	105462	116,77	0,000
Erro	4	3613	0,34%	3613	903		
Total	7	1069215	100,00%				

Fonte: Própria autora.

A figura 4.9 apresenta os resultados da turbidez do clarificado em função da dosagem de amido de batata. Nela podemos observar que o menor valor de turbidez encontrado foi quando se utilizou o reagente na dosagem de 120 g/t. Para as dosagens de 500 e 1000 g/t a turbidez atingiu o ápice de medição do aparelho que é de 1000 NTU. No ensaio com menor valor da dosagem do reagente percebe-se que as condições de turbidez não foram as melhores, o que pode ter ocorrido pois a quantidade de reagente adicionado não foi suficiente para a efetiva formação de flocos e consequente captura das partículas finas, já em dosagens elevadas, as partículas podem ter se dispersado, tornando a turbidez do sobrenadante mais alta.

Figura 4.9: Gráfico da turbidez em função da dosagem de amido.



Fonte: Própria autora.

▪ *Percentual de sólidos no underflow*

Assim como para a turbidez, a relação entre a dosagem de amido com o percentual de sólidos no *underflow* é de terceiro grau, conforme mostra a equação de regressão (equação 4.3).

$$\%S = 48,59 + 0,2035 D - 0,000523 D^*D + 0,000000 D^*D^*D \quad [4.3]$$

A partir da tabela de ANOVA, apresentada na tabela 4.11, nota-se que a fração de terceiro grau é a que mais contribui para a resposta percentual de sólidos no *underflow*, apresentando uma contribuição de 62,31%, outra análise importante é no que diz respeito ao erro, que neste caso contribui com apenas 3,23% na resposta. A porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, representada pelo valor de R<sup>2</sup> (ajustada) é de 94,34%, um valor relativamente alto, mostrando o quão adequado está o modelo cedido pela regressão.

Tabela 4.11: ANOVA para percentual de sólidos no *underflow*.

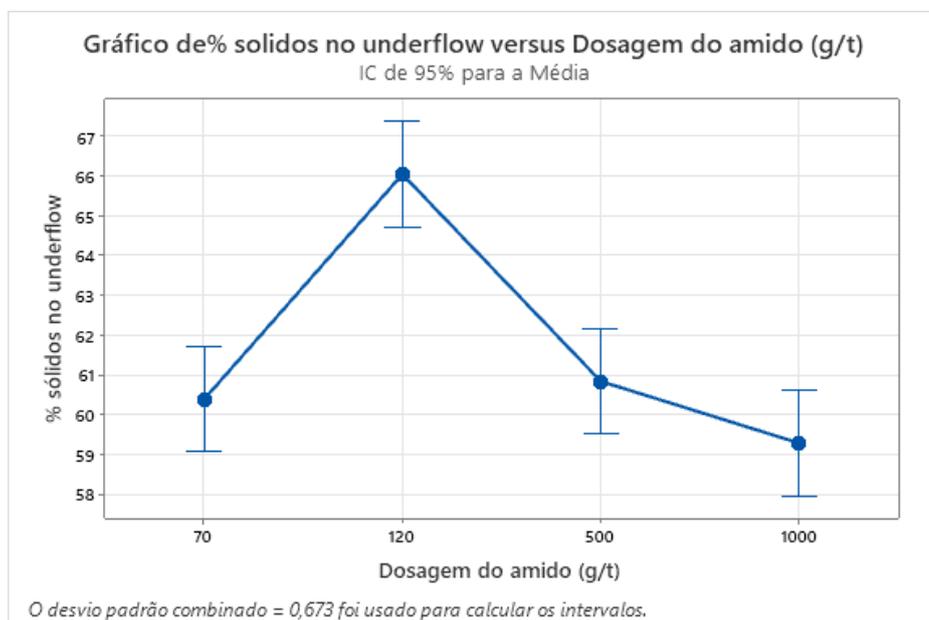
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	3	54,3809	96,77%	54,381	18,1270	39,92	0,002
D	1	19,2795	34,31%	33,505	33,5048	73,79	0,001
D*D	1	0,0825	0,15%	35,101	35,1010	77,30	0,001
D*D*D	1	35,0189	62,31%	35,019	35,0189	77,12	0,001
Erro	4	1,8163	3,23%	1,816	0,4541		
Total	7	56,1972	100,00%				

Fonte: Fonte: Própria autora

Analisando a figura 4.10 percebe-se que dentre os níveis avaliados, a concentração de sólidos foi maximizada quando se utilizou a dosagem de 120 g/t do amido de batata, a partir desta dosagem o percentual de sólidos volta a decrescer. Uma observação importante é que o percentual de sólidos no *underflow* conseguido utilizando-se o amido de batata a 120 g/t - (66% de sólidos) - é superior ao encontrado na melhor condição operacional dos reagentes avaliados

na primeira etapa. Este aumento do percentual de sólidos para o amido, pode ter sido ocasionado pelo fato de que o reagente natural proporciona flocos menores, capazes de armazenar menor quantidade de água em seu interior, impactando assim no percentual de sólidos do *underflow*.

Figura 4.10: Percentual de sólidos em função da dosagem de amido.

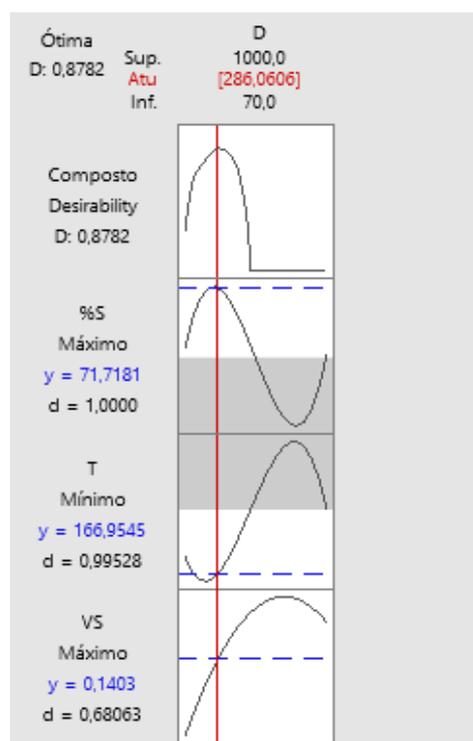


Fonte: Própria autora.

#### ▪ Otimização da resposta

Tomando-se como base que a desejabilidade para as respostas é o máximo de velocidade de sedimentação, o mínimo de turbidez e o máximo de percentual de sólidos no *underflow*, foi realizada a otimização dentre os níveis de dosagem de amido avaliados, estes resultados estão apresentados na figura 4.11. A figura 4.11 aponta que para se obter os melhores valores simultaneamente para os parâmetros avaliados, deve-se trabalhar com uma dosagem do amido em 286,06 g/t, conseguindo assim uma velocidade de sedimentação de 0,14 cm/s, turbidez de 166,95 NTU e 71,71% de sólidos no *underflow*, um fato importante é que este valor de dosagem otimizado se encontra dentre os intervalos dos níveis avaliados.

Figura 4.11: Otimização da resposta



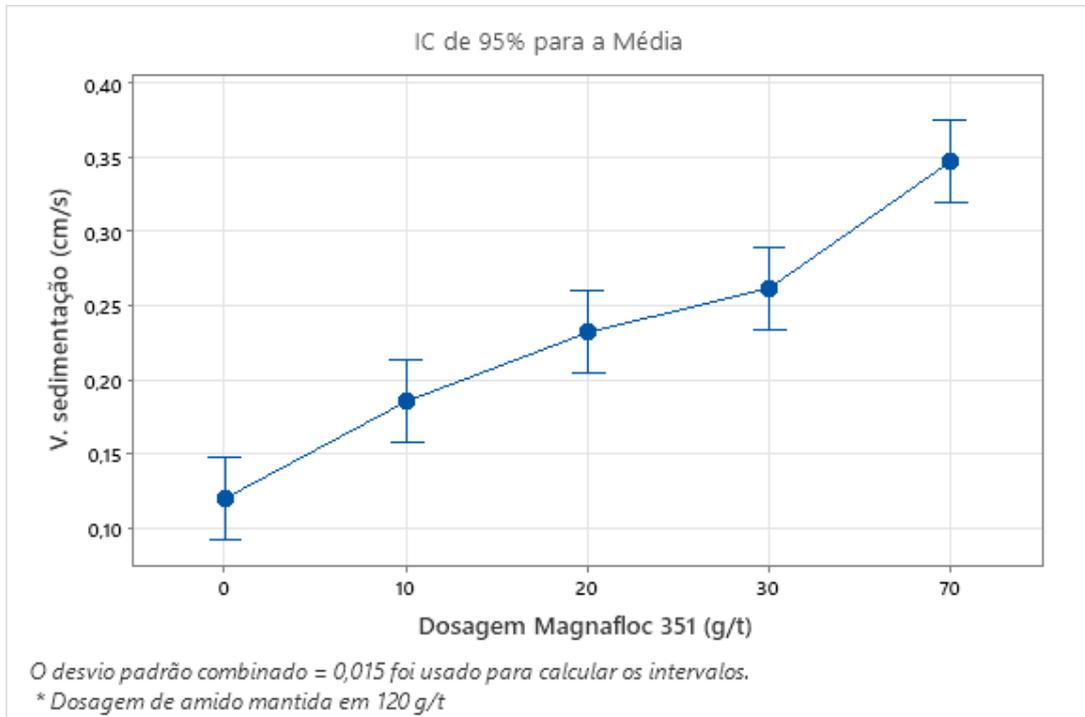
Fonte: Própria autora

Foi realizada uma outra análise, em que se adicionou uma quantidade do floculante Magnafloc 351, que dentre as poliacrilamidas sintéticas avaliadas, foi o que apresentou melhor resultado, juntamente com o amido, a fim de avaliar se esta mistura iria proporcionar uma melhoria nos resultados da sedimentação com o floculante natural. A dosagem de amido fixada nesses ensaios foi de 120 g/t que foi escolhida pelo motivo que, dentre as dosagens menores que a otimizada, esta foi a que proporcionou melhores respostas para os parâmetros avaliados, quando atuando sozinho. Foram então avaliadas as adições de 10, 20, 30 e 70 g/t da poliacrilamida Magnafloc 351. Os resultados para a velocidade de sedimentação, turbidez do clarificado e percentual de sólidos no *underflow* estão apresentados nas figuras 4.12, 4.13 e 4.14, respectivamente. Os ensaios foram realizados em duplicata.

Na figura 4.12 percebe-se que uma pequena adição da poliacrilamida misturada ao amido promove um significativo aumento (24,16%) na velocidade de sedimentação quando comparado ao resultado da otimização do amido (286,06g/t). Já com relação a turbidez, os resultados apresentados na figura 4.13 apontam que as misturas contendo 20 e 30 g/t promoveram uma redução na turbidez do clarificado. Para o percentual de sólidos no *underflow*, a mistura não se mostra favorável em nenhuma das dosagens avaliadas neste estudo, ao passo que a adição da poliacrilamida junto ao amido proporcionou diminuição do percentual de

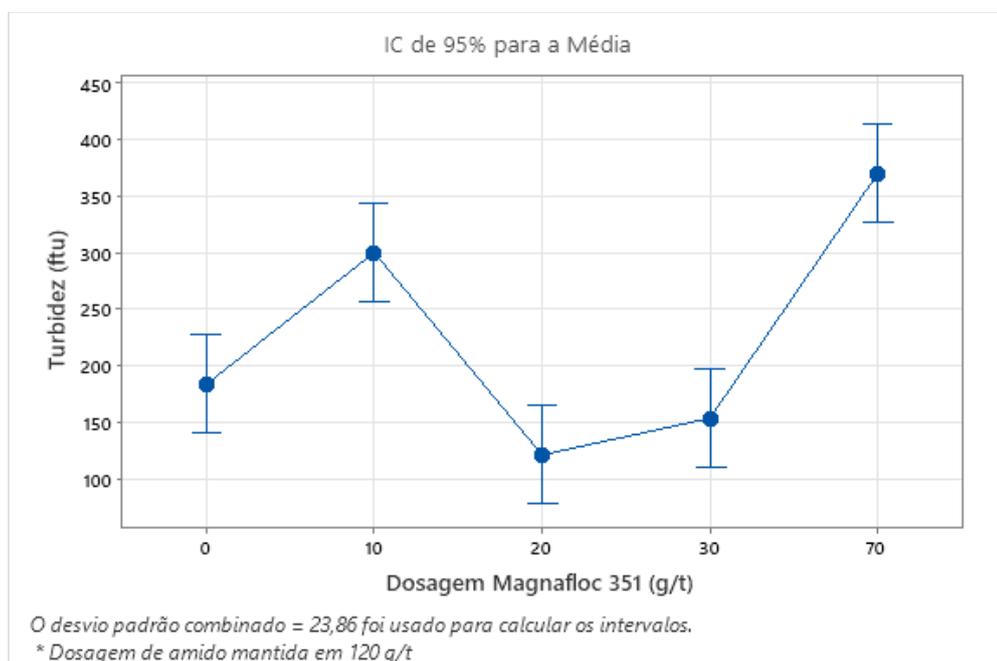
sólidos no *underflow*, que pode ser explicado pelo fato de os flocos formados na mistura terem diâmetro maiores do que os flocos formados apenas pelo amido, fazendo com que mais água pudesse ser armazenada em seu interior.

Figura 4.12: Velocidade de sedimentação em função da dosagem de Magnafloc 351 na mistura.



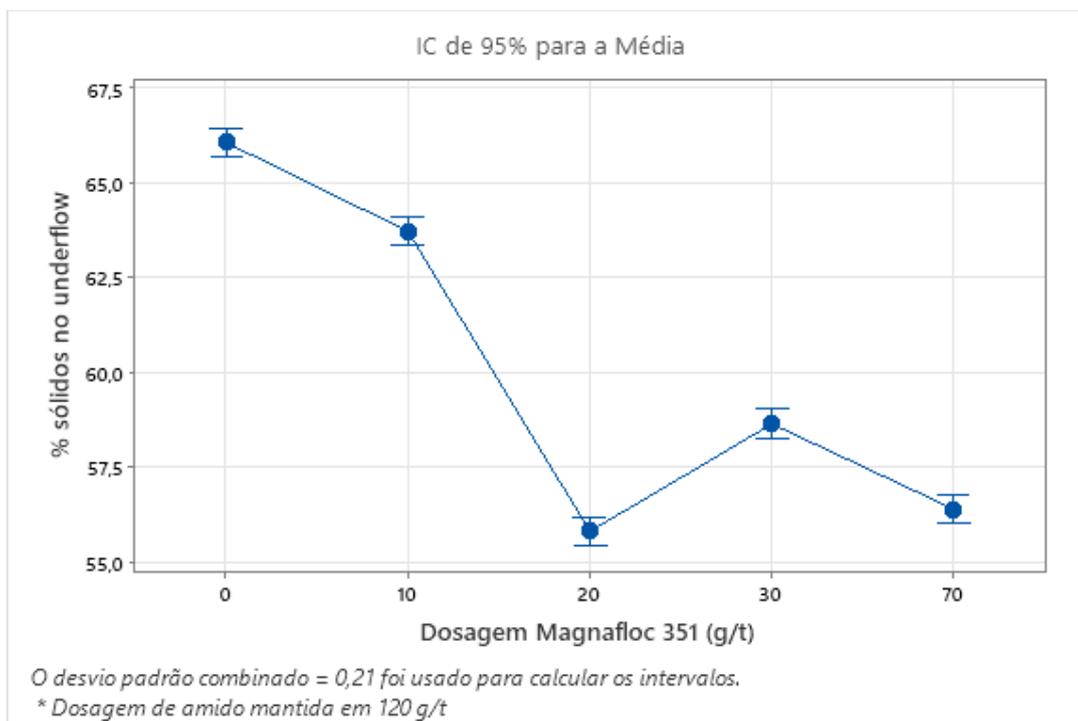
Fonte: Própria autora

Figura 4.13: Turbidez em função da dosagem de Magnafloc 351 na mistura.



Fonte: Própria autora

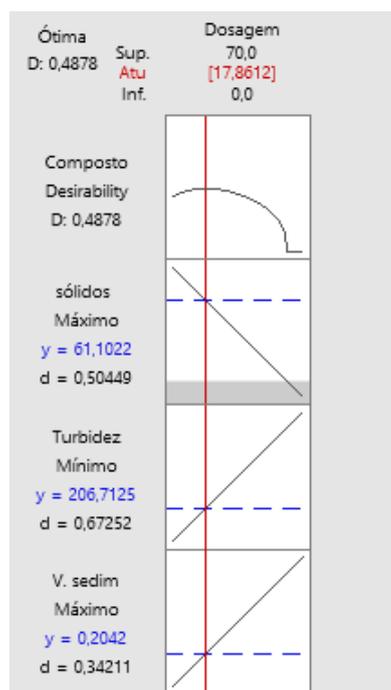
Figura 4.14: Gráfico percentual de sólidos no *underflow* em função da dosagem de Magnafloc 351 na mistura.



Fonte: Própria autora

Foi realizada a otimização das respostas, utilizando-se o Minitab 21, a figura 4.15 apresenta os resultados da otimização. Os resultados apresentados na figura 4.15 apontam que para a mistura amido + Magnafloc 351, o cenário que proporciona simultaneamente as melhores respostas é utilizando-se 120 g/t de Amido + 17,86 g/t de Magnafloc 351. Utilizando-se a mistura nesta proporção será obtida uma velocidade de sedimentação de 0,2 cm/s, turbidez de 206,7 NTU e um percentual de sólidos no *underflow* de 61,10%. Comparando esses resultados aos resultados otimizados, em que o amido atuou sozinho, percebe-se que a velocidade de sedimentação é superior quando se usa a mistura otimizada, pois a poliacrilamida tem maior efetividade na captura das partículas, principalmente as partículas finas que por apresentarem maior área de superfície possuem maior potencial de adsorção, quando comparada ao amido. Contudo, a poliacrilamida na condição otimizada e sem mistura proporciona resultados mais satisfatórios.

Figura 4.15: Otimização da resposta para a mistura de amido com Magnafloc 351.



Fonte: Própria autora

### 4.3.3 Análise da terceira etapa (Rheomax)

Para a análise da influência dos reagentes Rheomax 1050 e Rheomax 1010, foi montado um planejamento fatorial com dois fatores e dois níveis, sendo que o nível mais baixo para a variável B (dosagem do reagente) foi 30 g/t e o mais alto de 70 g/t. Estes valores foram estabelecidos a partir de ensaios preliminares que mostraram que dosagens menores destes reagentes eram mais satisfatórias que as dosagens mais elevadas. Conforme mostra a tabela 4.12.

A Figura 4.16 mostra que os efeitos principais ou de interação que estiverem à direita da reta normal têm influência positiva sobre a resposta quando do aumento do seu nível. Já os efeitos que estiverem à esquerda da reta normal apresentam efeito negativo sobre a resposta quando se passa o fator ou variável do seu nível baixo para o seu nível alto.

Conforme a análise do gráfico normal dos efeitos padronizados, para a velocidade de sedimentação apenas a interação entre o tipo de reagente e a dosagem influenciou na resposta, em um nível de significância de 95,5%. Para a turbidez, observa-se que nenhum fator e nem mesmo a interação entre eles tiveram efeito significativo na resposta. A dosagem do reagente

foi um fator de influência significativa apenas para o percentual de sólidos no *underflow*, diminuindo o valor da resposta quando se utiliza o nível mais baixo (30g/t).

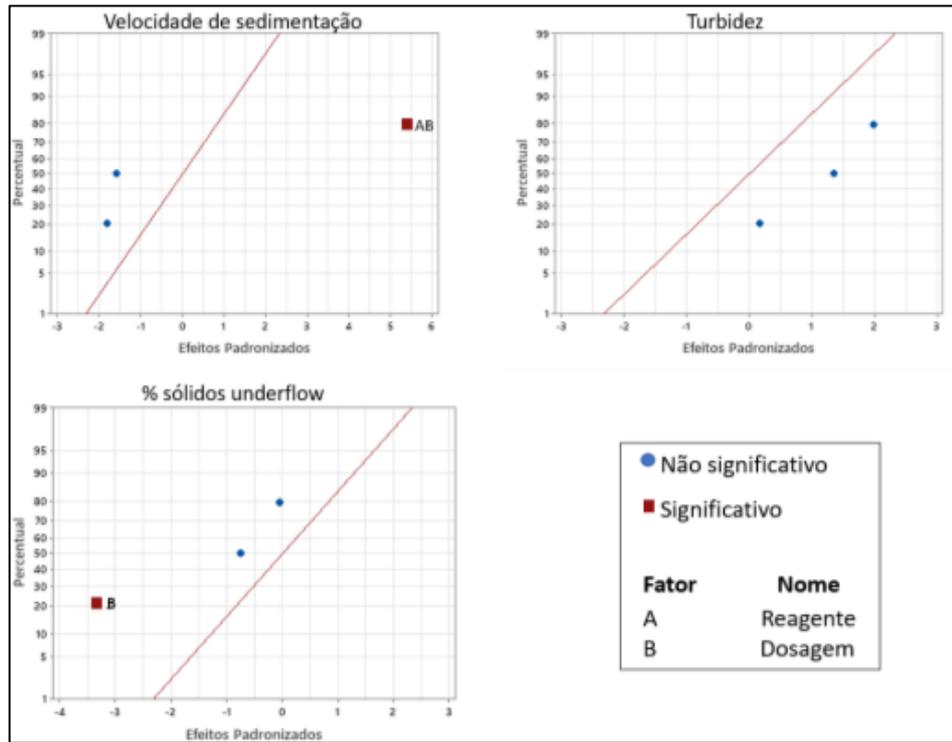
Tabela 4.12: Ensaio de sedimentação preliminares com Rheomax.

Rheomax 1050			
Dosagem do reagente	Velocidade de sedimentação (cm/s)	Turbidez (NTU)	% sólidos underflow
20	0,58	158	72,5
20	0,63	135	68,3
30	0,79	81	53,58
30	0,74	40	53,94
70	0,6	107	49,64
70	0,61	108	49,95
120	0,52	293	43,2
120	0,48	385	42,8
Rheomax 1010			
Dosagem do reagente	Velocidade de sedimentação (cm/s)	Turbidez (NTU)	% sólidos underflow
20	0,42	128	58,3
20	0,48	85	59,8
30	0,58	57	57,8
30	0,64	208	51,87
70	0,71	208	47,88
70	0,67	178	49,3
120	0,59	203	52,6
120	0,61	198	49,8

Fonte: Própria autora.

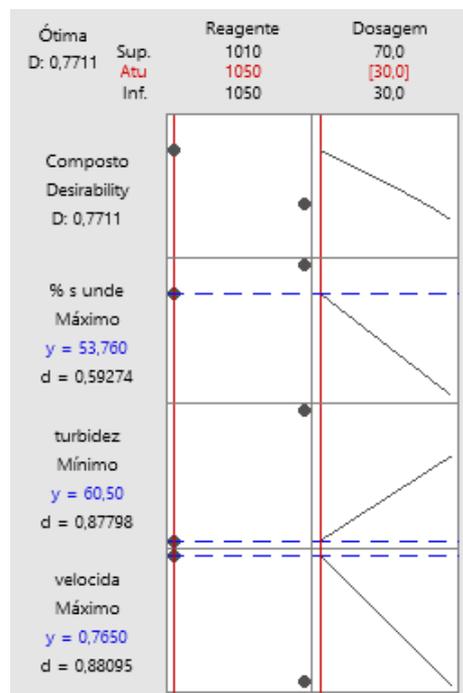
Para avaliar a dosagem mais adequada do reagente, lança-se mão da ferramenta otimizador de respostas do *software* Minitab 21, indicando que com 30 g/t é possível obter resultados satisfatórios, conforme mostra a figura 4.17. Diferentemente dos reagentes da linha Magnafloc e do amido de batata, os reagentes da linha Rheomax não proporcionaram características muito divergentes nas respostas para a sedimentação do material, este fato, pode ter ligação com fato dos reagentes da linha Rheomax serem utilizados como modificadores de reologia, de acordo com o fabricante, já os floculantes da linha Magnafloc são destinados exclusivamente para a floculação.

Figura 4.16: Gráfico normal dos efeitos padronizados



Fonte: Própria autora.

Figura 4.17: Otimização da resposta para Rheomax

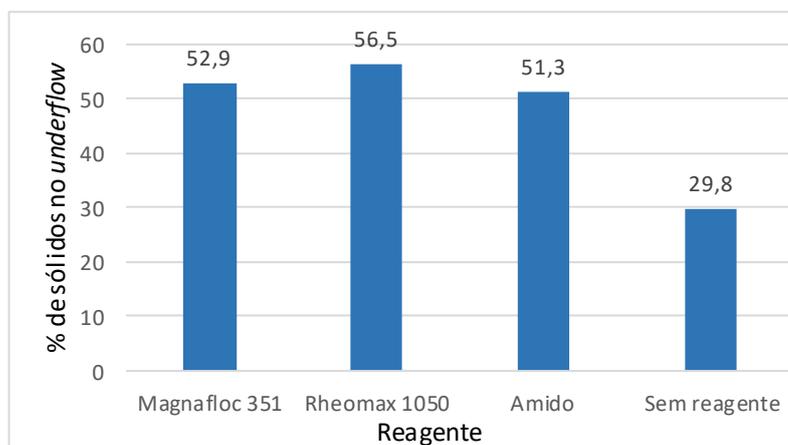


Fonte: Própria autora.

#### 4.4 Ensaios de sedimentação no sedimentador de pastas

Os ensaios no sedimentador de pastas foram realizados apenas com as condições otimizadas dos flocculantes, em tempo igual a uma hora para todos os ensaios. A figura 4.18 apresenta esses resultados.

Figura 4.18: Resultados de % de sólidos no *underflow* do sedimentador de pastas.



Fonte: Própria autora.

Na figura 4.18 é possível observar que, nestes ensaios os reagentes proporcionaram o mesmo padrão de comportamento para o percentual de sólidos no *underflow* que nos ensaios de proveta, sendo o Rheomax 1050 o reagente que proporcionou maior % de sólidos no *underflow*, seguido do Magnafloc 351 e do amido de batata. Percebe-se também que o ensaio de sedimentação em que não se utilizou flocculante apresentou um *underflow* com maior quantidade de água o que mostra a efetividade dos reagentes na captura das partículas sólidas.

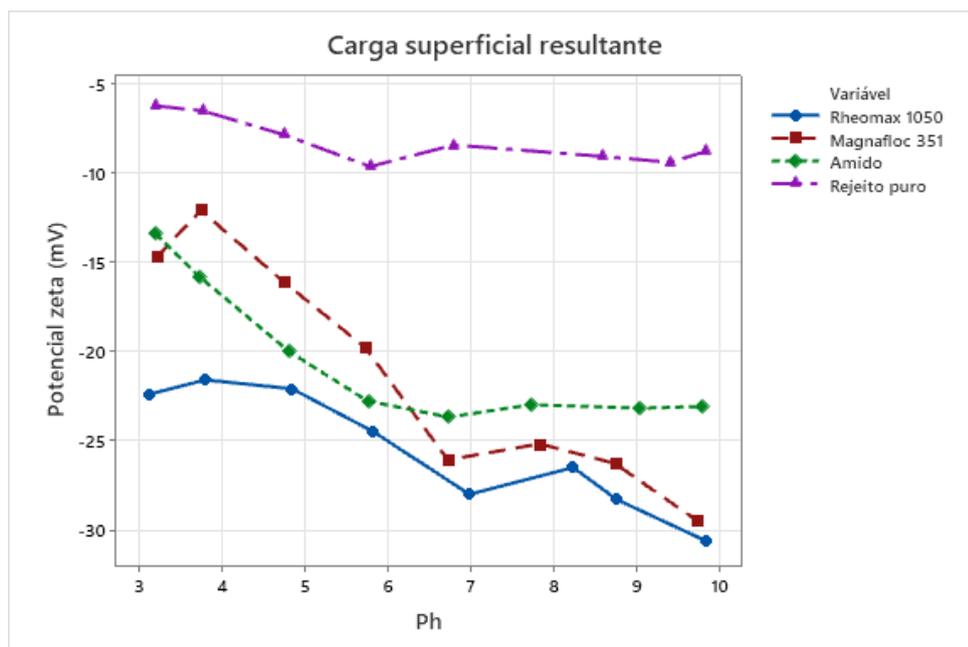
#### 4.5 Potencial zeta do rejeito na presença dos reagentes

A carga superficial resultante foi avaliada no rejeito sem a adição dos flocculantes (rejeito puro), e na presença dos reagentes Magnafloc 351, Rheomax EDT 1050 e do amido residual de batata.

Os resultados obtidos nas análises da carga superficial resultante, apresentados na figura 4.19, revelaram que tanto a superfície do rejeito sem adição dos flocculantes, como do mesmo

em contato com os reagentes possui carga residual de mesmo sinal, negativa, para toda faixa de pH avaliada. Os resultados mostraram também que em contato com os reagentes, a carga superficial teve seu potencial negativo intensificado, caracterizando assim uma adsorção química dos flocculantes na superfície dos sólidos, seguindo a mesma ordem dos ensaios de sedimentação Rheomax 1050, Magnafloc 351 e amido de batata.

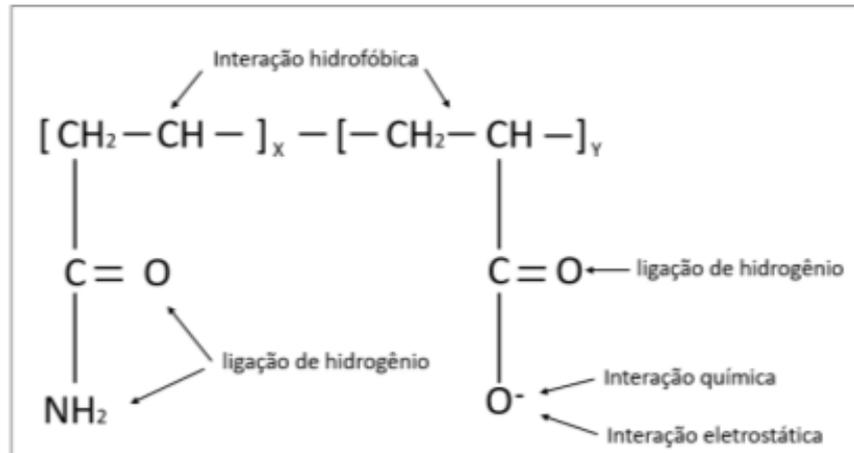
Figura 4.19: Carga superficial resultante do rejeito puro e na presença de reagentes



Fonte: Própria autora.

Baltar (2021), aponta que a adsorção das poliacrilamidas aniônicas, como as analisadas neste estudo, podem ocorrer através de mecanismos distintos, conforme apresentado na figura 4.20. Segundo o autor predominantemente ocorrem as ligações de hidrogênio, também podem ocorrer as interações hidrofóbicas através da cadeia hidrocarbônica da poliacrilamida, já a interação química acontece por intermédio da carboxila presente na poliacrilamida aniônica. É possível que um desses tipos de adsorção tenha ocorrido, já que, a atração eletrostática que é também um tipo de adsorção possível das poliacrilamidas, não pode ocorrer logo que, para que ocorra esse tipo de adsorção a superfície deveria ter carga positiva, o que não é o caso do rejeito avaliado nesse estudo.

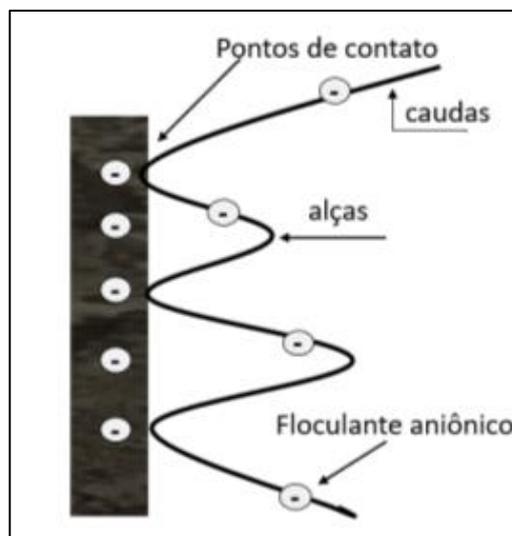
Figura 4.20: Mecanismos de adsorção da poliacrilamida aniônica.



Fonte: Baltar (2021)

O aumento do pH provocou um aumento em módulo da carga superficial da partícula, caracterizado pelo aumento do potencial zeta ou carga superficial resultante. A partícula ficou cada vez mais negativa com o aumento do pH nas faixas avaliadas. Baltar (2021) aponta que quanto maior o grau de ionização, maior é o estiramento da molécula de floculante. Com relação ao floco e sabendo que os reagentes são aniônicos e a superfície negativa, a conformação vertical é a que possivelmente ocorre entre partícula/reagente, esse tipo de conformação, gera grandes alças e cauda, devido a repulsão eletrostática entre a superfície e a macromolécula. Esta conformação pode ser observada na figura 4.21.

Figura 4.21 Conformação vertical da macromolécula.



Fonte: Baltar (2021)

## 4.6 Ensaios reológicos

### 4.6.1 Ensaios de abatimento (*slump test*)

Inicialmente foram realizados ensaios preliminares, com as polpas artificialmente preparadas sem nenhuma adição de reagentes e em diferentes percentuais de sólidos. Foi observado, que para concentrações de sólido menores que 70% o abatimento era de 100%, ou seja, a tensão de escoamento é nula. Na figura 4.22 está apresentado alguns dos ensaios preliminares, mostrando uma polpa de 65% de sólidos com abatimento de 100%.

Figura 4.22: Ensaios de slump em 65,70 e 75% de sólidos sem flocculante.



Fonte: Propria autora

O abatimento pode ser medido apenas para as polpas acima de 70% e com limite de 75% de sólidos, pois além deste percentual de sólidos, não foi possível produzir um material homogêneo e passível para realização do teste. Sendo assim, os ensaios foram conduzidos variando o percentual de sólidos da polpa em 70, 72 e 75% de sólidos. Para avaliar a influência dos reagentes nas características reológicas da polpa, estes foram mantidos em todos os ensaios na dosagem de 20 g/t. Após os resultados serem tratados no Minitab 21, foi obtida a tabela 4.13 de ANOVA para a tensão de escoamento, que é proveniente da análise estatística dos dados.

A partir da tabela 4.13, pode-se observar que a variável B (percentual de sólidos da polpa) apresenta maior influência na tensão de escoamento, contribuindo com 83,96% da responsabilidade da resposta, a variável A (tipo de reagente) é significativa do ponto de vista estatístico, mas contribui com apenas 11,94% do resultado. O erro interfere na resposta em apenas 1,54%, um valor relativamente baixo, o que mostra a confiabilidade dos testes. Outro

ponto importante é a métrica de  $R^2$  (ajustado) e  $R^2$  (predição) que possuem valores iguais a 96,99% e 93,84% respectivamente, estes valores, próximos a 100 indicam que o modelo está bem ajustado e fornece uma confiabilidade alta.

Tabela 4.13: ANOVA para a tensão de escoamento.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	23	71717	98,46%	71717	3118,1	66,76	0,000
Linear	9	69848	95,89%	69848	7760,9	166,16	0,000
A	7	8696	11,94%	8696	1242,2	26,60	0,000
B	2	61152	83,96%	61152	30576,1	654,62	0,000
Interações de 2 fatores	14	1869	2,57%	1869	133,5	2,86	0,011
A*B	14	1869	2,57%	1869	133,5	2,86	0,011
Erro	24	1121	1,54%	1121	46,7		
Total	47	72838	100,00%				

Fonte: Própria autora.

Para a porcentagem de abatimento do material, também foi gerada uma tabela de ANOVA, apresentada na tabela 4.14. Assim como para a tensão de escoamento, a variável B influenciou mais na variabilidade da resposta de porcentagem de abatimento, contribuindo 77,46% no resultado, a variável A, que é o tipo de reagente, interferiu de maneira significativa, porém com menor importância, contribuindo com 16,18%. A variabilidade na resposta que é de responsabilidade dos erros aleatórios, é de apenas 1,17%, mais uma vez mostrando uma confiabilidade nos resultados. O sumário do modelo apresentou valores de 97,71 e 95,32% para  $R^2$  (ajustado) e  $R^2$  (predição), mostrando grande representatividade do modelo.

Tabela 4.14: ANOVA para a porcentagem de abatimento.

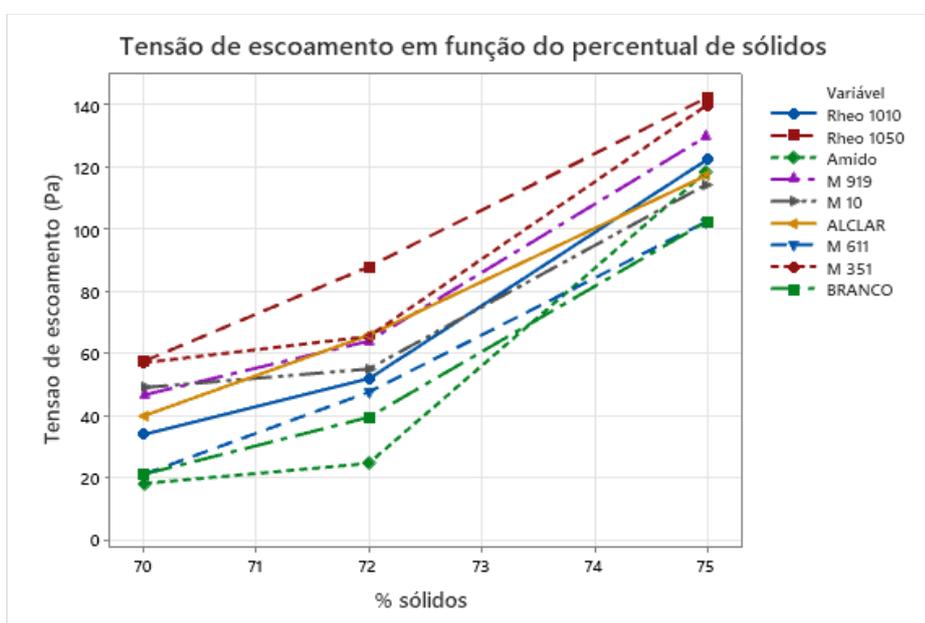
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	23	11149,9	98,83%	11149,9	484,78	88,10	0,000
Linear	9	10565,9	93,65%	10565,9	1173,98	213,36	0,000
A	7	1825,4	16,18%	1825,4	260,78	47,39	0,000
B	2	8740,4	77,47%	8740,4	4370,21	794,24	0,000
Interações de 2 fatores	14	584,1	5,18%	584,1	41,72	7,58	0,000
A*B	14	584,1	5,18%	584,1	41,72	7,58	0,000
Erro	24	132,1	1,17%	132,1	5,50		
Total	47	11282,0	100,00%				

Fonte: Própria autora.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios do planejamento experimental, foi construído um gráfico para representar a variação do abatimento e da tensão de escoamento influenciadas pelos reagentes estudados. Estes gráficos estão apresentados nas figuras 4.23 e 4.24.

A figura 4.23 mostra a dependência da tensão de escoamento com o percentual de sólidos nas polpas com diferentes reagentes. Pode-se observar que para todos os testes, o aumento do percentual de sólidos na polpa promove o aumento da tensão de escoamento, este fato também foi observado por Ribeiro (2015) e Santos (2016), pois à medida que a concentração de sólidos na polpa aumenta, também aumenta a interação entre as partículas. A concentração de sólidos na polpa, também influencia no formato e estrutura dos flocos formados, influenciando diretamente na tensão de escoamento (PASAPOUR *et al.*, 2014; JARVISA *et al.*, 2005). Na análise de variância (ANOVA) observou-se que o tipo de flocculante interfere de maneira significativa na variação da tensão de escoamento, e observando o gráfico da figura 4.23 é notória essa variação. Em todas as concentrações de sólidos na polpa, o reagente que proporcionou maior tensão de escoamento foi o Rheomax 1050, seguindo do Magnafloc 351, já o amido foi o reagente que mostrou menor influência, se aproximando aos valores dos ensaios sem reagente (branco). A diferença na eficiência dos reagentes avaliados pode ser explicada pela diferença da interação que cada polímero faz com as partículas e pela estrutura e resistência do floco.

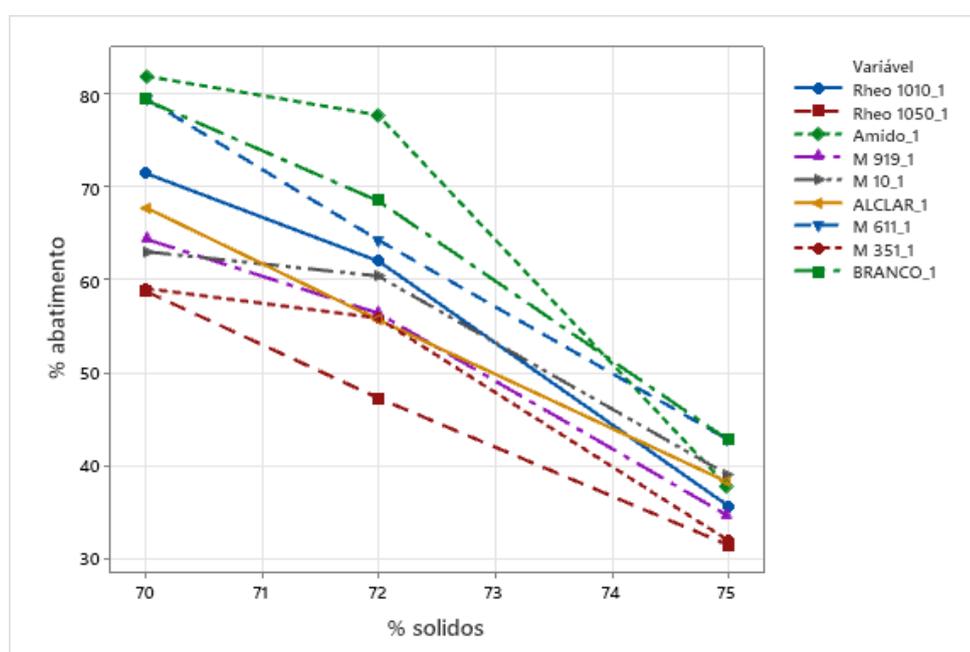
Figura 4.23: Gráfico da tensão de escoamento em função do percentual de sólidos.



Fonte: Própria autora

Na figura 4.24 observa-se que o abatimento do material está diretamente ligado a porcentagem de sólidos, em todas as situações o aumento da concentração de sólidos implicou na diminuição do abatimento. Também pode-se indicar que o uso dos reagentes flocculantes interfere no empacotamento do material, logo que o uso desses reagentes diminuiu o percentual de abatimento em todas as concentrações de sólido. A característica dos flocculantes de formar flocos também contribui para a questão do abatimento do material, ao passo que além da maior concentração de sólidos existe a resistência do floco contribuindo para que o material abata menos.

Figura 4.24: Gráfico do abatimento em função do percentual de sólidos.



Fonte: Própria autora

O flocculante Rheomax EDT 1050, indicado como modificador de reologia pelos fabricantes, foi o reagente que proporcionou menor percentual de abatimento dentre os reagentes analisados, apresentando 58,8, 47,26 e 31,43% de abatimento respectivamente para 70, 72 e 75% de sólidos. Enquanto o amido foi o reagente que proporcionou maior percentual de abatimento, chegando a proporcionar maior abatimento do que o material sem a adição de reagentes. Na figura 4.25 pode-se observar a diferença da altura de abatimento para Rheomax e amido.

Figura 4.25: Abatimento a mido e Rheomax.



Fonte: Própria autora.

Levando-se em consideração que para ser considerado pasta, o rejeito deve apresentar abatimento menores que 20 % e tensão de escoamento acima de 200 Pa, em nenhuma das condições avaliadas o rejeito se comportou como pasta, obtendo como menor valor de abatimento 31,9% e maior valor de tensão de escoamento de 141 Pa para o Rheomax 1050 na concentração de sólidos de 75%. Para polpa acima de 72% de sólidos o material se comportou como rejeito espessado de alta densidade, apresentando tensão de escoamento dentro dos limites de tensão de escoamento de 40 a 200 Pa (MEND, 2017).

#### 4.6.2 Ensaio Reômetro

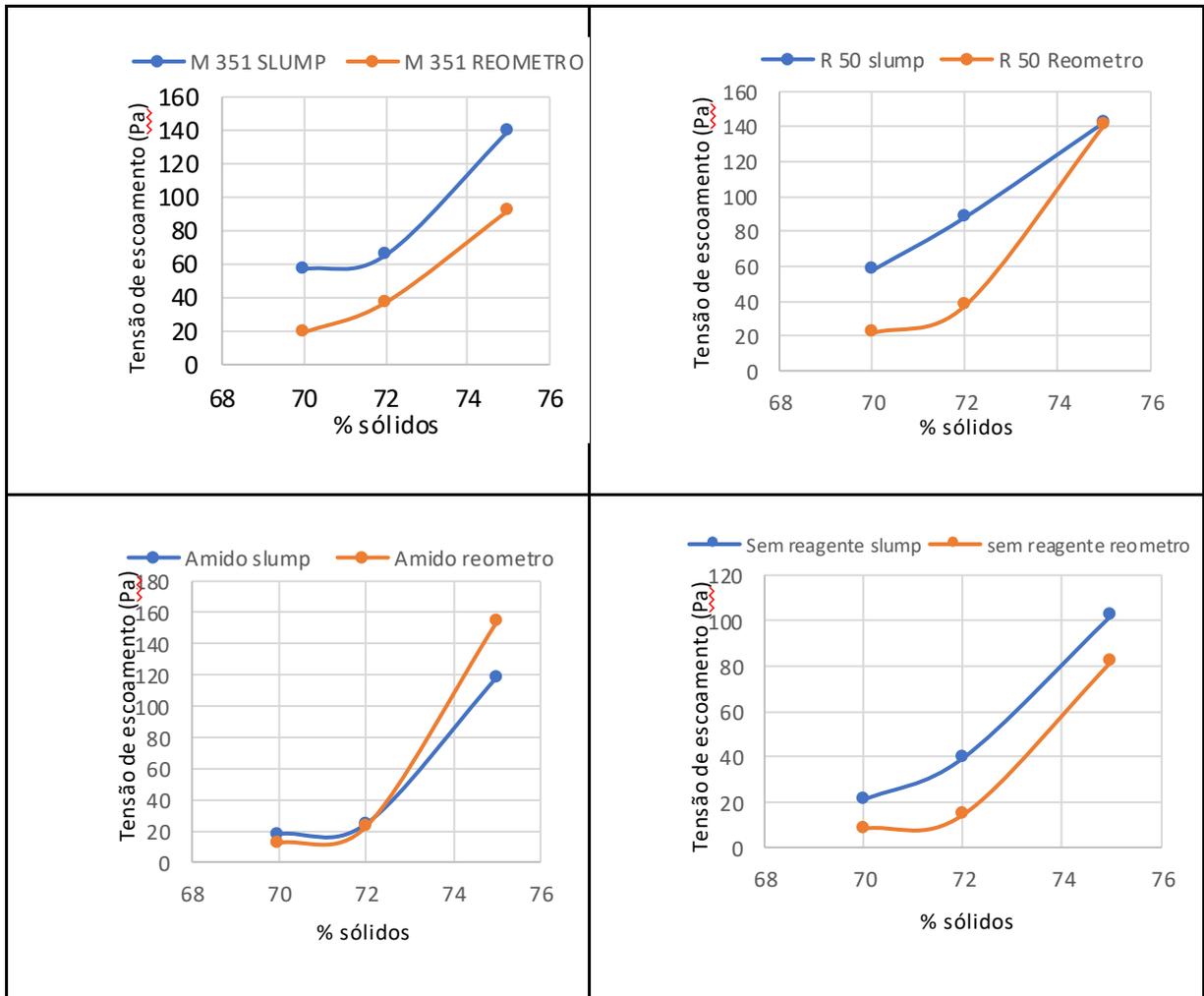
Os ensaios de reologia com o reômetro foram realizados apenas com os reagentes otimizados e com as mesmas condições de concentração de sólidos na polpa que os ensaios de *slump*. Na figura 4.26 tem-se a apresentação gráfica dos resultados para a tensão de escoamento obtidos com o reômetro juntamente com os de *slump*.

O primeiro ponto a se perceber quando se analisa a figura 4.26 é que os resultados não são de certa maneira diferentes, mas que possuem a mesma tendência. Este fato pode ser explicado pois além dos ensaios de *slump* terem medida manual, em que se tem o erro humano, durante a realização dos ensaios no reômetro pode ter ocorrido a sedimentação do material, interferindo no resultado do teste.

Comparando os testes de *slump* com os testes do reômetro, na figura 4.26 observa-se que existe uma correlação entre os resultados, para os dois procedimentos percebe-se uma tendência

de aumento da tensão de escoamento com o uso dos reagentes. Percebe-se também o aumento da tensão de escoamento conforme o aumento da concentração mássica de sólidos na polpa, sustentando a afirmação de Pereira *et al.* (2022), segundo os autores a tensão de escoamento aumenta exponencialmente com o aumento da concentração de sólidos na polpa.

Figura 4.26: Tensões de escoamento para os ensaios de *slump* e reômetro



Fonte: Própria autora

Contudo, a reologia não depende apenas do percentual de sólidos e dos reagentes, mas também do tamanho das partículas, conforme apresentado no item 2.5.2 deste trabalho. Os finos podem aumentar a estabilidade da polpa, desta forma tem-se menos espaços vazios entre as partículas, o que favorece a formação de pastas. É possível que, para o mesmo material estudado, mas com redução do tamanho da partícula pudesse se obter pasta dentro dos limites de reagentes avaliados.

## 5 CONCLUSÕES

A partir da caracterização do rejeito utilizado, constatou-se que o material é considerado fino pois apresenta um  $D_{90}$  de  $77,47\mu\text{m}$  com 21,7% das partículas menores que  $20\mu\text{m}$ . O material avaliado é composto predominantemente por quartzo e hematita.

Nos resultados obtidos tanto nos ensaios de reologia, como nos de sedimentação, foi observado que os reagentes flocculantes provocaram uma diferença nos resultados quando comparados aos mesmos sem a adição destes reagentes, o que indica que esses reagentes interagiram com a superfície do rejeito. Com as análises de carga superficial resultante, esta afirmação ficou ainda mais evidente logo que a adição dos reagentes mostrou uma diferença na carga superficial quando comparada a condição inicial do rejeito sem flocculante.

Os ensaios de sedimentação em proveta evidenciaram que:

- Em primeiro momento o flocculante Magnafloc 351 na dosagem de 120 g/t foi o reagente otimizado pela análise estatística da primeira etapa. Nesta condição, em uma polpa com 20% de sólidos, o reagente proporcionou velocidade de sedimentação máxima de 0,59 cm/s, turbidez mínima do clarificado de 28,92 NTU e um percentual de sólidos para o *underflow* de 50,41%.
- Para os reagentes da linha Rheomax, a otimização dos resultados apontou que para se obter as melhores respostas dentro das condições avaliadas deve-se utilizar o Rheomax 1050 na dosagem de 30g/t, conseguindo assim 0,75 cm/s de velocidade de sedimentação, uma turbidez de 60,5 NTU para o clarificado e um *underflow* com 56% de sólidos.
- O amido residual de batata analisado também se mostrou influente na sedimentação do material, pois quando comparado aos ensaios em que não foi utilizado reagente, o amido em sua condição otimizada pela regressão linear proporciona uma redução de 44,82% na turbidez do clarificado e um aumento de 18,16% no percentual de sólidos do *underflow*.
- Em todos os cenários avaliados, a turbidez do sobrenadante foi adequada à classificação de água Classe II, proposta pela CONAMA 357/2015. A qualidade do sobrenadante é de fundamental importância no espessamento, quando se visa o reuso nos processos de beneficiamento, reduzindo a necessidade de captar água nova e mitigando assim o impacto ambiental da indústria.

Apesar do amido apresentar, nas condições avaliadas, resultado menos satisfatório que as poliacrilamidas, é importante ressaltar que, diferentemente dos floculantes sintéticos, o amido residual é um produto biodegradável e que não oferece nenhuma toxicidade ambiental ou humana, além de ser um resíduo industrial. Outro ponto a se considerar é que, as poliacrilamidas tendem a ter valores muito elevados, já os amidos estão em grande abundância na natureza.

Em nenhuma das condições avaliadas o rejeito se comportou como pasta, mas sim como rejeito espessado de alta densidade, obtendo como menor valor de abatimento 31,9% e maior valor de tensão de escoamento 141 Pa, para o Rheomax 1050 na concentração de sólidos de 75%.

A aplicação da análise estatística na avaliação dos resultados foi de fundamental importância para as conclusões dos resultados. Em todas as análises os valores de  $R^2$ , que é a variabilidade que a resposta impacta no modelo, se aproximaram de 100%, podendo ser considerado um bom estudo.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

As operações realizadas neste estudo demandam pouco ou nenhum investimento de projeto, podendo ser consideradas como viáveis para novos ensaios.

Para os ensaios de sedimentação em proveta, pode ser realizada a aferição do pH da polpa antes e depois de cada ensaio, para que se possa ter maior amplitude de discussão dos resultados. Ainda sobre o pH da polpa, essa variável também pode ser avaliada juntamente com os floculantes.

Visando a avaliação financeira do processo, seria interessante o levantamento dos custos de todos os reagentes analisados, e visando a diminuição de gastos financeiros, há a possibilidade de se avaliar o amido em diferentes condições de dosagens em misturas com pequenas quantidades das poliacrilamidas.

Com relação aos ensaios reológicos, uma sugestão de bastante relevância seria realizar os ensaios nas mesmas condições deste trabalho, variando apenas a granulometria do material, para que assim se possa observar a interferência do tamanho da partícula na reologia e possibilidade de formação de pastas do rejeito.

## 7 REFERENCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **Anuário mineral brasileiro: Principais substâncias metálicas, ano base 2019**. Brasília: ANM, 2020a. 37 p

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. 2020. 116 f. (Dissertação) -Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2020.

ALVES, L. P.; Silva, L. A.; OLIVEIRA, M. S.; CAPPONI, F. N. **Ensaio exploratório em coluna de flotação de bancada com minério fosfático ultrafino**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo, p. 1-8. 2016.

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.

BALTAR, C. A. M. Flotação: em nova abordagem. 1 ed. Recife: UFPE, 2021, 537 p.

BARNES, Howard. **A handbook of elementary rheology: the newtonian liquid**. In: a handbook of elementary rheology. 1. ed. Aberystwyth: [s. n.], 2000. cap. 5, p. 19-24. ISBN 0-9538032-0-1.

BARREDA R.H.O; FONSECA C. R. M.; VALADÃO G. E. S. **Principais características de pastas minerais preparadas com rejeitos de manganês**. Encontro Nacional de Tratamento de Minérios: Salvador 2011. p. 741-748.

BARREDA R.H.O; FONSECA C. R. M.; VALADÃO G. E. S. **Principais características de pastas minerais preparadas com rejeitos de manganês**. Encontro Nacional de Tratamento de Minérios: Salvador 2011. p. 741-748.

BARREDA, Rubén Heriberto Olcay; VALADÃO, George Eduardo Sales. **POLÍMEROS DESAGUADORES PARA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS ADENSADOS**. HoloS, [s. l], v. 8, p. 1-14, 20 nov. 2020.

BARREDA. R.H.O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral**. 2008. 169. Dissertação (Mestrado – em Engenharia Metalúrgica e de Minas). – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

BISCO, A.P.R. (2009). **A influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais**. Tese de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 87 p.

Boger, D. V. (2013). **Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry**. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 4(1), 239–257. doi:10.1146/annurev-chembioeng-061312-103347

BOGER, D. V. **Paste and Thickened Tailings - A Guide**. 2nd ed. Perth, WA: 2006, Cap 3, p. 25-37. BOGER, D. V. **Paste and Thickened Tailings - A Guide**. Third edition. Perth, WA: 2015, Cap 3, p. 21-43.

BOLTO, B.; GREGORY, J. **Organic polyelectrolytes in water treatment.** Water Research 41 (11). p 2301-2324, 2007

CHÁCARA, D. M. **Reologia de depósitos de rejeitos espessados de minério de ferro para estudos de dam break.** 2020. 152 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Desaguamento, Espessamento e Filtragem.** 4ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 2, 2013, 240 p.

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.

CLAYTON, S., GRICE, T. G., BOGER, D. V. **Analysis of the Slump Test for onsite Yield Stress Measurement of Mineral Suspensions.** International Journal of Mineral Processing, Melbourne – Australia, No. 70, Jun-2003, p. 3-21.

DAVIES, M. **Filtered Dry Stacked Tailings - The Fundamentals.** In: INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, 14, 2011, Vancouver

DUBIŃSKI, J. **Sustainable Development of Mining Mineral Resources.** Journal of Sustainable Mining. V 12, Abril, 2013. p. 1-6

FERREIRA, E. E.; BRANDAO, P. R. G.; KLEIN, B.; PERES, A. E. **-Reologia de suspensões minerais: uma revisão-** Rem: Rev. Esc. Minas. 2005, vol.58, n.1

FITTON, T. G, Seddon KD. **Paste and thickened tailings – myth busting and clarification.** In: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings; 2013 June 17-20; Belo Horizonte, Brazil. Australia: The University of Western Australia; 2013. p. 37-43.

FITTON, T. G.; ROSHDIEH, A. 2013, **Filtered tailings versus thickened slurry: four case studies.** Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, p. 275-288. for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. International Journal of Mineral Processing, v. 70, p. 3-21, 2003

FRANÇA, S. C. A.; TRAMPUS, B. C. **Desaguamento de Rejeitos Minerais para Aplicação de Métodos de Disposição Alternativos às Barragens de Rejeito Convencionais.** Rio de Janeiro: Cetem/mctic, 2018. 59 p. (Tecnologia ambiental).

FRANKS, D. M. et al. **Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes.** Resources Policy, 2011. V 36. p. 114-122.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. **Inventário de barragem do estado de Minas Gerais,** ano base 2017. Belo Horizonte: FEAM, 2018<sup>a</sup>. 40 p.

GALINDO, M. S. V. (2013). **Desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação da viscosidade de solos.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 113p.

GOMES, R. B. TOMI, G. ASSIS, P. S. **Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil.** Journal of Materials Research na Technology. V 5, outubro, 2016. P. 339-344

GONÇALVES, S.G. **Influência da granulometria e de aditivos no comportamento reológico do rejeito de lavagem da bauxita**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

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.

HERNANDEZ, C. A; QUIERO, A. L, ALEGRIA, P. I. **Efeito da distribuição granulométrica sobre o comportamento reológico de pastas minerais**. In: Anais do 26º Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2015 Outubro 18-22; Poços de Caldas, Brasil. 2015. P. 421-429.

IRGENS, F. **Rheology and Non-Newtonian Fluids**. Doi: 10.1007/978-3-319-01053-3. 2014.

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.

LUZ, A. B.; LINS. F.A.F. **Introdução ao tratamento de Minérios**. In: LUZ, A.B., SAMPAIO, J. A. e ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. 5. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p. 3-18.

MINE ENVIRONMENTAL NEUTRAL DRAINAGE (MEND) Project, 2017. **Study of Tailings Management Technologies**. October. MEND Report 2.50.1

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.

MREJEN, M.; PERELMAN, J; MACHADO, D. C. **Environmental disasters and birth outcomes: Impact of a tailings dam breakage in Brazil**. Social Science & Medicine.V 250, Abril, 2020. p. 1-12.

NASCIMENTO, C. R. **Reologia e reometria aplicadas ao estudo de polpas minerais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. (Série Rochas e Minerais Industriais, 11).

OLCAY, R.H; HERNÁNDEZ, C.A.; VALADÃO, G.E.S; CHAVEZ, A.P. (2020). **Production of minerals paste from phosphates sludges, Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería**, Universidad de Tarapacá, Chile, 8(2).

OLIVEIRA M. F. M. **Poliacrilamidas na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. (Dissertação de mestrado). UFMG. Belo Horizonte, 2016. 70 p.

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

OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M.; LACERDA, C. M. M. **Espessamento e Filtragem**. Ouro Preto: [s.n.], 2004. 122 p.

OSORIO, C.A.H.; ARAÚJO, A.C. e VALADÃO, G.E.S. (2008). **Estudo de características de algumas pastas minerais**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, SP, v.4, n.3. 50-55 pp.

OWEN J.R. **Catastrophic tailings dam and disaster risk disclosur**. International Journal of Disaster Risk Reduction. V. 42, Abril, 2020. p. 1-135.

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.

PASHIAS, N.; BOGER, D. V; SUMMERS, J. GLENISTER D.J. (1996). **A fifty cent rheometer for yield stress measurement**. J. Rheol. 40p. 1179–1189

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. 2012. 108 p. (Dissertação de mestrado) – Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2012.

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

PIAZON G. I.; ORTEGA F. S. **Efeito da taxa de cisalhamento na avaliação do comportamento reológico de uma suspensão de alumina coagulada**. Congresso Brasileiro De Engenharia e Ciência dos Materiais. : Natal 2016. p 569-580.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 2013. 180 f. (Dissertação) - Curso de Mestrado em Geotécnica e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

POSSA, M. V.; NASCIMENTO, C. R. **Reologia no tratamento de minérios**. In: Tratamento de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.14. p. 597-632.

RIBEIRO, V. Q. F. **Proposta de Metodologia Para Avaliação dos Efeitos de Ruptura de Estruturas de Disposição de Rejeitos**. Belo Horizonte: UFMG, 2015. Dissertação (Mestrado) - UFMG/ Curso de Pós-Graduação em Geotécnica e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais.

ROTTA, L. H. S. *et al.* **The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil**. In: Int J Appl Earth Obs Geoinformation. V 90. Agosto, 2020. p 1-12.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G.. **Análise granulométrica por peneiramento**. IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 55-72

SANTOS, B. B. **Caracterização Reológica do Rejeito de Mineração. Estudo de caso: Rejeito desprendido da Barragem do Fundão - Mariana/MG**. 2016. 72 f. TCC (Graduação)

- Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UfmG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

SANTOS, F. F. G. **Análise da Disposição de Rejeitos sob a Forma de Pasta**. 2012. 37 f. Monografia (Especialização) – Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SILVA, G. R. R. **Caracterização e Aproveitamento de Rejeitos do Quadrilátero Ferrífero**. 2018. 43 p. (Trabalho de conclusão de curso) – Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

SOFRÁ, F.; BOGER, D.V. **Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry**. Chemical Engineering Journal. Melbourne, p. 319-330, 2002.

TANNER, R. I. **Engineering Rheology**. Ed. Rev. New York: Oxford University Press. (1988). 451p.

TESSAROTTO, C., **Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (dry stacking)**. In: Anais do XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas-MG, v. 3, p. 430-437, 2015.

TRAMPUS, Bruna Camara; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Aplicação de polieletrólito catiônico para desaguamento de lama vermelha: produção de sedimentos adensados**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Sao Paulo, v. 16, p. 525-531, out. 2019.

VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. de. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. 234 p.

YILMAZ, E.; FALL, M. **Paste Tailings Management**. Gewerbestrasse: Springer, 2017. 283 p. v. 1. ISBN 978-3-319-39682-8.

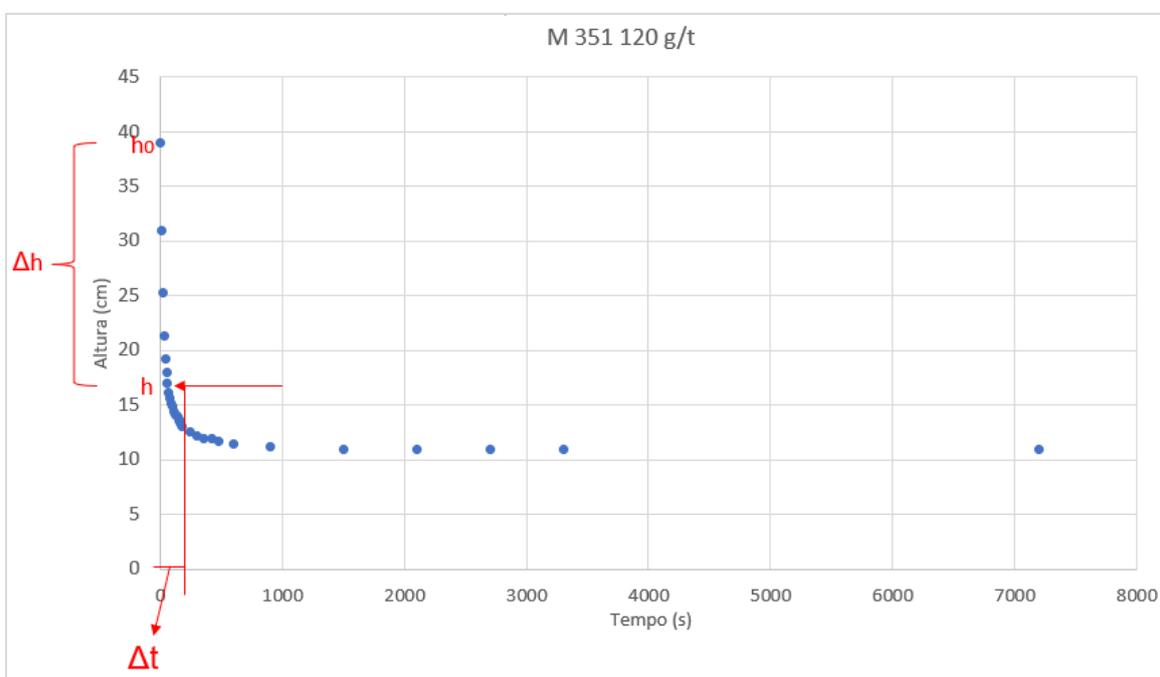
## 8 APÊNDICE

A velocidade de sedimentação foi medida conforme mencionado no item 3.3 a partir da equação 8.1, os valores de  $\Delta h$  e  $\Delta t$  foram inferidos conforme mostra a figura 8.1

As curvas de sedimentação para os ensaios realizados com 120 g/t do reagente Magnafloc 351 e 30 g/t do Rheomax 1050 estão apresentadas nas figuras 8.1, 8.2 e 8.3 consecutivamente.

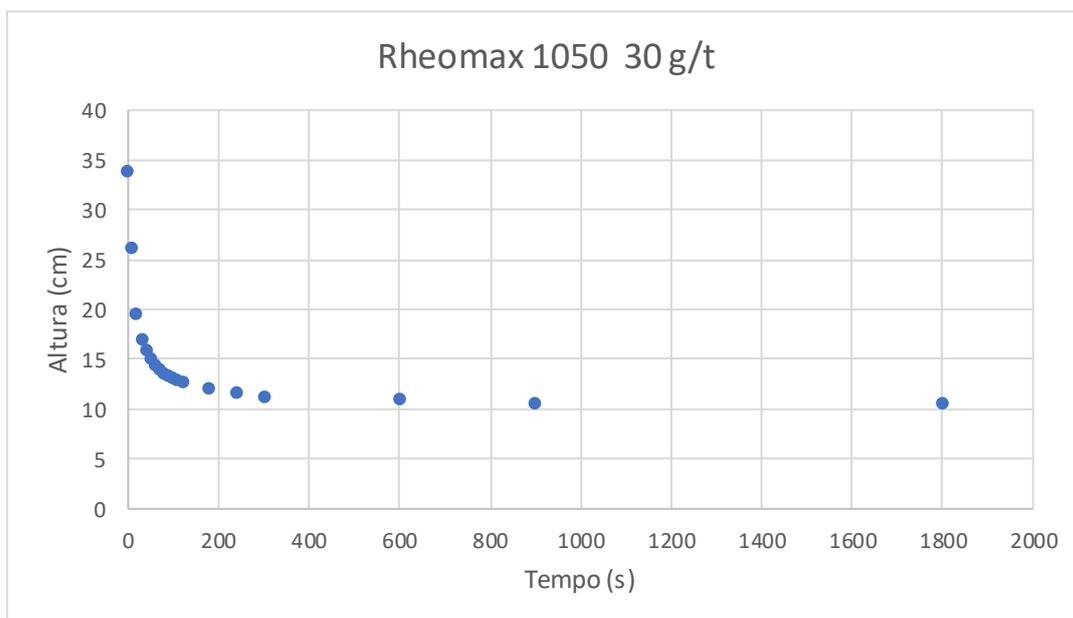
$$V_s = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad [8.1]$$

Figura 8.1: Curva de sedimentação Magnafloc 351 120 g/t.



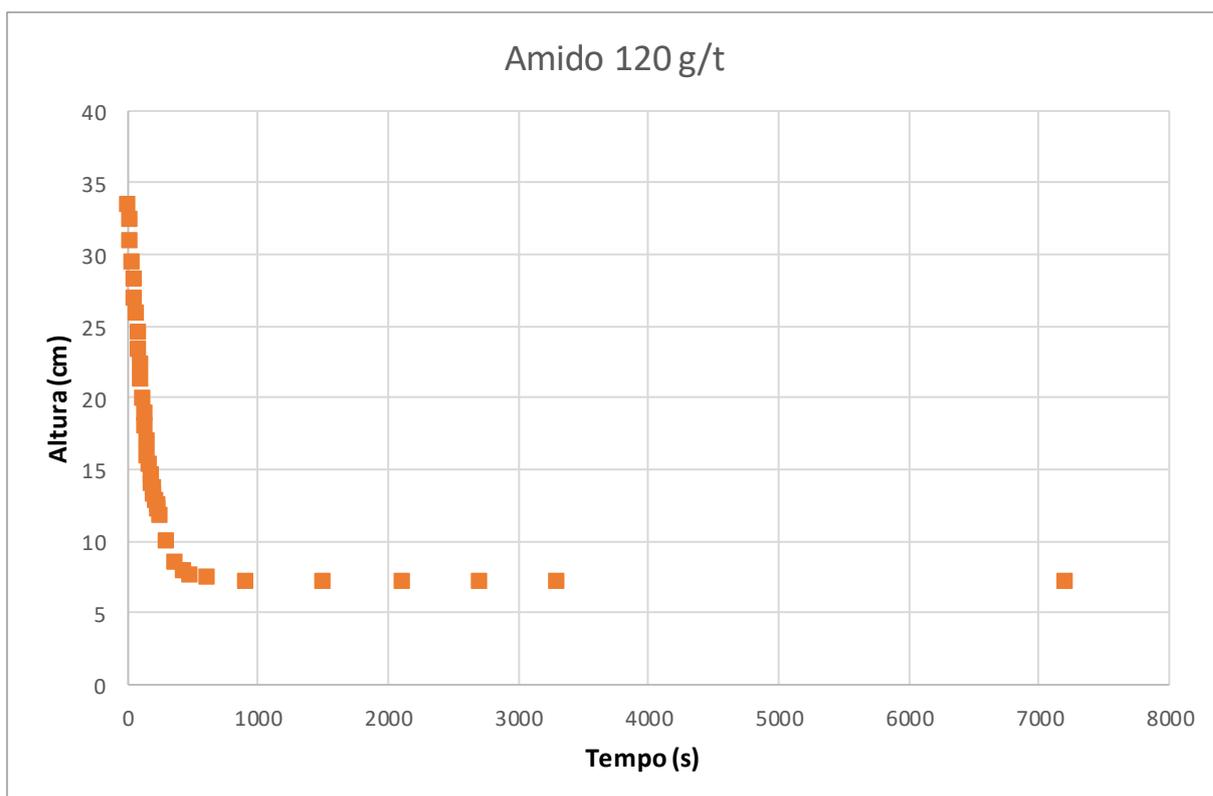
Fonte: Própria autora.

Figura 8.2: Curva de sedimentação Rheomax 1050 30 g/t.



Fonte: Própria autora.

Figura 8.3: Curva de sedimentação Amido de batata 120 g/t.



Fonte: Própria autora.