



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ANNY CAROLINY VIDAL DE LIMA RODRIGUES**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DE ADITIVO  
REOLÓGICO NO ESCOAMENTO DA POLPA DE BAUXITA**

**BELÉM  
2018**

**ANNY CAROLINY VIDAL DE LIMA RODRIGUES**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DE ADITIVO  
REOLÓGICO NO ESCOAMENTO DA POLPA DE BAUXITA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos**

**ORIENTADORES: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe**

**Prof. Dr. José Antonio da Silva Souza**

**BELÉM  
2018**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

---

Rodrigues, Anny Caroliny Vidal de Lima, 1990-  
Avaliação da influência da granulometria e de aditivo reológico no escoamento da polpa de bauxita/Anny Caroliny Vidal de Lima Rodrigues.- 2018.

Orientadora: Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe;  
Coorientador: José Antonio da Silva Souza

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Belém, 2018.

1.Reologia 2. Bauxita 3. Viscosidade I. Título

CDD 22.ed. 551.1134

---

**ANNY CAROLINY VIDAL DE LIMA RODRIGUES**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DE ADITIVO  
REOLÓGICO NO ESCOAMENTO DA POLPA DE BAUXITA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

**Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos**

**DATA DA AVALIAÇÃO:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**CONCEITO:** \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof.<sup>ª</sup>. Dr.<sup>ª</sup>. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe  
(PPGEQ/ITEC/UFPA – Orientadora)**

---

**Prof. Dr. José Antonio da Silva Souza  
(PPGEQ/ITEC/UFPA – Co-orientador)**

---

**Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando  
(PPGEQ/ITEC/UFPA – Membro)**

---

**Prof. Dr. Clauderino da Silva Batista  
(PPGEP/ITEC/UFPA – Membro)**

## **DEDICATÓRIA**

**À minha família por todo apoio.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me conceder saúde para batalhar pelos meus objetivos.

À minha família, pelo apoio e acolhimento diante das minhas decisões, por entender minhas ausências, pelo acalento diante das minhas decepções, pelos valores que me ensinaram, por priorizar minha educação e estimular em mim a busca pelo aperfeiçoamento do ser humano que sou hoje.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe por todo ensinamento dedicado ao longo desta etapa importante na minha formação.

Ao Prof. Dr. José Antonio da Silva Souza pela disponibilidade, pela atenção e paciência, sempre que precisei.

Ao Prof. Dr. Nielson Fernando da Paixão Ribeiro pelo apoio e suporte durante a realização deste trabalho.

À Mineração Paragominas S.A. em nome do Dr. Eng. Sebastião Martins Brum pelo apoio fundamental para execução deste trabalho.

Ao Msc. Eng. André Mileo pelos ensinamentos compartilhados.

Ao Msc. Eng. Dilson Cardoso pelos conselhos e sugestões ao longo da minha trajetória acadêmica.

Ao Augusto Fernandes, Jefferson Willian, Woshington Brito, Gilmar Neves pela disponibilidade e paciência em auxiliar.

Aos membros desta banca examinadora pela atenção e por todas as sugestões e recomendações para o enriquecimento deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

“O menino ia crescendo e se  
fortificava: estava cheio de  
sabedoria, e a graça de Deus  
repousava nele”  
**Lucas, 2:40**

## RESUMO

Para estudar propriedades de escoamento de polpas de bauxita em diferentes faixas granulométricas bem como a eficácia de aditivos modificadores de viscosidade foram realizados testes de caracterização física, mineralógica e reológica. Uma amostra da polpa de bauxita que é bombeada por mineroduto de Paragominas/PA até Barcarena/PA foi coletada, e submetida a análises preliminares. A polpa apresenta 52 % de sólidos enquanto as partículas apresentam  $d_{50}$  de 74  $\mu\text{m}$ , massa específica equivalente a 1455  $\text{kg/m}^3$  e viscosidade aparente de 0,011 Pa.s. Após secagem natural da polpa, as partículas foram desagregadas e separadas por peneiramento em três frações: retida em malha de 150 Mesh; passante em malha de 150 e retida em 270 Mesh e passante de 270 Mesh. A análise por MEV revelou a heterogeneidade das partículas que compõem a amostra de bauxita e este resultado foi complementado pela análise por DRX antes e após o fracionamento, onde foram identificadas as fases cristalinas correspondentes a gibbsita, acompanhada de caulinita, goethita, hematita e anatásio. A composição mineralógica não foi alterada pelo peneiramento. Os testes reológicos das polpas a 50 % demonstraram que polpas com partículas de maior tamanho apresentaram os menores valores de tensão inicial. O comportamento das polpas se ajustou ao modelo de Herschel-Bulkley. O hexametáfosfato de sódio defloculou as polpas de bauxita. A concentração de aditivo considerada ideal, que promoveu valores mínimos de viscosidade, equivale a 300 g/ton de bauxita para as polpas contendo frações e 250 g/ton para a amostra original. As curvas de histerese indicaram que o fluido tem comportamento dependente do tempo, caracterizando-se como fluido reopético. Em uma simulação de fluxo de polpas sem aditivo e com aditivo na concentração ideal, o fator de atrito estimado através da equação de Dodge-Metzner foi reduzido.

Palavras-chave: Bauxita. Defloculante. Fator de atrito. Viscosidade.



## ABSTRACT

To study flow properties of bauxite pulps containing different particles sizes and to investigate the efficacy of chemical additives in reducing the viscosity of the mineral suspensions it was performed tests physical, mineralogical and rheological analysis of the pulps. A sample of bauxite pulp which is pumped through the pipeline from Paragominas/PA to Barcarena/PA was collected and some measurements were performed. The results showed that solids content is 52 %,  $d_{50}$  size is 74  $\mu\text{m}$ , specific mass is 1455  $\text{kg}/\text{m}^3$  and viscosity is 0,011 Pa.s. The sample was air dried, disaggregated, and sieved to obtain a coarse fraction which was retained by a 150 Mesh sieve, a medium particles size fraction which passed a 150 Mesh sieve but was retained by a 270 Mesh sieve, and a fines fraction, which passed a 270 Mesh sieve. SEM analysis revealed heterogeneity of the samples, and XRD analysis confirmed the previous results indicating that Paragominas bauxite is composed essentially by gibbsite and it also contains kaolinite, goethite, hematite, anatase. Sieving operations did not affect mineralogical composition of the samples. The particles were mixed to water at a concentration of 50% to perform rheological measurements. Pulps constituted by coarse particles had higher initial tension values than pulps containing fines. The suspensions studied had non-Newtonian behavior which best adjusted to Herschel-Bulkley rheological model. Sodium hexametaphosphate reduced viscosity values of all samples, which characterizes deflocculation of the suspensions. The concentration of additive that reduced viscosity values of pulps composed by bauxite fractions to lowest values is 300 g/ton of bauxite and original samples of bauxite reached lowest viscosity values when 250g/ton of bauxite were added to them. Bauxite pulps demonstrated rheopectic time-dependent behavior. The additive caused reduction of friction factor in slurries, and that parameter was estimated by Dodge-Metzner correlation through simulation of flow.

Key-words: Bauxite. Deflocculant. Friction factor. Viscosity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Reservas mundiais de bauxita.....	20
Figura 2- Beneficiamento de bauxita em Paragominas.....	22
Figura 3 - Mineroduto de Miltônia .....	24
Figura 4- Modelo para estudo do escoamento .....	26
Figura 5 - Comportamento reológico dos fluidos.....	28
Figura 6- Fluido tixotrópico e fluido reopético.....	29
Figura 7 - Influência da distribuição granulométrica.....	31
Figura 8 - Geometrias: discos paralelos (a), cilindros concêntricos (b), cone e placa (c) .....	33
Figura 9- Cilindros concêntricos.....	33
Figura 10 - Representação do rotor tipo <i>vane</i> .....	34
Figura 11 - Representação do dispositivo helicoidal.....	35
Figura 12 – Curva de defloculação .....	36
Figura 13 - Mecanismos de estabilização.....	37
Figura 14 - Potencial zeta vs pH de amostras de óxido de titânio.....	38
Figura 15 - Cadeia de polifosfato com 5 unidades de ortofosfato.....	38
Fluxograma 1 - Esquema dos ensaios.....	42
Gráfico 1 – Classificação granulométrica.....	47
Figura 16 - Micrografias das frações de bauxita: grossa (a), intermediária (b), fina (c) .....	49
Gráfico 2 - Difratoograma da bauxita anterior ao fracionamento.....	50
Gráfico 3 - Padrões difratométricos das amostras.....	51
Gráfico 4 - Curva de defloculação da polpa com fração grossa ( $\phi=350\ \mu\text{m}$ ) .....	52
Gráfico 5 - Curva de defloculação da polpa com fração intermediária ( $\phi=79\ \mu\text{m}$ ) .....	52
Gráfico 6 - Curva de defloculação da polpa com fração fina ( $\phi=28\ \mu\text{m}$ ) .....	53
Gráfico 7 - Curva de defloculação da bauxita original ( $\phi=299\ \mu\text{m}$ ) .....	53
Gráfico 8 – Curvas de defloculação das amostras unificadas .....	54
Gráfico 9 – Curvas de fluxo das polpas com fração grossa ( $\phi=350\ \mu\text{m}$ ) .....	55
Gráfico 10 - Curvas de fluxo das polpas com fração intermediária ( $\phi=79\ \mu\text{m}$ ) .....	56
Gráfico 11 - Curvas de fluxo das polpas com fração fina ( $\phi=28\ \mu\text{m}$ ) .....	57
Gráfico 12 – Curvas de fluxo das polpas com amostra original ( $\phi=299\ \mu\text{m}$ ) .....	57
Gráfico 13 – Incerteza: polpa com fração grossa ( $\phi=350\ \mu\text{m}$ ) .....	59
Gráfico 14 - Incerteza: polpa com fração intermediária ( $\phi=79\ \mu\text{m}$ ) .....	59
Gráfico 15 - Incerteza: polpa com fração fina ( $\phi=28\ \mu\text{m}$ ) .....	60
Gráfico 16 – Incerteza: polpa com amostra original ( $\phi=299\ \mu\text{m}$ ) .....	60

Gráfico 17 - Perfis de viscosidade das amostras sem aditivo .....	61
Gráfico 18 - Perfis de viscosidade das polpas com aditivo.....	62
Gráfico 19 - Histerese das polpas com fração grossa ( $\phi = 350 \mu\text{m}$ ) .....	63
Gráfico 20 - Histerese das polpas com fração intermediária ( $\phi = 79 \mu\text{m}$ ) .....	63
Gráfico 21 – Histerese das polpas com fração fina ( $\phi = 28 \mu\text{m}$ ) .....	64
Gráfico 22 – Histerese das polpas com amostra original ( $\phi = 299 \mu\text{m}$ ) .....	65
Gráfico 23 – Fator de atrito vs vazão volumétrica.....	67
Gráfico 24 – Fator de atrito vs Número de Reynolds generalizado .....	68
Gráfico 25 – Avaliação matemática da equação de Dodge-Metzner .....	67
Figura 17 – Cilindro concêntrico e suas medidas.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produtores mundiais de bauxita em 2015 .....	23
Tabela 2- Parâmetros dos modelos reológicos .....	28
Tabela 3- Nomenclatura das amostras .....	43
Tabela 4 - Parâmetros físicos da amostra polpa de bauxita em comparação com valores da literatura.....	48
Tabela 5 – Parâmetros reológicos da fração grossa.....	56
Tabela 6 – Parâmetros reológicos da fração intermediária.....	56
Tabela 7 - Parâmetros reológicos da fração fina .....	57
Tabela 8 – Parâmetros reológicos da amostra original.....	58
Tabela 9 - pH das polpas a 50 % (m/m) .....	66
Tabela 10 – Dados da amostra original .....	66
Tabela 11 – Parâmetros para cálculo do fator de atrito .....	66
Tabela 12 – Fator de atrito da amostra original.....	67
Tabela 13 – Parâmetros complementares para avaliação matemática da equação de Dodge-Metzner.....	69
Tabela 14 – Histerese da amostra com grossos .....	79
Tabela 15 – Histerese da amostra com fração intermediária.....	80
Tabela 16 – Histerese da amostra com fração fina.....	81
Tabela 17 – Histerese da amostra com bauxita original.....	81
Tabela 18 – Distribuição granulométrica da polpa original .....	82
Tabela 19 – Propriedades de escoamento da polpa original.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANT	Anatásio
DRX	Difratometria de Raios-X
DLVO	Teoria Sobre Estabilização de Suspensão de Colóides
GBS	Gibbsita
GT	Goethita
HEM	Hematita
ICDD/PDF	International Center for Diffraction Data/Powder Diffraction File
KLN	Caulinita
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPSA	Mineração Paragominas S.A.
PA	Estado do Pará
PCZ	Ponto de Carga Zero
PSI	<i>Pipeline Systems Incorporated</i>
SAG	<i>Semi-autogeneous Grinding</i>
TON	Tonelada

## LISTA DE SÍMBOLOS

#	Mesh
%	Porcentagem
(Al(OH) <sub>3</sub> )	Gibbsita
(AlO(OH))	Boehmita; Diásporo
(FeO(OH))	Goethita
(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Hematita
(TiO <sub>2</sub> )	Anatásio
(SiO <sub>2</sub> )	Sílica não reativa
(Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> )	Caulinita
$\rho_a$	Massa específica aparente
A	Área da placa
$\Upsilon$	Distância infinitesimal
t	Tempo
V	Velocidade
F	Força
$\mu$	Viscosidade
$\tau_{yx}, \tau$	Tensão cisalhante
$dv_x/dy$	Taxa de cisalhamento
$\tau_0$	Tensão de escoamento
K	Índice de consistência do fluido
n	Índice de comportamento do fluido
$\zeta$	Potencial zeta
°C	Graus Celsius
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Fosfato monossódico
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	Fosfato dissódico
Re	Número de Reynolds
$N_{Re}'; Re_{M-R}$	Número de Reynolds generalizado dado pela equação de Metzner-Reed
$f_{D-M}$	Fator de atrito dado pela equação de Dodge-Metzner
$g_c$	Constante de gravidade
$n'$	Índice de comportamento dos fluidos Lei da potência
$K'$	Índice de consistência dos fluidos Lei da potência
f	Fator de atrito

$\tilde{\alpha}; Y$	Parâmetros adimensionais
$C(x)$	Constante de integração
$\tau_w$	Tensão na parede
$U_m$	Velocidade média
$\mu_m$	Micrômetro
$C_s$	Concentração de sólidos
$\rho_p$	Massa específica da polpa
$Cu$	Cobre
$K\alpha_1; K\beta$	Tipo de radiação característica
$Ni$	Níquel
$d_{50}$	Valor que 50 % das partículas tem menor tamanho
$R^2$	Coefficiente de correlação
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
2.1. Objetivo geral .....	19
2.2. Objetivos específicos .....	19
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1. Bauxita .....</b>	<b>20</b>
3.1.1. Transportes de polpas minerais por minerodutos.....	23
<b>3.2. Reologia.....</b>	<b>25</b>
3.2.1. Viscosidade .....	25
3.2.2. Classificação do perfil reológico dos fluidos .....	27
3.2.4. Reologia de suspensões.....	29
<b>3.3. Reometria.....</b>	<b>32</b>
3.3.1. Viscosímetros rotacionais .....	32
3.3.2. Geometria cilindros concêntricos.....	33
3.3.3. Outras geometrias.....	34
<b>3.4. Aditivos modificadores de viscosidade de polpas minerais .....</b>	<b>35</b>
3.4.1. Hexametáfosfato de sódio .....	38
<b>3.5. Fator de atrito.....</b>	<b>39</b>
<b>4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>42</b>
4.1. Análise granulométrica.....	43
4.2. Concentração de sólidos .....	43
4.3. Massa específica da polpa.....	43
4.4. Obtenção das frações de bauxita .....	44
4.5. Difratomia de raios-X .....	44
4.6. Microscopia eletrônica de varredura .....	44
4.7. Preparo de soluções de hexametáfosfato de sódio.....	45



<b>4.8. Ensaaios reológicos .....</b>	<b>45</b>
4.8.1. Curvas de defloculação .....	45
4.8.2. Caracterização reológica – Método <i>Pipeline Systems Incorporated</i> (PSI) .....	45
4.8.3. Incerteza do equipamento .....	45
4.8.4. Perfil de viscosidade .....	45
4.8.5. Curvas de histerese.....	46
<b>4.9. pH .....</b>	<b>46</b>
<b>4.10. Cálculo do fator de atrito pela equação de Dodge-Metzner da bauxita original ....</b>	<b>46</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>47</b>
<b>5.1. Propriedades físicas da amostra original.....</b>	<b>47</b>
<b>5.2. Microscopia eletrônica de varredura .....</b>	<b>48</b>
<b>5.3. Difração de raios-X.....</b>	<b>49</b>
<b>5.4. Testes reológicos.....</b>	<b>51</b>
5.4.1. Curva de defloculação.....	51
5.4.2. Caracterização reológica – método PSI .....	55
5.4.3. Incerteza do equipamento .....	58
5.4.4. Perfil de viscosidade .....	61
5.4.5. Histerese.....	62
<b>5.5. pH .....</b>	<b>65</b>
<b>5.6. Cálculo do fator de atrito pela equação de Dodge-Metzner da bauxita original ....</b>	<b>66</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>70</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE A – DADOS PARA O CÁLCULO DA INCERTEZA.....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE HISTERESE .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO A – PARÂMETROS FÍSICOS E DE FLUXO DA POLPA DE BAUXITA DE PARAGOMINAS.....</b>	<b>82</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades econômicas mais importantes do estado do Pará e neste segmento a cadeia do alumínio exerce um papel de destaque, uma vez que as etapas de lavra, beneficiamento, refino da alumina e produção do alumínio primário, através da redução eletrolítica, ocorrem no próprio estado (além da extrusão, em menor proporção que as outras etapas). Tal importância demanda grandes investimentos neste setor, e aqui se destaca o beneficiamento, dado o desafio diário de ser cada vez mais competitivo, sustentável e rentável.

Uma característica peculiar atrelada ao beneficiamento de bauxita em Paragominas/Pa é a questão do transporte do material beneficiado até a refinaria na cidade de Barcarena/Pa, que ocorre por mineroduto. Este é o primeiro no mundo em transporte de bauxita e tem extensão de 244 km. Foi projetado para superar dificuldades envolvendo o transporte de bauxita por meio de veículos, como malha viária de qualidade carente, poluição devido aos gases e resíduos gerados, o que acaba elevando os custos deste tipo de transporte (BRUM, 2011).

No Brasil, o emprego de dutos para transporte de minérios vem crescendo devido às vantagens deste meio de transporte. Dentre os principais minerodutos no país existem cinco minerodutos de ferro, dois minerodutos de caulim, dois minerodutos de fosfato e um de bauxita (SILVA, 2017).

No entanto, o projeto de mineroduto para escoamento de polpas minerais requer grande conhecimento acerca do material a ser escoado e dos meios disponíveis para a implantação de tal empreendimento para garantir o bom funcionamento do mesmo, evitando grandes paradas para manutenção que poderiam levar a complicações na retomada (NASCIMENTO e SAMPAIO, 2009).

Neste sentido, o estudo de parâmetros físicos como massa específica, distribuição granulométrica, viscosidade de polpas minerais associados a ensaios complementares como os testes de bombeamento são necessários para trazer informações essenciais para o projeto de minerodutos. No estudo reológico, as curvas de fluxo, perfis de viscosidade e histerese são fontes valiosas que permitem caracterizar o modo como se dá o escoamento de polpas.

De posse destas informações, é possível ainda buscar meios de favorecer o escoamento utilizando-se de aditivos químicos. Estes aditivos alteram a química de superfície de um sistema através de vários mecanismos, podendo diminuir ou aumentar a resistência ao escoamento (GONÇALVES et al., 2015).

No processamento mineral, o interesse crescente pelo transporte de polpas em dutos tem impulsionado estudos cada vez mais específicos sobre projetos de sistemas de bombeamento (GANDHI et al., 2008). Além do conhecimento sobre o material a ser bombeado os parâmetros

do fluxo também levam a informações essenciais para um dimensionamento adequado e vida útil longa destes sistemas, além da redução no consumo de energia nos empreendimentos.

Considerado uma variável expressiva no estudo de escoamento de fluidos, o fator de atrito pode ser calculado através de equações que podem considerar variáveis como regime do fluxo, rugosidade na parede do duto, comportamento reológico do duto (WILSON e THOMAS, 2010). Neste sentido, estudos para estimar o fator de atrito de polpas propõem equações para determinar as perdas de carga, proporcionando projeto mais eficiente de minerodutos (RUFINO, 2009; BRUM, 2011; SILVA, 2017).

Para simular o escoamento por dutos da polpa de bauxita, optou-se por utilizar os valores de diâmetro do duto e vazão volumétrica do próprio mineroduto de Paragominas (BRUM, 2011). A vazão volumétrica foi escolhida como ponto de partida para os cálculos do Número de Reynolds generalizado por representar condições reais do transporte por mineroduto.

A cadeia do alumínio no estado do Pará tem motivado diversos estudos sobre os processos que a compõem. Quaresma (2007) desenvolveu um modelo matemático para calcular fator de atrito de fluidos Herschel-Bulkley e Mizrahi-Berk onde ensaiou amostras de lama vermelha para obtenção de parâmetros reológicos. Brum (2011) propôs uma formulação da polpa de bauxita de Paragominas bombeada pelo mineroduto baseada na granulometria além de determinar os modelos reológicos de polpas de bauxita e desenvolver modelo matemático teórico das equações de atrito deste fluido. Silva (2011) estudou o emprego de aditivos reológicos na polpa de bauxita com intuito de facilitar o bombeamento enquanto Gonçalves et al. (2015) investigaram o efeito de aditivos no comportamento de rejeito de bauxita. Reis (2015) analisou a influência de frações granulométricas no comportamento reológico da polpa de bauxita bombeada por mineroduto.

Em meio ao que tem sido produzido no âmbito de estudos sobre beneficiamento e transporte de bauxita na região Amazônica, este trabalho busca enriquecer com informações acerca dos efeitos de tamanho de partículas e emprego de aditivos modificadores de viscosidade nas propriedades reológicas e no bombeamento por dutos de polpa de bauxita.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Este estudo tem como objetivo avaliar a influência dos parâmetros da granulometria e a presença de aditivo modificador de viscosidade no escoamento em dutos de polpas de bauxita de Paragominas/Pa.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Obter experimentalmente a curva de defloculação das frações;
- Avaliar o comportamento reológico das frações (retida em 150 Mesh; passante de 150 Mesh e retida em 270 Mesh; passante de 270 Mesh) a partir da histerese apresentada.
- Estimar fator de atrito da polpa de bauxita de Paragominas pela equação de Dodge-Metzner e avaliar como este parâmetro pode ser afetado pela presença do aditivo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

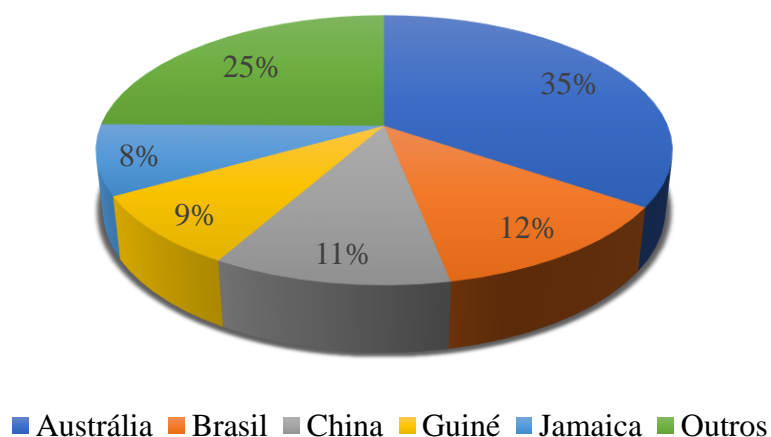
#### 3.1. Bauxita

Produto da lixiviação natural das rochas alcalinas em meio a um clima tropical ora seco ora úmido causando a decomposição dos silicatos e argilominerais concentrando óxidos de alumínio e ferro, a bauxita e seus constituintes são formados a partir dos processos de: caulinização, onde feldspatos e outros aluminossilicatos presentes em rochas metamórficas se decompõem formando o caulim; laterização, consequência da transformação de um solo rico em hidróxidos de alumínio e ferro em rocha (laterito); bauxitização, formação de bauxita dessilicatada na presença de calcário (LUZ e LINS, 2008).

A mistura impura de óxidos de alumínio hidratados e outros elementos é conhecida como bauxita. Dentre os óxidos de alumínio mais importantes, estão a gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), boehmita ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ) e diásporo ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ). As concentrações destes variam de acordo com a região, onde um destes óxidos será predominante. As impurezas mais comuns geralmente associadas a estes óxidos de alumínio são goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), anatásio ( $\text{TiO}_2$ ) e sílica. Esta pode estar nas formas inerte ( $\text{SiO}_2$ ) ou reativa, quando associada à caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) (SAMPAIO e NEVES, 2005).

Estima-se que a reserva mundial de bauxita é superior a 30 bilhões de toneladas, de modo que 34,5 % desta quantidade corresponde à bauxita produzida pela Austrália, seguida dos demais grandes produtores: Brasil (12,4 %), China (11,3 %), Guiné (8,6 %), Jamaica (8,4 %) entre outros, como é mostrado através da Figura (1). Aproximadamente 95 % da produção mundial tem como destino o processo Bayer e 90 % do que passa pelo processo é convertido em alumínio metálico (LUZ e LINS, 2008; SAMPAIO e NEVES, 2005).

**Figura 1 – Reservas mundiais de bauxita**



Fonte: Luz e Lins, 2008

A etapa de lavra pode ser realizada manualmente ou com auxílio de equipamentos, subterrânea ou a céu aberto. Comumente empregada, a lavra a céu aberto é em geral feita através do *strip mining*, que consiste na remoção das camadas do solo na forma de tiras (LUZ e LINS, 2008).

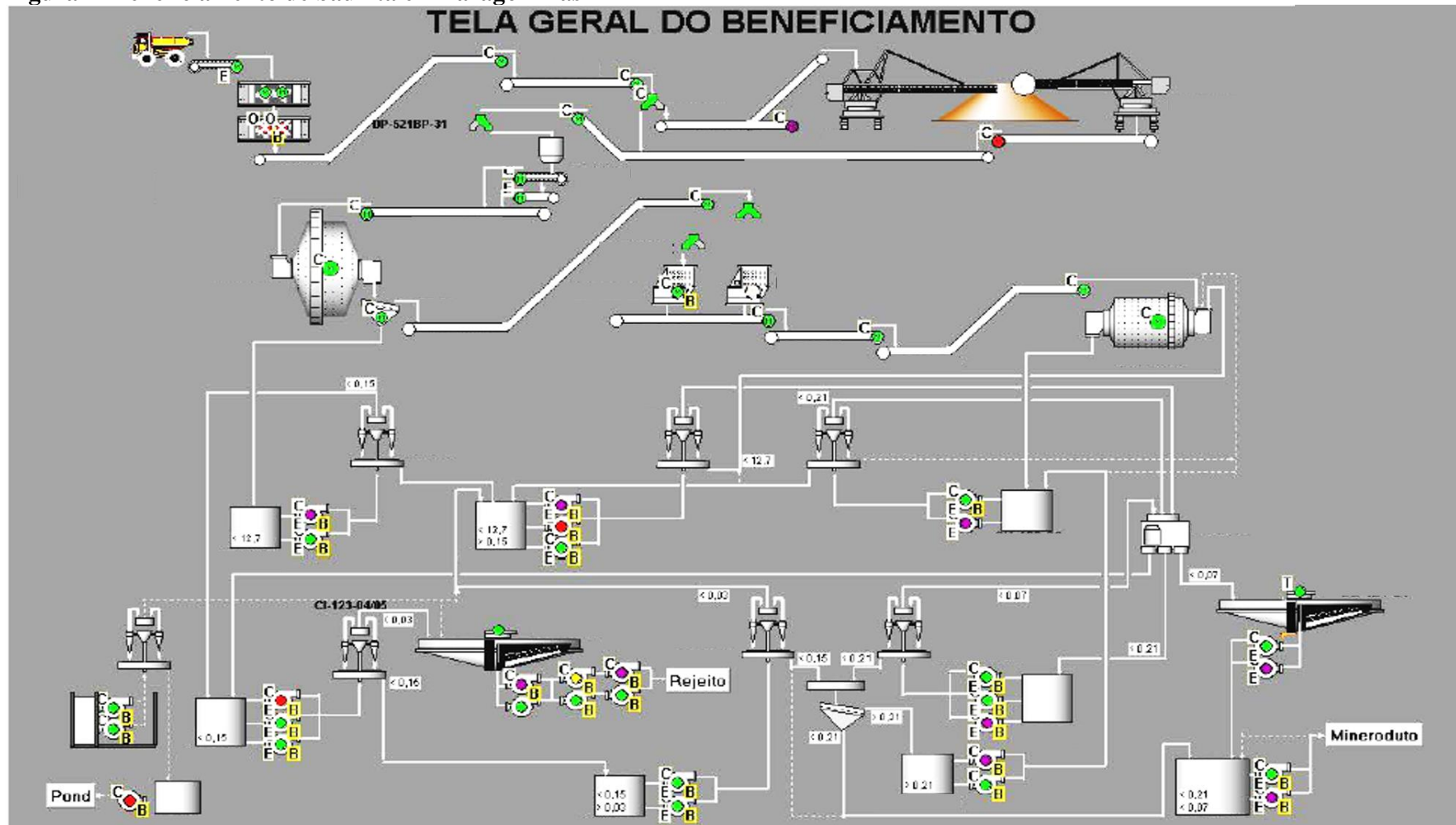
O beneficiamento da bauxita é composto pelas operações de britagem, peneiramento e lavagem para remoção de materiais argilosos e sílica. Há ainda remoção de minerais paramagnéticos seguido de filtragem e secagem até 5 % de umidade. A bauxita para fins metalúrgicos deve apresentar razão mássica de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  superior a 10 e em alguns casos, quando esta razão é inferior a 10, a flotação é empregada para remover a sílica reativa e caulinita. Bauxitas para fins não metalúrgicos passam por separação magnética para remover  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  (LUZ e LINS, 2008).

No município de Paragominas/PA está localizado o Platô Miltônia 3, onde a bauxita é lavrada (método *strip mining*) e beneficiada pela Mineração Paragominas S.A. Durante a lavra, a camada vegetal é removida e transportada. Posteriormente, ocorre o decapeamento, escarificação, carregamento, transporte de minério e recomposição da vegetação original. São removidas tiras de 20 a 30 metros de largura e 200 metros de comprimento (BRUM, 2011).

No processamento da bauxita de Paragominas, Brum (2011) destaca as principais etapas como sendo a britagem e estocagem em pilhas, moagem primária e deslamagem, moagem secundária, desaguamento, peneiramento final e recuperação de água de processo e disposição de rejeitos. Ainda segundo o autor, os circuitos de moagem primária e secundária são compostos por moinhos SAG (*semi-autogenous grinding*) e moinhos tubulares de bolas, a água do processo é recuperada por meio de hidrociclones e espessadores e os rejeitos são depositados em uma bacia de rejeitos onde são secados naturalmente.

Em seguida, a bauxita em forma de polpa é transportada por meio de um mineroduto até a cidade de Barcarena/Pa, alimentando a refinaria de alumina. A Figura (2) apresenta um esquema do beneficiamento em Paragominas.

Figura 2- Beneficiamento de bauxita em Paragominas



Fonte: Brum, 2011

Dentre os maiores produtores de bauxita em 2015, a Austrália ocupa a primeira posição com 81 milhões de toneladas ao ano seguida da China (65 milhões de toneladas/ano) e do Brasil, que produziu 37 milhões de toneladas, como mostra a Tabela (1). Ainda em 2015, o Brasil foi responsável pela produção de cerca de 10 milhões de toneladas de alumina e 793 mil toneladas de alumínio primário. Os percentuais de 66 % da bauxita produzida, 19 % da alumina produzida e 61 % do alumínio brasileiros tiveram como destino o consumo doméstico. Quase a totalidade (91 %) da bauxita produzida para uso metálico no país é originária do estado do Pará (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017).

**Tabela 1 – Produtores mundiais de bauxita em 2015**

<b>País</b>	<b>Produção anual (milhões de toneladas)</b>
Austrália	81
China	65
Brasil	37
Guiné	27,6
Índia	24,2

**Fonte: Associação Brasileira do Alumínio, 2017**

De acordo com o emprego desejável da bauxita, costuma-se classificar esta rocha em bauxita metalúrgica e bauxita não metalúrgica. A primeira, deve apresentar uma composição aproximada de 45-55 % de  $Al_2O_3$ , 5-30 % de  $Fe_2O_3$ , até 6 % de  $TiO_2$  e sílica total até 15 %. Outros setores de indústria que consomem bauxita são os de cimentos, abrasivos, refratários e química (SAMPAIO e NEVES, 2005).

### 3.1.1. Transportes de polpas minerais por minerodutos

O interesse no transporte de polpas minerais através de dutos teve início em meados dos anos 1800 na Califórnia, em plena corrida do ouro. Inicialmente pensado como um dispositivo para auxiliar na prospecção, foi logo ajustado para se direcionar o solo já processado para uma determinada área onde este seria armazenado longe dos sítios a ser prospectados. Esta ideia é hoje empregada na mineração para conduzir os rejeitos para as bacias de contenção. Nos anos 60, a viabilidade econômica deste tipo de empreendimento já era altamente considerada na mineração. (BETINOL e NAVARRO, 2009).



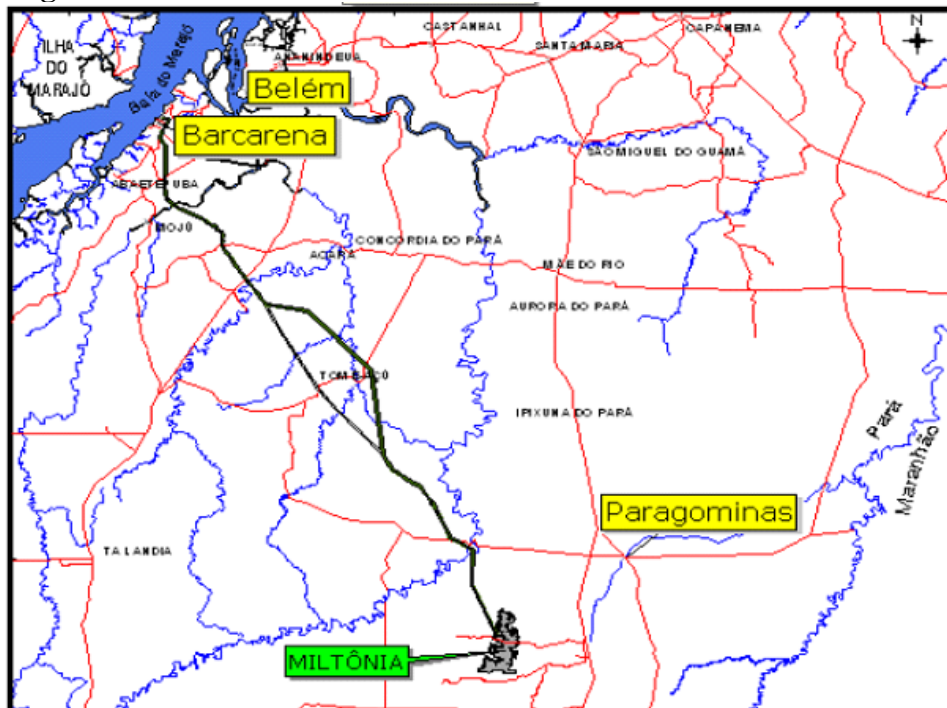
Segundo Gomes (2012), algumas vantagens no emprego de minerodutos são o custo de implantação e operação relativamente baixos se comparados com o uso de rodovias, segurança ambiental e operacional.

Na avaliação de viabilidade econômica, Betinol e Navarro (2009) afirmam que a combinação de fatores como localização das instalações, rota do mineroduto, características da polpa e quantidade de sólidos a ser transportada são preponderantes. Entende-se que capacidade desejada e condições de operação também devem ser levadas em consideração neste tipo de avaliação.

Os estudos de projeto devem considerar aspectos reológicos do fluido que será transportado, permitindo-se estimar o tipo de fluxo da polpa e as velocidades de transporte, o que conseqüentemente geram dados para os estudos hidráulicos, onde são dimensionadas as bombas adequadas, realiza-se o balanço energético do sistema e são projetadas as tubulações apropriadas.

O trajeto do mineroduto de Paragominas é mostrado na Figura (3). Este é o primeiro no mundo em transporte de polpa de bauxita e tem extensão de 244 km, diâmetro de 24", é constituído de aço API 5L-X70, situa-se a uma profundidade média de 1,5 m, atravessa 7 municípios e a calha de 4 rios.

**Figura 3 - Mineroduto de Miltônia**



Miltônia/Belém .....360 km  
Miltônia/Paragominas...67 km  
Miltônia/Barcarena.....244 km

Fonte: Brum, 2011

Sua capacidade é de aproximadamente 15 milhões de toneladas de bauxita por ano. O bombeamento é feito por 6 bombas de deslocamento positivo cuja capacidade total é de 2136 m<sup>3</sup>/h e pressão máxima de descarga de 13,7 MPa. Em Barcarena, seu ponto final, conta com uma estação de desaguamento (BRUM, 2011; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017).

A estação de bombeamento conta com quatro tanques com agitação de polpa, que alimentam uma bomba de carga, a qual é responsável por fornecer a pressão de sucção necessária para as bombas de deslocamento, que por sua vez carregam o mineroduto com a polpa. O mineroduto ainda conta com sistemas de detecção de vazamentos bem como monitoramento de corrosão para garantir que a operação ocorra dentro das especificações desejadas (GANDHI et al., 2008).

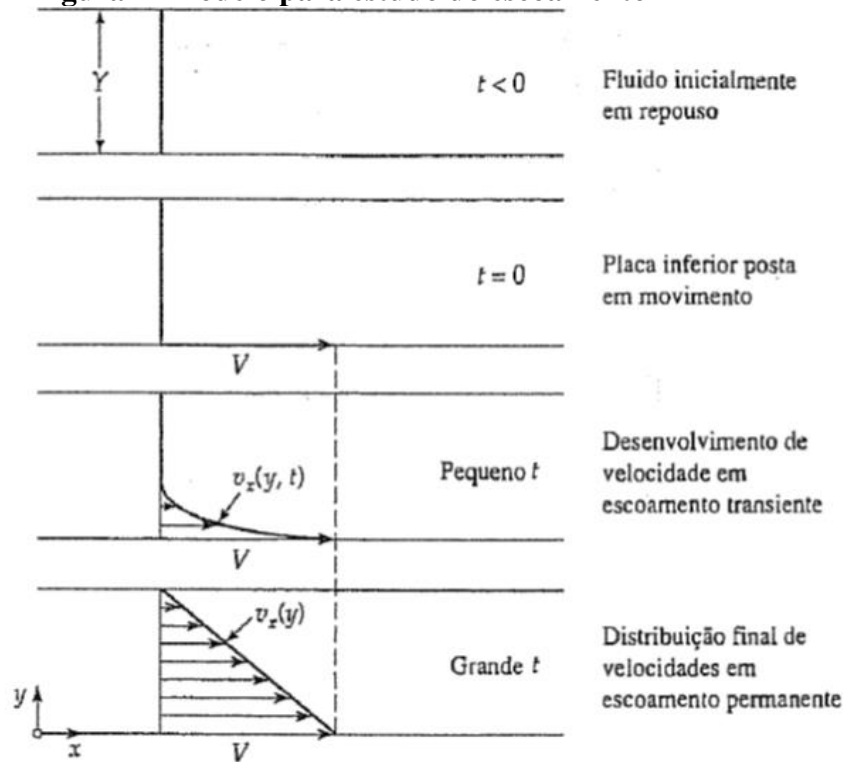
### **3.2. Reologia**

A análise das respostas de tensão de um material submetido a deformação ou deformação de um material submetido a tensão constitui a ciência conhecida como reologia (BRETAS e D'ÁVILA, 2005). O conhecimento da maneira como se dá o fluxo e a deformação de um material revela como o mesmo se comporta na presença de diversos tipos de forças, o que por sua vez permite elaborar projetos cada vez mais eficientes, com menor consumo energético.

#### **3.2.1. Viscosidade**

O estudo do fluxo de matéria foi inicialmente desenvolvido por Isaac Newton, que analisou o escoamento de um fluido ideal. Em um sistema composto por duas placas de área  $A$ , comprimento infinito e separadas por uma distância infinitesimal  $Y$ , preenchida por um fluido que pode estar no estado líquido ou gasoso. A placa superior é mantida fixa e o sistema encontra-se inicialmente em repouso. No tempo  $t = 0$ , a placa inferior movimenta-se com velocidade constante  $V$  no sentido positivo do eixo  $x$ . Com o passar do tempo, o fluido atinge o regime permanente e apresenta o perfil de velocidade final como mostrado na Figura (4).

**Figura 4- Modelo para estudo do escoamento**



Fonte: Bird, Stewart e Lightfoot, 1960

Admitindo-se que o fluxo é laminar, é necessária uma força  $F$  para manter a velocidade da placa inferior. Esta relação pode ser entendida da seguinte forma:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{Y} \quad (1)$$

A Equação (1) mostra que a força é diretamente proporcional à velocidade e à área, mas inversamente proporcional à distância entre as placas. O termo  $\mu$  representa uma constante de proporcionalidade, chamada de viscosidade. O primeiro termo da Equação (1) é a definição da tensão ( $\tau_{yx}$ ) que indica a força que o fluido de menor valor de  $\dot{\gamma}$  exerce sobre o fluido de maior  $\dot{\gamma}$ . Substituindo  $V/Y$  pela razão  $-dv_x/dy$ , pode-se reescrever a Equação (1):

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (2)$$

A Equação (2) é conhecida como Lei de Newton da Viscosidade e todos os fluidos que obedecem tal relação são chamados fluidos newtonianos. Água, glicerina e óleos minerais apresentam comportamento de fluidos newtonianos. Aqueles fluidos cujo comportamento não

pode ser descrito pela Equação (2) são chamados fluidos não newtonianos. Tintas, creme dental e suspensões minerais são alguns exemplos de fluidos não newtonianos.

Embora bastante generalizada, esta classificação permite conhecer fundamentalmente o comportamento reológico de um fluido. Os fluidos que apresentam comportamento não newtoniano podem ser subclassificados com relação ao perfil reológico e dependência do tempo.

### 3.2.2. Classificação do perfil reológico dos fluidos

O comportamento dos fluidos é descrito por equações matemáticas, de modo que a Equação de Herschel-Bulkley representa um modelo geral, representado pela Equação (3), que pode descrever outros modelos inclusive o newtoniano.

$$\tau = \tau_0 + K \times \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

onde:  $\tau$  = tensão de cisalhamento

$\tau_0$  = tensão inicial

$K$  = índice de consistência do fluido

$n$  = índice de comportamento do fluido

Os fluidos newtonianos apresentam valor de  $n$  igual a 1, o que indica que a tensão varia linearmente com a taxa de cisalhamento e através de uma série de considerações, o índice de consistência representa a própria viscosidade (FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 2004). Fluidos que apresentam tensão de escoamento precisam de uma tensão cisalhante superior à energia de coesão das espécies que o compõem para que escoem.

No comportamento pseudoplástico, a viscosidade diminui à medida que se aumenta a taxa de cisalhamento devido ao estiramento das macromoléculas (caso dos polímeros), deformação das gotículas (no caso das emulsões), rompimento dos agregados (caso das suspensões) ou à orientação das partículas (caso das dispersões) (ARAÚJO e NASCIMENTO, 2007).

Em fluidos dilatantes, a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento. Misturas de partículas em contato íntimo com uma quantidade de líquido suficiente para preencher os espaços entre as partículas são casos de fluidos dilatantes. Em baixas taxas de cisalhamento, a fricção interna é pequena e o líquido age como lubrificante entre as partículas

em movimento. Em taxas elevadas, as partículas se separam, aumentando o volume total. O lubrificante já não é suficiente para preencher os vazios, há deficiência de lubrificação e aumento da viscosidade (BARBATO, 2011). Para os fluidos newtonianos bem como os não newtonianos independentes do tempo, alguns valores para  $\tau_0$ ,  $K$  e  $n$  são apresentados na Tabela (2).

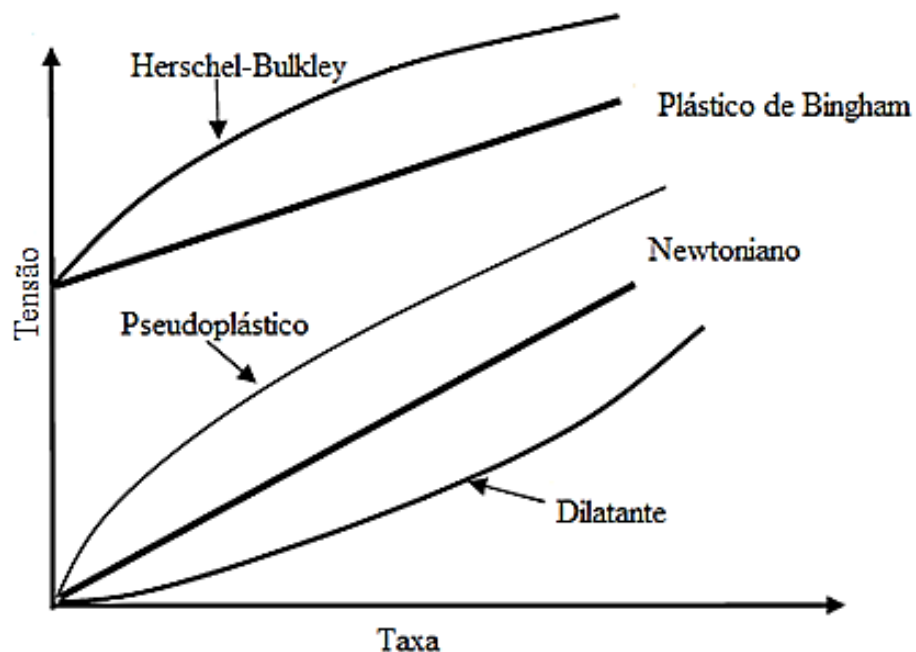
**Tabela 2- Parâmetros dos modelos reológicos**

Classificação do Fluido	Valor de $K$	Valor de $n$	Valor de $\tau_0$
Herschel-Bulkley	$> 0$	$0 < n < \infty$	$> 0$
Newtoniano	$> 0$	1	0
Pseudoplástico	$> 0$	$0 < n < 1$	0
Dilatante	$> 0$	$1 < n < \infty$	0
Plástico de Bingham	$> 0$	1	$> 0$

Fonte: Steffe, 1996

A Figura (5) apresenta o comportamento reológico dos fluidos em um gráfico que relaciona tensão e taxa de cisalhamento. A resposta do fluido submetido a este tipo de ensaio é conhecida por curva de fluxo.

**Figura 5 - Comportamento reológico dos fluidos**



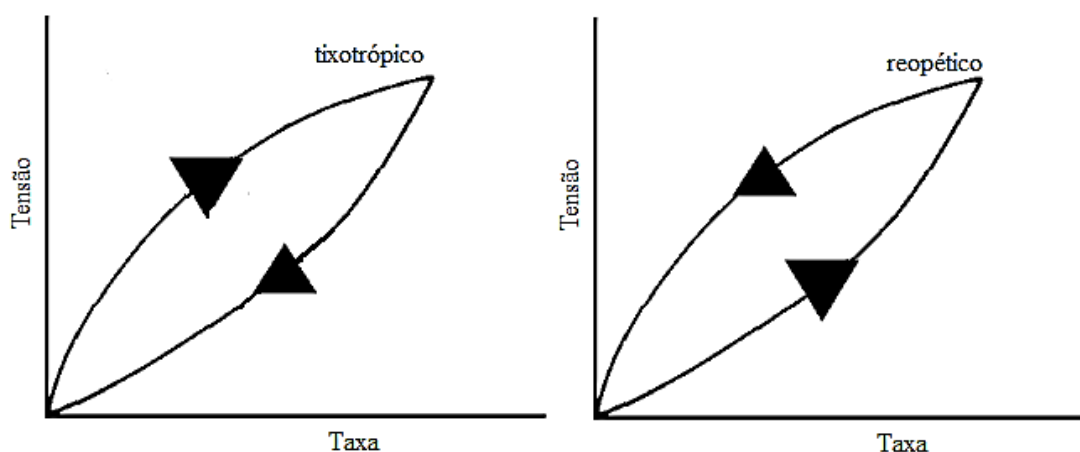
Fonte: White, 1998

### 3.2.3. Classificação quanto à dependência do tempo

Os fluidos não newtonianos que apresentam dependência com o tempo são classificados como tixotrópicos e reopéticos. Fluidos com características tixotrópicas apresentam redução da viscosidade à medida que se aumenta o tempo de cisalhamento, a uma taxa de cisalhamento constante. Segundo Nascimento (2008), a tixotropia é resultado da recomposição mais lenta da estrutura do material quando comparada à velocidade de destruição desta mesma estrutura, em um estado inicial; a reopexia resulta de uma velocidade de recomposição da estrutura mais rápida que a velocidade de destruição da estrutura inicial.

Pelo fato de as velocidades de destruição e recomposição serem diferentes, as curvas de fluxo não se sobrepõem, formando uma área conhecida como histerese. Quanto maior for esta área, mais intensa é a dependência com o tempo. A Figura (6) exemplifica a diferença entre um fluido tixotrópico e fluido reopético.

**Figura 6- Fluido tixotrópico e fluido reopético**



### 3.2.4. Reologia de suspensões

A reologia de uma suspensão é um aspecto que merece ser adequadamente estudado pois afeta diversas operações unitárias durante um processo de beneficiamento assim como operações de bombeamento e o transporte por meio de minerodutos. Ferreira et al. (2005) esclarecem o objetivo do estudo da reologia de suspensões como sendo o fluxo por meio da determinação da viscosidade aparente e tensão de escoamento, análise que pode ser feita a partir das curvas de fluxo.

O estudo reológico por meio de medidas de viscosidade ainda permite avaliar a estabilidade de suspensões coloidais na presença de aditivos (OHENOJA et al., 2014).

He, Wang e Forsberg (2006) afirmam que a reologia de uma polpa mineral indica o grau de agregação e da interação entre as partículas sólidas que constituem a suspensão, e daí a necessidade de se avaliar a tensão de escoamento, que é uma medida indireta destes parâmetros.

Interações entre partículas que compõem uma suspensão coloidal afetam as características reológicas dos fluidos. Quando as interações são do tipo forças de *van der Waals*, resultado da interação de dipolos formados devido a aproximação das partículas que induzem a formação de outros dipolos, tem-se uma suspensão eletricamente carregada. A intensidade deste tipo de força pode ser modificada por meio do tamanho das partículas (JOHNSON et al., 2000).

Em outra situação, quando partículas minerais se encontram em meio aquoso, estas se tornam eletricamente carregadas em suas superfícies e promovem uma redistribuição muitas vezes desigual dos íons nas vizinhanças. A interação destas partículas carregadas e as vizinhanças dá origem à chamada dupla camada elétrica. Forças de *van der Waals* combinadas com forças originadas pela dupla camada elétrica compõem a teoria que explica a estabilidade de colóides desenvolvida por Derjaguin e Landau e Verwey e Overbeek (DLVO) que de maneira simplificada afirma que a interação inter partículas resultante em uma suspensão coloidal se dá pelo somatório destas forças. As forças inter partículas podem ser coesivas ou repulsivas. (JOHNSON et al., 2000).

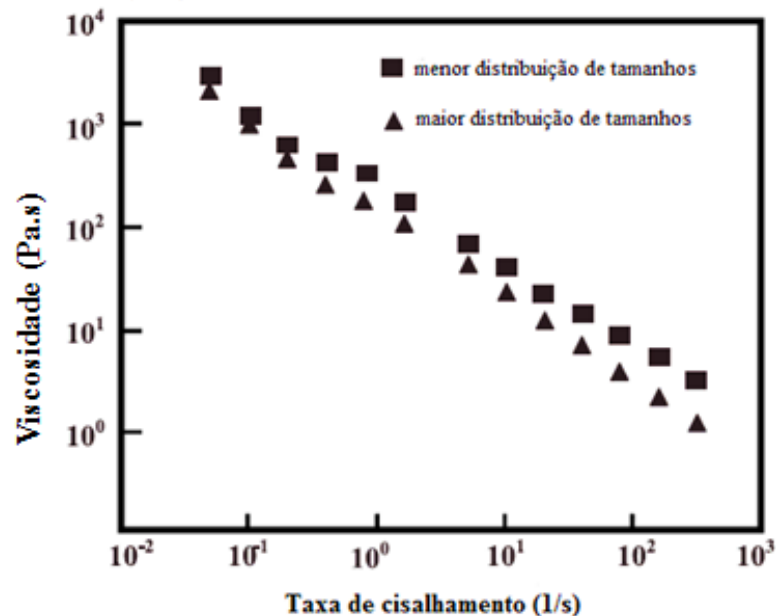
A influência da concentração de sólidos na reologia de polpas é resultado de forças entre as partículas sólidas causando maior resistência ao cisalhamento. Tal resistência se dá por conta do aumento da concentração de sólidos, que intensifica a aglomeração de partículas, diminuindo possíveis interações mais fracas entre as partículas (ZHOU et al., 1999). He, Wang e Forsberg (2006) explicam que, em suspensões minerais diluídas, as partículas encontram-se mais distantes umas das outras e as interações de *van der Waals* são suficientemente fracas, mantendo as partículas livres na fase líquida.

O tamanho da partícula também afeta a reologia de uma suspensão. À medida que se aumenta a concentração de partículas de granulometria inferior a 1µm tem-se um aumento da viscosidade causado por aglomerações resultantes do aumento das forças atrativas de *van der Waals* (HE, WANG e FORSSBERG, 2004).

A distribuição de tamanhos das partículas também afeta a caracterização reológica. Quanto maior esta distribuição, menor o empacotamento das partículas, o que favorece a mobilidade devido a maior quantidade de moléculas de água disponível. A forma da partícula pode alterar as características reológicas de uma suspensão mineral de modo que suspensões compostas por partículas com maior esfericidade apresentam menores valores de viscosidade

(HE, WANG e FORSSBERG, 2006). A Figura (7) exemplifica a relação entre a distribuição granulométrica e a viscosidade de uma suspensão de dióxido de titânio.

**Figura 7 - Influência da distribuição granulométrica**



Fonte: He, Wang e Forsberg, 2004

A temperatura é outra variável que influencia a viscosidade de suspensões. Em geral, em temperaturas mais elevadas, a viscosidade da suspensão diminui. A velocidade de rotação em que produz o cisalhamento sobre o fluido também influencia nas características reológicas e por isso, deve ser cuidadosamente escolhida em uma caracterização (HE, WANG e FORSSBERG, 2004).

A presença de aditivos altera a característica reológica de uma suspensão pois são dotados de carga. Estes podem ser de natureza química inorgânica ou orgânica, como no caso dos polímeros. A escolha de um aditivo deve levar em consideração a composição química das partículas que compõem a suspensão, bem como conhecer as propriedades e características do aditivo.

Barbato, França e Nele (2011) ao estudar a influência da concentração de sólidos, pH, distribuição granulométrica e temperatura no comportamento reológico de polpas de bauxita recomendam polpas com perfil tixotrópico como mais adequadas para o transporte por mineroduto, já que as polpas com comportamento reopético podem causar obstrução dos tubos durante eventuais paradas no processo de bombeamento.



### 3.3. Reometria

A definição de técnicas para avaliação da relação entre tensão e taxa de cisalhamento constitui o escopo da reometria. Os aspectos de maior interesse na reometria envolvem a escolha da geometria do equipamento mais adequada e as próprias medidas. Podem envolver aplicação de uma força mecânica (reômetros de geometria controlável), métodos ópticos ou ainda ressonância magnética nuclear e ultrassom (BRETAS e D'ÁVILA, 2005).

De forma geral, os ensaios reológicos visam medir um parâmetro sob determinada condição. Em outras palavras, pode-se determinar a tensão de cisalhamento e a viscosidade de um fluido sob uma taxa de cisalhamento constante ou variável. Outro caso é a determinação da taxa de cisalhamento do fluido e a viscosidade controlando-se a tensão aplicada (que pode ser constante ou variável em um intervalo de tempo).

Outras propriedades podem ainda ser quantificadas através de equipamentos mais sofisticados. Entretanto, deseja-se enfatizar a tensão de cisalhamento e a viscosidade pelo fato de ser facilmente medidos comparando-se a quantificação de outros parâmetros. A viscosidade fornece entendimento sobre como se dá o escoamento do fluido, grau de dispersão das partículas em uma suspensão enquanto que a tensão de cisalhamento permite até estimar a intensidade das forças inter partículas de uma suspensão (NGUYEN e BOGER, 1985). O fato de a tensão de cisalhamento ser altamente influenciada pelas forças inter partículas e independente do aparato experimental utilizado para medi-la simplifica as condições para avaliação desta propriedade (JOHNSON et al., 2000).

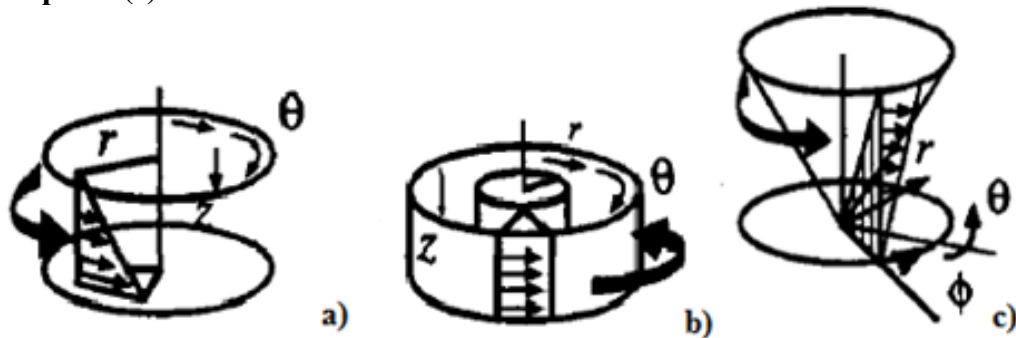
Possa e Lima (2000) destacam que no tratamento de minérios na forma de suspensão, duas técnicas são as mais aplicáveis: capilar e rotacionais. Dentre os métodos que envolvem aplicação mecânica de forças, as geometrias de equipamento mais utilizadas são do tipo discos paralelos, cone-placa, reometria capilar e cilindros concêntricos.

#### 3.3.1. Viscosímetros rotacionais

São basicamente constituídos por duas partes onde uma é fixa e a outra gira em torno de seu próprio eixo gerando cisalhamento no fluido. A viscosidade é medida em função do torque necessário para produzir uma determinada velocidade angular ou a partir da velocidade necessária para produzir determinado torque. Viscosímetros do tipo copo e disco são empregados para taxas de cisalhamento de até  $74 \text{ s}^{-1}$ , os do tipo cone-placa são eficientes para taxas de cisalhamento médias e os do tipo cilindro concêntricos podem ser usados sob taxas médias até altas e viscosidade de até  $10^9 \text{ mPa.s}$  (POSSA e LIMA, 2000).

A Figura (8) mostra alguns tipos de geometrias dentre as mencionadas.

**Figura 8 - Geometrias: discos paralelos (a), cilindros concêntricos (b), cone e placa (c)**



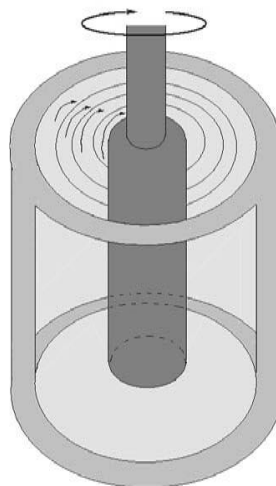
Fonte: Macosco, 1994

### 3.3.2. Geometria cilindros concêntricos

Viscosímetros e reômetros rotacionais do tipo cilindros concêntricos promovem a deformação por cisalhamento do material por meio da rotação de um elemento sensor no interior ou exterior da amostra. A Figura (9) apresenta um esquema do dispositivo.

Em um viscosímetro, as medidas reológicas são realizadas em regime permanente de cisalhamento, onde o rotor gira em um único sentido com velocidade constante, a superfície do material em contato com o rotor tem a mesma velocidade deste e a velocidade da camada do material em contato com o copo está em repouso (SAMPAIO, FRANÇA E BRAGA, 2007).

**Figura 9- Cilindros concêntricos**



Fonte: Sampaio, França e Braga, 2007

Ao determinar a tensão de escoamento de uma suspensão industrial empregando viscosímetro com rotor tipo cilindros concêntricos, Nguyen e Boger (1987) relataram dificuldades na avaliação do comportamento de fluidos dependentes do tempo devido a

geometria do rotor. Os autores esclarecem a necessidade das dimensões do rotor serem apropriadas para garantir que toda a suspensão é cisalhada durante a rotação.

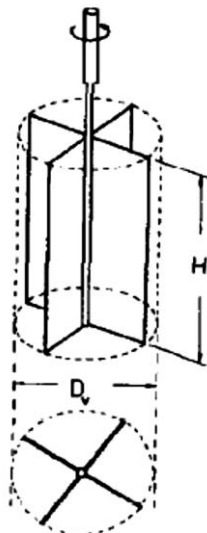
Este tipo de geometria apresenta como principais fontes de erro na medição das propriedades reológicas efeitos na parte inferior do rotor, deslizamento na parede do rotor, sedimentação de partículas, absorção de umidade, quantidade incorreta de amostra a ser analisada, presença de bolhas (FERREIRA et al., 2005; SAMPAIO, FRANÇA e BRAGA, 2007).

### 3.3.3. Outras geometrias

Estudos de caracterização reológica de polpas minerais vem sendo desenvolvidos utilizando-se viscosímetros/reômetros com geometria de *spindles* diferentes dos já conhecidos cilindros concêntricos, na tentativa de reduzir erros experimentais.

O modelo conhecido como *vane* é composto por espécies de palhetas que, ao girar, minimizam efeitos de sedimentação das partículas, como mostra a Figura (10). Os resultados obtidos utilizando-se o *vane* mostraram que este dispositivo foi mais preciso na determinação da tensão de escoamento de suspensões de lama vermelha em altas concentrações, em comparação com testes de caracterização reológica sem o uso do mesmo (NGUYEN e BOGER, 1985).

**Figura 10 - Representação do rotor tipo *vane***

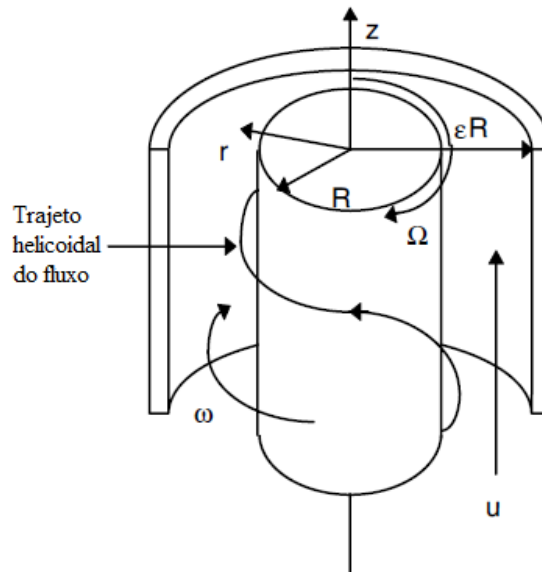


Fonte: Nguyen e Boger, 1985

Akroyd e Nguyen (2003) estudaram a eficácia de um dispositivo baseado nos princípios do fluxo helicoidal de fluidos para caracterização reológica. Os autores desenvolveram um

procedimento que é aplicável na caracterização de fluidos newtonianos e não newtonianos, como polímeros e suspensões minerais. Embora necessite de ajustes para englobar maior diversidade de fluidos, apresenta-se como boa alternativa para estudo de fluidos industriais. Outro modelo de rotor para determinação de propriedades reológicas de suspensão mineral é apresentado na Figura (11).

**Figura 11 - Representação do dispositivo helicoidal**



Fonte: Akroyd e Nguyen, 2003

### 3.4. Aditivos modificadores de viscosidade de polpas minerais

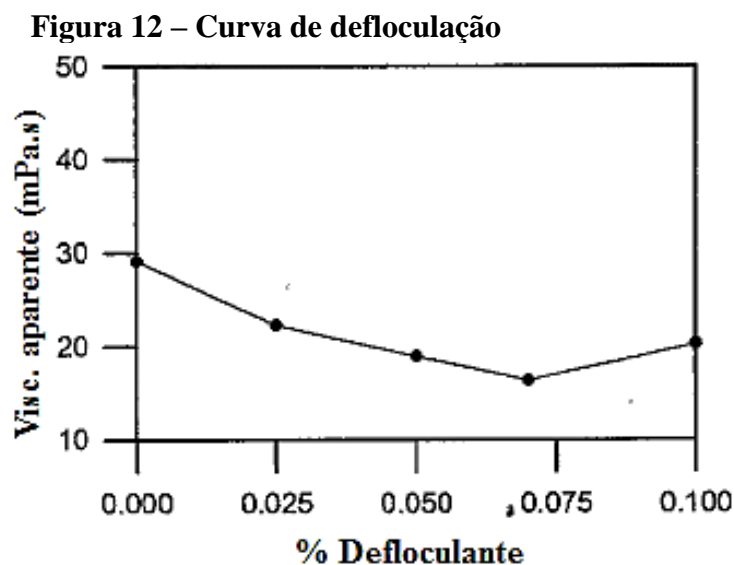
Na indústria mineral, diversas etapas de beneficiamento/tratamento empregam estes produtos, seja com a finalidade de concentrar ou dispersar partículas. Um exemplo recorrente é a disposição de rejeitos, que normalmente ocorre nas chamadas bacias de rejeitos. Para chegar até as bacias, os rejeitos formados por partículas de minerais de baixo interesse econômico para determinado processo misturados a água são bombeados através de dutos até as bacias. A eficiência no projeto de sedimentadores para rejeitos minerais é altamente dependente de estudos reológicos que irão garantir a redução de perdas (BOGER, 2000).

Entretanto, para que o bombeamento ocorra de maneira eficiente, o material deve apresentar condições de fluxo adequadas as quais podem ser alcançadas por meio de ajustes no teor de sólidos (quanto mais fluido o sistema, mais fácil se dá o bombeamento), ou através do emprego dos aditivos reológicos dispersantes, que agem modificando as características nas superfícies das partículas suspensas em um fluido, modificando a interação inter partículas. (JONES e HORSLEY, 2000).

De maneira geral, os aditivos são polímeros de origem inorgânica ou orgânica e dentre os aditivos poliméricos destacam-se os dispersantes, que são moléculas contendo um ou vários grupos funcionais fixos a uma cadeia polimérica solúvel. Os dispersantes poliméricos podem ou não ser carregados eletricamente. Esta característica é resultado das propriedades do grupo funcional ligado à cadeia principal. Se estas cadeias são longas demais, podem causar floculação devido a formação de emaranhados. Por outro lado, se muito curtas, não garantem uma barreira eficaz entre as partículas, o que causa instabilidade na dispersão (FARROKHPAY, 2009).

Quando adicionado à suspensão, o dispersante intensifica a repulsão entre as partículas causando assim uma redução na viscosidade aparente do fluido que pode atingir um valor mínimo. A concentração de aditivo capaz de reduzir ao mínimo a viscosidade é chamada concentração ideal ou ótima de defloculante. Neste momento, a suspensão encontra-se estabilizada e o aditivo saturado, adsorvido na superfície das partículas. Qualquer quantidade de defloculante superior ao valor ótimo causa desestabilização do sistema, ocorrendo a floculação das partículas e aumentando a viscosidade (PAPO e PIANI, 2017).

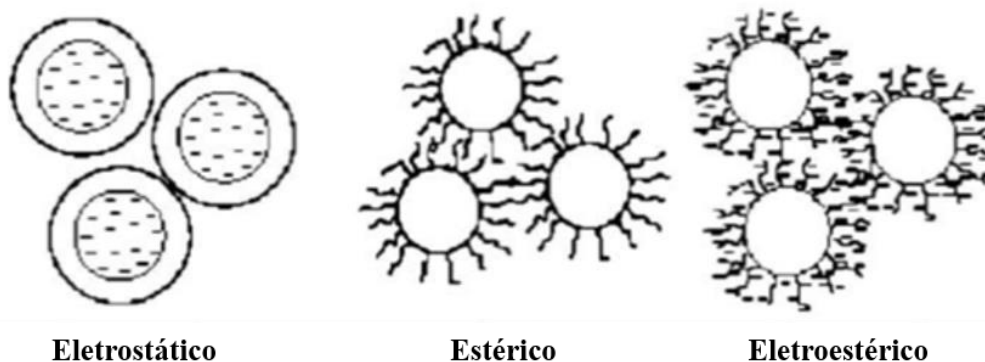
Experimentalmente, a curva de defloculação é um método usado para avaliar a capacidade defloculante de um aditivo. Este experimento consiste na aplicação de um cisalhamento constante sobre as amostras, que são ensaiadas inicialmente sem aditivo e posteriormente na presença deste em concentrações crescentes. Determina-se a viscosidade aparente média de cada amostra assim como a concentração de defloculante empregada no respectivo ensaio. Os valores de concentração e viscosidade média são relacionados em um gráfico, e a curva obtida é a própria curva de defloculação, como mostra a Figura (12).



Fonte: Hotza et al., 1998

Aditivos poliméricos são capazes de promover a estabilização de uma suspensão coloidal através de dois mecanismos: estabilização eletrostática e estabilização estérica. Na estabilização eletrostática, são formadas camadas eletricamente carregadas em torno da superfície da partícula, evitando a aglomeração das mesmas. Na estabilização estérica, a restrição de volume disponível combinada a um fator osmótico promovem a compressão da camada adsorvida, aumentando a concentração de polímeros no entorno da partícula. Existe ainda um mecanismo que resulta da combinação dos outros anteriormente citados: estabilização eletroestérica. Em geral, dispersantes poliméricos iônicos podem estabilizar uma suspensão pelas vias eletrostática e estérica enquanto que os dispersantes não iônicos empregam apenas a via estérica (FARROKHPAY, 2009). A Figura (13) apresenta um esquema dos mecanismos de estabilização.

**Figura 13 - Mecanismos de estabilização**



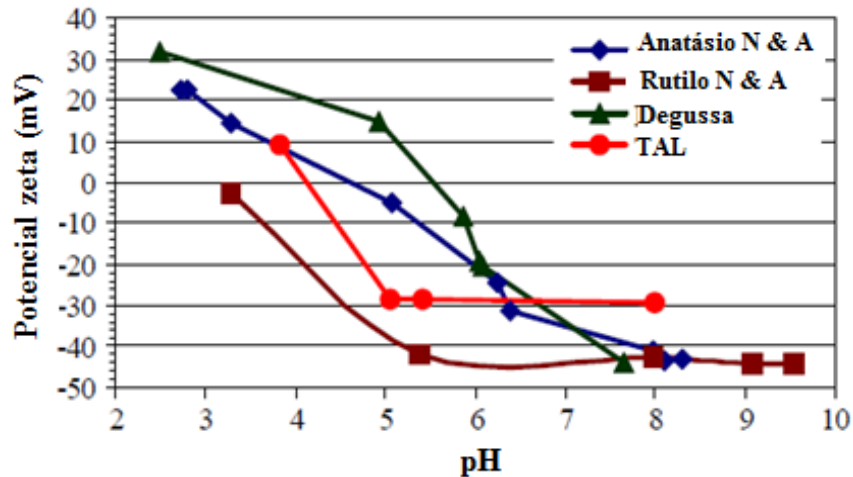
Fonte: Farrokhpay, 2009

Ao estudar o efeito de aditivos de diferentes naturezas químicas em rejeito de bauxita, Gonçalves et al. (2015) observaram que polímeros aniônicos podem atuar tanto como dispersantes quanto como floculantes e que o pH e a composição química do sistema são fatores que influenciam diretamente neste comportamento.

Outra variável que afeta a reologia de suspensões, o potencial zeta ( $\zeta$ ) é uma função das cargas superficiais das partículas. Por isso, pode-se utilizar este parâmetro para estimar o grau de estabilização de sistemas coloidais. No ponto isoelétrico, que corresponde ao pH onde o potencial zeta é nulo, as partículas tendem a se aglomerar, por isso deve ser evitado quando o objetivo é manter a suspensão estabilizada. O potencial zeta é influenciado pelo pH, concentração de íons, solvente, e natureza dos aditivos (MANDZY, GRULKE e DRUFFEL, 2005).

A Figura (14) apresenta a variação do potencial zeta com o pH em suspensões formadas por água e nanopartículas de óxidos de titânio de diferentes estruturas.

**Figura 14 - Potencial zeta vs pH de amostras de óxido de titânio**



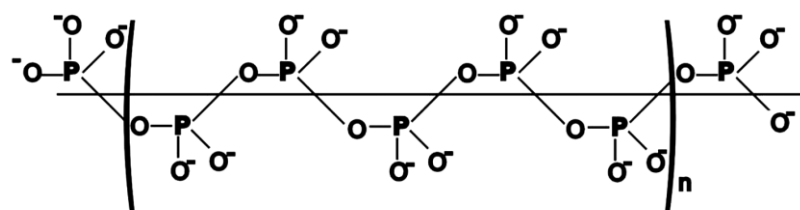
Fonte: Mandzy, Grulke e Druffel, 2005

A concentração do aditivo empregado é um fator a ser observado quando da utilização do mesmo para modificação das propriedades reológicas de uma suspensão mineral (ARAÚJO, 2008). Por isso, ao se utilizar um aditivo para determinado fim, deve-se ter em mente que este pode prejudicar etapas posteriores de um processo. Desta forma, a seleção do aditivo bem como da concentração suficiente para se obter o efeito desejado deve ser extremamente criteriosa.

#### 3.4.1. Hexametáfosfato de sódio

O hexametáfosfato de sódio é considerado um polímero inorgânico solúvel produto de reações de polimerização por condensação. Na presença de água, apresenta-se como íons estáveis obtidos da fusão a 600 °C ~ 800 °C de  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  seguido de resfriamento rápido. Sua fórmula geral é  $\text{Na}_{n+2}\text{P}_n\text{O}_{3n+1}$  (LIMA et al, 2010). A Figura (15) apresenta a estrutura de um polifosfato, classe de polímeros inorgânicos a qual pertence o hexametáfosfato de sódio.

**Figura 15 - Cadeia de polifosfato com 5 unidades de ortofosfato**



Fonte: Lima et al., 2010

Jones e Horsley (2000) explicam o mecanismo de dispersão dos polifosfatos em suspensão contendo água, partículas de óxido de ferro e sílica. Devido à interação interpartículas, a sílica e o óxido de ferro formam flocos, aumentando a viscosidade do sistema. Os aditivos atuam ligando-se às partículas do óxido metálico e tornando suas superfícies carregadas negativamente, destruindo os flocos e reduzindo a tensão de escoamento.

Ao estudar o efeito do hexametáfosfato de sódio como dispersante em suspensões de lama vermelha em pH 10, Hiroshue et al. (2006) observaram que nas concentrações de 0,1 % a 1 % (peso) de aditivo o efeito foi mais significativo.

Ao estudar o efeito do hexametáfosfato de sódio como defloculante de polpas de bauxita a 50 % (peso), Silva (2011) observou que a concentração deste aditivo a qual provocou menores valores de viscosidade da polpa correspondia a 2,5%. Em polpas de rejeito de bauxita a 33,5 %, Gonçalves et al. (2015) verificaram que 101,75 g/ton foi a concentração deste aditivo que promoveu a viscosidade mínima da polpa.

A opção pelo hexametáfosfato de sódio como aditivo para desenvolvimento deste estudo se deu por conta dos resultados satisfatórios de outros estudos existentes na literatura associados à maior facilidade na manipulação deste aditivo e preparo de reagentes a partir do mesmo.

### 3.5. Fator de atrito

Parâmetro obtido a partir de resultados experimentais, o fator de atrito é contabilizado entre as perdas de cargas maiores ou distribuídas ao longo de um duto por onde escoar um fluido. De maneira geral, é uma função do número de Reynolds ( $Re$ ) combinado com outras variáveis do escoamento e, de acordo com o regime de fluxo, é calculado por equações diferentes (FOX, MCDONALD, PRITCHARD, 2004).

Dodge e Metzner (1959) observaram o escoamento de fluidos newtonianos e não newtonianos a fim de propor uma forma de calcular o fator de atrito de fluidos no regime turbulento a partir de uma única equação baseada em propriedades do fluido.

Partindo do caso mais simples de escoamento, onde um fluido newtoniano escoar em regime laminar por um duto liso, os autores fizeram uma série de considerações físicas e matemáticas empregando ainda o número de Reynolds generalizado ( $N_{Re'}$ ) desenvolvido por Metzner e Reed (1955), aplicados a fluidos newtonianos e pseudoplásticos.

Dodge e Metzner (1959) propuseram uma equação generalizada que relaciona o fator de atrito ( $f_{D-M}$ ) no regime turbulento e  $N_{Re'}$ . As equações de  $N_{Re'}$  e  $f_{D-M}$  são apresentadas pelas Equações (4) e (5).



$$N_{Re'} = \frac{D^{n'} V^{2-n'} \rho}{g_c K' 8^{n'-1}} \quad (4)$$

$$\sqrt{\frac{1}{f_{D-M}}} = \frac{4}{n^{0,75}} \log \left[ N_{Re'} f_{D-M}^{1-\frac{n'}{2}} \right] - \frac{0,4}{n^{1,2}} \quad (5)$$

Onde: D = diâmetro do duto;

V = velocidade média do fluido escoando no duto;

$\rho$  = massa específica do fluido;

$g_c$  = constante de gravidade, equivalente a 32,17 lb.ft/lbf.s<sup>2</sup>.

Partindo dos conceitos desenvolvidos para a formulação da correlação de Rabinowitsch, Metzner e Reed (1955) estudaram o caso do fluido tipo lei da potência para definir os parâmetros  $K'$  e  $n'$ , que são dados pelas Equações (6) e (7) (apenas para o caso dos fluidos tipo lei da potência).

$$n' = n \quad (6)$$

$$K' = K \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n \quad (7)$$

Os parâmetros reológicos  $K$  e  $n$  para o modelo lei da potência apresentam intervalos de valores apresentado na Tabela (2), página 25.

A partir dos conceitos sobre lei da parede, Quaresma (2007) propôs uma equação matemática para calcular o fator de atrito de fluidos do tipo Herschel-Bulkley. Esta equação considera as características do escoamento de acordo com o referido modelo reológico e introduz como parâmetros uma nova velocidade característica e comprimento característico como sendo função de  $n$  e  $\tau_0$ . O modelo matemático proposto é apresentado pela Equação (8).

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{f}{2} - \frac{Y^{\frac{n}{2-n}}}{Re^{\frac{n}{2-n}}}}} = \frac{1}{k} \ln \left[ Re^{\frac{1}{n}} \frac{(1-\tilde{a})}{2} \left( \sqrt{\frac{f}{2} - \frac{Y^{\frac{n}{2-n}}}{Re^{\frac{n}{2-n}}}} \right)^{2-\frac{n}{n}} \right] + \frac{(\tilde{a}-1)(\tilde{a}+3)}{2k} + C \quad (8)$$

Onde os parâmetros  $\tilde{a}$ ,  $Y$ ,  $f$ ,  $Re$  são definidos através das Equações (9) a (12).

$$\tilde{a} = \frac{2Y^{n/2-n}}{f \operatorname{Re}_g^{2/2-n}} \quad (9)$$

$$f = \frac{2\tau_\omega}{\rho U_m^2} \quad (10)$$

$$Y = \frac{D^2 \rho \tau_0^{2-n/n}}{k^{2/n}} \quad (11)$$

$$\operatorname{Re} = \rho \frac{U_m^{2-n} D^n}{k} \quad (12)$$

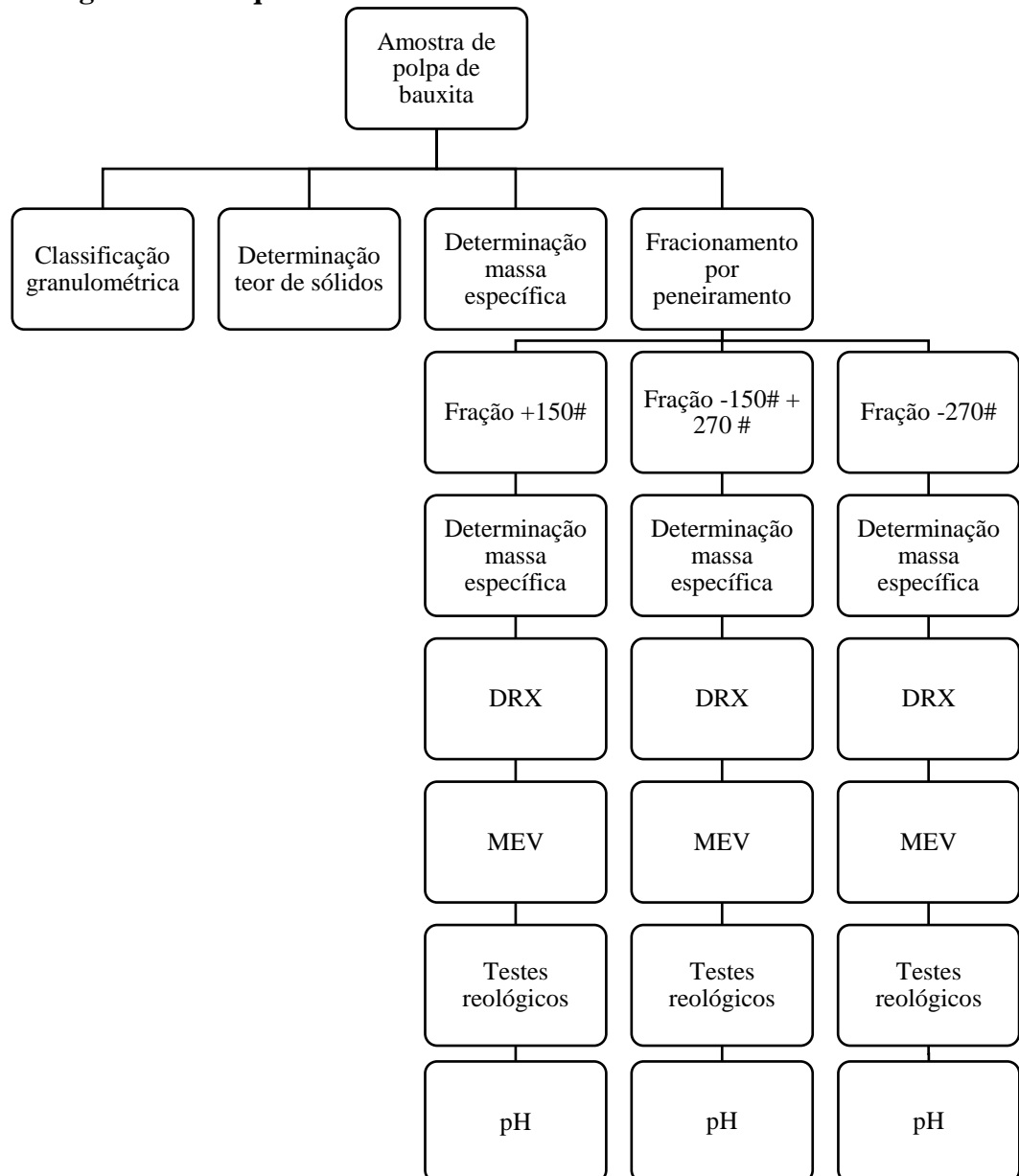
Foram adotados como valores de  $k$  e  $C(x)$  aqueles obtidos experimentalmente por Nikuradse, que são 0,41 e 5,55 respectivamente. A Equação (8) permitiu calcular de modo satisfatório o fator de atrito, quando comparados seus resultados aos existentes na literatura.

Nota-se que tanto no modelo de Quaresma (2007) quanto de Dodge e Metzner (1959) o fator de atrito está implícito e para a resolução destas equações pode-se adotar por exemplo métodos matemáticos ou iterativos, sendo que este pode ser bastante dispendioso.

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios realizados buscaram caracterizar a amostra original, obter as frações de bauxita de acordo com a granulometria, avaliar a composição mineralógica e o comportamento reológico das amostras. O esquema apresentado no Fluxograma (1) mostra as análises empregadas.

**Fluxograma 1 - Esquema dos ensaios**



A amostra de polpa de bauxita fornecida pela Mineração Paragominas S.A. foi submetida aos testes físicos na determinação da concentração de sólidos e propriedades como

massa específica e pH da polpa. A Tabela (3) relaciona as amostras utilizadas e tamanho médio das partículas.

**Tabela 3- Nomenclatura das amostras**

Amostra	Procedência	Intervalo de malhas (Mesh)	Tamaho médio da partícula (µm)
Original	Beneficiamento	-	299
Grossa	Separação por peneiramento a partir da amostra original	-28# +150#	350
Intermediária		-150# +270#	79
Fina		-270 #	28

#### 4.1. Análise granulométrica

A amostra de bauxita foi homogeneizada, quarteada a úmido e submetida ao peneiramento por via úmida empregando-se o conjunto de peneiras, série Tyler, de malhas 28#, 32#, 48#, 65#, 100#, 150#, 200#, 325# e 400#. As frações 20 µm, 10 µm, 5 µm e 2µm foram analisadas através de difração a *laser* por analisador de tamanho de partículas da Malvern Instruments, modelo Mastersizer 2000. Estas análises foram realizadas no Laboratório Físico-Químico da Mineração Paragominas S.A. (MPSA).

#### 4.2. Concentração de sólidos

A fim de se verificar a concentração da polpa determinou-se o teor de sólidos que consistiu na secagem de uma determinada massa de polpa mineral em estufa à 100 °C seguida de pesagem até obtenção de peso constante. A concentração é dada pela Equação (13):

$$C_s = 100 \times \frac{m_s}{m_p} \quad (13)$$

Onde: Cs = concentração de sólidos, em %

ms = massa da amostra após secagem, em gramas

mp = massa inicial da polpa, em gramas

#### 4.3. Massa específica da polpa

Dada pela razão entre determinada massa de polpa e o respectivo volume. Em uma proveta de 100 mL, determinou-se a massa correspondente a este volume de polpa. A Equação (14) apresenta a definição matemática para massa específica.

$$\rho_p = \frac{m_p}{v_p} \quad (14)$$

Onde:  $\rho_p$  = massa específica da polpa, em  $\text{g/cm}^3$

$m_p$  = massa de polpa, em gramas

$v_p$  = volume ocupado pela polpa, em  $\text{cm}^3$

#### 4.4. Obtenção das frações de bauxita

A amostra de polpa mineral foi seca em temperatura ambiente (cerca de 32 °C) posteriormente homogeneizada em pilha prismática, quarteada, desagregada em gral e submetida a peneiramento por via seca para separação das frações granulométricas de interesse.

Para a separação granulométrica, peneiras de malhas 150# e 270# (Tyler) foram submetidas à vibração mecânica por cerca de sete minutos, de modo que ao final foram obtidas três frações: +150#; -150# +270#; -270#.

#### 4.5. Difratomia de raios-X

Para identificação das fases cristalinas presentes em cada fração granulométrica pelo método do pó utilizou-se difratômetro D8 Advance (Bruker) com geometria Bragg-Brentano e detector LynxEye, tubo de Cu ( $K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$ ), Filtro  $K\beta$  de Ni, fendas divergentes de 0,6 mm, fenda Soller (2,5°), faixa angular de varredura ( $2\theta$ ) 5-75°, passo angular de 0,02° e o tempo por passo 0.2 s. A voltagem empregada foi 40 kV, corrente 40 mA. Esta análise foi realizada no Laboratório de Raios-X, Análise Térmica e Dielétrica do PPGF, ICEN/UFPA. A análise dos difratogramas foi realizada pelo *software HighScore Plus* versão 3.0 e a identificação dos minerais foi realizada por meio de comparação entre os difratogramas obtidos e fichas padrões do banco de dados do ICDD-PDF (*International Center for Diffraction Data – PowderDiffraction File*).

#### 4.6. Microscopia eletrônica de varredura

As imagens foram obtidas utilizando-se microscópio eletrônico de varredura TESCAN modelo VEGA3. As análises foram realizadas no Laboratório de Nanomanipulação do PPGF/UFPA. As condições operacionais foram corrente de feixe de elétrons de 85  $\mu\text{A}$  a 90  $\mu\text{A}$  e 20 kV de voltagem. As amostras receberam recobrimento de uma camada de 5  $\text{m\AA}$  de espessura de ouro metálico para melhorar a aquisição das imagens.

#### 4.7. Preparo de soluções de hexametáfosfato de sódio

O hexametáfosfato de sódio foi dissolvido em água para obtenção das soluções nas seguintes concentrações (m/m): 0,5 %; 1,0 %; 1,5 %; 2,0 %; 2,5 %; 3,0 %; 3,5 %. Estas foram misturadas à polpa de bauxita nos ensaios reológicos.

#### 4.8. Ensaios reológicos

Para os ensaios reológicos, o equipamento utilizado foi o viscosímetro HAAKE VT550 com sensor do tipo cilindro concêntrico SV1. A programação das rotinas de trabalho foi estabelecida através do *software Rheowin Job Manager 2.94* e o tratamento dos resultados foi feito empregando-se *Rheowin Data Manager 2.94*.

##### 4.8.1. Curvas de defloculação

Aplicou-se cisalhamento constante nas amostras de polpa de bauxita de diferentes granulometrias a 50 % em peso misturadas ao aditivo reológico nas diferentes concentrações previamente elaboradas, bem como na ausência deste. A análise consistiu no emprego de taxa de cisalhamento constante de  $100 \text{ s}^{-1}$  por 10 s (SILVA, 2011).

##### 4.8.2. Caracterização reológica – Método *Pipeline Systems Incorporated* (PSI)

O método PSI utilizado por Brum (2011) visa minimizar erros experimentais devido a sedimentação das partículas.

A curva de fluxo foi elaborada relacionando-se em um gráfico os valores de tensão versus taxa de cisalhamento das polpas a 50 % (peso) sem aditivo e misturadas a este na concentração ideal. Estes parâmetros foram ajustados a modelos reológicos existentes na literatura por meio do *software* do equipamento, *Rheowin Data Manager 2.94*.

##### 4.8.3. Incerteza do equipamento

O cálculo da incerteza foi realizado com base nos valores de tensão de cisalhamento registrados a partir da curva de fluxo, utilizando-se deduções para o rotor SV1 fornecidas pelo fabricante do viscosímetro.

##### 4.8.4. Perfil de viscosidade

Conhecendo-se, a partir da curva de defloculação, a concentração de aditivo capaz de reduzir a viscosidade da polpa de bauxita até um valor mínimo, denomina-se esta como a

concentração ideal de defloculante. A polpa de bauxita foi então misturada ao aditivo na concentração ideal para obtenção do perfil de viscosidade, empregando-se o método PSI.

#### 4.8.5. Curvas de histerese

As polpas de bauxita sem aditivo e com aditivo a 2,5 % (peso) foram ensaiadas. A programação consistiu de cisalhamento em rampa crescente  $0 \text{ s}^{-1}$  a  $200 \text{ s}^{-1}$  durante 100 s, taxa constante de  $200 \text{ s}^{-1}$  por 10 s e rampa decrescente  $200 \text{ s}^{-1}$  a  $0 \text{ s}^{-1}$  em 100 s.

### 4.9. pH

Determinou-se o pH das polpas sem aditivo e das polpas com aditivo na concentração ideal. Para isto, utilizou-se pHmetro de bancada modelo PHS3BW BelEngineering. As medições foram feitas em duplicata.

### 4.10. Cálculo do fator de atrito pela equação de Dodge-Metzner da bauxita original

A análise da polpa sem aditivo e com aditivo na concentração ideal fornece dados de tensão de cisalhamento e viscosidade que são empregados para obtenção do ajuste a um modelo reológico, feito através do *Rheowin Data Manager*. Com o ajuste, são determinados os parâmetros reológicos da suspensão.

Os parâmetros diâmetro e faixa de vazão volumétrica bem como metodologia para simulação do escoamento foram escolhidos segundo Silva et al. (2017) adaptados às condições deste experimento. Assim, o diâmetro e a vazão do duto correspondem aos parâmetros operacionais do próprio mineroduto de Paragominas (BRUM, 2011; GANDHI, 2008). A massa específica da polpa foi determinada experimentalmente.

Uma vez que são conhecidas as variáveis, utilizam-se as Equações (4) e (5) para estimar o fator de atrito. As estimativas são realizadas com auxílio do *Excel*.

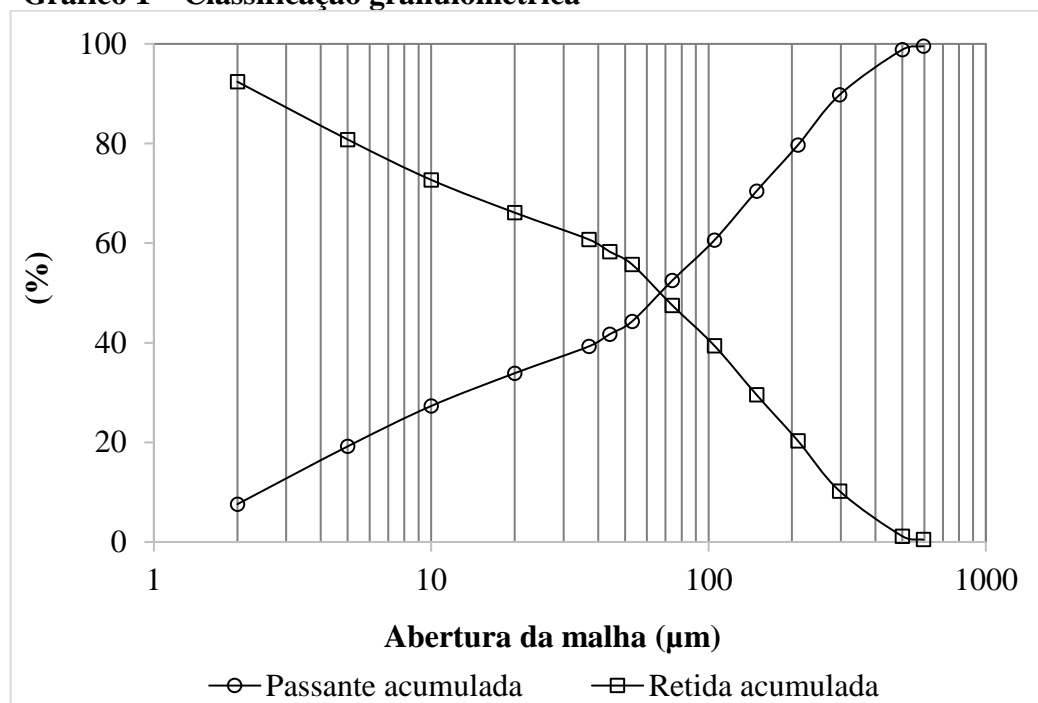
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A polpa de bauxita da mina Miltônia 3, em Paragominas, foi caracterizada em relação às suas propriedades físicas. Para isso, foram determinados concentração de sólidos, massa específica e distribuição granulométrica.

### 5.1. Propriedades físicas da amostra original

A distribuição granulométrica da polpa de bauxita que é bombeada através do mineroduto está apresentada no Gráfico (1).

**Gráfico 1 – Classificação granulométrica**



Fonte: MPSA, 2017.

Observa-se pelo Gráfico (1) que os 50 % da amostra tem tamanho inferior a 74 µm.

A distribuição granulométrica de uma suspensão mineral é um fator que influencia a viscosidade de suspensões minerais de modo que maiores faixas de distribuição de tamanhos acarretam em suspensões com menores valores de viscosidade. Em suspensões com alta faixa de distribuição de tamanhos de partículas o empacotamento é prejudicado e, havendo maior quantidade de partículas livres, maior é a quantidade de água necessária para preencher os espaços vazios. (HE, WANG e FORSSBERG, 2004; HE, WANG e FORSSBERG, 2006).

A Tabela (4) apresenta os valores médios de massa específica, teor de sólidos e viscosidade da polpa e os compara com os dados de polpa de bauxita com mesmo teor de sólidos encontrados por Silva (2011) e Brum (2011).



**Tabela 4 - Parâmetros físicos da amostra polpa de bauxita em comparação com valores da literatura**

Parâmetro	Resultado experimental	SILVA (2011)	BRUM (2011)	Especificação comercialização (BRUM, 2011)
Teor de sólidos (%)	52	52	50	47 - 52
Massa específica da polpa (kg/m <sup>3</sup> )	1455	1510	1440	1410 - 1440
Viscosidade aparente (Pa.s)	0.011	0.070	0.014	0.007 – 0.015

Os valores experimentais estão dentro das especificações de comercialização apresentados por Brum (2011) com exceção da massa específica, que se mostrou superior ao intervalo aceitável. Ainda assim, pode-se observar o controle dos parâmetros.

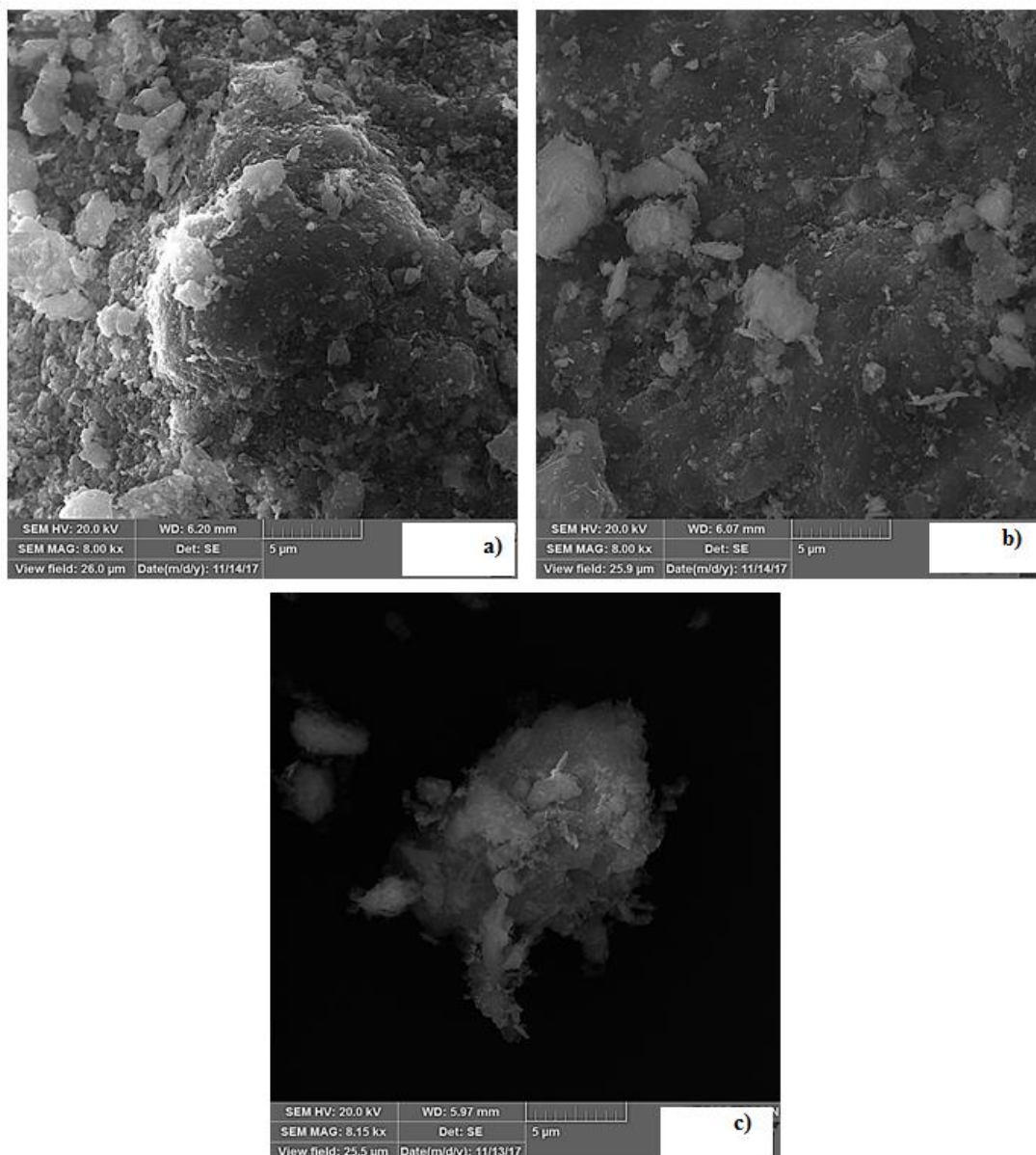
É necessário esclarecer que em seus ensaios, Silva (2011) partiu de uma polpa a 60 % e diluiu a mesma até a concentração de 52 %. A autora justifica que o fato de secar a polpa e posteriormente reconstituir adicionando água para execução dos testes acarreta em resultados alterados, o que pode ser comprovado através da Tabela (4). Com isso, confirma-se a influência do preparo da polpa nos resultados experimentais obtidos.

## 5.2. Microscopia eletrônica de varredura

A Figura (16) apresenta as micrografias obtidas com magnitude de 8000 X e escala 5 µm. A análise por MEV permitiu verificar a heterogeneidade morfológica das amostras, o que pode ser facilmente observado por meio do aspecto das partículas em cada imagem. Observa-se ainda que partículas de maior tamanho se encontram recobertas por outras menores de aspecto rugoso.

Observa-se a partir da Figura (16 c) que a fração com menor tamanho de partículas apresenta-se na forma de agregados, o que é uma consequência da intensificação das forças interpartículas de caráter coesivo causadas pelo aumento da área superficial.

**Figura 16 - Micrografias das frações de bauxita: grossa (a), intermediária (b), fina (c)**



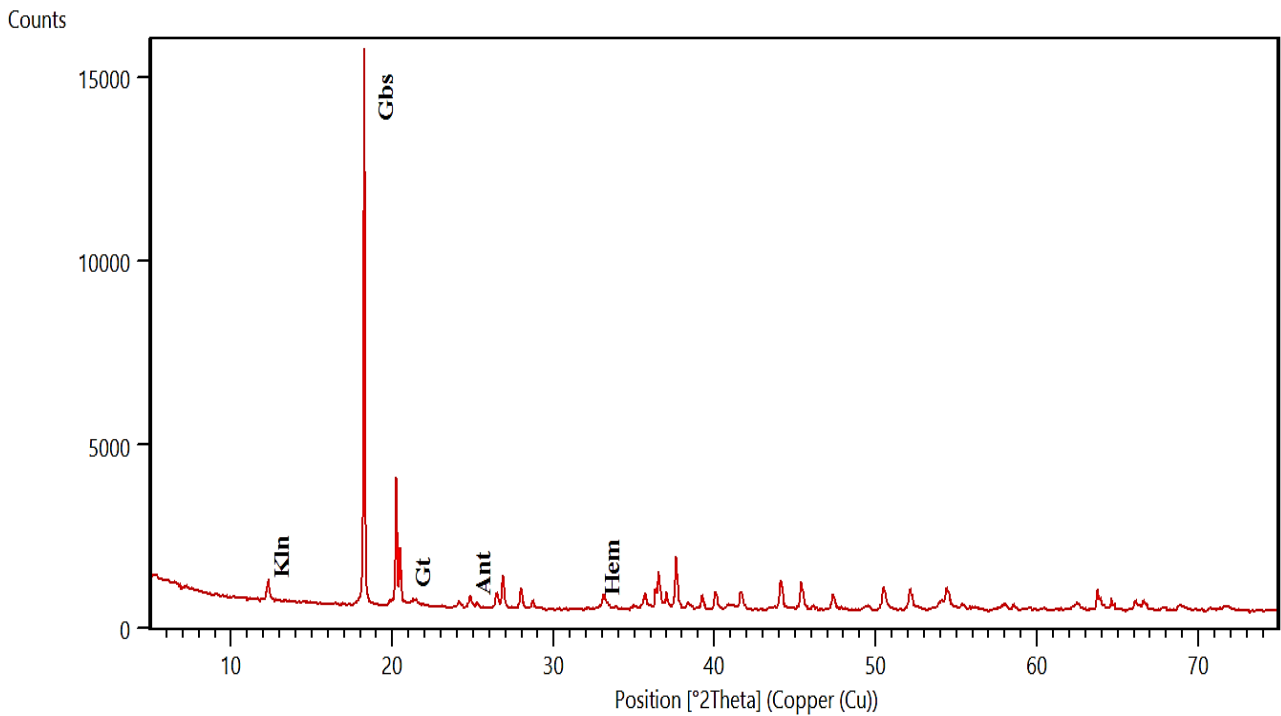
Ao analisar micrografias de uma fração de bauxita de Paragominas correspondente ao passante em malha de 400 Mesh, Nascimento (2010) observou estruturas semelhantes às aquelas apresentadas na Figura (16) e após análise por EDS, verificou que as estruturas maiores tinham altos teores de alumínio enquanto que as partículas mais externas eram compostas por alumínio e silício. Tais resultados indicam que na bauxita desta região as partículas maiores correspondem à gibbsita e estas encontram-se recobertas por partículas de caulinita.

### 5.3. Difração de raios-X

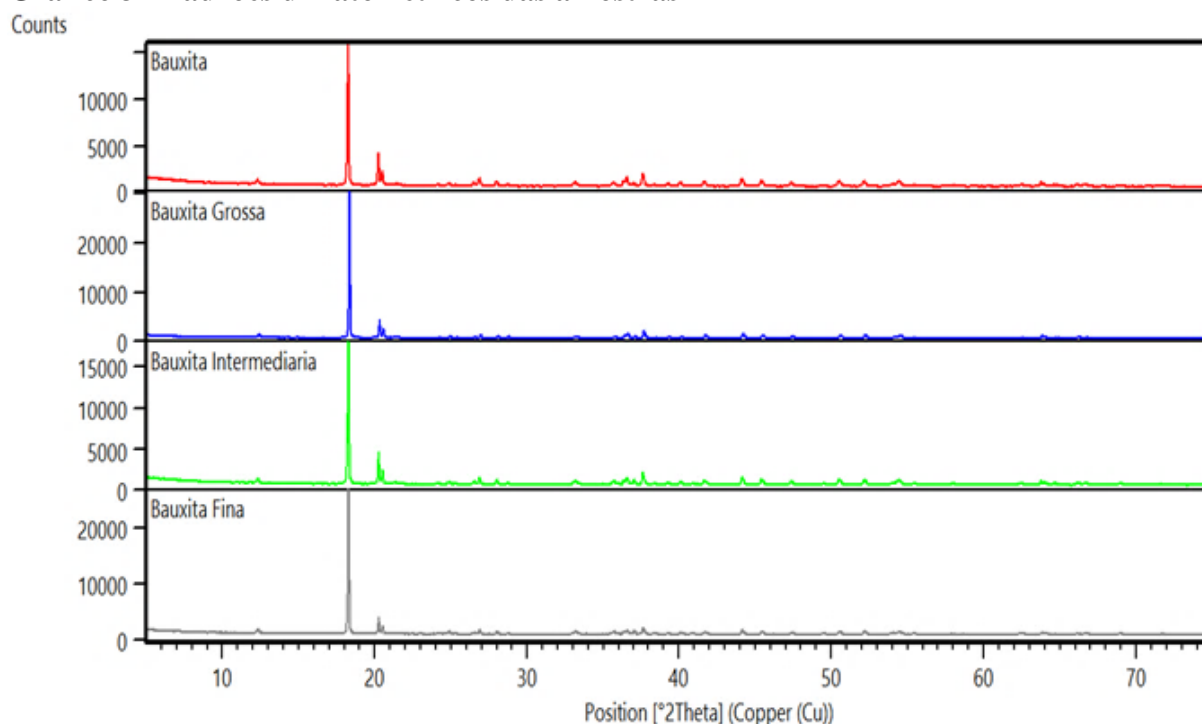
Através da difração por raios-X, foram observados os picos característicos referentes às fases cristalinas dos principais constituintes da amostra de bauxita de Paragominas como mostra

o Gráfico (2). Observa-se que a amostra é composta por gibbsita (Gbs), contendo ainda os minerais caulinita (Kln), goethita (Gt), hematita (Hem), e anatásio (Ant). Os resultados obtidos se mostram de acordo com estudos sobre a composição mineralógica da bauxita de Paragominas e caracterizações por DRX (KOTSCHOUBEY et al., 2005; PAZ, ANGÉLICA e KAHN, 2017).

**Gráfico 2 - Difratoograma da bauxita anterior ao fracionamento**



Uma comparação entre os difratoogramas das amostras de bauxita antes e depois do fracionamento é ilustrada através do Gráfico (3). Observa-se que não existem mudanças significativas nos padrões difratométricos analisados, o que permite afirmar que a separação por peneiramento não altera a composição mineralógica da amostra.

**Gráfico 3 - Padrões difratométricos das amostras**

Entretanto, nota-se que a intensidade no pico de uma mesma fase cristalina varia entre uma amostra e outra, com destaque para os picos da gibbsita e goethita. Este fato pode ser uma consequência do efeito da diluição de determinada fase cristalina associado a sobreposição de picos (PAZ, 2016). Observa-se, portanto, que a análise de DRX não é conclusiva a respeito da caracterização mineralógica e outras técnicas de quantificação são necessárias quando se deseja alta precisão de resultados.

#### 5.4. Testes reológicos

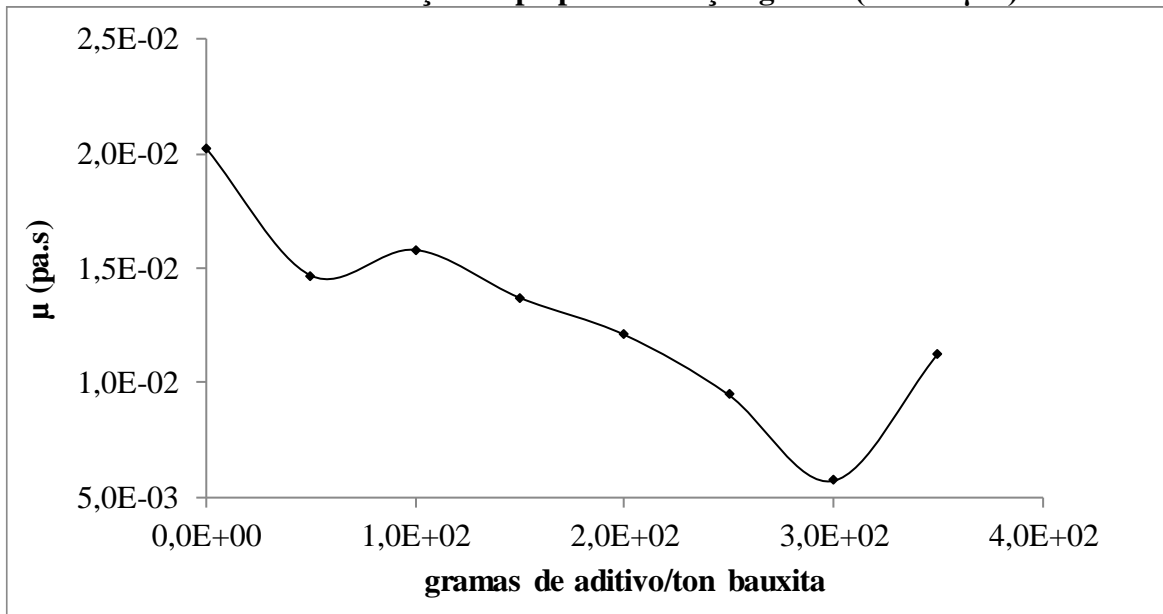
Os ensaios reológicos permitiram avaliar o comportamento das frações de bauxita na ausência e na presença de aditivo, ajustar os dados experimentais a um modelo reológico existente na literatura de forma a caracterizá-lo e definir os parâmetros reológicos (tensão de escoamento, índice de consistência, índice de comportamento) das polpas estudadas.

##### 5.4.1. Curva de defloculação

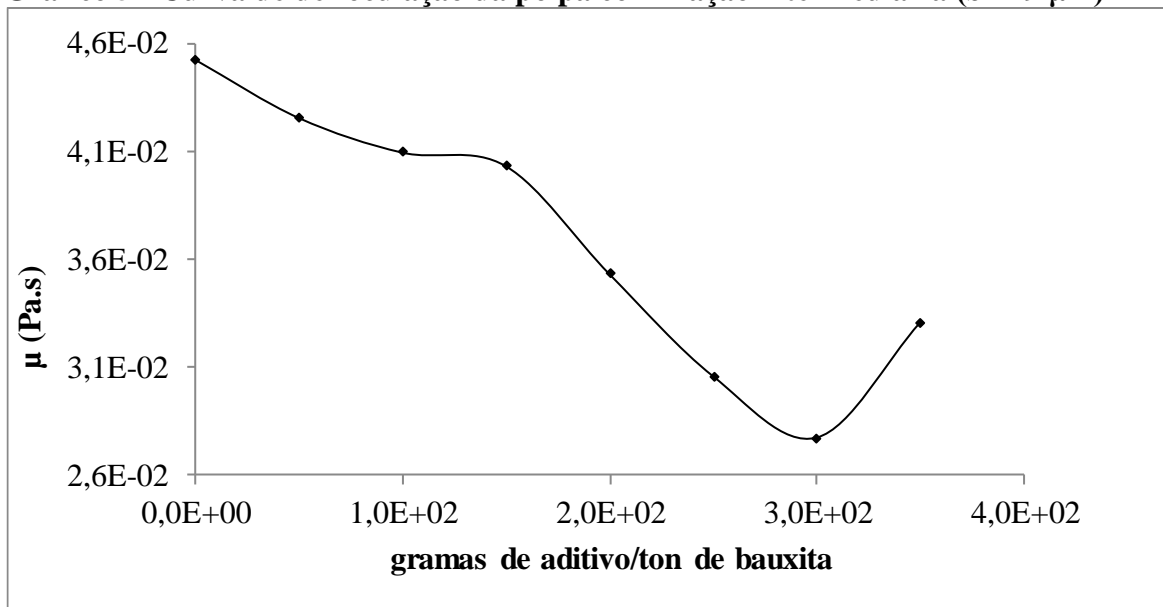
O hexametáfosfato de sódio promoveu a defloculação das amostras de polpas de bauxita fracionadas. Observa-se, através dos Gráficos (4) a (7) que à medida que se aumentou a concentração do defloculante a viscosidade aparente da polpa diminuiu até um ponto mínimo e em seguida aumentou consideravelmente quando a concentração de aditivo excedeu a concentração ideal.

Na concentração ideal de aditivo, entende-se que as suspensões se encontram estabilizadas devido a repulsão provocada pelas cargas negativas do defloculante que interagem com as cargas negativas das partículas, criando forças de repulsão entre as mesmas (HE, WANG e FORSSBERG, 2006).

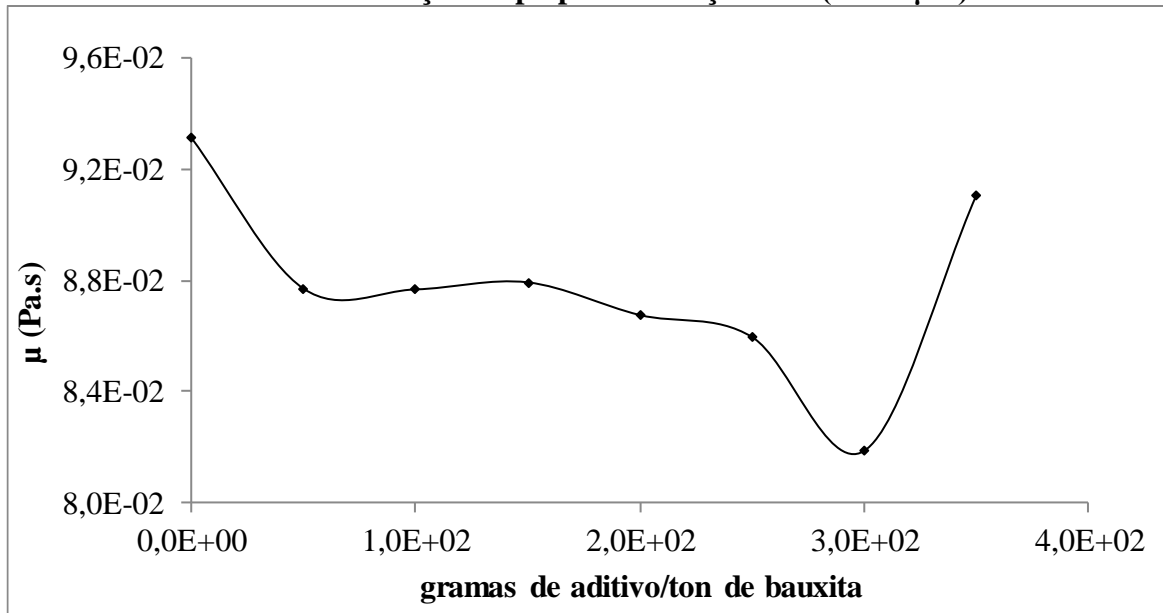
**Gráfico 4 - Curva de defloculação da polpa com fração grossa ( $\phi = 350 \mu\text{m}$ )**



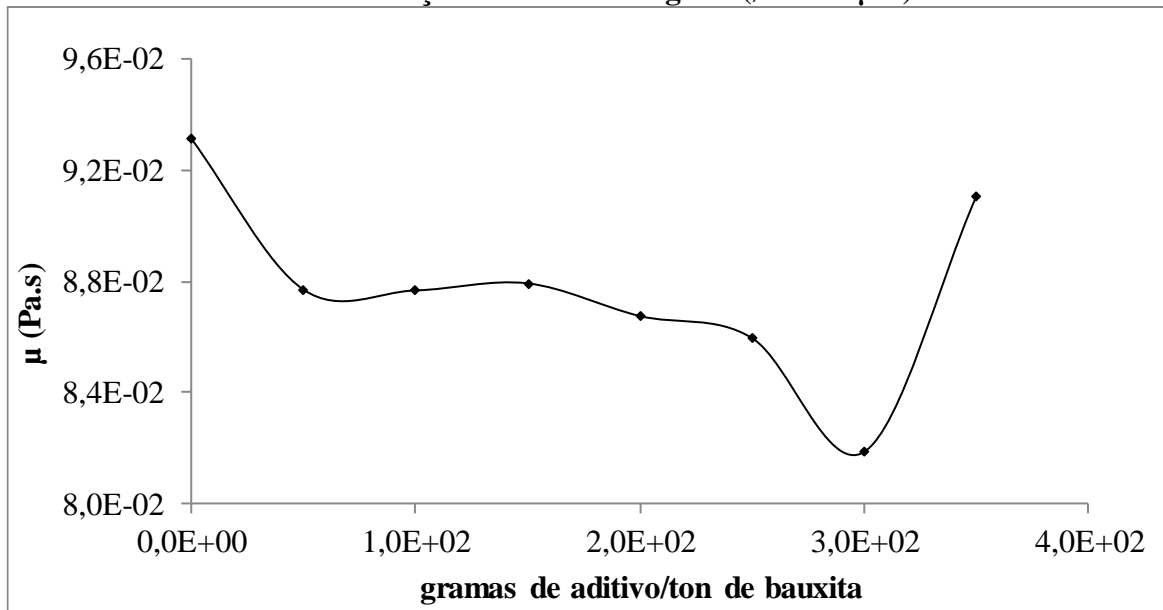
**Gráfico 5 - Curva de defloculação da polpa com fração intermediária ( $\phi = 79 \mu\text{m}$ )**



**Gráfico 6 - Curva de defloculação da polpa com fração fina ( $\phi = 28 \mu\text{m}$ )**



**Gráfico 7 - Curva de defloculação da bauxita original ( $\phi = 299 \mu\text{m}$ )**



A concentração ideal de aditivo das polpas de bauxita compostas pelas frações corresponde a 300 g de hexametáfosfato de sódio por tonelada de bauxita em base seca. A polpa de bauxita original defloculou na presença de 250 g de aditivo por tonelada de bauxita. Silva (2011) estabeleceu, a partir de resultados experimentais para polpa de bauxita, a concentração de 62,5 g de aditivo por tonelada de minério. Reis (2015) demonstrou que à medida que se diminui o diâmetro das partículas de bauxita assim como a distribuição de tamanhos de partículas em uma polpa, maior quantidade de aditivo é necessária para a

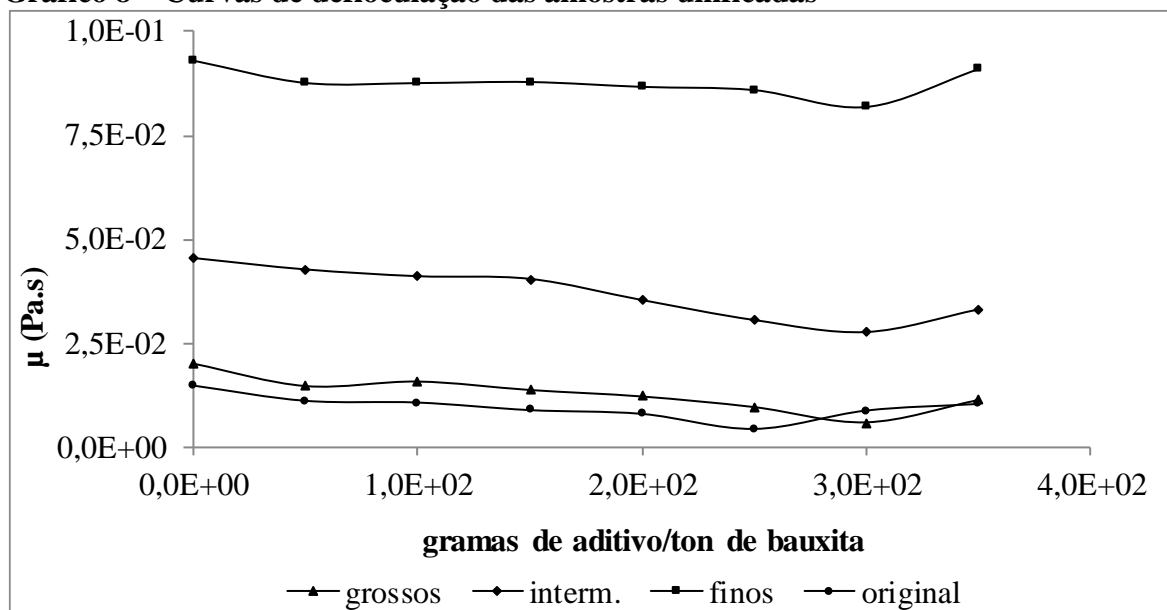
defloculação/floculação do sistema. As polpas estudadas por Reis (2015) podem ser aproximadas a sistemas monodispersos dado os comportamentos observados.

As polpas com amostra original apresentaram maior grau de estabilização, de modo que a viscosidade na concentração ideal foi reduzida em cerca de 70 % com relação à viscosidade da mesma polpa sem aditivo, seguida da polpa com grossos. Isto indica que o aditivo foi mais eficaz na estabilização das polpas que continham partículas maiores.

Os resultados mostraram ainda que a polpa original defloculou na presença de uma quantidade de aditivo inferior às polpas compostas por frações. Ainda assim, tal concentração foi suficiente para causar redução significativa dos seus valores de tensão.

Considerando-se que as partículas maiores ocupam espaços maiores em uma suspensão com ampla faixa de distribuição de tamanhos, é provável que o aditivo alcance mais rapidamente a superfície destas, ao invés das partículas menores que podem sofrer inclusive um impedimento físico por parte das maiores. Somando-se a isto o fato de que partículas de maior diâmetro apresentam menor área superficial, conclui-se que menor quantidade de aditivo é necessária para estabilização destas. Para a bauxita original avaliada, as partículas de maior tamanho representam cerca de 60 % do retido acumulado (em malha de 150 Mesh). Por estarem presente em menor quantidade, reduz ainda mais a quantidade de aditivo necessária para estabilização das mesmas. Estes fatos relacionados permitem justificar a menor quantidade de hexametáfosfato de sódio que promoveu a defloculação da polpa. O Gráfico (8) apresenta uma comparação entre as curvas de defloculação já apresentadas, desta vez unificadas.

**Gráfico 8 – Curvas de defloculação das amostras unificadas**



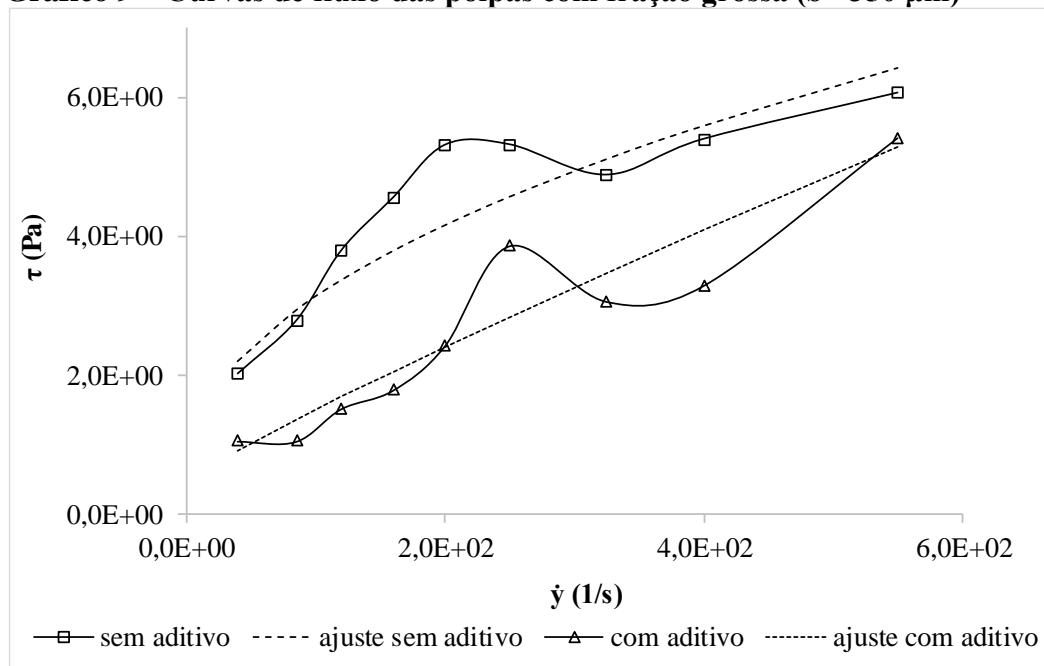
Embora comprovada a eficácia do aditivo na estabilização de polpas de bauxita, observa-se a partir da curva de defloculação que a viscosidade da polpa aumenta à medida que se diminui o tamanho das partículas de modo que a polpa constituída pela fração fina foi a que apresentou os maiores valores de viscosidade em comparação às demais frações. Com base nestas observações, pode-se afirmar que polpas constituídas de partículas de tamanho muito pequeno apresentam maior resistência ao escoamento, observado através dos maiores valores de viscosidade apresentados.

#### 5.4.2. Caracterização reológica – método PSI

A metodologia desenvolvida pela PSI busca reduzir erros experimentais ocasionados pela sedimentação das partículas de bauxita durante as análises reológicas. Através deste método foram analisadas as polpas de bauxita varrendo-se uma ampla faixa de taxas de cisalhamento.

Uma vez conhecida a concentração ideal de aditivo, avaliou-se o fluxo das polpas na ausência e presença de aditivo na concentração ideal. Os Gráficos (9) a (12) apresentam os resultados obtidos e as Tabelas (5) a (8) apresentam os parâmetros reológicos das amostras de polpa obtidos a partir dos ajustes.

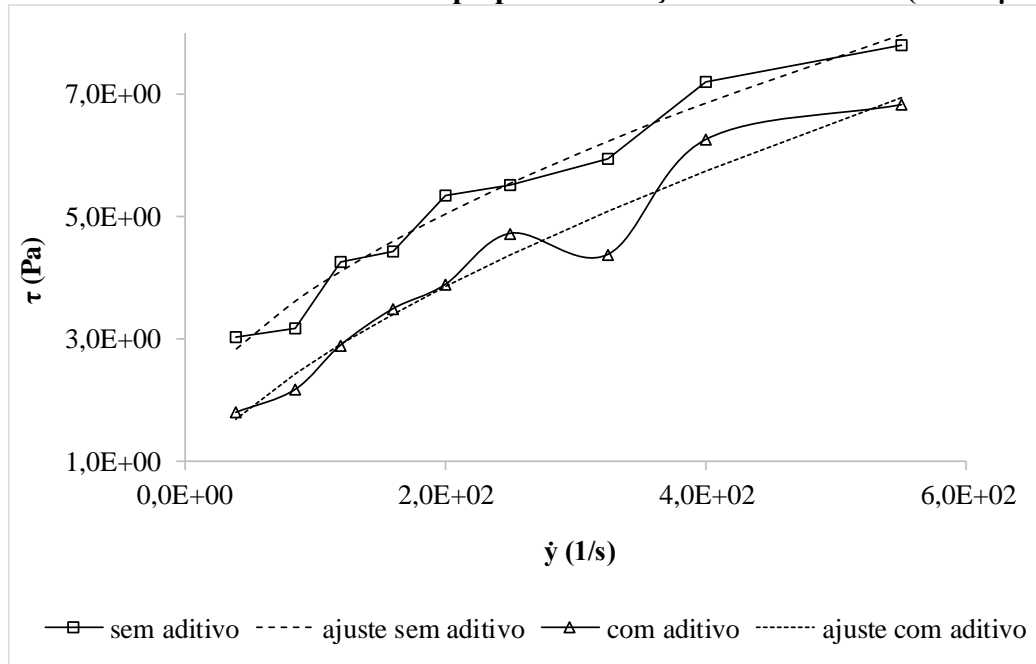
**Gráfico 9 – Curvas de fluxo das polpas com fração grossa ( $\phi = 350 \mu\text{m}$ )**



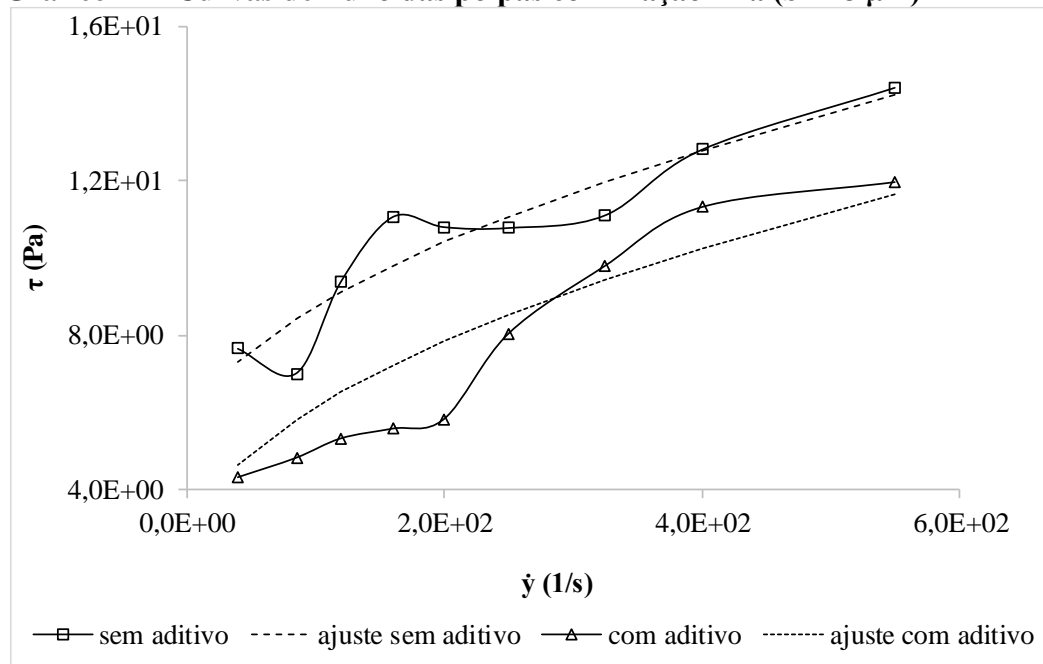


**Tabela 5 – Parâmetros reológicos da fração grossa**

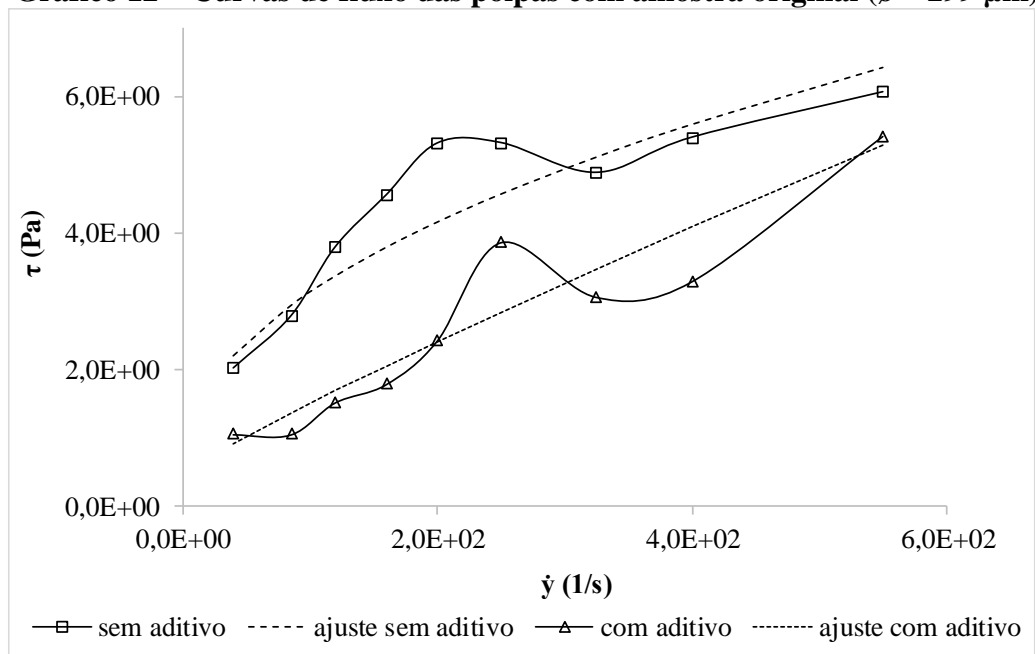
	Sem aditivo	Com aditivo
$\tau_0$ (Pa)	0,063	0,054
$K$ (Pa.s <sup>n</sup> )	0,352	0,062
$n$	0,375	0,605
$R^2$	0,985	0,820

**Gráfico 10 - Curvas de fluxo das polpas com fração intermediária ( $\phi = 79 \mu\text{m}$ )****Tabela 6 – Parâmetros reológicos da fração intermediária**

	Sem aditivo	Com aditivo
$\tau_0$ (Pa)	1,463	0,488
$K$ (Pa.s <sup>n</sup> )	0,156	0,113
$n$	0,591	0,641
$R^2$	0,986	0,979

**Gráfico 11 - Curvas de fluxo das polpas com fração fina ( $\phi = 28 \mu\text{m}$ )****Tabela 7 - Parâmetros reológicos da fração fina**

	Sem aditivo	Com aditivo
$\tau_0$ (Pa)	4,885	2,024
$K$ (Pa.s <sup>n</sup> )	0,353	0,411
$n$	0,519	0,500
$R^2$	0,942	0,977

**Gráfico 12 – Curvas de fluxo das polpas com amostra original ( $\phi = 299 \mu\text{m}$ )**

**Tabela 8 – Parâmetros reológicos da amostra original**

	Sem aditivo	Com aditivo
$\tau_0$ (Pa)	0,526	0,448
$K$ (Pa.s <sup>n</sup> )	0,289	0,017
$n$	0,478	0,896
$R^2$	0,964	0,943

Os resultados experimentais foram ajustados a um modelo reológico dentre os conhecidos pela biblioteca do *Rheowin Data Manager* de modo que o modelo no qual o ajuste se deu de forma mais adequada foi o Herschel-Bulkley. A partir do ajuste, foram obtidos os parâmetros reológicos para cada conjunto de dados. Em seguida, calcularam-se os valores de tensão teóricos substituindo os valores de taxa de cisalhamento e os parâmetros reológicos na equação de Herschel-Bulkley. Os valores experimentais são representados pelas linhas contínuas e os valores ajustados são apresentados como sendo a linha tracejada (polpa sem aditivo) e pontilhada (polpa com aditivo) nos gráficos.

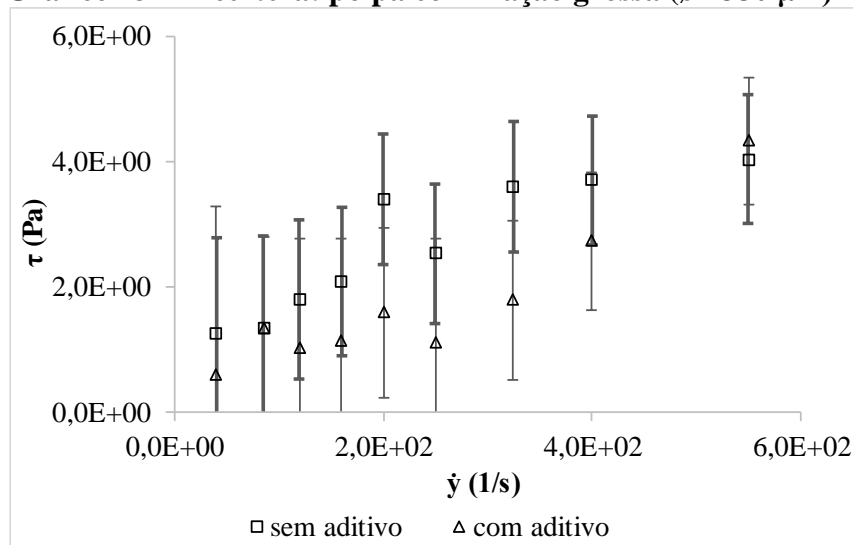
Observa-se a redução da tensão da polpa com defloculante assim como os valores de tensão inicial em todas as situações avaliadas em função da ação dispersante do aditivo. Assim, a resistência ao fluxo diminui, bem como a tensão necessária para se dar início ao escoamento.

O índice de consistência na polpa de finos foi o maior registrado, confirmando o aspecto consistente destas polpas com relação às demais observadas. Já o coeficiente de comportamento é diferente da unidade em todas as amostras, indicando comportamento não newtoniano.

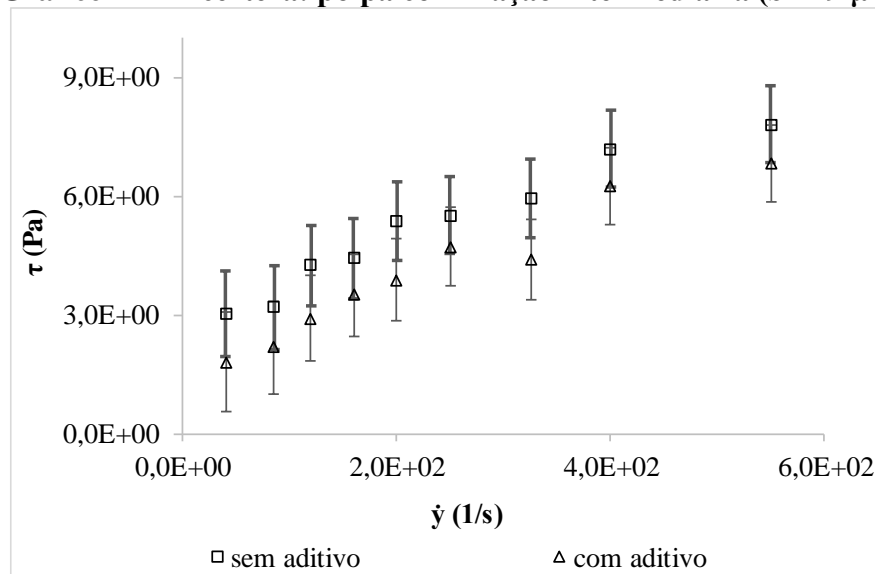
Ao caracterizar polpa de bauxita, Silva (2011) observou o mesmo comportamento reológico para o material, que se adequou ao modelo Herschel-Bulkley, assim como Brum (2011), estudando polpas de bauxita sem aditivos.

#### 5.4.3. Incerteza do equipamento

O cálculo da incerteza é feito a partir dos valores experimentais de tensão de cisalhamento obtidos por meio da curva de fluxo tendo como referência as informações do manual do equipamento para o *spindle* SV1. As considerações bem como as equações empregadas para cálculo estão descritas no Anexo A. As incertezas dos testes estão apresentadas nos Gráficos (13) a (16).

**Gráfico 13 – Incerteza: polpa com fração grossa ( $\phi = 350 \mu\text{m}$ )**

A polpa composta por partículas de diâmetro médio  $350 \mu\text{m}$  apresentou incerteza na faixa de 1 % a 3 %, que é a maior faixa registrada neste estudo. Tal fato pode ser novamente atribuído à sedimentação das partículas que se dá de maneira mais intensa neste tipo de material, uma vez que partículas maiores sedimentam mais rapidamente.

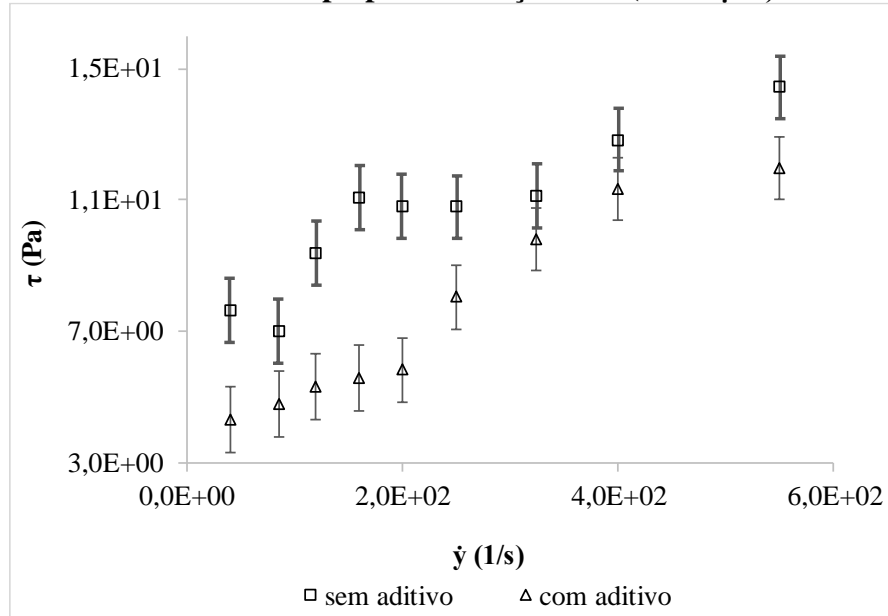
**Gráfico 14 - Incerteza: polpa com fração intermediária ( $\phi = 79 \mu\text{m}$ )**

A polpa com partículas de tamanho médio de  $79 \mu\text{m}$  apresentaram incerteza na faixa de 0,9 % a 1,3 %. Este resultado é inferior às polpas com grossos e pode ser considerado satisfatório em termos de incerteza do viscosímetro.

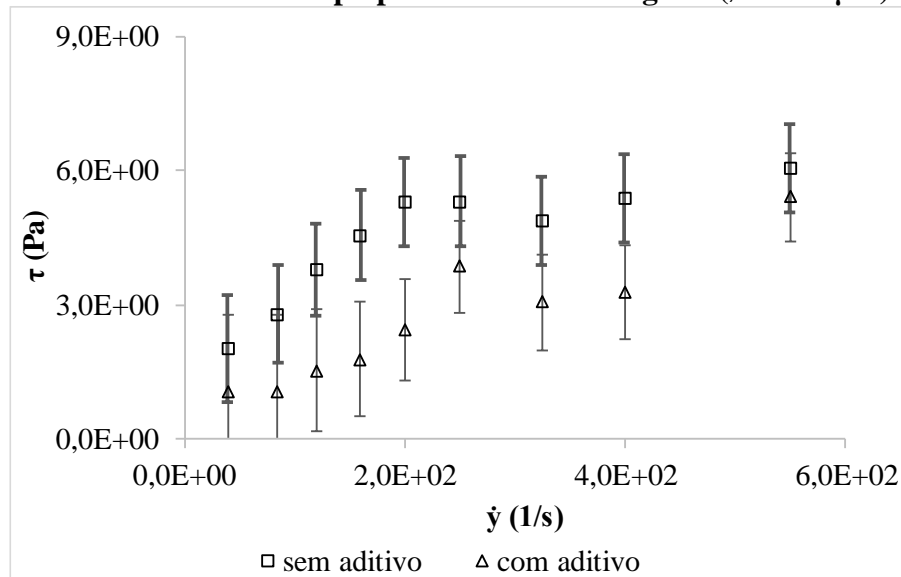
As polpas com partículas de tamanho médio  $28 \mu\text{m}$  e a polpa original, de tamanho médio  $299 \mu\text{m}$  apresentaram incerteza na faixa de 0,9 % a 1 % e 0,9 % a 1,7 % respectivamente.

Estes foram os menores valores de incerteza obtidos de modo que o resultado da polpa com finos encontra-se dentro da recomendação do fabricante do viscosímetro, que é incerteza inferior a 1 %.

**Gráfico 15 - Incerteza: polpa com fração fina ( $\phi = 28 \mu\text{m}$ )**



**Gráfico 16 – Incerteza: polpa com amostra original ( $\phi = 299 \mu\text{m}$ )**



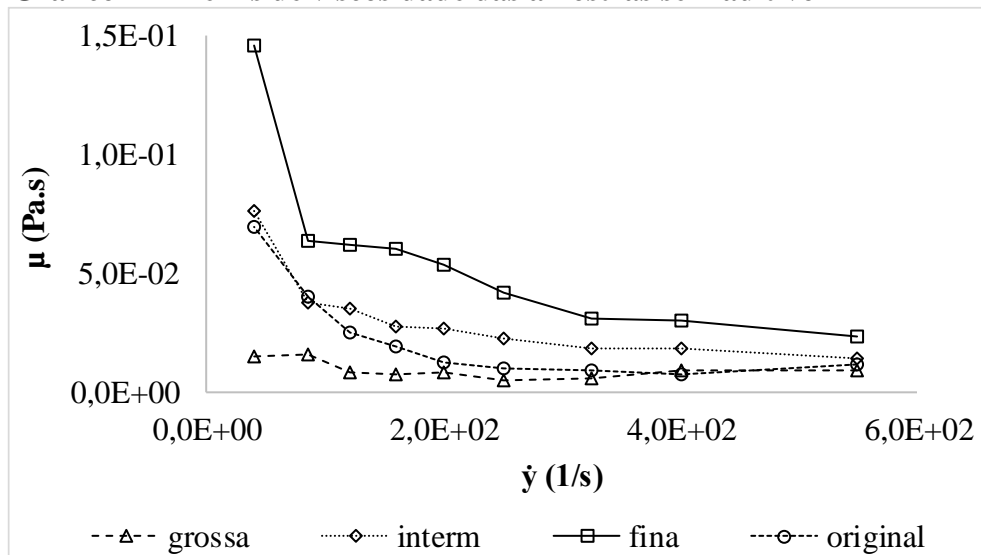
De maneira geral, em todas as amostras analisadas, a incerteza se mostrou maior nas medições em baixas taxas de cisalhamento, podendo ser consequência dos efeitos de deslizamento que, segundo Nguyen e Boger (1987), podem ser significativos quando se analisam suspensões concentradas em viscosímetros com cilindros concêntricos.

Consideram-se os resultados satisfatórios uma vez que, mesmo com as dificuldades devido a sedimentação e leitura em taxas de cisalhamento baixas, a incerteza se manteve em percentuais aceitáveis, não comprometendo a metodologia empregada.

#### 5.4.4. Perfil de viscosidade

O Gráfico (17) mostra que, para uma mesma taxa de cisalhamento, as polpas compostas por partículas de menor tamanho apresentaram os maiores valores de viscosidade. As partículas menores apresentam maior área superficial, o que intensificam as forças inter partículas do tipo *van der Waals*. Isto leva à formação de agregados que, aprisionando moléculas de água em seu interior, diminui a quantidade do fluido transportador disponível (água), aumentando a viscosidade (HE, WANG e FORSSBERG, 2006).

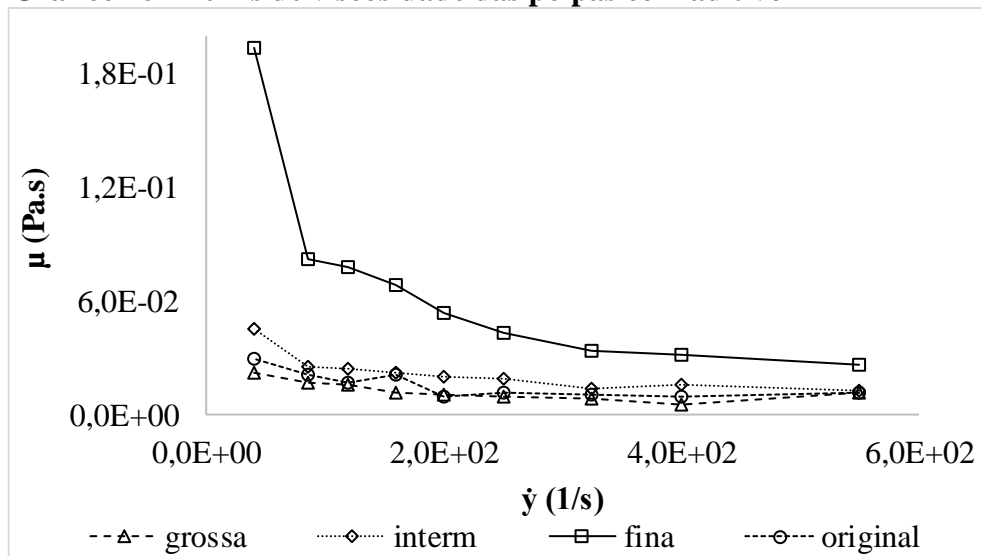
**Gráfico 17 - Perfis de viscosidade das amostras sem aditivo**



O Gráfico (18) apresenta o perfil de viscosidade das polpas com aditivo na concentração ideal de aditivo. Observa-se, ao comparar-se os Gráficos (17) e (18), que para uma polpa composta pela mesma fração, os menores valores de viscosidade foram registrados para as polpas com aditivo, indicando a ação defloculante.

Este resultado é consequência da estabilização da polpa pelo aditivo. A força repulsiva entre as partículas mantém as partículas suspensas e livres no fluido (JONES e HORSLEY, 2000).

**Gráfico 18 - Perfis de viscosidade das polpas com aditivo**



Ainda a partir dos Gráficos (17) e (18), nota-se que a viscosidade registrada em altas taxas de cisalhamento é baixa. Uma possível explicação pode ser atribuída ao fato de que, nestas condições, os aglomerados existentes são destruídos, liberando fluido aprisionado e favorecendo o fluxo (ARAÚJO e NASCIMENTO, 2007).

Nota-se que a polpa original se comportou de maneira semelhante às polpas com partículas de tamanhos grande e intermediário, o que está de acordo com o esperado haja vista que apresentam os maiores tamanhos médios de partículas dentre as amostras avaliadas.

#### 5.4.5. Histerese

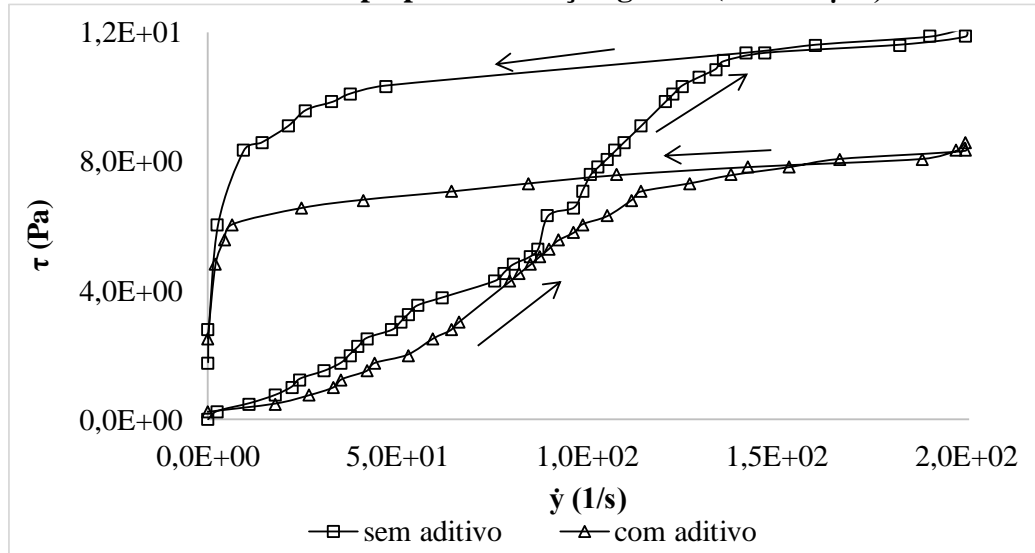
A partir do Gráfico (19) observa-se o comportamento reopético das polpas contendo grossos e finos, na ausência e na presença do aditivo. A reopexia é resultado de um processo de reconstrução estrutural mais rápido que o processo de destruição, quando da ocorrência de cisalhamento (ARAÚJO e NASCIMENTO, 2007). Os dados experimentais registrados nos ensaios de histerese estão disponíveis no Apêndice B, através das Tabelas (14) a (17).

Nota-se, a partir do Gráfico (19) que o equipamento apresentou limitações quanto à leitura em baixas taxas de cisalhamento, o que não dificultou a interpretação do caráter dependente do tempo deste tipo de suspensão.

A área de histerese das polpas com grossos e defloculante é relativamente menor se comparada com as histereses da bauxita sem aditivo. Isto é um indicativo da estabilização da suspensão. Observa-se ainda a eficiência do aditivo em reduzir os valores de tensão de cisalhamento da polpa. Silva (2003) relaciona a área da curva de histerese com o grau de

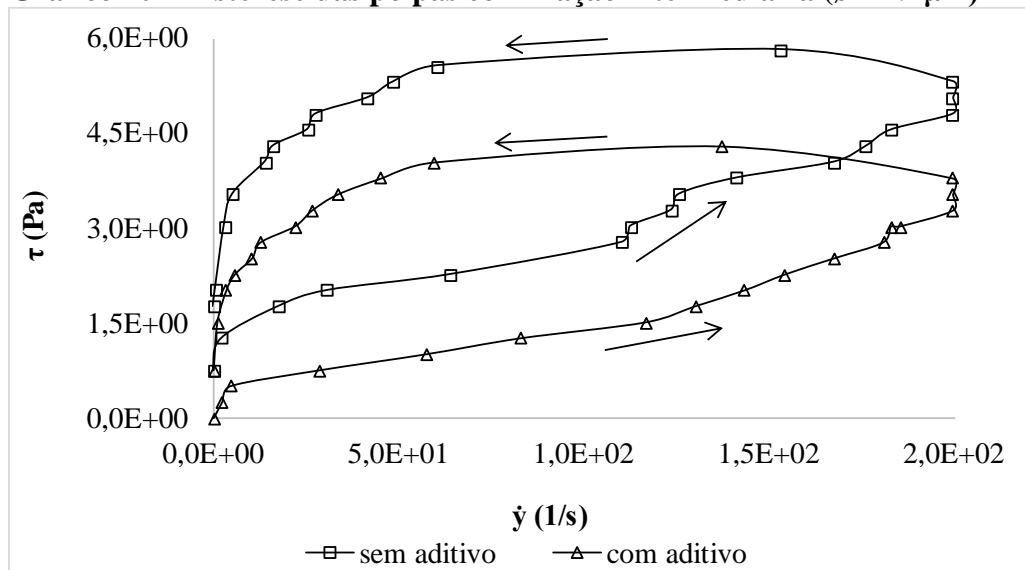
estabilidade da suspensão, de modo que maiores áreas de histerese representam substâncias com baixa estabilidade.

**Gráfico 19 - Histerese das polpas com fração grossa ( $\phi = 350 \mu\text{m}$ )**



O fato de a polpa com grossos se mostrar extremamente sensível às variações de taxa de cisalhamento pode ser justificada pela grande distribuição de tamanhos das partículas que compõem esta polpa. Durante o cisalhamento, elas se movimentam de maneira caótica dificultando a observação de um comportamento definido.

**Gráfico 20 - Histerese das polpas com fração intermediária ( $\phi = 79 \mu\text{m}$ )**

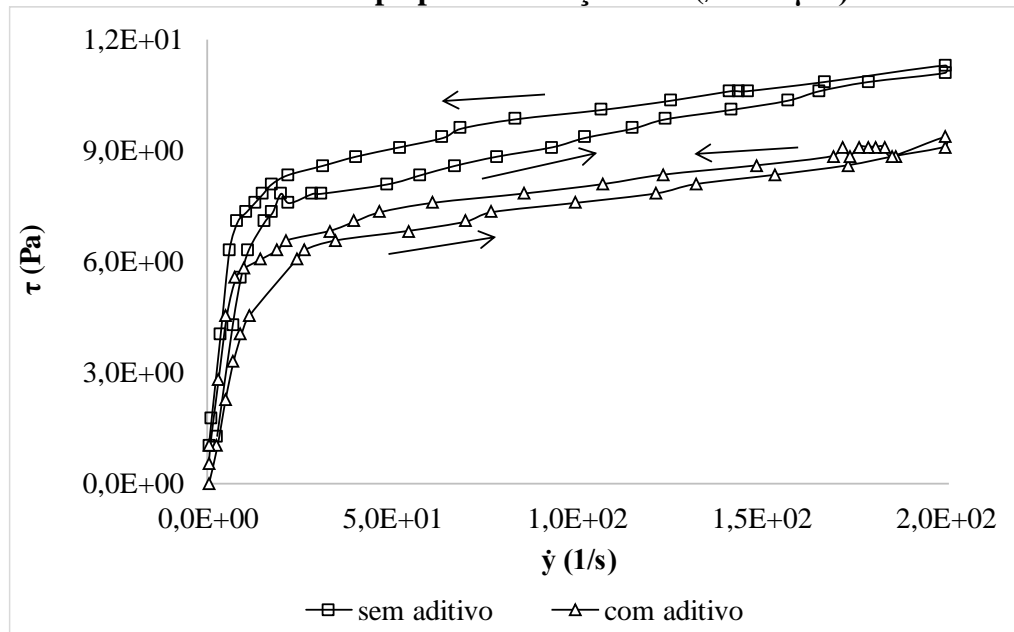


Comparando-se os Gráficos (19) e (20) percebe-se que a fração que contém menor distribuição de tamanho de partículas mostrou comportamento mais definido quando cisalhado.



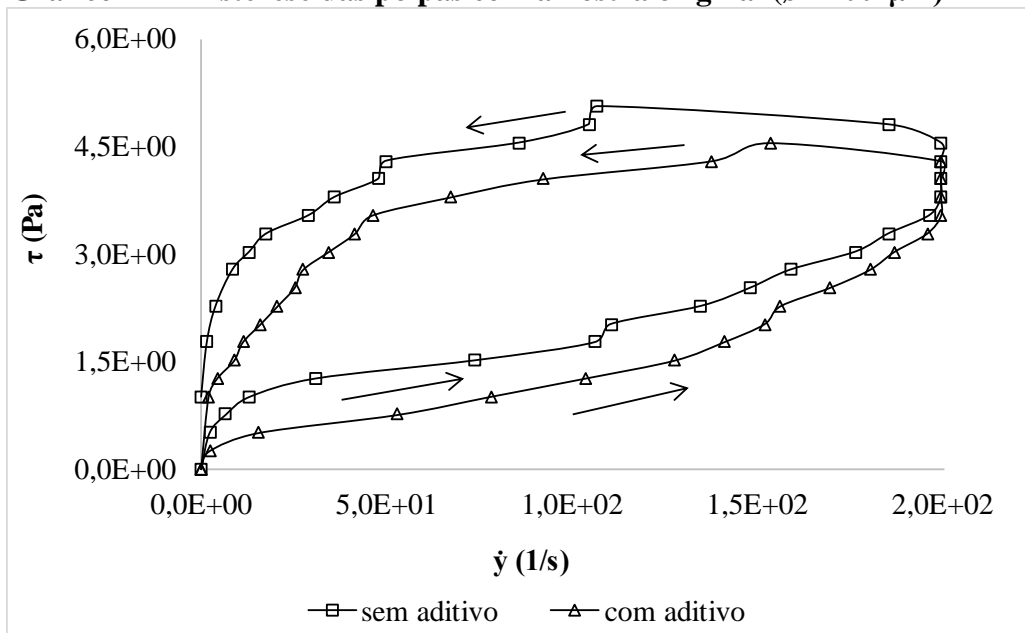
Entende-se que partículas com menor distribuição de tamanhos estruturam-se de forma mais ordenada na fase líquida da suspensão e por isso apresentam menor sensibilidade ao cisalhamento. O Gráfico (21) apresenta a histerese das polpas com finos. Este foi o que apresentou menor histerese dentre os resultados obtidos.

**Gráfico 21 – Histerese das polpas com fração fina ( $\phi = 28 \mu\text{m}$ )**



Nota-se que a polpa com finos apresentou menor caráter reopético dentre as polpas estudadas. Barbato, França e Nele (2011) salientam que o comportamento reopético de um fluido não é favorável para o escoamento em dutos devido a possibilidade de obstrução. O Gráfico (22) apresenta a curva de histerese da bauxita original.

**Gráfico 22 – Histerese das polpas com amostra original ( $\phi = 299 \mu\text{m}$ )**



Outros estudos sobre a dependência do tempo de polpas de bauxita a 50 % também revelaram comportamento reopético da polpa. (BRUM, 2011; SILVA, 2011). Supõe-se que a reopexia encontrada em estudos anteriores pode ser consequência da contribuição de várias faixas granulométricas, ou ainda de uma faixa específica.

Os resultados da histerese indicam que o aditivo afeta os parâmetros reológicos das polpas, mas não afetam a dependência do tempo das polpas. Polpas de bauxita compostas por frações com partículas grossas na presença de poliacrilato de sódio apresentaram reopexia enquanto polpas de bauxita com finos apresentaram tixotropia (REIS, 2015), o que mostra que a escolha do aditivo deve ser altamente criteriosa.

A distribuição granulométrica combinada às micrografias destes materiais permitem confirmar a heterogeneidade morfológica das partículas em estudo, em todas as amostras. No entanto, as polpas com grossos e original são as que possuem partículas com maior distribuição de tamanhos. Assim, percebe-se que uma maior histerese pode ser consequência da heterogeneidade morfológica das partículas que compõem um sistema.

### 5.5. pH

Os valores médios de pH são apresentados pela Tabela (9). Observa-se que o pH das polpas sem aditivo está na faixa ácida. As polpas com aditivo apresentaram pH na faixa neutra. De maneira geral, não se observou variação significativa do valor do pH devido a adição do defloculante.

**Tabela 9 - pH das polpas a 50 % (m/m)**

Amostra	pH das polpas sem aditivo	pH das polpas com aditivo
Original	6,58	6,68
Grossa	6,51	7,08
Intermediária	5,96	7,20
Fina	6,47	7,05

Os valores de pH da polpa de bauxita composta por frações medidos por Reis (2015) não apresentaram variação significativa. Entretanto, os valores de pH registrados se encontravam na faixa neutra (entre 7,32 e 7,83), superiores aos encontrados neste estudo.

### 5.6. Cálculo do fator de atrito pela equação de Dodge-Metzner da bauxita original

Uma amostra de polpa de bauxita a 50 % (m/m) sem aditivo e outra com aditivo na concentração ideal ajustaram-se ao modelo Herschel-Bulkley, de modo que os parâmetros reológicos correspondentes estão apresentados na Tabela (10).

**Tabela 10 – Dados da amostra original**

	Sem aditivo	Com aditivo
$\tau_0$ (Pa)	0,773	0,701
$K$ (Pa.s <sup>n</sup> )	0,061	0,049
$n$	0,814	0,771
$R^2$	0,992	0,981

A faixa de vazões foi então escolhida de modo que a vazão operacional representasse um valor médio entre as demais vazões de estudo. Para o estudo, considerou-se a vazão de 0,2 m<sup>3</sup>/s a 1 m<sup>3</sup>/s. A Tabela (11) apresenta os dados complementares para simulação do escoamento e estimativa de  $f_{D-M}$ .

**Tabela 11 – Parâmetros para cálculo do fator de atrito**

Outros parâmetros	
D (m)	0,6
Q (m <sup>3</sup> /s)	0,6
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1455

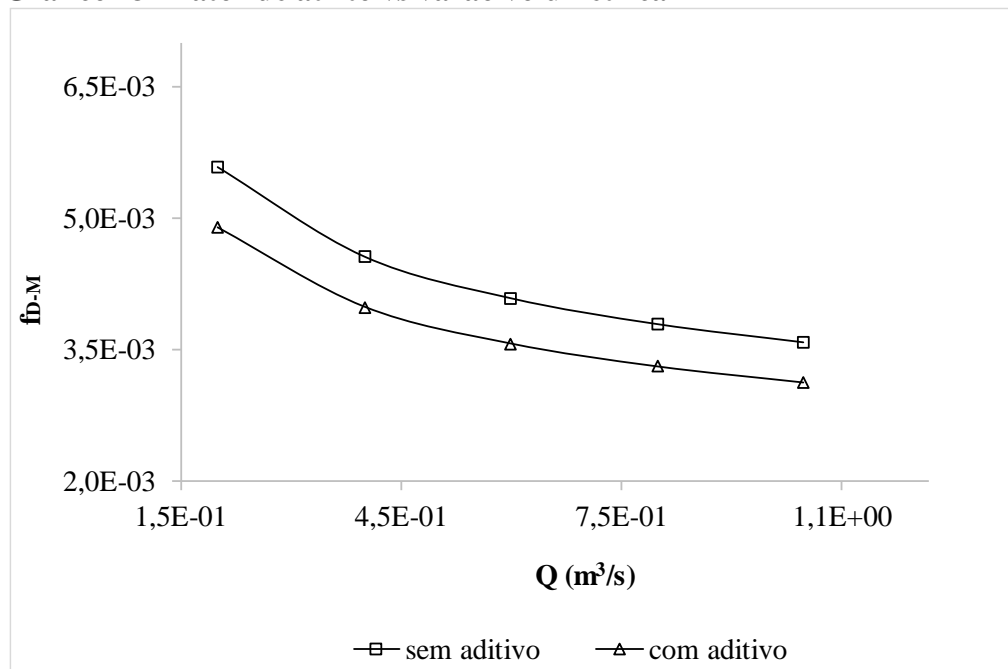
De posse dos dados apresentados nas Tabelas (10) e (11), estimou-se os valores de  $Re_{M-R}$  e  $f_{D-M}$  das polpas, substituindo-os nas Equações (4) e (5). Sendo os intervalos de vazão os mesmos para ambas polpas, construiu-se a Tabela (12) partindo-se desta variável.

**Tabela 12 – Fator de atrito da amostra original**

Q (m <sup>3</sup> /s)	Sem aditivo		Com aditivo	
	$Re_{M-R}$	$f_{D-M}$	$Re_{M-R}$	$f_{D-M}$
2,00E-01	2,05E+04	5,59E-03	2,98E+04	4,89E-03
4,00E-01	4,67E+04	4,56E-03	6,98E+04	3,99E-03
6,00E-01	7,56E+04	4,09E-03	1,15E+05	3,57E-03
8,00E-01	1,06E+05	3,79E-03	1,64E+05	3,31E-03
1,00E+00	1,38E+05	3,58E-03	2,15E+05	3,12E-03

Os dados da Tabela (12) foram relacionados de modo para gerar o Gráfico (23), onde o fator de atrito é avaliado em função da vazão volumétrica.

**Gráfico 23 – Fator de atrito vs vazão volumétrica**



Observa-se que, para uma mesma polpa, o aumento da vazão acarreta em decréscimo do fator de atrito de Dodge-Metzner. Considerando-se que a vazão é diretamente proporcional à velocidade do escoamento e esta, por sua vez, é diretamente proporcional ao número de Reynolds generalizado apresentado na Equação (4), ao se estimar o fator de atrito  $f_{D-M}$ , a

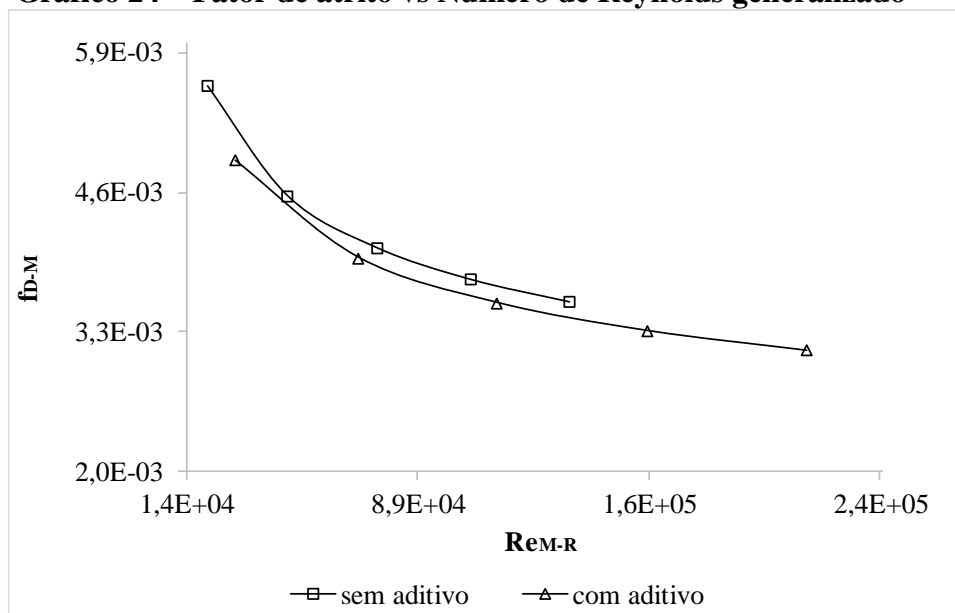
Equação (5) mostra que a raiz quadrada do inverso do fator de atrito é diretamente proporcional ao logaritmo do número de Reynolds generalizado.

Em suma, os parâmetros do Gráfico (23) se relacionam de modo inversamente proporcional de acordo com as equações utilizadas e o comportamento apresentado pelas curvas deste gráfico está de acordo com o esperado. Em termos práticos, pode-se observar que em altas vazões, o coeficiente de atrito alcança valores cada vez menores.

Ao comparar as curvas do Gráfico (23) observa-se que os fatores de atrito das polpas com aditivo se mostraram menores que  $f_{D-M}$  das polpas sem aditivo. Atribui-se este resultado à ação defloculante do hexametáfosfato de sódio que favorece o fluxo das partículas no meio fluido devido à estabilização das mesmas. Em uma vazão correspondente à capacidade máxima do mineroduto, a simulação mostrou que o fator de atrito da polpa com aditivo comparado ao fator de atrito da polpa sem aditivo foi reduzido em cerca de 12 %.

A relação entre o fator de atrito de Dodge-Metzner e o número de Reynolds generalizado das polpas sem aditivo e com aditivo é apresentado pelo Gráfico (24).

**Gráfico 24 – Fator de atrito vs Número de Reynolds generalizado**



A partir do Gráfico (24), observa-se que, para um mesmo valor de número de Reynolds generalizado, a polpa com aditivo na concentração ideal apresenta menores valores de fator de atrito que a polpa sem aditivo. Novamente, atesta-se a eficiência do aditivo em favorecer as propriedades de fluxo da polpa de bauxita nas condições estudadas.

Os resultados obtidos por meio dos Gráficos (23) e (24) mostram que o hexametáfosfato de sódio favoreceu a redução dos fatores de atrito das polpas de bauxita a 50 % (m/m). Estes

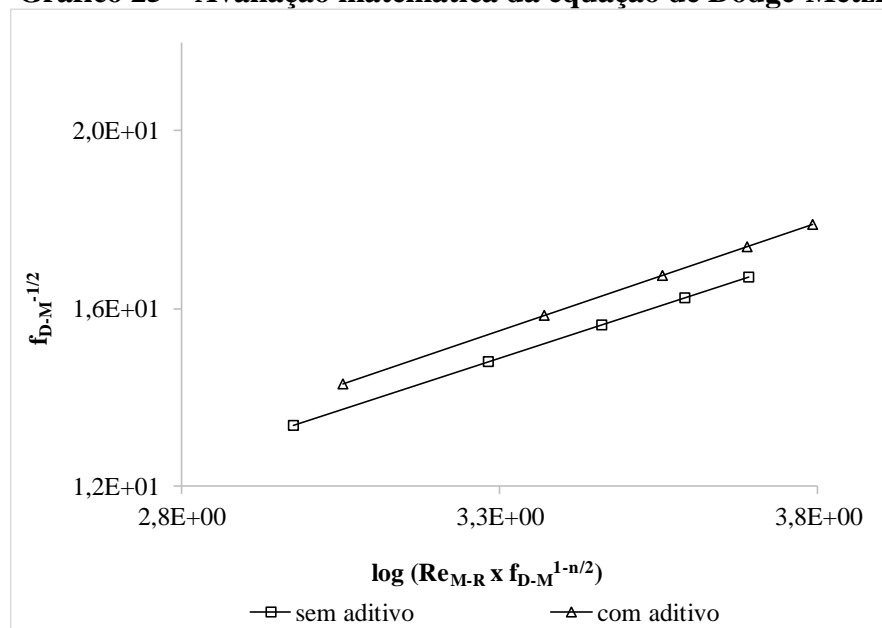
dados são significativos para o projeto de sistemas de bombeamento pois são o ponto de partida para o entendimento de diversos tipos de fluidos com característica reológica e composição semelhantes. Entretanto, não se pode generalizar tal comportamento uma vez que um mesmo aditivo pode ter ação tanto floculante quanto defloculante, dependendo da natureza da polpa.

Os valores apresentados na Tabela (12) permitiram calcular outros dados para complementar a avaliação do fluxo das polpas, os quais são apresentados na Tabela (13) e no Gráfico (25).

**Tabela 13 – Parâmetros complementares para avaliação matemática da equação de Dodge-Metzner**

Sem aditivo		Com aditivo	
$\sqrt{1/f_{D-M}}$	$\text{Log} (Re_{M-R} \times f_{D-M}^{(1-n/2)})$	$\sqrt{1/f_{D-M}}$	$\text{Log} (Re_{M-R} \times f_{D-M}^{(1-n/2)})$
1,34E+01	2,98E+00	1,43E+01	3,05E+00
1,48E+01	3,28E+00	1,58E+01	3,37E+00
1,56E+01	3,46E+00	1,67E+01	3,56E+00
1,62E+01	3,59E+00	1,74E+01	3,69E+00
1,67E+01	3,69E+00	1,79E+01	3,79E+00

**Gráfico 25 – Avaliação matemática da equação de Dodge-Metzner**



Da Equação (5) é possível perceber que há uma relação linear entre a raiz quadrada do inverso do fator de atrito e o termo logarítmico do segundo membro. Isto pode ser comprovado pelo Gráfico (25), o qual demonstra que a equação para o fator de atrito de Dodge-Metzner é uma forma simplificada de se estimar de modo satisfatório o fator de atrito de fluidos não newtonianos em regime turbulento.

## 6. CONCLUSÃO

A bauxita de Paragominas é essencialmente gibbsítica, contendo ainda goethita, hematita, caulinita e anatásio. A difratometria permitiu observar que a composição mineralógica das polpas não é significativamente alterada pelo peneiramento. A heterogeneidade da composição mineralógica foi confirmada pelo MEV, onde as amostras apresentaram partículas de formas variadas.

Os ensaios reológicos com as polpas compostas por partículas de ampla faixa de distribuição de tamanhos revelaram que quanto maior a distribuição de tamanhos das partículas que compõem uma suspensão menor será a viscosidade desta suspensão. Polpas compostas por partículas de menores tamanhos apresentaram maiores valores de viscosidade.

O hexametáfosfato de sódio atuou como defloculante da polpa de bauxita, independentemente da granulometria das partículas. Isto foi evidenciado através das curvas de defloculação, onde se observou que a viscosidade da polpa reduziu até um valor mínimo à medida que se aumentou a concentração do aditivo na polpa. As polpas compostas por frações apresentaram o menor valor de viscosidade observado na presença do aditivo a uma concentração equivalente a 300 g deste por tonelada de bauxita. No entanto, a polpa com amostra original apresentou menor valor de viscosidade quando misturada ao aditivo na concentração 250g/tonelada de bauxita.

As polpas apresentaram comportamento reológico não newtoniano descrito pelo modelo de Herschel-Bulkley. Quando misturadas ao hexametáfosfato, a característica foi mantida. A obtenção da curva de fluxo é altamente influenciada por questões como a geometria dos *spindles* e sedimentação das partículas. Por isso, é importante minimizar erros relacionados a estes fatores, de maneira a viabilizar um bom ajuste e se determinar os parâmetros reológicos com maior precisão.

As curvas de histerese revelaram comportamento dependente do tempo das suspensões avaliadas. Todas as polpas apresentaram reopexia, no qual a viscosidade aumenta com o tempo mantendo-se constante a taxa de cisalhamento. Ao se comparar as histereses entre as polpas com partículas grossas e finas observou-se que as polpas com finos apresentaram menor histerese, indicando que aquela polpa se apresenta em maior grau de estabilização das partículas. Em outras palavras, pode-se dizer que a polpa com finos apresentou maior estabilidade estrutural.

A adição do dispersante não afetou o pH da polpa, cujo pH encontra-se próximo do valor neutro.

As estimativas do número de Reynolds generalizado e do fator de atrito de Dodge-Metzner mostraram que para maiores valores de  $Re_{M-R}$  o fator de atrito atinge valores cada vez mais baixos.

A simulação de uma condição operacional de escoamento de polpa de bauxita na ausência e na presença do hexametáfosfato mostrou que o fluxo foi satisfatoriamente beneficiado pela ação defloculante do aditivo. Para uma vazão correspondente à capacidade máxima do mineroduto, as estimativas mostraram que o fator de atrito foi reduzido em cerca de 12 % em comparação ao fator de atrito da polpa sem aditivo, mostrando que um sistema de bombeamento pode ter suas perdas em termos de forças viscosas amenizadas pelo uso de aditivos modificadores de viscosidade.



## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Determinar potencial zeta das polpas estudadas para enriquecer as informações sobre estabilização da polpa pelos aditivos.

Realizar ensaios de bombeamento da polpa de bauxita com e sem defloculante para levantar dados experimentais sobre propriedades de transporte desta suspensão e validar os resultados obtidos a partir destas equações para determinação das propriedades de fluxo no bombeamento de polpas de bauxita.

Avaliar o impacto do uso de aditivos no processo de bombeamento nas etapas posteriores (recepção da polpa no ponto final do mineroduto, refino).

## REFERÊNCIAS

- AKROYD, T.J.; NGUYEN, Q.D. Continuous rheometry for industrial slurries. **Experimental thermal and fluid science**, v.27, n.5, p.507-514, 2003.
- ARAÚJO, D.G.; NASCIMENTO, C.R. Efeito da aditivação nas propriedades reológicas e nas características de sedimentação da polpa de bauxita: I ensaios preliminares. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16, Rio de Janeiro, 2008. **Anais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p.1-7.
- ARAÚJO, D.G.; NASCIMENTO, C.R. Propriedades reológicas da polpa de bauxita- II avaliação do rotor tipo *vane*. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15, Rio de Janeiro, 2007. **Anais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p.1-7.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Bauxita no Brasil** mineração responsável e competitividade. São Paulo, 2017. 61p.
- BARBATO, C.N. **Estudo reológico de suspensão de bauxita**. Rio de Janeiro, 2011, 152p. Tese de Doutorado – Escola de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- BARBATO, C.N.; FRANÇA, S.C.A.; NELE, M. **Light metals**. 1.ed. New York: Springer International Publishing, 2011. p.19-24.
- BETINOL, R.; NAVARRO, R.L. Slurry pipeline design approach. In: RIO PIPELINE 2009 CONFERENCE AND EXPOSITION, Rio de Janeiro, 2009. **Anais**. Rio de Janeiro: -, 2009.
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Transport phenomena**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1960. 780p.
- BRETAS, R.E.S.; D'AVILA, M.A. **Reologia de polímeros fundidos**, 2.ed. São Carlos: Edufscar, 2005. 257p.
- BRUM, S.M. **Estudo da influência da granulometria no comportamento reológico de polpa de bauxita e no fator de atrito**. Belém, 2011, 112p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal do Pará.
- BOGER, D.V. Rheology and the minerals industry. **Min. Pro. Ext. Met. Rev.**, v.20, n.1, p.1-25, 2000.
- DODGE, D.W.; METZNER, A.B. Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems. **AIChE Journal**, v.5, n.2, p.189-204, 1959.
- FARROKHPAY, S.A. Review of polymeric dispersant stabilisation of titania pigment. **Advances in Colloid and Interface Science**, v.151, n.1/2, p.24-32, 2009.
- FERREIRA, E.E. et al. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. **REM: Rev. Esc. Minas**, v.58, n.1, p.83-87, 2005.
- FOX, R.; MCDONALD, A.; PRITCHARD, P. **Introduction to fluid mechanics**. 6.ed. New York: John Wiley & Sons, 2004. 789 p.

GANDHI, R. et al. Design and operation of the world's first long distance bauxite slurry pipeline. In: DONALDSON, D.; RAAHAUGE, B.E., eds. **Essential readings in light metals: alumina and bauxite**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2008. cap.11, p.75-81.

GOMES, H.A. **Dimensionamento de mineroduto**. Belo Horizonte, 2012, 58p. Monografia de Especialização – Especialização em Engenharia de Recursos Minerais - Universidade Federal de Minas Gerais.

GONÇALVES, S.G. et al. Efeito de aditivos no comportamento reológico do rejeito da bauxita. **Cerâmica**, v.61, n.357, p.1-5, 2015.

HE, M.; WANG, Y.; FORSSBERG, E. Parameter studies on the rheology of limestone slurries. **Int. J. Miner. Process.**, v.78, n.2, p.63-77, 2006.

HE, M.; WANG, Y.; FORSSBERG, E. Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review. **Powder Technology**, v.147, n.1/3, p.94-112, 2004.

HIROSHUE, H. et al. Coagulation and dispersion of red mud suspensions. **Powder Technology**, v.78, n.2, p.63-77, 2006.

HOTZA, D. et al. Influência da adição de defloculante, ligante e partículas de alumina no comportamento reológico de suspensões a base de frita e caulim. **Quím. Nova**, v.21, n.4, p.526-528, 1998.

JOHNSON, S.B. et al. Surface chemistry-rheology relationships in concentrated mineral suspensions. **Int. J. Miner. Process.**, v.58, n.1/4, p.267-304, 2000.

JONES, R.L.; HORSLEY, R. R. Viscosity modifiers in the mining industry. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal**, v.20, n.1, p.215-223, 2000.

KOTSCHOUBEY, B. et al. Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da província bauxitífera de paragominas, noroeste da bacia do Grajaú, nordeste do Pará/oeste do Maranhão. In: MARIANI, O.J.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS, B.W., eds. **Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia**. Brasília: [s.n.], 2005. cap.11, p.691-782.

LIMA, E.C. et al. Fracionamento de polifosfato de sódio e caracterização por RMN de <sup>31</sup>P: um experimento para aulas de físico-química. **Quím. Nova**, v.33, n.9, p.1991-1995, 2010.

LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. **Rochas e minerais industriais** usos e especificações. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.

MACOSCO, C.W. **Rheology** principles, measurements and applications. New York: Wiley-VCH, 1994. 550 p.

MANDZY, N.; GRULKE, E.; DRUFFEL, T. Breakage of TiO<sub>2</sub> agglomerates in electrostatically stabilized aqueous dispersions. **Powder Technology**, v.160, n.2, p.121-126, 2005.

METZNER, A.; REED, J.C. Flow of non-Newtonian fluids Correlation of the laminar, transition, and turbulent-flow regimes. **AIChE Journal**, v.1, n.4, p.434-440, 1955.

MPSA. **Relatório interno de produção**. Paragominas, 2017.

NASCIMENTO, C.R. Reologia e reometria aplicadas ao estudo de polpas minerais. **Série Rochas e Minerais Industriais**, v.11, Rio de Janeiro: CETEM, 2008, 53p.

NASCIMENTO, C.R. Caracterização e determinação do comportamento de consolidação da polpa de bauxita. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v.63, n.2, p.325-329, 2010.

NASCIMENTO, C.R.; SAMPAIO, J.A. Comportamento de consolidação da polpa de bauxita gibbsítica na presença de aditivos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 23, 2009. **Anais**. Gramado: Editora da UFRGS, 2009. v.1 p.67-72.

NGUYEN, Q.D.; BOGER, D.V. Direct yield stress measurement with the *vane* method. **Journal of Rheology**, v.29, n.3, p.335-347, 1985.

NGUYEN, Q.D.; BOGER, D.V. Characterization of yield stress fluids with concentric cylinder viscometers. **Rheol. Acta**, v.26, n.6, p.508-515, 1987.

OHENOJA, K. et al. Effect of molecular weight of sodium polyacrylates on the particle size distribution and stability of a TiO<sub>2</sub> suspension in aqueous stirred media milling. **Powder Technology**, v.262, p.188-193, 2014.

PAPO, A.; PIANI, L. Rheological properties of alumina slurries effect of deflocculant addition. **Particulate Science and Technology**, v.162, p.48-57, 2017.

PAZ, S.P.A. **Desenvolvimento e otimização de métodos de controle de qualidade e de processo de beneficiamento para bauxitas gibbsíticas tipo Paragominas**. São Paulo, 2016, 202p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo – Universidade de São Paulo.

PAZ, S.P.A.; ANGÉLICA, R.S.; KAHN, H. Optimization of the reactive silica quantification method applied to Paragominas-type gibbsitic bauxites. **International journal of mineral processing**, v.160, n.2, p.121-126, 2017.

POSSA, M.V.; LIMA, J.R.B. **Comportamento reológico de polpas de minério**. 1 ed. CETEM, 2000. 37p. (Série Tecnologia Mineral, n.77).

QUARESMA, J.N.N. **Relatório técnico** projeto experimentos e simulação em escoamentos não-newtonianos. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará. Belém, 2007. 41p.

REIS, I.N.S.F. **Influência da granulometria nas propriedades reológicas da polpa de bauxita pós beneficiamento**. Belém, 2015, 77p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química/Universidade Federal do Pará.

RUFINO, R.L. **Análise da velocidade crítica de escoamento e estudo reológico de polpas de caulim da bacia do Rio Capim em dutos circulares**. Belém, 2009, 101p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica/Universidade Federal do Pará.

SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A.; BRAGA, P.F.A. **Tratamento de minérios** práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. 570 p.

SAMPAIO, J.A.; NEVES, C.H.B. **Bauxita** MSL minerais S.A. In: Usinas de beneficiamento de minérios no Brasil. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. p.307-314.

SILVA, A.L.M.F. et al. Simulação do fator de atrito para o escoamento de caulim com diferentes teores de sólidos pelo modelo de SWAMEE-JAIN. **Revista Matéria**, v.22, n.2, e11814, 2017.

SILVA, C.C. **Métodos de inspeção de tubulações de transporte de minério** o caso da integridade de dutos. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2017, 57p.

SILVA, J.G. **Reologia e microestrutura na estabilização de suspensões concentradas de  $Al_2O_3$** . Belo Horizonte, 2003, 134p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais - Universidade Federal de Ouro Preto.

SILVA, K.C.S. **Influência de aditivos químicos no comportamento reológico de polpa de bauxita**. Belém, 2011, 96p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal do Pará.

STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering**. 2 ed. East Lansing: Freeman Press, 1996. 418p.

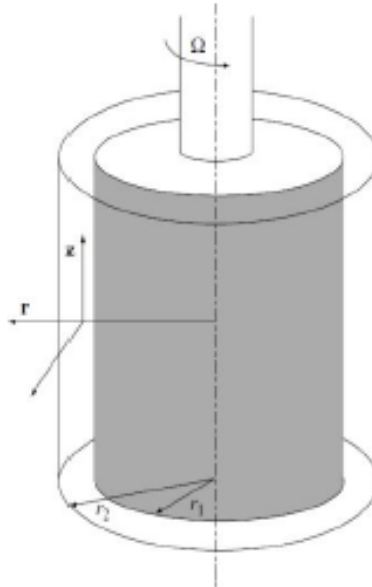
WHITE, F.M. **Fluid Mechanics**. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1998. 418p.

WILSON, K.C.; THOMAS, A.D. Hybrid rheological model for non-newtonian turbulent pipe flow. **The Canadian journal of chemical engineering**, v.88, n.2, p.179-181, 2010.

ZHOU, Z. et al. The yield stress of concentrated flocculated suspensions of size distributed particles. **Journal of Rheology**, v. 43, n.3, p. 651-671, 1999.

## APÊNDICE A – DADOS PARA CÁLCULO DA INCERTEZA

**Figura 17 – Cilindro concêntrico e suas medidas**



- Definições:

$$T = F \times r_1$$

$$A = 2 \times \pi \times r_1 \times L$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{T}{r_1 \times 2 \times \pi \times r_1 \times L}$$

Onde: T = torque;

F = força aplicada;

$r_1$  = raio interno (raio do rotor);

$\tau$  = tensão cisalhante;

L = comprimento do rotor.

- Medidas do sensor SV1:

$$r_1 = 10.1 \text{ mm} = 0.0101 \text{ m}$$

$$L = 61.4 \text{ mm} = 0.0614 \text{ m}$$

- Equação para tensão no SV1:

$$\tau = \frac{T}{r_1 \times 2 \times \pi \times r_1 \times L}$$

A equação específica é dada por

$$\tau = \frac{T}{2 \times \pi \times r_1^2 \times L \times F_c} \quad (1)$$

$$F_c = \frac{0,01}{2 \times \pi \times r_1^2 \times L} \quad (2)$$

- Relação entre tensão e torque no SV1:

Substituindo a equação (2) em (1):

$$\tau = \frac{T}{2 \times \pi \times r_1^2 \times L \times \frac{0,01}{2 \times \pi \times r_1^2 \times L}} \therefore \tau = \frac{T}{0,01} \therefore T = 0,01 \times \tau$$

- Desvios para as medidas do SV1:

$$\delta r_1 = 0.025 \text{ mm} = 0.000025 \text{ m}$$

(obs.: experimentais do equipamento)

$$\delta L = 0.5 \text{ mm} = 0.0005 \text{ m}$$

(obs.: experimentais do equipamento)

$$\delta T = 0.015 \text{ N.cm} = 0.00015 \text{ N.cm}$$

(desvio do Torque:  $T_{\text{máx}} = 0.5 \% \times 3 \text{ N.cm}$ )  $\rightarrow$  manual HAAKE

- Relações entre tensão e suas variáveis influentes:

$$\tau = \frac{T}{2 \times \pi \times r_1^2 \times L}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial T} = \frac{1}{2 \times \pi \times r_1^2 \times L}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial r_1} = \frac{-2T}{2 \times \pi \times r_1^3 \times L}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial L} = \frac{-T}{2 \times \pi \times r_1^2 \times L^2}$$

- Equação para cálculo da incerteza:

$$I = \frac{\partial \tau}{\tau} = \sqrt{\left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + 4 \times \left(\frac{\delta r_1}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2} \times 100$$

## APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE HISTERESE

**Tabela 14 – Histerese da amostra com grossos**

Sem aditivo		Com aditivo	
$\tau$ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	$\tau$ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)
0	0,009	0,253	0,009
0,506	11,04	0,759	26,53
0,759	17,71	1,012	33,2
1,012	22,07	1,265	35,42
1,265	24,3	1,518	41,92
2,024	37,47	2,53	59,63
2,277	39,78	2,783	64,17
2,53	41,92	3,036	66,39
3,036	50,91	4,554	82,41
3,289	53,04	4,807	85,18
3,542	55,36	5,06	87,67
3,795	62,12	5,313	90,25
4,301	75,83	5,566	92,56
4,554	78,14	5,819	96,84
4,807	80,55	6,072	99,06
5,06	85,18	6,325	105,6
6,578	96,66	7,337	127,3
7,084	98,88	7,59	138,2
7,843	103,2	8,096	166,9
8,096	105,5	8,349	200,1
8,349	107,7	8,602	200,1
8,602	109,9	8,349	197,8
9,108	114,4	8,096	188,8
10,88	134,1	6,831	41,03
11,13	136,3	6,578	24,92
11,39	147,4	6,072	6,587
11,64	182,8	5,566	4,275
11,89	200,1	4,807	2,048
12,14	200,1	2,53	0,009
11,89	190,7	-	-
11,64	160,6	-	-
11,39	142,1	-	-
10,12	37,56	-	-
9,867	32,93	-	-
9,614	25,9	-	-
8,602	14,15	-	-
6,072	2,669	-	-
2,783	0,204	-	-



**Tabela 15 – Histerese da amostra com fração intermediária**

Sem aditivo		Com aditivo	
$\tau$ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	$\tau$ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]
0,759	0,008	0	0,008
1,265	2,312	0,253	2,312
1,771	17,71	0,506	4,538
2,024	30,89	0,759	28,84
2,277	64,35	1,012	57,58
2,783	110,5	1,265	83,13
3,036	112,8	1,518	117
3,289	123,8	1,771	130,3
3,542	126	2,024	143,7
3,795	141,4	2,277	154,7
4,048	167,9	2,53	167,9
4,301	176,6	2,783	181,2
4,554	183,3	3,036	183,3
4,807	200,1	3,036	185,7
5,06	200,1	3,289	200,1
5,313	200,1	3,542	200,1
5,819	153,5	3,795	200,1
5,566	60,78	4,301	137,7
5,313	48,86	4,048	59,63
5,06	41,83	3,795	45,39
4,807	27,86	3,542	33,64
4,554	25,45	3,289	26,7
4,301	16,28	3,036	21,99
4,048	14,07	2,783	12,72
3,542	5,337	2,53	10,41
3,036	3,026	2,277	5,788
2,024	0,612	2,024	3,468
1,771	0,009	1,518	1,011
-	-	0,759	0,008

**Tabela 16 – Histerese da amostra com fração fina**

Sem aditivo		Com aditivo	
$\tau$ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	$\tau$ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]
1,265	2,227	0	0,0085
4,301	6,493	1,012	2,312
5,566	8,72	2,277	4,538
7,337	17,35	4,554	11,13
7,843	19,58	6,072	23,94
7,843	28,22	6,578	34,8
7,843	30,43	6,831	54,29
8,096	48,33	7,084	69,96
8,349	57,58	7,337	76,98
8,855	78,41	7,843	121,6
9,108	93,36	8,096	132,5
9,361	102,2	8,349	154,1
9,614	115,3	8,602	173,6
9,867	124,1	8,855	186,6
10,12	141,8	9,108	200,1
10,37	157,2	9,361	200,1
10,63	165,9	8,855	185,8
10,88	179,1	9,108	183,6
11,13	200,1	9,108	181,4
11,33	200,1	9,108	179,1
10,88	167,2	9,108	176,6
10,63	141,7	8,855	169,7
9,67	83,39	8,096	107,2
9,614	68,62	7,843	85,88
9,361	63,63	7,59	60,96
9,108	51,89	7,337	46,63
8,855	40,05	7,084	39,7
8,602	30,89	6,831	32,84
8,349	21,45	6,578	21,27
7,843	14,77	6,072	14,33
7,59	12,46	5,819	9,612
7,337	10,15	5,566	7,386
7,084	7,836	4,554	4,895
6,325	5,609	2,783	2,584
4,048	3,204	1,012	0,331
1,771	0,765	0,506	0,0085
1,012	0,0085	-	-

**Tabela 17 – Histerese da amostra com bauxita original**

Sem aditivo		Com aditivo	
$\tau$ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	$\tau$ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]
0	0,008	0	0,008
0,506	2,312	0,253	2,312
0,759	6,672	0,506	15,58
1,012	13,26	0,759	53,22
1,265	30,97	1,012	78,41
1,518	73,96	1,265	103,8
1,771	106,4	1,518	128,1
2,024	110,8	1,771	141,3
2,277	135,2	2,024	152,3
2,53	148,5	2,277	156,7
2,783	159,4	2,53	169,9
3,036	177,1	2,783	180,8
3,289	186	3,036	187,5
3,542	197	3,289	196,3
3,795	200,1	3,542	200,1
4,048	200,1	3,795	200,1
4,301	200,1	4,048	200,1
4,554	200,1	4,301	200,1
4,807	186	4,554	153,8
5,06	107,2	4,301	138
4,807	104,8	4,048	92,56
4,554	86,15	3,795	67,47
4,301	50,11	3,542	46,28
4,048	47,88	3,289	41,65
3,795	36,04	3,036	34,62
3,542	29,1	2,783	27,59
3,289	17,71	2,53	25,28
3,036	13,08	2,277	20,74
2,783	8,457	2,024	16,11
2,277	3,918	1,771	11,3
1,771	1,547	1,518	8,992
1,012	0,008	1,265	4,36
-	-	1,012	2,048
-	-	0	0,008

## ANEXO A – PARÂMETROS FÍSICOS E DE FLUXO DA POLPA DE BAUXITA DE PARAGOMINAS

**Tabela 18 – Distribuição granulométrica da polpa original**

(%) de Passante Acumulada	
<b>28#</b>	99,52
<b>32#</b>	98,85
<b>48#</b>	89,78
<b>65#</b>	79,68
<b>100#</b>	70,45
<b>150#</b>	60,59
<b>200#</b>	52,49
<b>270#</b>	44,28
<b>325#</b>	41,71
<b>400#</b>	39,26
<b>20 µm</b>	33,88
<b>10 µm</b>	27,30
<b>5 µm</b>	19,20
<b>2 µm</b>	7,59

Fonte: MPSA, 2017

**Tabela 19 – Propriedades de escoamento da polpa original**

Densímetro		Reologia					
% Sólido	Densid	%Sol. Seco	Densid	Visc (mPa)	Yield (Dyn/cm <sup>2</sup> )	pH	Vel. Sed. (cm/h)
51,80	1,65	51,17	1,46	10,47	68,06	8,12	0,85

Fonte: MPSA, 2017