



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

IZABELA DE NAZARÉ SOUZA DA FONSECA REIS

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DA
POLPA DE BAUXITA PÓS BENEFICIAMENTO**

BELÉM - PA

2015

IZABELA DE NAZARÉ SOUZA DA FONSECA REIS

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS
POLPA DE BAUXITA PÓS BENEFICIAMENTO**

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia de Processos Inorgânicos.

ORIENTADORES: Prof. Dr. José Antonio da Silva Souza.

Prof^a. Dr^a. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe.

BELÉM - PA

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Reis, Izabela de Nazaré Souza da Fonseca, 1991-
Influência da granulometria nas propriedades
reológicas da polpa de bauxita pós beneficiamento /
Izabela de Nazaré Souza da Fonseca Reis. - 2015.

Orientador: José Antonio da Silva Souza;
Coorientadora: Augusta Maria Paulain
Ferreira Felipe.

Dissertação (Mestrado) - Universidade
Federal do Pará, Instituto de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química,
Belém, 2015.

1. Reologia. 2. Bauxita. I. Título.

CDD 22. ed. 531.1134

IZABELA DE NAZARÉ SOUZA DA FONSECA REIS

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DA
POLPA DE BAUXITA PÓS BENEFICIAMENTO**

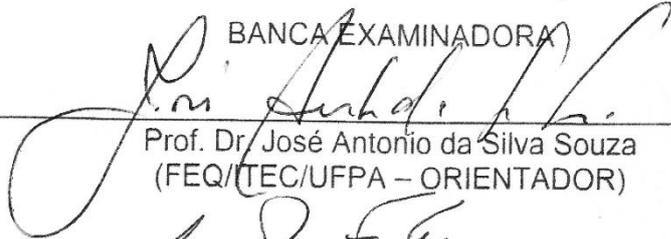
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia de Processos Inorgânicos.

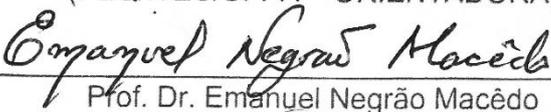
DATA DA AVALIAÇÃO: 13 / 11 / 2015

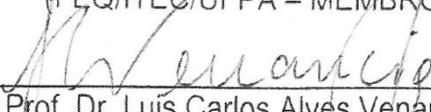
CONCEITO: APROVADO.

BANCA EXAMINADORA)


Prof. Dr. José Antonio da Silva Souza
(FEQ/ITEC/UFPA – ORIENTADOR)


Prof. Dra. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe
(FEQ/ITEC/UFPA – ORIENTADORA)


Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo
(FEQ/ITEC/UFPA – MEMBRO)


Prof. Dr. Luís Carlos Alves Venâncio
(CCET/UFMA – MEMBRO)

À DEUS por seu infinito amor.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço a DEUS, por seu infinito amor e bondade.

A minha mãe Maria Darcy Fonseca pela criação baseada no amor, na fé, respeito e responsabilidade. Todas as minhas qualidades são frutos da criação dessa mulher maravilha que eu tanto amo.

Ao Bóris, meu grande amigo de quatro patas, pelo seu jeitinho encantador que me faz mais feliz.

Ao meu querido Jefferson Figueiredo pelo carinho, companhia e compreensão. Muito obrigada!

A minha orientadora Prof^a. Dr^a. Augusta Felipe por acreditar e confiar em mim e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Antonio pela confiança e pelos ensinamentos e esclarecimentos fundamentais.

Ao Msc. Eng. Sebastião Martins Brum da Mineração Paragominas S/A pelo fornecimento da matéria-prima e parceria durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório: Dilson Nazareno, André Mileo, Cláudio Cardins Júnior e Anny Rodrigues pelas conversas e apoio durante a execução dos experimentos.

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para execução deste trabalho. Muito obrigada!

“Posso todas as coisas em Cristo que me fortalece.”

Filipenses 4:13

RESUMO

O conhecimento de fatores que influenciam a reologia de polpa de bauxita faz-se necessário e importante para o controle de qualidade do processo de escoamento via mineroduto. O presente trabalho avaliou a influência de diferentes frações granulométricas (-100#+150#; -150#+200#; -200#+270#; -270#+325# e -400#) na reologia da polpa de bauxita transportada através do mineroduto da Mineração Paragominas S/A (MPSA). Foram realizadas análises de caracterização mineralógica, através da Difractometria de Raios-X (DRX) das frações de bauxita obtidas por peneiramento a úmido, sendo observada mineralogia semelhante (gibbsita, caulinita, hematita, goethita e anatásio) entre as diferentes frações granulométricas, havendo um incremento na concentração das frações mais grossas para frações mais finas analisadas. O estudo dos parâmetros reológicos foi realizado no viscosímetro Haake VT 550, com sensor tipo cilindros coaxiais SV1, a temperatura de 30°C. Polpas de bauxita, com teor de sólidos constante e igual a 50% foram preparadas, a fim de se garantir as especificações de transporte seguro e eficaz por mineroduto. Ensaios de curvas de viscosidade aparente *versus* concentração de aditivo foram realizados utilizando-se o poliacrilato de sódio em concentrações que variaram de 0 – 1% (m/m) com o intuito de se determinar a concentração ideal de aditivo necessária à estabilização das polpas formuladas. Determinadas as concentrações ótimas de poliacrilato de sódio, os ensaios de histerese foram realizados. Verificou-se que quanto menor o diâmetro médio das partículas, maior a quantidade de aditivo faz-se necessária à estabilização da polpa e que a adição de poliacrilato de sódio à fração mais fina de bauxita ocasionou floculação do sistema. De uma maneira geral, o comportamento reológico das polpas de bauxita aditivadas com as respectivas concentrações ótimas de poliacrilato de sódio mostrou-se não-Newtoniano e dependente do tempo, apresentando características de fluido reopético para as frações com granulometrias entre 127 e 48,5 µm e comportamento tixotrópico para fração fina de diâmetro médio menor que 37 µm. A polpa de bauxita de granulometria fina e sem a adição de poliacrilato de sódio apresentou comportamento reopético. Observou-se, para as polpas de bauxita dispersas, que a diminuição do tamanho médio das partículas influencia a magnitude da área de histerese formada, causando uma diminuição do caráter reopético.

Palavras chave: Bauxita, granulometria, reologia, histerese.

ABSTRACT

The knowledge of factors that influence the rheology of bauxite pulp is necessary and important for the quality control of the flow through the pipeline process. This work evaluated the effect of different granulometric fractions (-100#+150#; -150#+200#; -200#+270#; -270#+325# and -400#) on rheology of bauxite pulp that is carried through Mineração Paragominas S/A (MPSA) pipelines. Distinct fractions of bauxite obtained by wet screening were analyzed by an X-Ray Diffractometer (XRD) to determine the mineralogical composition of the samples. The results of those analysis revealed that each fraction has a similar composition (gibbsite, kaolinite, hematite, goethite and anatase) though different proportion in the fractions. The studies of rheological parameters were developed by using Thermo Scientific HAAKE Viscotester 550 and the SV1 coaxial cylinder sensor at 30°C. Bauxite pulps, with constant solids content and equal to 50 wt% were prepared in order to simulate the actual conditions of flow through the pipeline. Testing of apparent viscosity curves versus additive concentration were carried out using sodium polyacrylate at concentrations that ranged from 0 – 1 wt% in order to determine the optimal concentration of additive necessary to stabilize the bauxite pulp. From the results found of optimal concentration of sodium polyacrylate, the hysteresis tests were performed. It was found that the smaller the average particle diameter, the greater the amount of additive is necessary to stabilize the pulp and the addition of sodium polyacrylate in the finer fraction of bauxite caused the flocculation of system. In general, the rheological behavior of the bauxite pulps with their optimal concentrations of sodium polyacrylate was shown to be non-Newtonian and time dependent, with rheopetic behavior for fractions with granulometry between 127 and 48.5 micrometers and thixotropic behavior to fine fraction with average diameter smaller than 37 micrometers. The bauxite pulp formulated with the fine particle size and without addition of sodium polyacrylate showed rheopetic behavior. It was observed, for the dispersed bauxite pulps, that the decrease the average particle size influences the size of the hysteresis area formed, causing a decrease in rheopetic behavior.

Keywords: Bauxite, granulometry, rheology, hysteresis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica da MPSA.....	25
Figura 2 – Layout da sequência das operações de lavra	26
Figura 3 – Fluxograma do beneficiamento de bauxita da MPSA.....	28
Figura 4 – Extensão do mineroduto de bauxita Paragominas – Barcarena.	29
Figura 5 – Representação gráfica do escoamento de um fluido entre placas paralelas	32
Figura 6 – Classificação reológica dos principais tipos de fluidos.	34
Figura 7 - Curvas de fluxo e de viscosidade dos principais fluidos de comportamento independente do tempo.....	35
Figura 8 – Comportamento reológico dos fluidos dependentes do tempo.	38
Figura 9 – Variação da viscosidade em função do tempo.....	39
Figura 10 – Mudança do comportamento reológico em função do teor de sólidos (<40%) e tamanho da partícula.	42
Figura 11 – Influência da distribuição de partículas na viscosidade de suspensões.	43
Figura 12 – Efeito do tamanho de partícula na viscosidade aparente de suspensões.	43
Figura 13 – Curva de fluxo de suspensões com partículas de vidro de diferentes formatos.	44
Figura 14 – Viscosidade da polpa de bauxita com 50% em peso de sólidos em função do tempo, parametrizado no pH e em taxa de cisalhamento constante de 100 s-1.	46
Figura 15 – Fluxograma dos ensaios realizados.	48
Figura 16 – Viscosímetro rotacional Haake VT	51
Figura 17 – Calibração do viscosímetro.	52
Figura 18 – Monômero poliacrilato de sódio (PAS).	52
Figura 19 – Curva de distribuição granulométrica.	55
Figura 20 – Superposição em modo 3D dos difratogramas das frações de bauxita.	55
Figura 21 – Superposição dos difratogramas de bauxita (zoom no pico da caulinita).	56
Figura 22 – Curva de deflocação fração passante de 100# (-100#+150#).....	58
Figura 23 – Curva de deflocação fração passante de 150# (-150#+200#).....	58
Figura 24 – Curva de deflocação fração passante de 200# (-200#+270#).....	59

Figura 25 – Curva de defloculação fração passante de 270# (-270+325#).....	59
Figura 26 – Curva de flocculação fração passante de 400# (-400#).....	60
Figura 27 – Histerese polpa -100#+150#.....	62
Figura 28 – Histerese polpa -150#+200#.....	63
Figura 29 – Histerese polpa -200#+270#.....	63
Figura 30 – Histerese polpa -270#+325#.....	64
Figura 31 – Histerese polpa -400#.....	65
Figura 32 – Histerese polpa -400# sem adição de poliacrilato de sódio.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das bauxitas.	21
Tabela 2 – Composição mineralógica de bauxitas.	22
Tabela 3 – Principais reservas e produtores mundiais de bauxita.	23
Tabela 4 – Composição em óxidos de bauxitas.	24
Tabela 5 – Especificação de parâmetros para transporte de polpa de bauxita.	30
Tabela 6 – Principais modelos reológicos.	40
Tabela 7 – Análise granulométrica por peneiramento.	54
Tabela 8 – Resultados caracterização das polpas.	57
Tabela 9 – Concentração ótima de poliacrilato de sódio e valores de viscosidade aparente observado em função do diâmetro médio.	61
Tabela 10 – Viscosidade aparente e tensão de cisalhamento dos perfis de ida e volta a uma taxa constante.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
CID	Concentração Ideal de Defloculante
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raios-X
DTP	Distribuição de Tamanho de Partícula
MPSA	Mineração Paragominas S/A
PA	Estado do Pará
PAS	Poliacrilato de sódio

LISTA DE SÍMBOLOS

#	Mesh
%	Porcentagem
τ	Tensão de cisalhamento
Σ	Somatório
μ	Viscosidade absoluta
η	Viscosidade aparente
τ_0	Tensão limite de escoamento
ρ_l	Massa específica do líquido
ρ_{polpa}	Massa específica da polpa
ρ_s	Massa específica de sólidos
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento
<i>An</i>	Anatásio
<i>A</i>	Área
<i>C_w</i>	Concentração de sólidos
<i>D₅₀</i>	Diâmetro médio
<i>F</i>	Força de cisalhamento
<i>g/cm³</i>	Gramas por centímetros cúbicos
<i>Gb</i>	Gibbsite
<i>Gt</i>	Goethita
<i>H₂O</i>	Água
<i>Hm</i>	Hematita
<i>K</i>	Caulinita
<i>m/m</i>	Massa por massa
<i>m/v</i>	Massa por volume
<i>mm</i>	Milímetros
<i>Mton</i>	Milhões de toneladas
°C	Temperatura em graus Celsius
<i>Pa</i>	Pascal
<i>Pa.s</i>	Pascal segundo
<i>pH</i>	Potencial hidrogeniônico
<i>R²</i>	Coeficiente de correlação

<i>s</i>	Segundos
<i>t</i>	Tempo
<i>T</i>	Temperatura
<i>ton</i>	Tonelada
<i>Tyler</i>	Escala granulométrica
<i>V</i>	Velocidade
$\frac{dV}{dy}$	Diferencial da velocidade pelo espaço (taxa de cisalhamento)
<i>kV</i>	Quilovolts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Bauxita	21
3.1.1	Principais reservas	22
3.1.2	Principais aplicações industriais	23
3.2	A mineração de bauxita em Paragominas/PA	24
3.2.1	Lavra.....	26
3.2.2	Beneficiamento	27
3.2.3	Transporte: Primeiro mineroduto de bauxita do mundo.....	28
3.3	Importância do estudo reológico de polpas minerais	31
3.4	Conceito de reologia e viscosidade	31
3.5	Comportamento reológico de fluidos.....	33
3.5.1	Fluidos viscoelásticos	34
3.5.2	Fluidos não-Newtonianos independentes do tempo.....	35
3.5.3	Fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo.....	37
3.6	Modelos reológicos.....	39
3.7	Principais variáveis que afetam o comportamento reológico de polpas minerais	40
3.7.1	Porcentagem de sólidos	41
3.7.2	Tamanho e morfologia das partículas.....	41
3.7.3	pH e aditivos modificadores de superfície	45
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1	Análise granulométrica.....	49
4.2	Caracterização.....	49
4.2.1	Composição mineralógica	49

4.3	Preparo das polpas minerais	50
4.3.1	Teor de sólidos	50
4.3.2	Massa específica da polpa	50
4.3.3	pH	50
4.4	Ensaio reológico	51
4.4.1	Curvas de viscosidade <i>versus</i> concentração de aditivo	52
4.4.2	Histerese	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1	Análise granulométrica.....	54
5.2	Análise mineralógica	55
5.3	Caracterização das polpas de bauxita	57
5.4	Análises reológicas.....	57
5.4.1	Curvas viscosidade aparente <i>versus</i> concentração de PAS	57
5.4.2	Histereses.....	61
6	CONCLUSÕES	68
7	PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS	70
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 INTRODUÇÃO

A bauxita constitui-se um material heterogêneo formado por uma mistura de oxi-hidróxidos de alumínio hidratados e impurezas (CONSTANTINO et al, 2002). Este minério é utilizado principalmente na produção do alumínio metálico, além de uma série de outros produtos não metálicos (ARENARE, 2009).

O Brasil é um dos países detentores de grandes reservas de bauxita, destacando-se também pela produção/beneficiamento mundial. No estado do Pará está em operação o primeiro mineroduto de polpa de bauxita do mundo. Esse mineroduto foi projetado e construído para transportar a polpa de minério de alumínio da usina de beneficiamento, localizada em Paragominas/PA até a planta química de produção de alumina, situada no município de Barcarena/PA, num percurso de 244 km de extensão. (ARAÚJO et al., 2010)

Do ponto de vista econômico e ambiental, a polpa deve ser transportada com maior concentração possível de sólidos, evitando assim a necessidade de operações com grandes volumes de água. Entretanto, o transporte hidráulico de sólidos por bombeamento apresenta características diferentes em relação à mesma operação com um líquido puro (água), e o aumento do teor de sólidos implica em mudanças no comportamento reológico da polpa (NASCIMENTO e SAMPAIO, 2007).

Em se tratando de fluidos não-Newtonianos, as propriedades reológicas de polpas minerais, como a viscosidade aparente, a tensão de escoamento e o comportamento de tempo dependência exercem grande influência nos aspectos técnicos e econômicos do bombeamento destes tipos de fluidos (BARBATO, 2011).

Segundo Klein e Hallbom (2002), propriedades inerentes à porção sólida da polpa, como concentração de sólidos, morfologia, tamanhos e distribuição de tamanhos de partículas; além das características do meio fluido, exercem influência significativa no comportamento reológico de polpas minerais, tornando-se indispensável o estudo da influência destes parâmetros no que diz respeito a fluidez e estabilidade da polpa de bauxita.

Dada a importância da região Norte na indústria de extração, beneficiamento e transporte por mineroduto da bauxita, ressalta-se a importância do estudo dos parâmetros que afetam a reologia de polpas minerais, evidenciando os relevantes estudos que já foram feitos com polpas de bauxita, a diferentes condições, pelo Laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará:

- Silva (2011) e Gonçalves et al. (2015) estudaram a influência de aditivos modificadores de viscosidade no comportamento de polpa de bauxita e do rejeito da lavagem de bauxita, respectivamente.
- Pinto et al. (2012) determinou o ponto de carga zero da polpa de bauxita, evidenciando valores de pH os quais favorecem a sedimentação e dispersão das partículas de bauxita em água.
- Brum (2011) avaliou a influência do diâmetro de Sauter na reologia de polpas de bauxita realizando também modelagem matemática das equações de atrito para as aplicações envolvendo as polpas de bauxita estudadas.

É neste contexto que o estudo da influência da granulometria na reologia de polpa de bauxita se justifica, tornando-se interessante um estudo no que diz respeito à caracterização mineralógica e ao comportamento de tempo dependência (análise de histerese) das polpas de bauxita fracionadas granulometricamente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é o de avaliar a influência de diferentes frações granulométricas (-100#+150#; -150#+200#; -200#+270#, -270#+325# e -400#) na reologia da polpa de bauxita transportada através do mineroduto da Mineração Paragominas S/A (MPSA).

2.2 Objetivos específicos

Realizar a classificação granulométrica da polpa de bauxita e obter frações com diferentes diâmetros médios de partícula;

Determinar a composição mineralógica de cada fração granulométrica;

Determinar a concentração ideal de poliacrilato de sódio (PAS) a ser adicionada nas polpas de diferentes granulometrias de bauxita formuladas a 50% de sólidos;

Realizar ensaios de histerese para avaliar o comportamento reológico de tempo dependência das polpas de bauxita formuladas com diferentes frações granulométricas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Bauxita

A bauxita foi descoberta no ano de 1821, em um vilarejo francês chamado Les Baux, pelo cientista Pierre Berthier (BÁRDOSSY, 1997). A bauxita constitui-se como um produto do intemperismo e lixiviação de uma variedade de rochas, sendo um material heterogêneo formado por uma mistura de oxi-hidróxidos de alumínio hidratados e impurezas. A concentração residual dos minerais constituintes da bauxita depende de distintos fatores, tais como clima e condições tectônicas (CONSTANTINO et al, 2002).

Vários critérios são utilizados para caracterizar os depósitos de bauxita, porém esses sistemas de classificação apresentam algumas controvérsias devido à vasta heterogeneidade composicional das bauxitas. De uma maneira geral e didática, pode-se classificar os depósitos de bauxita quanto a sua gênese, idade geológica e composição mineralógica. Na Tabela 1 encontra-se indicada estas classificações.

Tabela 1 – Classificação das bauxitas.

Classificação	Bauxita
Gênese	Laterítica
	Cárstica
	Sedimentar
Idade Geológica	Paleozóica
	Mesozóica
	Cenozóica
Composição mineralógica	Gibbsítica
	Boehmítica
	Diaspórica

Fonte: Santos, 2011; Avelar, 2011.

Em níveis de composição mineralógica, a composição da bauxita esta principalmente associada a minerais de alumínio, seguida de minerais de silício, ferro e titânio; além da presença de uma considerável variedade de elementos minoritários.

As impurezas presentes na rocha causam alterações no aspecto físico do minério que pode variar de um sólido marrom-escuro ferruginoso até um sólido de cor amarelada ou creme, duro e cristalino. A cor e a composição podem variar tanto geologicamente, quanto em um mesmo depósito de bauxita (CONSTANTINO *et al*, 2002).

Na Tabela 2 tem-se a composição mineralógica de bauxitas, sendo esta composição entre minerais majoritários e minerais de ganga e elementos traço.

Tabela 2 – Composição mineralógica de bauxitas.

	Mineral	Composição química
Majoritários	Gibbsita	$Al(OH)_3$
	Boehmita	$AlO(OH)$
	Diásporo	$AlO(OH)$
	Quartzo	SiO_2
	Caulinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
	Hematita	Fe_2O_3
	Goehmita	$FeO(OH)$
	Anatásio	TiO_2
	Rutilo	TiO_2
Minerais de ganga	-	Matéria orgânica
	Wavelita	$Al_3(PO_4)_2(OH)_3 \cdot 5H_2O$
	Crandalita	$CaAl_3(PO_4)(PO_3OH)(OH)_6$
	Calcita	$CaCO_3$
	Ilita	$KAl_2(Si_3AlO_{10})(OH)_2$
	Litioforita	$(Al, Li)MnO_2(OH)_2$
	Magnesita	$MgCO_3$
	Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$
	Dawsonita	$NaAlCO_3(OH)_2$
	Celestita	$SrSO_4$
	Woodhouseita	$CaAl_3(PO_4)(SO_4)(OH)_6$
	Pirita	FeS_2
	Gahnita	$ZnAl_2O_4$
	Cromita	$FeCr_2O_4$
	Schubnelita	$Fe_2(V_2O_8) \cdot 2H_2O$
	Zircão	$ZrSiO_4$
Elementos traço	-	F, S, Hg

Fonte: Authier-Martin et al., 2001; Avelar, 2011.

3.1.1 Principais reservas

As variações climáticas foram certamente um fator importante na gênese e distribuição das reservas de bauxita pelo mundo. Geograficamente, a maior parte das reservas mundiais encontra-se localizada em regiões tropicais e subtropicais.

As bauxitas geologicamente mais novas apresentam alto teor de gibbsita e são as que apresentam maior valor comercial, pois podem ser refinadas a temperaturas mais baixas do que outros tipos de minerais que contém alumina. Bauxitas gibbsíticas ocorrem normalmente em grandes depósitos em áreas de clima tropical, como Brasil, Austrália, Jamaica, Guiné, Guiana, Suriname e Índia. As bauxitas mais ricas em boehmita são encontradas em depósitos europeus (França e

Grécia), já as ricas em diásporo podem ser encontradas na China, Hungria e Romênia. (KIRK, 1992; ULLMANN, 1998)

Em 2013 as reservas mundiais de bauxita somaram 25,6 bilhões de toneladas, dividindo-se nos países Guiné, Austrália, Indonésia, China, Brasil, entre outros (DNPM, 2013).

A produção mundial de bauxita no ano de 2013 chegou a 257 milhões de toneladas, sendo a Austrália o maior produtor mundial com 77 milhões; seguida da China com 47 milhões; o Brasil aparece em terceiro lugar com 12,7% do total produzido o que representa 32,8 milhões de toneladas (DNPM, 2013). Esses dados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais reservas e produtores mundiais de bauxita.

Países	Reservas (10 ⁶ ton)		Produção (10 ⁶ ton)	
	2012	2012	2013	(%)
Brasil	714	33.260	32.867	12,7
Austrália	6.000	76.300	77.000	29,9
China	830	47.000	47.000	18,2
Indonésia	1.000	29.000	30.000	11,6
Índia	540	19.000	19.000	7,4
Guiné	7.400	17.800	17.000	6,6
Jamaica	2.000	9.340	9.500	3,7
Rússia	200	5.720	5.200	2,0
Cazaquistão	160	5.170	5.100	2,0
Outros países	6.850	14.830	15.250	5,9
TOTAL	25.694	257.420	257.917	100,0

Fonte: DNPM, 2013.

As principais reservas brasileiras de bauxita estão situadas no estado do Pará (75%) e Minas Gerais (16%). As demais reservas estão distribuídas pelos estados do Maranhão, Amapá, Santa Catarina, São Paulo, Rio de Janeiro, Amazonas e Goiás (SAMPAIO et al., 2005)

O Pará conta com reservas nos municípios de Oriximiná, Paragominas e Juruti (ABAL, 2013). Em termos de capacidade produtiva, nos municípios de Paragominas e Trombetas estão as maiores minas brasileiras de bauxita.

As principais empresas mineradoras de bauxita atuantes no Brasil são: Alcoa Alumínio S.A.; Mineração Rio do Norte S.A.; Norsk Hydro Brasil Ltda; Votorantim Metais; entre outras (ABAL, 2015).

3.1.2 Principais aplicações industriais

Desde o começo do século XX as áreas de aplicação industrial da bauxita têm se ampliado de acordo com sua composição química e mineralógica, podendo ser

dividida em dois tipos: bauxita metalúrgica e bauxita não metalúrgica (FLÔRES, 1992).

Bauxitas caracterizadas como metalúrgicas apresentam maior proporção de gibbsita e são utilizadas como matéria-prima para produção de alumínio metálico, principalmente. As bauxitas não metalúrgicas apresentam maior proporção de diásporo, sendo empregada como matéria-prima em diversas áreas da indústria de refratários, abrasivos, cimentos, indústria química, entre outras (ARENARE, 2009).

Na Tabela 4 estão as principais especificações de composição química da bauxita e suas principais aplicações industriais.

Tabela 4 – Composição em óxidos de bauxitas

Indústria	Óxidos principais			
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Metalúrgica	50 – 55	0 – 15	0 – 5	0 – 6
Cimentos	45 – 55	Máx. 6	20 – 30	0 – 3
Abrasivos	Mín. 55	Máx. 5	Máx. 6	Mín. 2,5
Químicos	Mín. 55 – 58	Máx. 5 – 15	Máx. 2	0 – 6
Refratários	Mín. 59 – 61	Máx. 1,5 – 5,5	Máx. 2	Máx. 2,5

Fonte: Pascoal e Pandolfelli, 2000.

Tem-se que mais de 90% da produção mundial da bauxita é utilizada na obtenção da alumina, visando principalmente a redução ao alumínio metálico através dos processos combinados de digestão alcalina (processo Bayer) e redução eletrolítica (processo Halt-Hérolt).

3.2 A mineração de bauxita em Paragominas/PA

A Província Bauxitífera de Paragominas ocupa área aproximada de 50.000 km², localizada nas porções leste do estado do Pará e oeste do estado do Maranhão, na Amazônia Oriental. Trata-se do mais extenso e denso agrupamento de depósitos de bauxita da Amazônia e do Brasil, possuindo cerca de 300 km de extensão norte-sul por até 200 km na direção leste-oeste. As reservas de bauxita metalúrgica aproveitáveis constituem-se em cerca de 60% das reservas brasileiras de bauxita. O potencial individual dos maiores depósitos pode alcançar 150-170 Mton, caso do Platô Miltônia, situado a cerca de 50 km a sudoeste de Paragominas (KOTSCHOUBEY et al., 2005).

Análises petrográficas aliadas a estudos de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-x (DRX), realizadas em amostras representativas dos platôs da região da Província Bauxitífera de Paragominas,

mostram a predominância dos seguintes minerais majoritários: gibbsita, hematita, caulinita, quartzo, goethita e minerais de titânio, além da presença de turmalina, zircão, micas pirofilita e ilmenita como elementos menores nos horizontes do perfil laterítico (KOTSCHOUBEY et al., 2005).

A Mineração Paragominas S/A (MPSA), controlada pela companhia norueguesa Norsk Hydro, é a segunda maior produtora de bauxita do Brasil e pioneira no bombeamento de polpa de minério de bauxita. Implantado em 2007, o empreendimento previa a produção de 4,95 milhões de toneladas por ano de minério de bauxita de alta qualidade com recuperação de 70%, passando, em médio prazo, para 14,85 milhões de toneladas por ano. Atualmente a produção de bauxita anual é de 9,2 milhões de toneladas (HYDRO, 2015). Na Figura 1 tem-se a localização aproximada da MPSA no mapa do estado do Pará.

Figura 1 – Localização geográfica da MPSA



Fonte: Adaptado de Avelar, 2011.

A MPSA compreende três atividades: a lavra, o beneficiamento e transporte da polpa de bauxita através de mineroduto para refinaria de alumina localizada no município de Barcarena/PA (Hydro-Alunorte). As operações de mineração e processamento mineral, atualmente, concentram-se no Platô Miltônia 3 distante cerca de 50 km do centro de Paragominas.

3.2.1 Lavra

Comumente o método de lavra é designado como sendo uma técnica de extração de determinado material de interesse, devendo ser levado em consideração uma análise criteriosa da área a ser trabalhada, da disposição das aberturas e sequência de extração, além do dimensionamento dos equipamentos a serem utilizados (MACEDO et al., 2001).

Os métodos de lavra dos minérios de bauxita variam de acordo com a natureza dos corpos mineralizados das jazidas. As características geométricas e espaciais do depósito de bauxita de Paragominas permitem a utilização do método de lavra em tiras (*strip mining*). A Figura 2 ilustra as principais operações de lavra utilizadas na mina de Paragominas.

Figura 2 – Layout da sequência das operações de lavra



Fonte: Ferreira, 2011.

O método de lavra em tiras é feito sequencialmente em faixas e em operações cíclicas, compreendendo, primeiramente, a raspagem e a preparação prévia do terreno, remoção do capeamento ao longo da faixa de lavra, retirada do minério de bauxita, reaterro e recomposição final da área lavrada por meio do material de recapeamento retirado da faixa posterior. Neste processo de recapeamento e recomposição final, é utilizado o solo vegetal retirado da faixa anterior que estava estocado. Por fim, é realizado o reflorestamento da área explorada, com o plantio de espécies nativas (FERREIRA, 2011).

A lavra é inteiramente mecanizada, sem uso de explosivos, onde são utilizados tratores de esteira, escavadeiras hidráulicas e caminhões fora de estrada para a remoção do estéril em conjunto com caminhões rodoviários traçados, para o transporte da bauxita, além de uma frota de equipamentos auxiliares visando manter o sistema de drenagem, acessos e desenvolvimento de mina (BRUM, 2011).

Em Paragominas, devido o depósito apresentar elevada relação estéril/minério (da ordem de 7,6 em volume) e também por localizar-se em uma região com elevado índice pluviométrico, o sistema de lavra em tiras cabível para essas circunstâncias configura-se em dividir a mina em blocos ordenados de A até K, com 200 metros de comprimento para que sejam lavrados em faixas de tiras que variam de 20 a 30 metros de extensão, dependendo da espessura do decapeamento (PIMENTEL, 2009).

O método de lavra em tiras, além de reduzir os custos com transporte para deposição do material estéril, permite também a reabilitação imediata da área minerada, o que reduz os impactos ao meio ambiente (PIMENTEL, 2009).

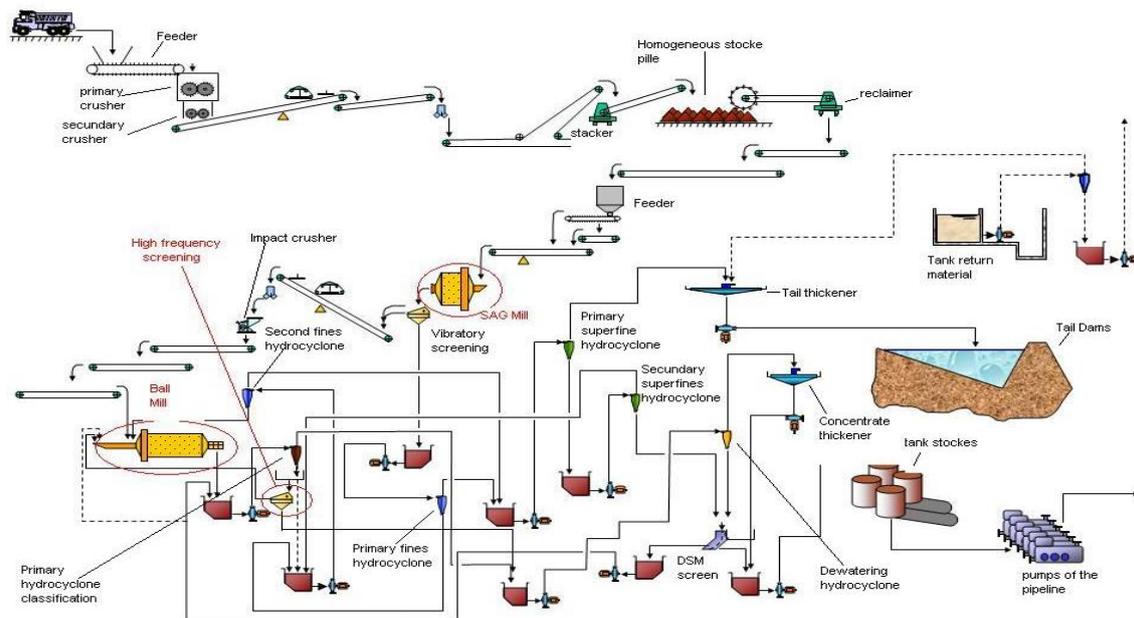
3.2.2 Beneficiamento

Segundo Luz e Lins (2004), tratamento ou beneficiamento de minérios consiste em um conjunto de operações aplicadas aos bens minerais que visam modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem, contudo, modificar a identidade química dos minerais.

Os parâmetros das operações unitárias utilizadas no beneficiamento de minérios devem ser devidamente controlados de forma a garantir a eficiência do processo. No beneficiamento de minérios de bauxita metalúrgica, por exemplo, deve-se tomar um cuidado especial com a razão mássica Al_2O_3/SiO_2 , que tem um efeito significativo sobre o refino através do processo Bayer e, na maioria das vezes, seu valor deve ser maior que 10 (SAMPAIO et al., 2005).

De maneira geral, as etapas do beneficiamento da bauxita de Paragominas compreendem uma sequência de operações de fragmentação e classificação granulométrica por via úmida, objetivando a adequação da polpa de bauxita formada ao transporte via mineroduto. O fluxograma do processo de beneficiamento utilizado na Mina de Bauxita de Paragominas é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do beneficiamento de bauxita da MPSA.



Fonte: BRUM, 2015.

A bauxita bruta é primeiramente cominuída em britadores, com posterior estocagem em pilhas no pátio. O minério é moído e lavado, para retirada da argila e areia, sendo, em seguida classificado em peneiras e hidrociclones. A bauxita, com granulometria adequada para o transporte, segue junto com a água da lavagem para a classificação final, onde é separada em rejeito (argila) e produto final (bauxita fina). Aquela que não atingiu a granulometria adequada é remoída até que chegue ao tamanho ideal para o transporte no mineroduto. Toda a água usada no beneficiamento é recuperada, visando o seu reaproveitamento na usina. Os rejeitos são bombeados para as bacias de rejeitos, onde áreas de secagem natural são cercadas por diques de terra, de modo a construir-se em camadas que parcialmente preenchem o vale adjacente à usina (PIMENTEL, 2009. BRUM, 2011).

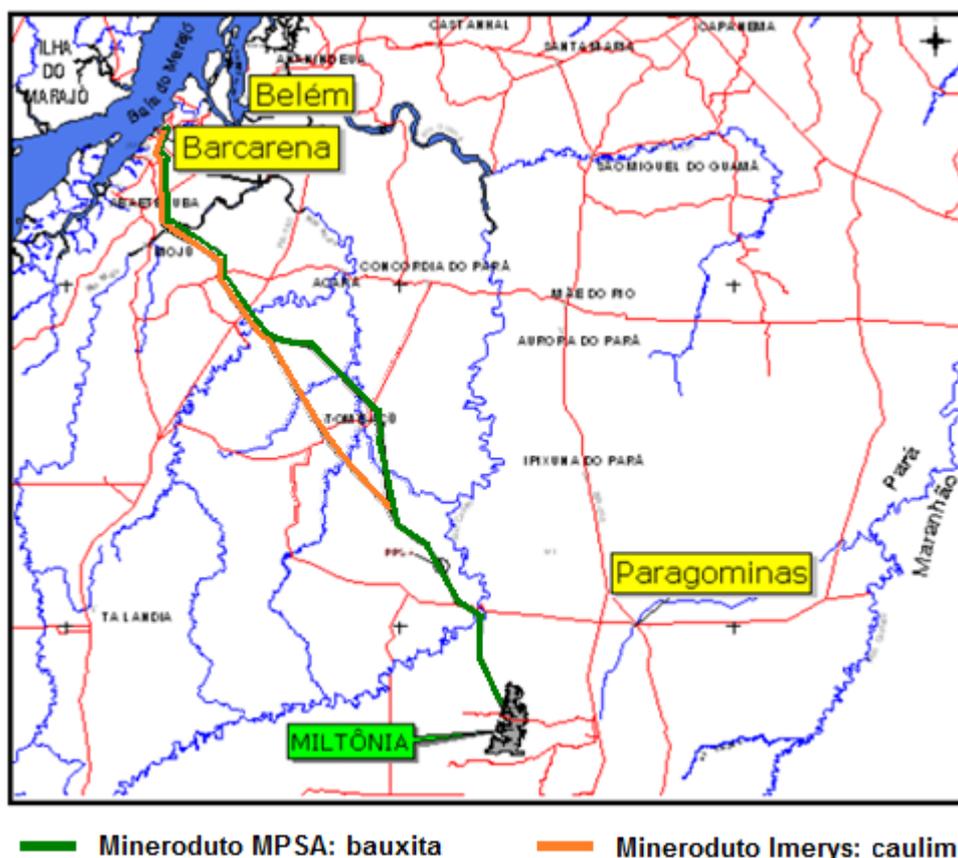
3.2.3 Transporte: Primeiro mineroduto de bauxita do mundo

A alternativa do transporte de sólidos em suspensão por mineroduto apresenta vantagens interessantes em relação a baixos custos de implantação e operação; eficiência e segurança operacionais, através da utilização de tecnologia avançada de monitoramento e manutenção; além de possuir baixo impacto ambiental.

Em Paragominas está em operação o primeiro mineroduto de bauxita do mundo, este grande empreendimento foi implantado como alternativa logística para escoamento da produção de bauxita.

A tubulação do mineroduto inicia-se em Miltônia 3, possui comprimento de 244 km, indo até a refinaria Hydro Alunorte, em Barcarena. Na Figura 4, tem-se destacado em verde a extensão do mineroduto que liga a mina até a refinaria.

Figura 4 – Extensão do mineroduto de bauxita Paragominas – Barcarena.



Fonte: Adaptado de Pereira, 2012.

A tubulação do mineroduto é de aço API - 5L-X70, possui diâmetro externo de 24 polegadas e encontra-se enterrada a uma profundidade média de 1,50 m, atravessando sete municípios: Paragominas, Ipixuna do Pará, Tomé-Açu, Acará, Moju, Abaetetuba e Barcarena; passando sob a calha de quatro rios: Capim, Acará-Mirim, Acará e Moju.

Para o transporte eficaz e seguro através de mineroduto faz-se necessário o controle reológico da polpa de bauxita através da análise e estabelecimento de parâmetros que influenciam diretamente na fluidez, tais como: granulometria, teor de sólidos, velocidade de sedimentação, viscosidade, pH, entre outros. Na Tabela 5

têm-se as especificações dos parâmetros reológicos necessários para um transporte seguro da polpa por mineroduto.

Tabela 5 – Especificação de parâmetros para transporte de polpa de bauxita

Parâmetros	Especificação para transporte
Viscosidade aparente (mPa.s)	7,0 – 15,0
Tensão limite de escoamento (Pa)	1,0 – 9,0
pH	6,8 – 7,9
Sólido seco (%)	47 – 52
Massa específica (g/cm³)	1,41 – 1,44
Velocidade de sedimentação (cm/h)	6,54 – 22,02
Granulometria (% Passante acumulada)	100% em 48#
	87,11% em 65#
	40 – 47% em 325#
	19 – 25% em 10 µm
	12 – 17% em 5 µm

Fonte: Brum, 2011.

O sistema de automação, controle e supervisão de todo processo é composto por ferramentas de hardware e software que propiciam recursos amplos para uma operação e controle do processo de modo simples, versátil, eficiente e seguro (BRUM, 2011).

3.3 Importância do estudo reológico de polpas minerais

O processamento mineral compreende uma gama de operações de cominuição, classificação, concentração, decantação e transporte do minério de interesse. Na maioria dos casos, todas essas operações ocorrem por via úmida, envolvendo a utilização de polpas minerais, que são definidas como misturas heterogêneas, constituídas de partículas sólidas em suspensão em um meio líquido, geralmente a água. (FERREIRA et al., 2005).

Partículas sólidas em meio fluido perturbam as linhas de fluxo, influenciando a resistência do sistema em se deformar ou fluir, quando submetido à força de cisalhamento ou pressão durante as operações de escoamento (DINGER, 2002). O comportamento reológico destes materiais pode apresentar uma variação de resultados desde um fluido viscoso Newtoniano à de um sólido elástico, passando por estados intermediários denominados de viscoelásticos.

Desta forma, o conhecimento a respeito das características reológicas de polpas minerais faz-se necessário e importante, pois influencia diretamente nas propriedades técnicas e econômicas das operações de bombeamento. (FERREIRA et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2000)

Cada polpa mineral possui peculiaridades, o que dificulta uma padronização a respeito do seu comportamento reológico. Segundo Possa e Nascimento (2010), para que se possa ter um progresso na solução de problemas práticos que envolvam conceitos de escoamento de polpas minerais, faz-se necessário compreender o comportamento macroscópico do sistema e fazer inferências sobre o que pode estar ocorrendo em escala microscópica, envolvendo características individuais das partículas e da água na polpa, bem como as interações partícula-partícula.

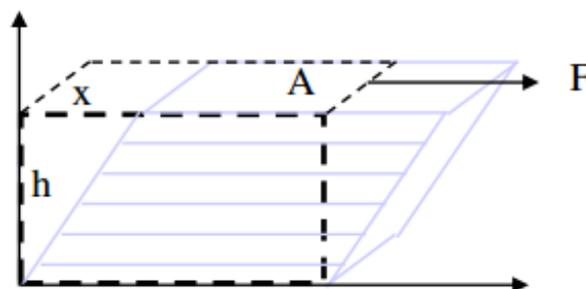
3.4 Conceito de reologia e viscosidade

Reologia (*rheo*-deformação e *logya*-ciência) é a ciência que estuda as respostas de um determinado material fluido quando sujeito a uma solicitação de caráter mecânico. O estudo da deformação e fluxo da matéria, os quais envolvem fenômenos de elasticidade, plasticidade e viscosidade, constitui-se o principal objetivo da reologia (BARNES et al., 1989).

Em 1687 Isaac Newton em seus estudos com fluidos definiu a viscosidade como sendo uma propriedade reológica correspondente à resistência do fluido ao fluxo induzido pela tensão cisalhante (tangencial) aplicada. Em sua abordagem

matemática, Newton utilizou o modelo de duas placas paralelas de áreas A , separadas por uma distância h ; onde uma delas se movimenta em relação à outra devido à aplicação de uma força tangencial F , de acordo com o esquema da Figura 5 abaixo.

Figura 5 – Representação gráfica do escoamento de um fluido entre placas paralelas



Fonte: Melo, 2008.

A aplicação da força F , tangencial à placa superior, gera uma tensão de cisalhamento. Considerando que ocorre aderência do fluido que está em contato direto com a placa que está se movimentando e que o fluxo entre placas é laminar; a velocidade das diversas partículas do fluido entre placas varia de V , junto à placa superior, a zero, junto à placa inferior, gerando um perfil de velocidade. Existindo esta diferença de velocidade entre as camadas do fluido entre placas, ocorrerá a deformação contínua do fluido, devido à ação da tensão de cisalhamento.

De acordo com esse modelo, a força por unidade de área $\left(\frac{F}{A}\right)$ necessária para manter uma diferença de velocidade entre as placas é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade $\left(\frac{dV}{dy}\right)$ através do líquido, sendo o coeficiente de proporcionalidade existente denominado de viscosidade dinâmica ou absoluta “ μ ”. Tem-se, portanto a lei de Newton da viscosidade, matematicamente definida pela Equação 1, abaixo:

$$\frac{F}{A} = - \mu \cdot \frac{dV}{dy} \quad (1)$$

A força por unidade de área é conhecida como tensão de cisalhamento (τ) e o gradiente de velocidade é conhecido como taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), reescrevendo, tem-se:

$$\tau = -\mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2)$$

O sinal negativo observado na equação de Newton da viscosidade é uma convenção matemática utilizada para evidenciar o sentido do escoamento, que se dá de uma região de maior fluxo de quantidade de movimento (placa em movimento) para uma de menor fluxo (placa estacionária).

A viscosidade absoluta tem como unidade Pa.s em unidades do Sistema Internacional (SI). Outra forma convenientemente utilizada, a partir do sistema CGS (centímetro-grama-segundo) é o Poise, sendo que 1 Pa.s igual a 10 Poise.

Em certos estudos é conveniente utilizar o conceito de viscosidade cinemática, ν , que é uma grandeza definida a partir da relação entre a viscosidade e a massa específica (ρ) de fluidos, a uma mesma temperatura (Equação 3).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

No SI a unidade da viscosidade cinemática é m²/s. No sistema CGS é utilizada a unidade Stokes.

3.5 Comportamento reológico de fluidos

Todos os fluidos que em escoamento laminar apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade, são denominados fluidos Newtonianos. Para estes fluidos a viscosidade é assumida como constante, para certas condições de temperatura e pressão, e independente da taxa de cisalhamento (STEEFE, 1992).

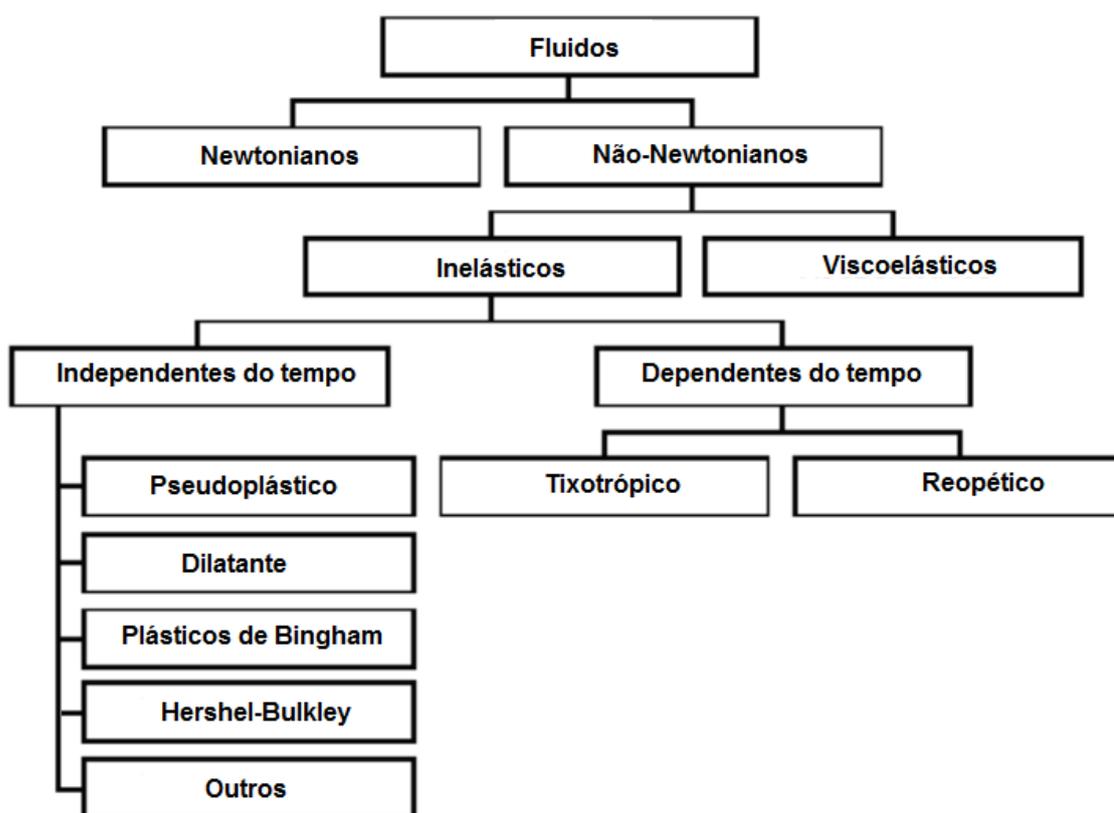
Graficamente o comportamento de fluidos Newtonianos pode ser representado por uma reta que passa pela origem, cujo coeficiente angular é a viscosidade. Os fluidos Newtonianos constituem a maior parte dos líquidos puros, suas misturas simples e os gases.

No entanto, nem todos os fluidos utilizados em processos de bombeamento apresentam essa proporcionalidade entre tensão e taxa de cisalhamento, sendo estes classificados como não-Newtonianos. A relação entre a tensão de

cisalhamento e o gradiente de velocidade para fluidos não-Newtonianos não é linear, sendo denominada de viscosidade aparente (MACOSKO, 1994).

Os fluidos não-Newtonianos apresentam viscosidade variável, de acordo com a tensão de cisalhamento aplicada e são subdivididos em: viscoelásticos, dependentes do tempo e independentes do tempo. A Figura 6 apresenta a classificação reológica dos principais tipos de fluidos.

Figura 6 – Classificação reológica dos principais tipos de fluidos.



Fonte: Adaptado de Macosko, 1994.

A correlação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento que define o comportamento de fluxo dos fluidos é mostrada graficamente em um diagrama de τ na ordenada e $\dot{\gamma}$ na abscissa. Este diagrama é conhecido como “curva de fluxo” (Figura 7).

3.5.1 Fluidos viscoelásticos

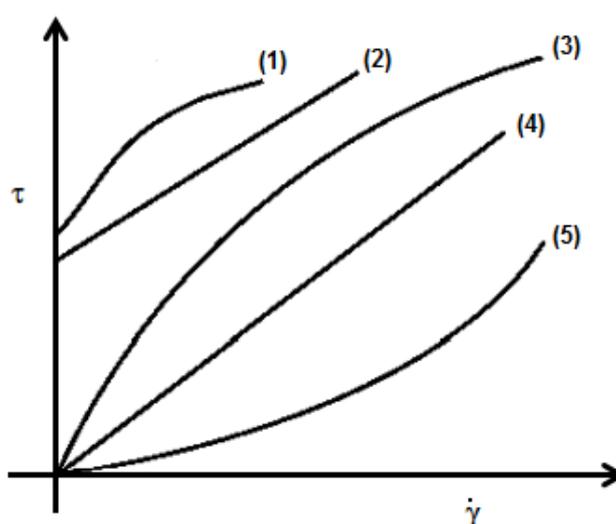
O termo viscoelasticidade é utilizado para descrever simultaneamente a existência de propriedades elásticas e viscosas em um material. Segundo Barnes et

al. (1989) fluidos viscoelásticos retornam parcialmente ao estado original quando a tensão aplicada é retirada.

3.5.2 Fluidos não-Newtonianos independentes do tempo

A Figura 7 ilustra o comportamento das curvas de fluxo dos principais fluidos de comportamento independente do tempo.

Figura 7 - Curvas de fluxo e de viscosidade dos principais fluidos de comportamento independente do tempo.



Modelos reológicos: (1) Herschel-Bulkley; (2) Plástico de Bingham; (3) Pseudoplástico; (4) Newtoniano e (5) Dilatante.
Fonte: (Steffe, 1992)

a. Pseudoplásticos

Para fluidos não-Newtonianos caracterizados como pseudoplásticos, a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Este comportamento pode ser encontrado em sistemas coloidais onde as partículas assimétricas, com orientação ao acaso, ficam inicialmente emaranhadas, formando uma rede, que aprisiona o fluido carreador, o que dificulta o escoamento. Com o aumento da taxa de cisalhamento esta rede tende a se romper, diminuindo a viscosidade, facilitando o escoamento da suspensão (SHAW, 1975; POSSA, 2004).

Como pode ser observado na Figura 7, em baixas taxas de cisalhamento, fluidos pseudoplásticos apresentam elevada viscosidade, devido à atuação predominante das forças brownianas que possuem caráter randômico. Já em altas taxas de cisalhamento, a viscosidade da suspensão é significativamente reduzida

pelo aparecimento dos efeitos de ordenamento das partículas originados pelas forças hidrodinâmicas. Em taxas de cisalhamento intermediárias esse comportamento está relacionado à competição existente entre os efeitos do movimento browniano e de ordenamento das partículas como resultado da atuação de forças hidrodinâmicas (NASCIMENTO, 2007).

b. Dilatantes

Quando a viscosidade aumenta com aumento da taxa de cisalhamento, tem-se um fluido caracterizado reologicamente como dilatante e, como exemplo, têm-se certas polpas com elevada porcentagem de sólidos.

Segundo Shaw (1975), com o aumento da taxa de cisalhamento é gerada uma instabilidade na polpa fazendo com que as partículas se movam umas em relação às outras, expandindo/dilatando a polpa. Sendo a água insuficiente para preencher os novos vazios gerados, devido à alta concentração de sólidos presente, há o aparecimento de forças de tensão superficial que culminam em um aumento da viscosidade aparente da polpa.

c. Viscoplasticos

Uma categoria interessante de fluidos e que abrange grande parte das polpas minerais processadas na indústria, são os fluidos plásticos ou viscoplásticos. Este tipo de fluido é caracterizado pela existência de uma tensão de cisalhamento inicial " τ_0 ", diferente de zero, necessária para o escoamento, deste modo o fluido apenas se deforma quando a tensão externa aplicada for maior que esta tensão de cisalhamento inicial. Quando a tensão externa exceder o valor da tensão de cisalhamento inicial, a curva da tensão em função da taxa de cisalhamento pode ser linear ou não-linear.

Um fluido cuja curva de fluxo é linear, onde $\tau > \tau_0$ é chamado fluido plástico de Bingham, sendo caracterizado por uma constante de viscosidade plástica (tangente à curva) e pela tensão de cisalhamento inicial. Já os fluidos que possuem uma tensão de cisalhamento inicial ($\tau > \tau_0$) e um comportamento não linear são caracterizados como Herschel-Bulckey (ver Figura 7).

É interessante notar que fluidos com características plásticas também apresentam uma viscosidade aparente que diminui com o acréscimo da taxa de deformação. Esse tipo de comportamento é característico de suspensões pseudo-homogêneas de partículas finas ou ultrafinas (FERREIRA et al., 2005).

Segundo Ferreira *et al.* (2005) uma das principais aplicações do parâmetro tensão limite de escoamento é no projeto e monitoramento do transporte de polpas através de bombeamento, onde se deseja um valor de tensão limite de escoamento que possibilite o transporte de suspensões sem a ocorrência de sedimentação de partículas e, em caso de uma eventual parada do sistema, não ocorra a sedimentação imediata das partículas. Sampaio e Nascimento (2006) em seus estudos sugerem que quanto maior for o valor da tensão limite de escoamento, menor será a tendência de sedimentação da suspensão. Entretanto, no bombeamento de polpas minerais, deve-se observar que valores elevados de tensão inicial podem sobrecarregar as bombas, causando deficiências no controle do processo.

3.5.3 Fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo

Na prática, viscosidades aparentes podem depender não somente da taxa de deformação, mas também do tempo durante o qual o fluido foi submetido à deformação (BARNES, 1999).

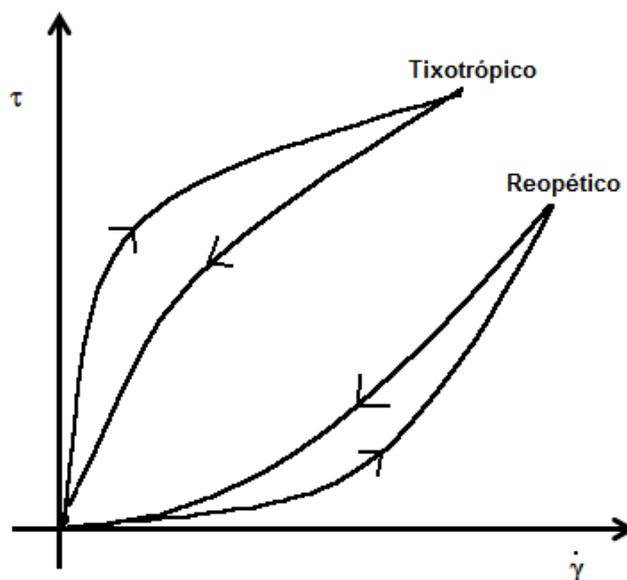
Em algumas suspensões minerais, a cinética de destruição dos agregados, que ocorre quando se aumenta a taxa de cisalhamento, é diferente da cinética de formação dos agregados e como resposta tem-se que a curva da variação da tensão (ou da viscosidade) em função da taxa de cisalhamento, obtida quando o fluido é acelerado, não coincide com a curva de desaceleração do fluido, formando uma área que representa a histerese do fluido estudado.

De uma maneira geral, no processamento de suspensões minerais o comportamento dependente do tempo necessita de controle rigoroso, devido as mudanças de viscosidade apresentadas em função do tempo (FERREIRA *et al.*, 2005)

Fluidos que apresentam este comportamento são denominados de maneira geral como dependentes do tempo de cisalhamento e podem ser classificados em dois tipos: tixotrópicos e reopéticos.

A Figura 8 ilustra o comportamento tixotrópico e reopético de fluidos dependentes do tempo.

Figura 8 – Comportamento reológico dos fluidos dependentes do tempo.



Fonte: Adaptado de Steefe, 1996.

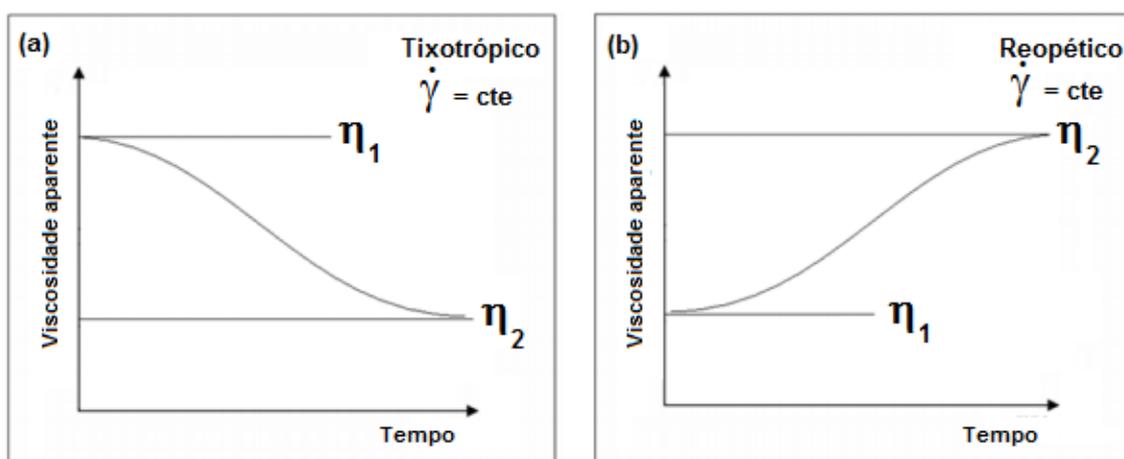
Fluidos tixotrópicos apresentam diminuição da viscosidade com o tempo quando submetidos a uma taxa de cisalhamento constante, sendo este comportamento comumente observado em suspensões contendo aglomerados fracos de interação entre partículas. O processo de formação e destruição desses aglomerados é relativamente lento, tornando-o dependente não só da condição de cisalhamento como também do tempo, a uma determinada taxa de sollicitação constante. A aplicação de taxas de cisalhamento superiores favorece a destruição dos aglomerados levando a uma redução da viscosidade aparente da suspensão, no entanto quando essas taxas são reduzidas, os aglomerados não voltam a se formar com a mesma rapidez com que foram destruídos, fazendo com que a viscosidade da polpa diminua (OLIVEIRA et al, 2000; NASCIMENTO, 2007; SAMPAIO, 2006).

Já os fluidos reopéticos apresentam comportamento inverso ao de fluidos tixotrópicos, ou seja, há um aumento da viscosidade conforme o tempo de exposição a uma taxa constante pré-estabelecida. No caso de suspensões reopéticas os aglomerados de partículas vão sendo destruídos à medida que o cisalhamento se torna mais intenso, levando a uma redução na viscosidade; entretanto, ao contrário da tixotropia, quando a taxa de cisalhamento vai sendo reduzida uma parcela das partículas se unem gradativamente para formar novos aglomerados, que aumentam a viscosidade da suspensão em função do tempo (OLIVEIRA et al, 2000; NASCIMENTO, 2007).

Com relação ao bombeamento de polpas, a reopexia é um comportamento extremamente prejudicial ao processo, pois pode levar a obstrução dos dutos durante o processo de escoamento (KLEIN e HALLBOM, 2002).

A Figura 9 ilustra a variação de viscosidade aparente em função do tempo, a uma taxa constante e pré-estabelecida, para fluidos de comportamento tixotrópico e reopético.

Figura 9 – Variação da viscosidade em função do tempo.



(a) Queda da viscosidade aparente (tixotrópicos) e (b) Aumento da viscosidade aparente (reopéticos), durante taxa de cisalhamento constante ao longo do tempo.

Fonte: Adaptado de Silva et al.(1989).

3.6 Modelos reológicos

A descrição do comportamento reológico dos fluidos é feita através de modelos matemáticos. Tais modelos, a partir das hipóteses de que os fluidos em questão são incompressíveis e de comportamento reológico independente do tempo, procuram expressar matematicamente a forma pela qual o fluido se deforma quando são submetidos a tensões de cisalhamento distintas, à temperatura constante. Esse conhecimento é indispensável em diversas etapas de processamento de polpas minerais, tais como no projeto e dimensionamento de bombas, tubulações e equipamentos; no controle intermediário da polpa em linhas de produção; no controle de qualidade do produto final a ser transportado por dutos; etc.

O modelo reológico mais simples é o Newtoniano, no entanto, a maioria dos fluidos não apresenta uma proporcionalidade direta entre a tensão e taxa de cisalhamento, necessitando de modelos mais complexos para sua caracterização,

que incluem sempre dois ou mais parâmetros para caracterizar as forças viscosas que atuam no escoamento do fluido. (TABILO-MUNIZAGA e BARBOSA-CÁNOVAS, 2005; GONÇALVES, 2008).

Na literatura existem muitos modelos reológicos propostos encontrados a partir de dados experimentais obtidos exclusivamente em regime laminar, onde as equações clássicas para cálculo de tensões e taxas de cisalhamento são válidas. Na Tabela 6 tem-se um resumo das equações matemáticas que regem os modelos reológicos independentes do tempo usualmente apresentados na literatura, bem como os parâmetros reológicos envolvidos em tais equações.

Tabela 6 – Principais modelos reológicos

Modelo	Equação	Parâmetros
Newton	$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$	Viscosidade dinâmica ou absoluta (μ)
Ostwald-de-Waale	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$	Índice de consistência (K) Índice de comportamento (n)
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$	Tensão limite de escoamento (τ_0) Viscosidade plástica (μ_p)
Herschell-Bulckley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$	Tensão limite de escoamento (τ_0) Índice de consistência (K) Índice de comportamento (n)
Casson	$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + (\mu_\infty \cdot \dot{\gamma})^{0,5}$	Tensão limite de escoamento (τ_0) Viscosidade limite para altas taxas de cisalhamento (μ_∞)

Fonte: Machado, 2002.

3.7 Principais variáveis que afetam o comportamento reológico de polpas minerais

Na caracterização de uma polpa, Pawlik e Laskowski (1999) consideram importante o balanço de três forças que agem sob o sistema fluido-partícula: a interação hidrodinâmica, as forças entre partículas e a difusão Browniana. A contribuição específica de cada uma dessas forças depende da porcentagem de sólidos, do tamanho e morfologia das partículas e de algumas condições físico-químicas da polpa.

Banfill e Sauders (1981) em seus trabalhos ressaltam que as condições de execução da análise reológica, tais como a geometria do spindle utilizado, as máximas taxas de cisalhamento pré-estabelecidas, bem como os ciclos de tempo de

análise são fatores experimentais que podem influenciar no resultado de caracterização reológica de fluidos não-Newtonianos, devendo ser previamente definidas.

3.7.1 Porcentagem de sólidos

A porcentagem/teor de sólidos tem um efeito importante nas propriedades reológicas de suspensões minerais, pois, diferentes concentrações de sólidos podem levar a diferentes tipos de curva de fluxo e conseqüentemente, ações distintas de manutenção do controle de qualidade devem ser adotadas.

Segundo Moreno (2005) quando a concentração de sólidos é baixa, a viscosidade do fluido é dominante e controla a viscosidade da suspensão, entretanto, à medida que se aumenta o teor de sólidos, as propriedades da suspensão se desviam rapidamente de suas semelhanças com as propriedades do fluido carreador. Deste modo, polpas diluídas apresentam comportamento tipicamente Newtoniano e, com o incremento da concentração de sólidos, devido a maior interação entre as partículas (colisões), há um aumento de viscosidade, gerando um comportamento não-Newtoniano dependente ou não do tempo de cisalhamento (COSTA, 2006; HE et al., 2004).

De uma maneira geral, segundo Barnes (1989), à medida que se aumenta mais e mais a concentração de sólidos em uma polpa, maior é a dificuldade de movimento relativo entre as partículas sólidas, devido a formação de um arranjo tridimensional rígido que impede a movimentação relativa entre elas e como resposta tem-se uma tendência da viscosidade à valores cada vez maiores, prejudicando a fluidez do sistema.

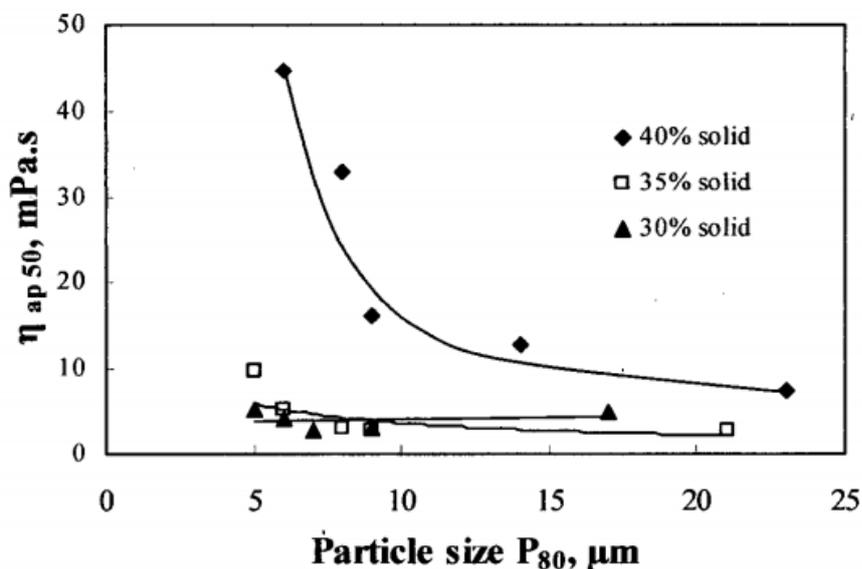
Sampaio e Nascimento (2006) observaram em seus estudos que a concentração de sólidos teve efeito relevante sobre as propriedades reológicas de tempo dependência de polpas de bauxita, verificou-se mudança de comportamento tixotrópico para o reopético em função do aumento da concentração de sólidos (40-60% m/m).

3.7.2 Tamanho e morfologia das partículas

Yue e Klein (2004) observaram em seus estudos que tanto a concentração de partículas sólidas, quanto o tamanho das partículas interagem para influenciar o comportamento reológico de polpas, entretanto, à medida que a concentração de

sólidos aumenta, acima de 40%, os valores da viscosidade são mais influenciados devido ao tamanho da partícula, como é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Mudança do comportamento reológico em função do teor de sólidos (<40%) e tamanho da partícula.

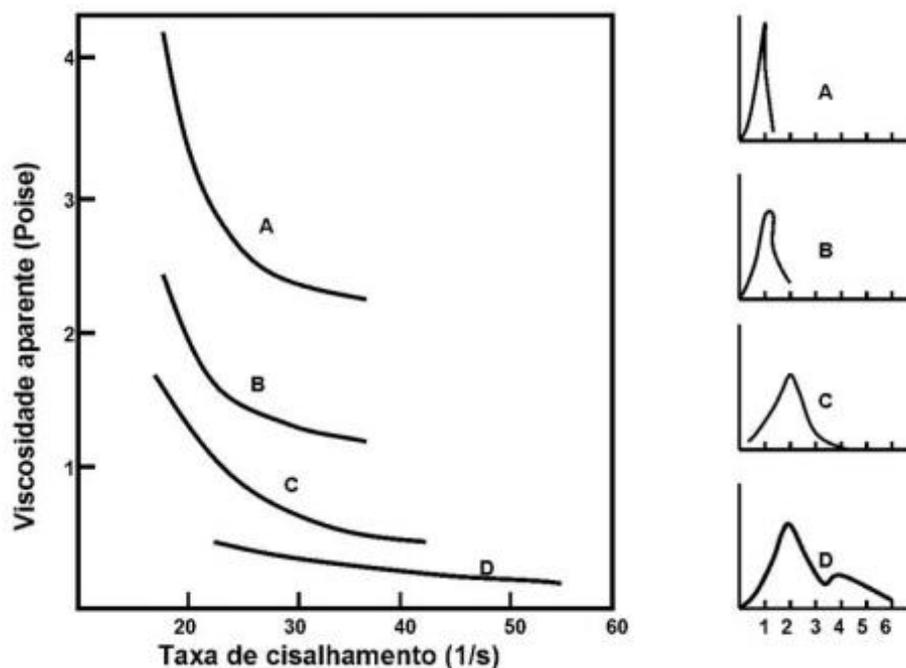


Fonte: Yue e Klein, 2004.

Se tratando de tamanho de partículas, tem-se que distribuições de tamanho de partícula (DTP) polidispersas proporcionam menores viscosidades do que distribuições monodispersas, para uma mesma fração volumétrica. Distribuições de tamanho de partículas polidispersas ocupam volume menor do que partículas de um único tamanho, assim, a camada de água entre as partículas de tamanhos diferentes se torna mais espessa, resultando em viscosidade mais baixa (BARNES et al., 1989).

Na Figura 11 pode-se observar a influência da distribuição do tamanho de partículas na reologia de suspensões, onde uma distribuição monodispersa induz a uma viscosidade maior (MONTALVO, 2008).

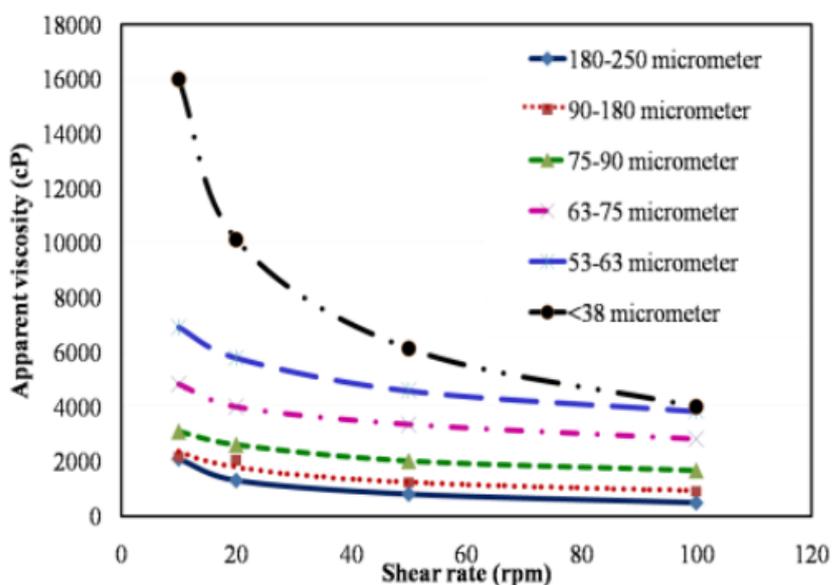
Figura 11 – Influência da distribuição de partículas na viscosidade de suspensões.



A – Monodispersas finas; B – Monomodal estreita; C – Monomodal larga; D – Polidispersa.
Fonte: Montalvo, 2008.

Buranasrisak e Narasingha (2012) em seus estudos sobre a influência do tamanho de partículas em uma suspensão de carvão em água, mantendo constante a concentração de sólidos (60%), verificaram um incremento da viscosidade aparente da suspensão com a diminuição do diâmetro médio das partículas de carvão. A Figura 12 mostra os resultados dos experimentos realizados.

Figura 12 – Efeito do tamanho de partícula na viscosidade aparente de suspensões.



Fonte: Buranasrisak e Narasingha, 2012.

A forma das partículas e suas propriedades superficiais também contribuem no comportamento reológico de suspensões, sendo que estes fatores são mais influenciados à medida que se aumenta o teor de sólidos da suspensão (MORENO, 2005).

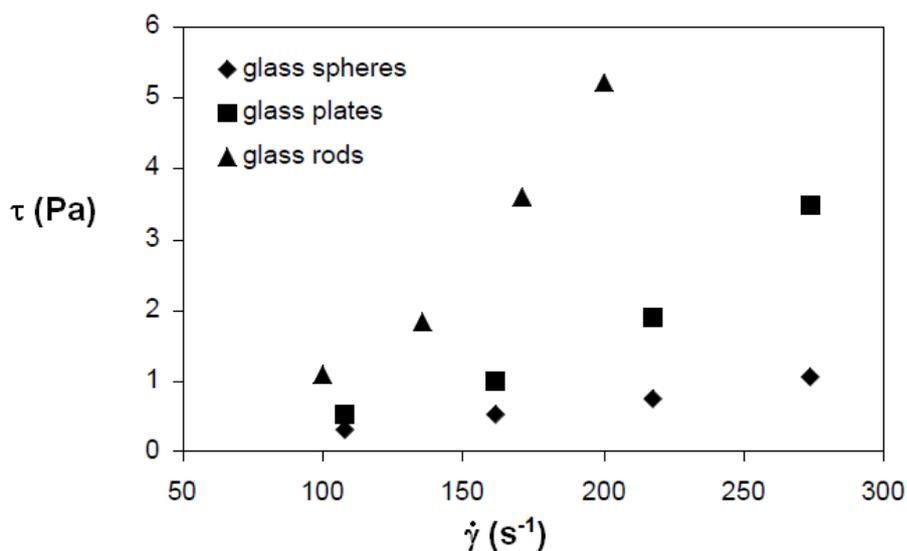
Partículas esféricas causam uma perturbação relativamente pequena nas linhas de fluxo de uma suspensão, se comparadas com partículas de formato irregular, acarretando em menores valores de viscosidade.

As partículas de minério, provenientes de estágios de cominuição, são não esféricas, apresentando morfologias irregulares, o que também influencia a fluidez das suspensões durante o processamento/bombeamento.

Segundo Costa (2006) a presença de partículas com elevada rugosidade superficial acentua o atrito durante as colisões, dificultando o escoamento.

A influência da morfologia da partícula pode ser observada na Figura 13, na qual se tem a variação da viscosidade aparente em função dos diferentes formatos de partículas de vidro. Pode-se observar que à medida que a forma das partículas é desviada do formato esférico, a suspensão torna-se mais viscosa.

Figura 13 – Curva de fluxo de suspensões com partículas de vidro de diferentes formatos.



Fonte: Clarke, 1967.

3.7.3 pH e aditivos modificadores de superfície

Uma partícula torna-se carregada quando imersa em um líquido polar (água). Segundo Totou (2010), a carga elétrica das partículas sólidas imersas em fluidos pode ter várias origens, podendo ser devido à estrutura e química da partícula ou ser resultante da adsorção específica de algum soluto presente no sistema.

Neste sentido, em muitos casos, as propriedades reológicas podem ser modificadas através da adição de substâncias químicas que modifiquem o meio fluido e conseqüentemente atuem sob a superfície das partículas. A modificação desses fatores pode se dar através da adição de substâncias químicas ou mudança de pH.

Estas substâncias químicas adicionadas podem ser orgânicas ou inorgânicas e, dependendo da quantidade adicionada e das condições do meio, podem afetar o estado de agregação-dispersão das partículas.

Modificadores inorgânicos atuam basicamente como modificadores de pH do meio, afetando a carga da superfície das partículas minerais através do controle da magnitude de forças atrativas (Van der Waals) e das forças repulsivas (interação eletroestática).

Aditivos orgânicos, tais como polímeros e surfactantes, atuam através da combinação de forças eletroestáticas e estéricas (impedimento mecânico). Uma peculiaridade da utilização de aditivos poliméricos é que estes, dependendo do peso molecular, podem agir tanto como dispersantes (baixo peso molecular) quanto como floculantes (alto peso molecular).

Tem-se, portanto, que o pH do meio influencia bastante o estado de agregação-dispersão das partículas, devendo ser avaliado e controlado.

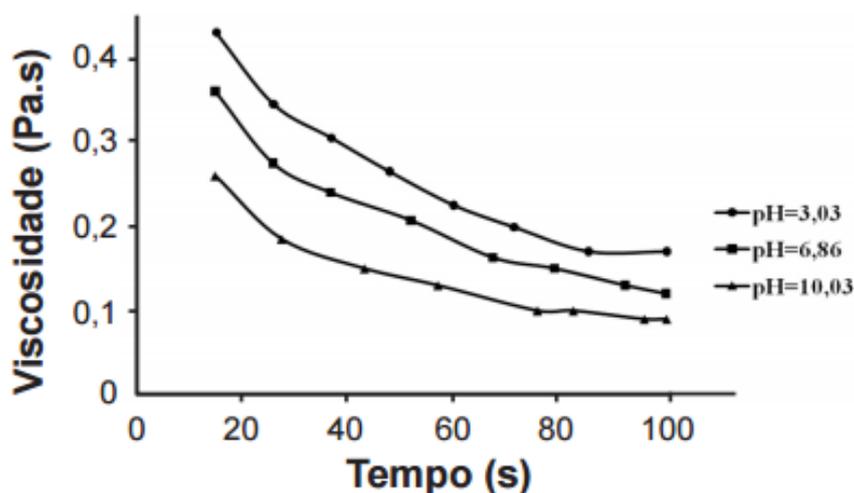
São muitos os trabalhos na área de reologia que se utilizam do efeito de aditivos químicos para avaliar a influência destes em diferentes etapas de beneficiamento e transporte de polpas minerais.

Barbato et al. (2013) observaram que suspensões de bauxita preparadas no pH 12 são mais estáveis e menos viscosas do que as preparadas no pH 7 e 9,5, nas mesmas condições de temperatura, distribuição de tamanho de partículas e concentração de sólidos.

Pinto et al. (2012) comprovou a influência do pH na reologia da polpa de bauxita, mostrando que o controle do pH da polpa em valores distantes ao ponto de carga zero (PCZ-pH) é um fator importante para reduzir a viscosidade e facilitar o

transporte por minerodutos. Na Figura 14 observa-se que valores de pH superiores a 3,86, que corresponde ao PCZ-pH da bauxita, favorecem o escoamento da polpa uma vez que, a viscosidade tende a reduzir.

Figura 14 – Viscosidade da polpa de bauxita com 50% em peso de sólidos em função do tempo, parametrizado no pH e em taxa de cisalhamento constante de 100 s⁻¹.



Fonte: PINTO et al., 2012.

Santos et al. (2002) avaliaram a interação do poliacrilato de sódio com a superfície de um óxido e observaram que o pH influencia no processo de deflocação. Sendo que um pH básico favorece a interação do polímero com a partícula, tornando a deflocação mais eficiente.

Silva (2011) avaliou a influência da adição de poliacrilato de sódio na reologia de polpa de bauxita, observando que este atuou como defloculante em valores de pH que variaram entre 6,8 e 7,5, reduzindo a viscosidade e a tensão limite de escoamento da polpa formulada a 50% de sólidos e d_{50} igual a 74 μm .

Gonçalves et al. (2015) em seus estudos com rejeito de lavagem da bauxita avaliou a influência do pH no comportamento de diferentes aditivos, observando que um mesmo aditivo pode atuar tanto como defloculante, quanto como floculante dependendo da variação do pH do meio.

É importante ressaltar que a adição de excesso de dispersantes pode causar efeito contrário, levando à agregação, ou seja, devem-se realizar estudos da influência da adição de determinado aditivo em polpas minerais com o intuito de se estimar a concentração ideal de aditivo necessária para dispersão, além de verificar se, em determinadas condições físico-químicas da polpa, este aditivo atuará

especificamente como defloculante ou floculante. (WANG e HEISKANEN, 1991; GOMES et al., 2005).

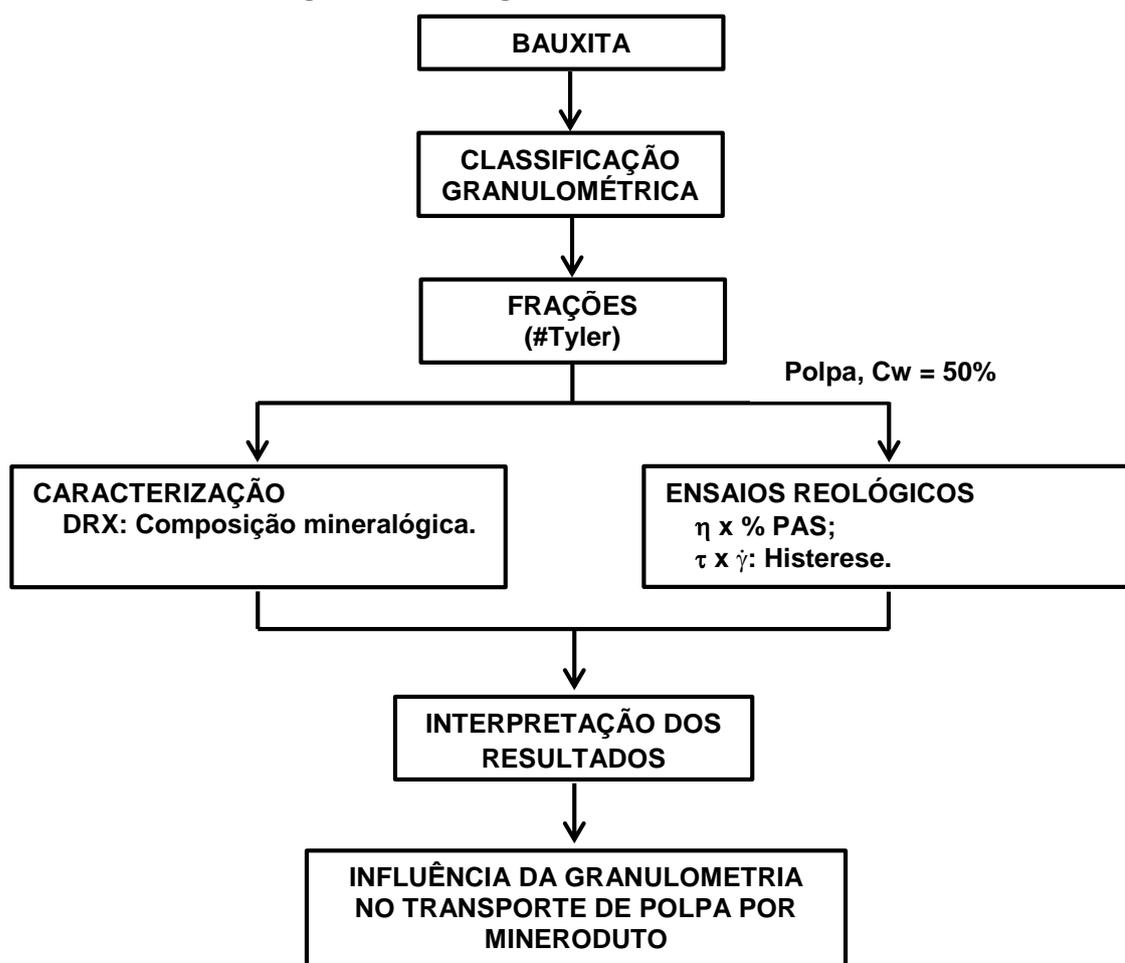
4 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de bauxita utilizadas neste estudo são procedentes da usina de beneficiamento da Mineração Paragominas S/A (MPSA), estado do Pará.

Primeiramente foi feita a caracterização granulométrica por peneiramento da amostra de bauxita. As frações com granulometrias distintas foram caracterizadas a fim de se conhecer a composição mineralógica média de cada fração. Polpas, com teor de sólidos de 50% foram preparadas, a fim de simular as especificações de escoamento através do mineroduto. As polpas de bauxita foram caracterizadas reologicamente para avaliação da influência da granulometria no comportamento de tempo dependência das frações de bauxita selecionadas.

Na Figura 15, tem-se o fluxograma dos ensaios realizados.

Figura 15 – Fluxograma dos ensaios realizados.



Fonte: Autora, 2015.

4.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada no Laboratório de Físico-Química da Mineração Paragominas S/A (MPSA).

As amostras de bauxita foram primeiramente homogeneizadas e quarteadas a úmido, sendo, em seguida, submetidas ao peneiramento a úmido em um conjunto suspenso de peneiras com malhas em escala Tyler de: 28#; 32#; 48#; 65#; 100#; 150#; 200#; 270#; 325# e 400#.

As frações de bauxita retidas nas peneiras foram secas, pesadas, sendo devidamente acondicionadas e enviadas ao Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará (UFPA) para utilização nos ensaios subsequentes.

4.2 Caracterização

4.2.1 Composição mineralógica

Amostras representativas das frações granulométricas obtidas foram submetidas à caracterização mineralógica através da técnica de Difractometria de Raios-X (DRX), sendo os ensaios realizados no Laboratório de Caracterização Mineral do Instituto de Geociências da UFPA.

As análises de DRX foram realizadas em difratômetro de raios-X modelo X'Pert Pro MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com goniômetro PW3050/60(θ - θ) e com tubo de raios-X cerâmico de ânodo de Cu ($K_{\alpha 1} = 1,5406 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kv. O detector utilizado é do tipo RTMS, X'Celerator. Foram utilizadas as seguintes condições de análise: Varredura 3° a 75° 2θ ; 40 kV, 30 mA, passo $0,02^\circ$ em 2θ e tempo/passo de 20s; modo de escaneamento contínuo e máscara fixa de 10 mm.

A aquisição dos dados foi feita com o software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, já o tratamento dos dados foi feito através da utilização do software X'Pert High Score versão 2.1b, também da PANalytical.

A identificação dos minerais foi realizada através da comparação do difratograma obtido com as fichas padrões do banco de dados do ICDD-PDF (International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File).

4.3 Preparo das polpas minerais

4.3.1 Teor de sólidos

O teor de sólidos (C_w) das polpas de bauxita é obtido através da Equação 4 abaixo.

$$C_w = \frac{m_s}{m_s + m_l} \times 100\% \quad (4)$$

Onde: m_s corresponde a massa de sólidos e m_l a massa de líquido, que neste caso é a água ($\rho_{H_2O} = \frac{1g}{cm^3} \therefore m_l = V_l$).

Para os estudos reológicos foram preparadas polpas a 50% de sólidos das diferentes frações de bauxita estudadas, com o intuito de simular as condições padrões de escoamento através do mineroduto.

4.3.2 Massa específica da polpa

A massa específica de uma polpa mineral é uma função da massa específica do fluido transportador (ρ_l), da massa específica das partículas sólidas (ρ_s) e do teor de sólidos (C_w) e pode ser calculada pela Equação 5 abaixo:

$$\rho_{polpa} = \frac{\rho_l}{1 + C_w \left(\frac{\rho_l}{\rho_p} - 1 \right)} \quad (5)$$

As massas específicas das diferentes frações de bauxita e do fluido transportador (água) foram determinadas através da técnica de picnometria simples a temperatura ambiente de acordo com metodologia definida em Sampaio et al. (2007).

4.3.3 pH

A determinação do pH das polpas foi realizada em pHmetro de bancada digital Quimis, modelo Q400AS, a temperatura ambiente média de 30°C.

4.4 Ensaios reológicos

Os ensaios reológicos foram realizados no Laboratório de Reologia do Laboratório de Engenharia Química da UFPA.

Utilizou-se o viscosímetro modelo Haake VT 550, com sensor tipo cilindros coaxiais SV₁, a uma temperatura média de 30 °C. A aquisição dos dados de interesse foi realizada através do software ReoWin Data Manager.

A Figura 16 corresponde ao viscosímetro utilizado durante os ensaios reológicos.

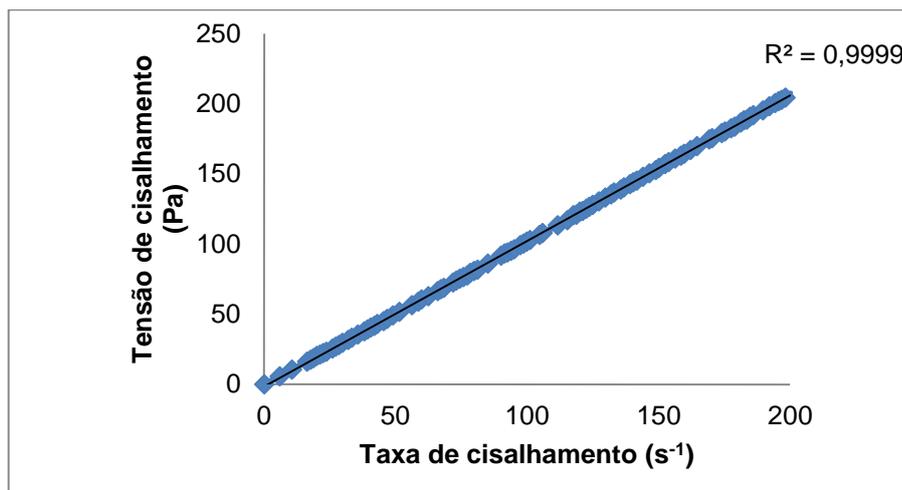
Figura 16 – Viscosímetro rotacional Haake VT



Fonte: Autora, 2015.

Com o intuito de assegurar a confiabilidade das análises reológicas, a calibração prévia do equipamento foi realizada, utilizando-se para isto o fluido de calibração OP 400 de comportamento característico de fluidos Newtonianos. A representação gráfica do ajuste experimental ao teórico é mostrada na Figura 17.

Figura 17 – Calibração do viscosímetro.



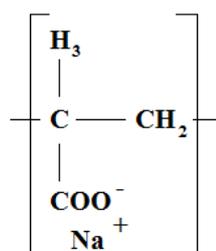
Fonte: Autora, 2015.

4.4.1 Curvas de viscosidade versus concentração de aditivo

Segundo Ortega et al. (1997a), a forma mais comum de se avaliar o efeito de um aditivo sobre uma suspensão consiste em se fazer medidas da viscosidade aparente da suspensão em função do teor de defloculante adicionado, a uma taxa de cisalhamento pré-estabelecida e constante. Avalia-se, então, o comportamento da curva de viscosidade em função do teor de aditivo e, dependendo do comportamento da curva obtida, caracteriza-se a ação do aditivo como defloculante (ponto mínimo) ou floculante (ponto máximo).

No presente estudo, utilizou-se como aditivo para as polpas de bauxita formuladas o polieletrólito a base de poliacrilato de sódio (PAS), variando-se sua concentração de 0 – 1% (m/m). Na Figura 18 tem-se um esquema da cadeia desse polímero.

Figura 18 – Monômero poliacrilato de sódio (PAS).



Fonte: Ortega et al., 1997a.

Os ensaios foram realizados a uma taxa constante de 100 s^{-1} durante 10 s, a temperatura ambiente, conforme metodologia utilizada por Silva (2011).

4.4.2 Histerese

A metodologia para a obtenção das curvas de histerese foi a mesma utilizada por Silva (2011), consistindo na programação do tipo rampa de aumento de taxa de cisalhamento de 0 a 200 s^{-1} em 100 s; permanência a taxa constante de 200 s^{-1} por 10 s; rampa de diminuição de taxa de cisalhamento de 200 a 0 s^{-1} em 100s.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise granulométrica

A Tabela 7 apresenta os resultados da análise granulométrica por peneiramento realizada pelo Laboratório Físico-Químico da MPSA nas amostras de bauxita. De uma maneira geral, através da avaliação dos resultados da classificação granulométrica, observa-se a predominância de material ultrafino (-400#).

Tabela 7 – Análise granulométrica por peneiramento.

Tyler	Diâmetro médio (µm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Passante	%Retida Acumulada	%Passante Acumulada
+48	297	82	2,35	97,65	2,35	97,65
-48+65	253,5	183	5,25	94,75	7,60	92,40
-65+100	179,5	365	10,46	89,54	18,06	81,94
-100+150	127	453	12,99	87,01	31,05	68,95
-150+200	89,5	588	16,86	83,14	47,91	52,09
-200+270	63,5	470	13,47	86,53	61,38	38,62
-270+325	48,5	394	11,30	88,70	72,68	27,32
-325+400	40,5	171	4,90	95,10	77,58	22,42
-400	37	782	22,42	77,58	100	0
		Σ = 3488	100	0		

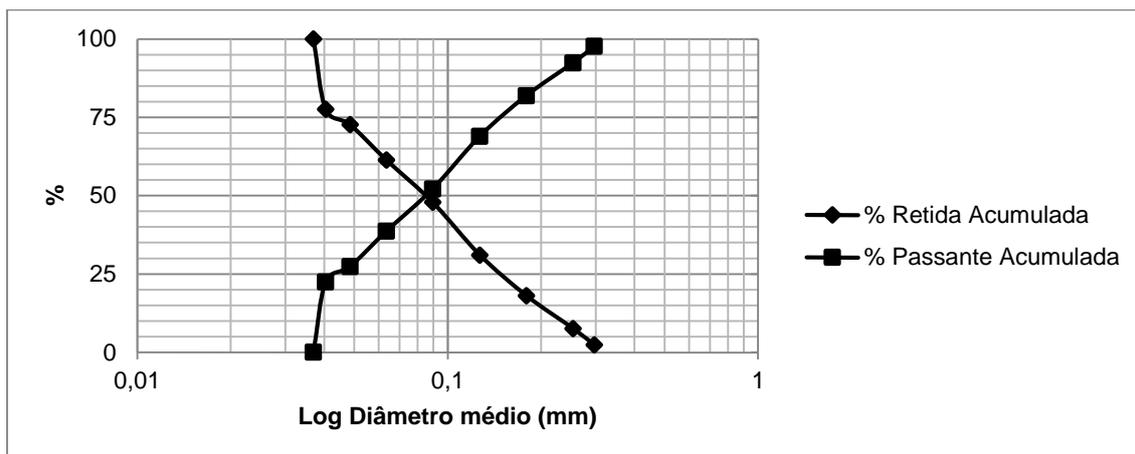
Fonte: MPSA, 2013.

Confrontando os resultados de classificação granulométrica obtidos experimentalmente (Tabela 7), com as especificações granulométricas definidas pelo controle de qualidade da MPSA (Tabela 5), observa-se que não existe total representatividade relacionada às características de distribuição granulométrica estabelecidas para um transporte seguro e eficaz da polpa de bauxita através de mineroduto.

Segundo Lima e Luz (2001), a distribuição granulométrica de partículas sólidas compreende a determinação do tamanho das mesmas, bem como a frequência que ocorrem em uma determinada faixa de tamanho, sendo esta análise bastante importante no controle de qualidade da eficiência das etapas de cominuição (britagem e moagem) e classificação nas indústrias de mineração.

Na Figura 19 tem-se a curva de distribuição granulométrica da amostra de bauxita ensaiada.

Figura 19 – Curva de distribuição granulométrica.



Fonte: MPSA, 2013.

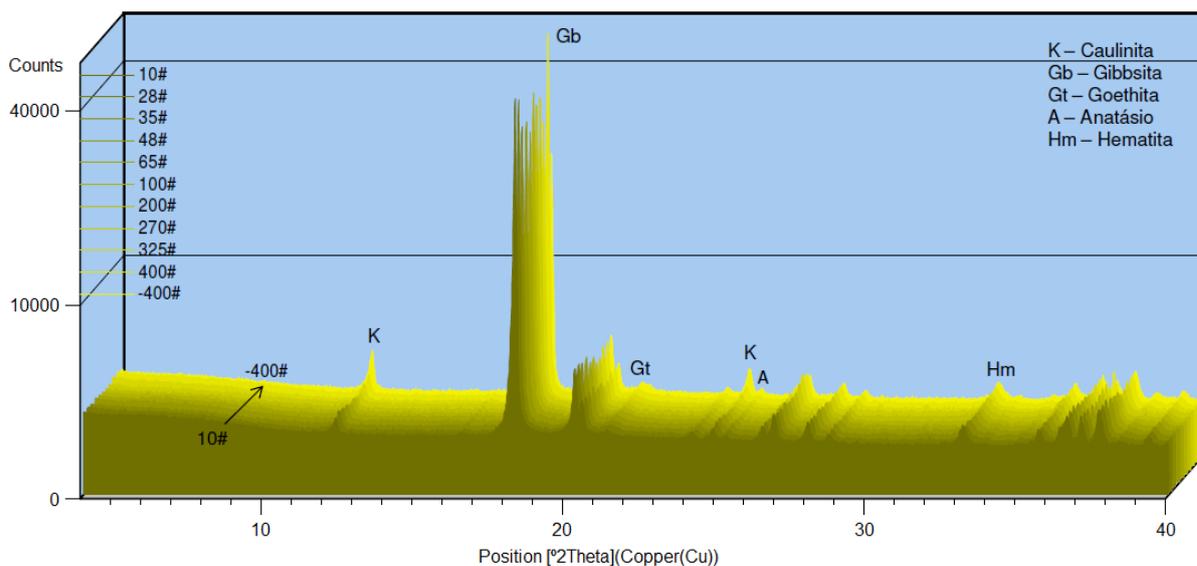
De acordo com a curva de distribuição granulométrica tem-se que o tamanho médio de 50% das partículas, d_{50} , é de aproximadamente 86 μm .

Ressalta-se que a quantidade de massa retida em cada malha de peneira, bem como o diâmetro médio das partículas retidas em cada malha, foram determinantes para a execução dos ensaios reológicos.

5.2 Análise mineralógica

Na Figura 20 têm-se os difratogramas superpostos, em modo 3D, das frações analisadas.

Figura 20 – Superposição em modo 3D dos difratogramas das frações de bauxita.



Fonte: Angélica, 2012.

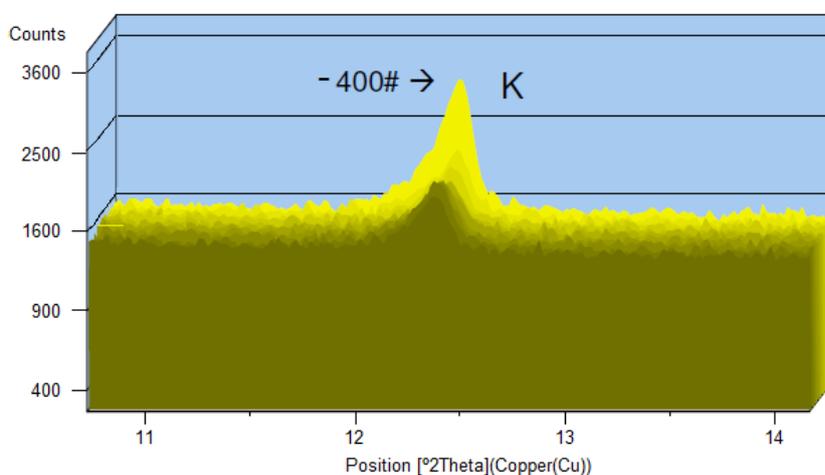
O resultado da análise de difração por raios-X demonstrou que o mineral dominante nas frações de bauxita é a gibbsita (Gb), seguida de menores proporções de goethita (Gt), caulinita (K), hematita (Hm) e anatásio (A). Segundo Kotschoubey et al. (2005) esta é uma composição mineralógica típica das bauxitas da região de Paragominas, o que justifica sua importância como matéria-prima na produção de alumina pelo processo Bayer.

A composição mineralógica total das amostras de bauxita avaliadas não variou com o fracionamento granulométrico, observando-se, através da superposição dos difratogramas obtidos, incremento na concentração dos minerais identificados das frações mais grossas para as frações mais finas.

Segundo Angélica (2012) a avaliação das proporções em cada fração da gibbsita é dificultosa, pois, neste mineral, o efeito de orientação preferencial é muito forte e pode modificar a intensidade dos picos. A partir da interpretação realizada dos difratogramas, observa-se certa variação do pico principal da gibbsita nas frações intermediárias e relativo aumento para as frações mais finas.

Através da avaliação do pico principal da caulinita (Figura 21), observa-se um significativo aumento da intensidade das frações mais grossas para as frações mais finas, sendo que, a última fração, que correspondente à massa passante da malha de 400# (-400#) possui maior concentração deste argilomineral, como seria de se esperar devido à granulometria coloidal de argilominerais. De acordo com Nascimento (2010) a caulinita tende a se ajustar face a face, influenciando o grau de coesão da bauxita no caso de uma parada no processo de bombeamento de polpas em dutos, o que pode ocasionar dificuldades numa nova partida operacional.

Figura 21 – Superposição dos difratogramas de bauxita (zoom no pico da caulinita).



Fonte: Angélica, 2012.

A caulinita é a principal fonte de sílica reativa contida nas bauxitas do tipo gibbsítica, constituindo-se como um deletério ao processo Bayer por reagir com o NaOH.

5.3 Caracterização das polpas de bauxita

Na Tabela 8 tem-se as massas específicas das partículas e das polpas formuladas a concentração constante de 50% de sólidos, além dos valores de pH das polpas.

Tabela 8 – Resultados caracterização das polpas.

Fração	Diâmetro médio (μm)	Massa específica das partículas (g/cm^3)	Concentração de sólidos (%m/m)	Massa específica da polpa (g/cm^3)	pH
-100+150	127	2,37		1,41	7,78
-150+200	89,5	2,40		1,41	7,32
-200+270	63,5	2,62	50	1,45	7,83
-270+325	48,5	2,58		1,44	7,79
-400	37	2,35		1,40	7,66

Fonte: Autora, 2015.

De uma maneira geral o pH das polpas de bauxita não apresentaram variação significativa, admitindo valores levemente alcalinos, entre 7,32 e 7,83. De acordo com Brum (2011) a especificação de pH da polpa de bauxita para transporte via mineroduto deve estar na faixa de 6,8 e 7,9.

Segundo Barbato et al. (2013) polpas de bauxita com pH entre 7 e 9 apresentam elevado grau de floculação, observação esta que justifica a utilização de aditivos químicos, os quais atuam de diversas formas sob a superfície das partículas mantendo-as dispersas, facilitando assim o bombeamento.

5.4 Análises reológicas

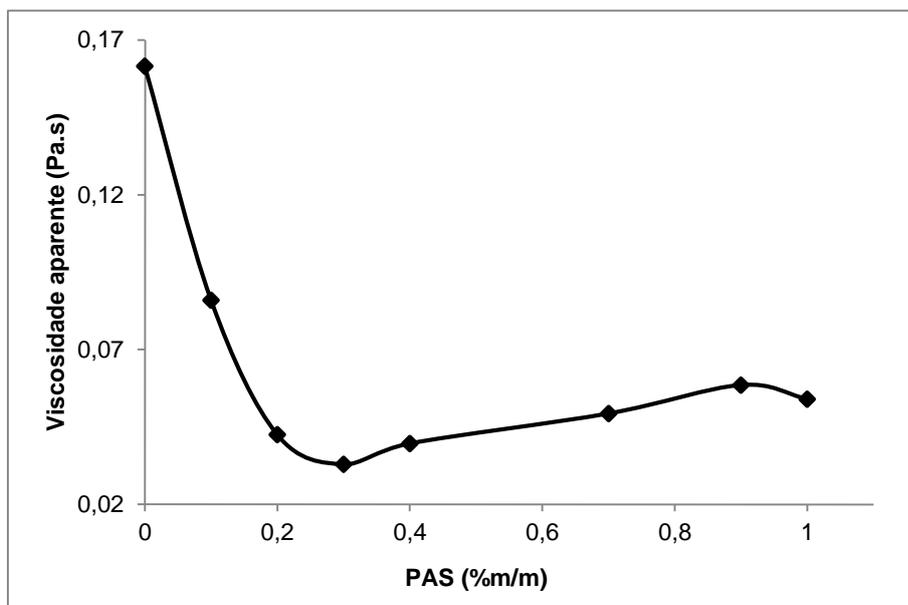
5.4.1 Curvas viscosidade aparente versus concentração de PAS

De acordo com a lei de Stokes a velocidade de sedimentação é diretamente proporcional ao quadrado do raio da partícula, logo, em uma suspensão de partículas sólidas em meio fluido, quanto maior o diâmetro médio das partículas mais rapidamente ocorrerá o processo de sedimentação, fato este que impossibilitou

os ensaios reológicos com as frações de partículas de bauxita de diâmetro superior a 127 μm em viscosímetro do tipo cilindros coaxiais.

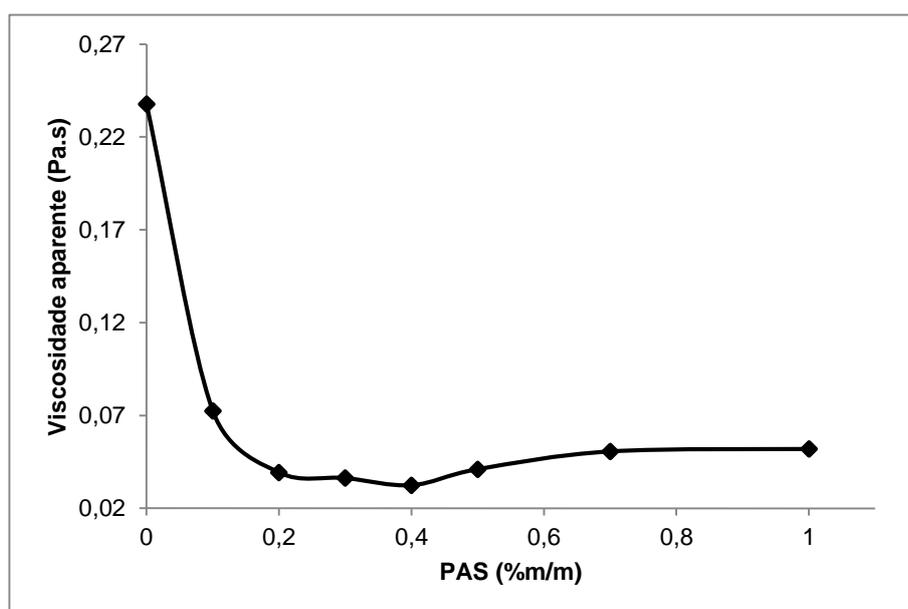
As Figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam os perfis das curvas de viscosidade aparente *versus* concentração de poliacrilato de sódio encontradas para as frações passantes de 100#, 150#, 200# e 270#, respectivamente.

Figura 22 – Curva de defloculação fração passante de 100# (-100#+150#).

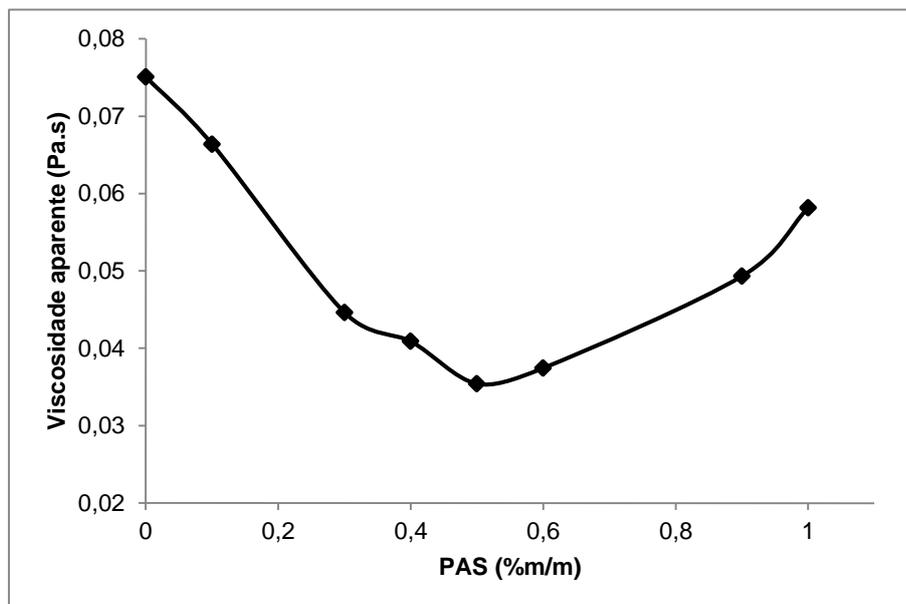


Fonte: Autora, 2015.

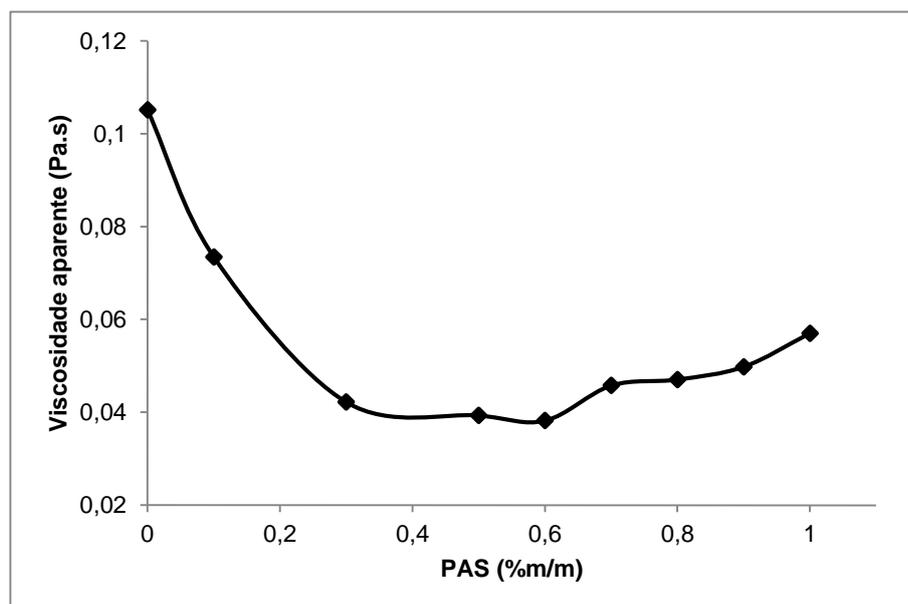
Figura 23 – Curva de defloculação fração passante de 150# (-150#+200#).



Fonte: Autora, 2015.

Figura 24 – Curva de defloculação fração passante de 200# (-200#+270#).

Fonte: Autora, 2015.

Figura 25 – Curva de defloculação fração passante de 270# (-270+325#).

Fonte: Autora, 2015.

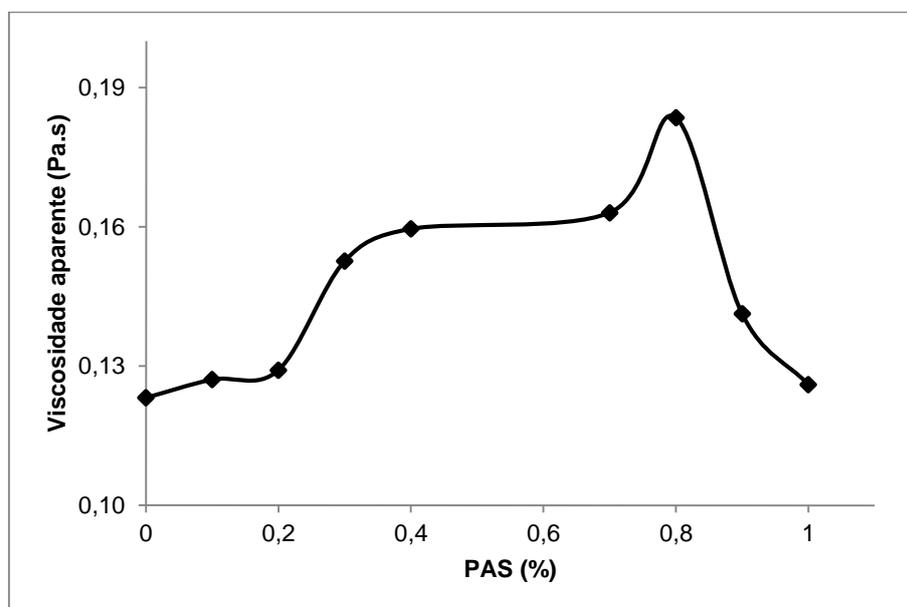
Através da análise do comportamento das Figuras 22, 23, 24 e 25, nota-se que o acréscimo de poliacrilato de sódio reduziu a viscosidade aparente das polpas de bauxita com diferentes granulometrias até pontos mínimos de viscosidade aparente e após estes pontos de mínimo, a viscosidade aumentou com o aumento

da concentração de polímero; comportamento este que caracteriza ação defloculante do poliacrilato de sódio.

De acordo com Ortega et al. (1997a) e Ortega et al. (1997b) a defloculação observada com a adição de poliacrilato de sódio ocorre devido o polímero apresentar conformação enovelada quando em suspensão, o que gera dificuldade de ligação entre duas ou mais partículas, evidenciando estabilização estérica.

Entretanto, comportamento inverso foi verificado para suspensão de bauxita formulada com a fração passante de 400#, onde se observou aumentos da viscosidade aparente da polpa em função do acréscimo de poliacrilato de sódio. Na Figura 26 observa-se um ponto de máxima viscosidade, que correspondente a uma concentração de poliacrilato de sódio aproximada de 0,8 %.

Figura 26 – Curva de flocação fração passante de 400# (-400#).



Fonte: Autora, 2015.

Em polpas minerais aditivadas com polímeros, tem-se que a diminuição do tamanho das partículas influencia na tendência à predominância da flocação do sistema através do efeito de pontes (*bridging effect*), que acontece quando o aditivo polimérico atua de forma a anexar partículas vizinhas através de conformações estendidas na solução (DIAS et al., 2004; BALTAR, 2010; GREGORY e BARANY, 2011).

Observa-se na Figura 26 que a partir da dosagem ótima de poliacrilato de sódio na polpa formulada com a fração mais fina, há um decréscimo da viscosidade,

isto é devido à re-estabilização do sistema que ocorre quando há recobrimento superficial muito grande das partículas devido às repulsões estéricas causadas pelo excesso de aditivo polimérico no meio, com isso, as pontes entre as partículas se desfazem, e o sistema tornar-se defloculado, com uma conseqüente queda na viscosidade (ERSOY, 2005; ORTEGA et al., 1997a; ORTEGA et al., 1997 b).

Na Tabela 9 têm-se as concentrações ideais de poliacrilato de sódio, aproximadas, referentes aos diferentes tamanhos de partículas das polpas ensaiadas a 50% de sólidos.

Tabela 9 – Concentração ótima de poliacrilato de sódio e valores de viscosidade aparente observado em função do diâmetro médio.

Fração (# Tyler)	Diâmetro médio (μm)	Concentração ótima de PAS (%m/m)	Viscosidade aparente (Pa.s)	Efeito da adição de PAS
-100+150	127	0,3	0,0329	
-150+200	89,5	0,4	0,0324	Defloculação
-200+270	63,5	0,5	0,0354	
-270+325	48,5	0,6	0,0382	
- 400	<37	0,8	0,1835	Floculação

Fonte: Autora, 2015.

Observa-se, de acordo com a Tabela 9, que quanto menor o tamanho de partícula, maior a concentração ideal de PAS.

Segundo Carvalho e Almeida (1997) menores diâmetros médios de partícula proporcionam maiores áreas superficiais, necessitando, assim, de maiores quantidades de aditivos para estabilização/re-estabilização. Deste modo, a dosagem de aditivos em polpas minerais deve estar de acordo com a necessidade do sistema, pois uma dosagem excessiva, além de significar custo desnecessário, pode levar a um comportamento antagônico ao que se deseja para a polpa mineral.

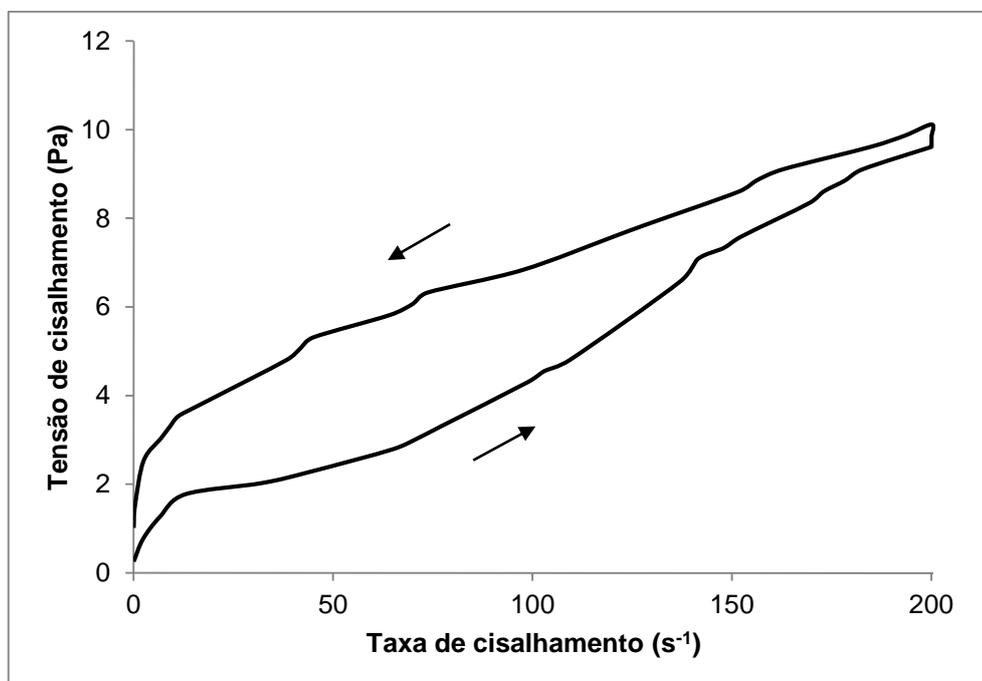
5.4.2 Histereses

A análise reológica das polpas de bauxita a diferentes granulometrias permitiu a investigação de como a tensão de cisalhamento dessas suspensões varia à medida que elas são submetidas a taxas de cisalhamento crescente, constante e decrescente, respectivamente, podendo ser avaliado o tempo de reestruturação do sistema. Verifica-se a existência de pequenos ruídos de medição no perfil das

curvas de crescimento e decrescimento da tensão de cisalhamento em função da taxa aplicada, contudo, não foram observadas mudanças bruscas nas medições que pudessem interferir no comportamento reológico global das polpas de bauxita ensaiadas a diferentes faixas granulométricas. Segundo Ferreira et al. (2005) a presença destes tipos de ruídos de medição em ensaios reológicos utilizando-se viscosímetros rotacionais são comumente observados e devem-se, entre outras perturbações, ao chamado “efeito de parede” observado na interface do rotor e da suspensão.

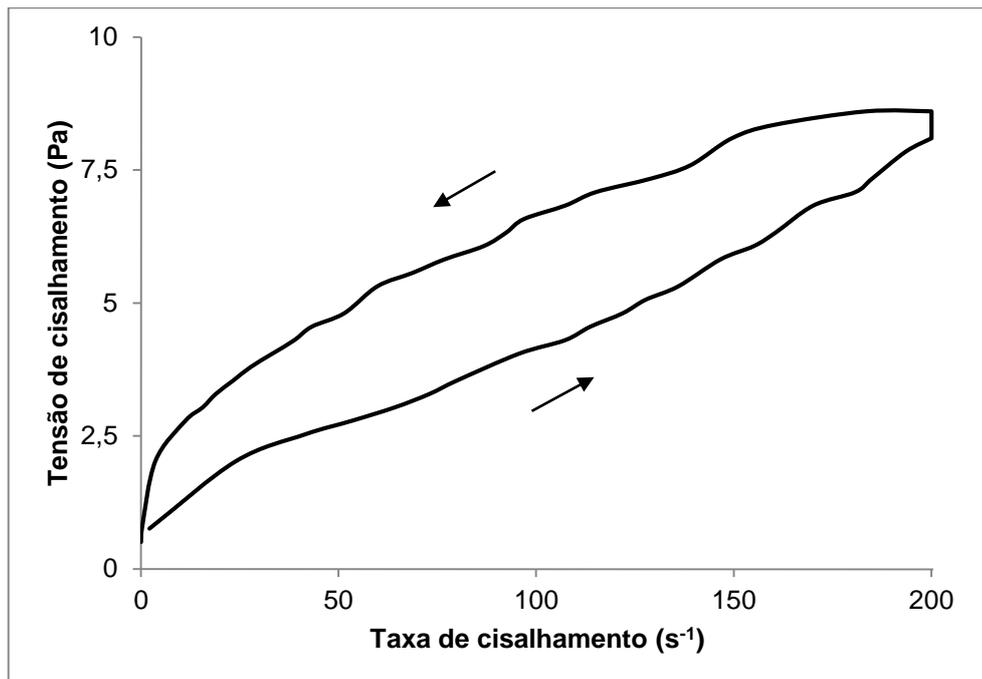
Os gráficos da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para as frações passantes de 100#, 150#, 200# e 270# são apresentados nas Figuras 27, 28, 29 e 30, respectivamente, permitindo a verificação do fenômeno da reopexia. Ressalta-se que estes comportamentos foram obtidos para as polpas de bauxita formuladas com as respectivas concentrações ideais de poliacrilato de sódio (pontos de viscosidade mínima), encontradas através dos ensaios de curva de defloculação.

Figura 27 – Histerese polpa -100#+150#.



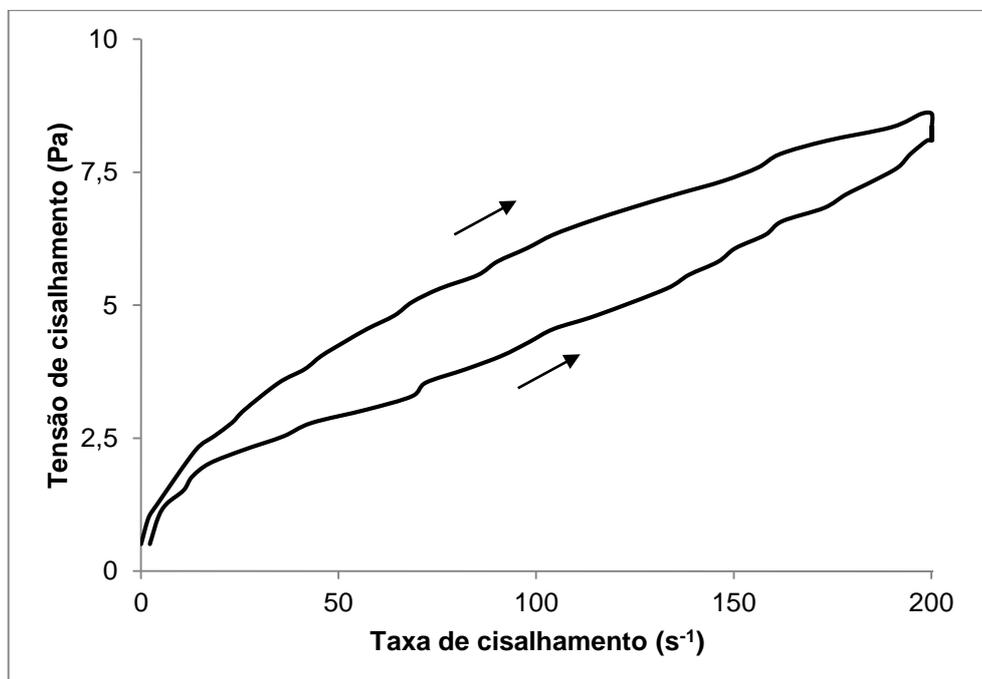
Fonte: Autora, 2015.

Figura 28 – Histerese polpa -150#+200#.



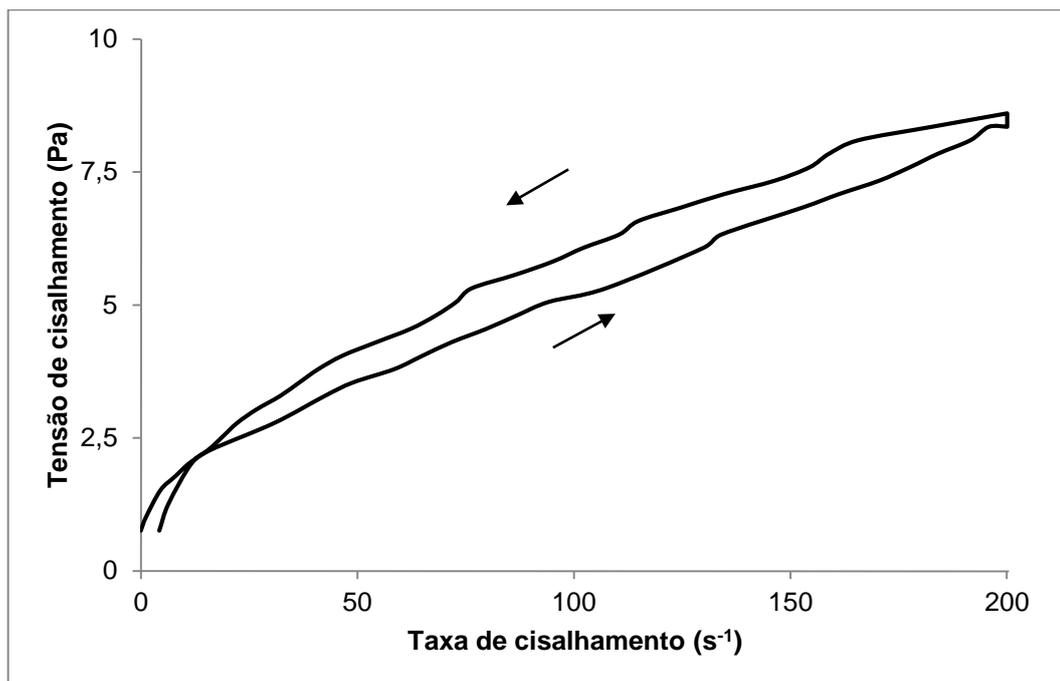
Fonte: Autora, 2015.

Figura 29 – Histerese polpa -200#+270#.



Fonte: Autora, 2015.

Figura 30 – Histerese polpa -270#+325#.



Fonte: Autora, 2015.

A manifestação da reopexia se dá quando o emprego da taxa de deformação de forma prolongada desloca o equilíbrio do sistema fluido-partícula para um arranjo mais bem estruturado (SLAWOMIRSKI, 1975).

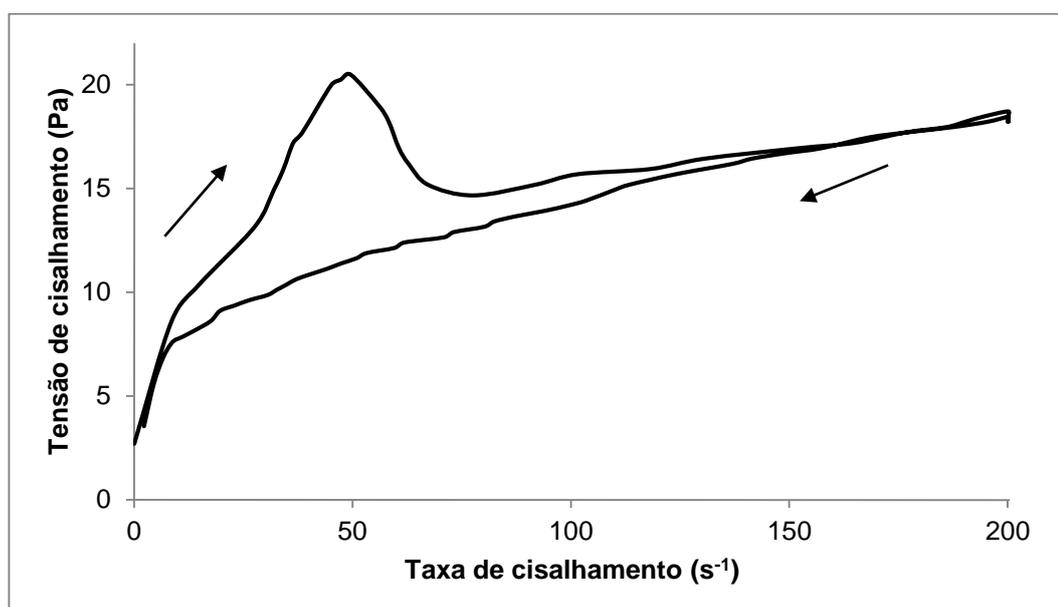
O aumento das colisões devido às turbulências que surgem permitem a criação de uma rede tridimensional complexa que aumenta a viscosidade aparente da polpa, sendo este comportamento influenciado pelo tamanho e forma da molécula/partícula, concentração de sólidos, composição química, além do controle dos parâmetros de taxa e tempo de cisalhamento (DEWAR e JOYCE, 2006; MOURA JÚNIOR, 2006; BANFILL e SAUDERS, 1981).

Com relação ao bombeamento de polpas, a reopexia é um comportamento extremamente prejudicial ao processo, pois pode levar a obstrução dos dutos durante o processo de escoamento (KLEIN e HALLBOM, 2002). Observa-se, através da análise das Figuras 27, 28, 29 e 30 uma diminuição da área de histerese à medida que o tamanho médio das partículas de bauxita que constituem as polpas vai diminuindo, evidenciando uma tendência à diminuição do caráter reopético das polpas de bauxita.

A análise de histerese da polpa de bauxita formulada com a fração mais fina e aditivada com a concentração ótima de poliacrilato de sódio encontrada apresentou comportamento tixotrópico, como pode ser observado na Figura 31. Observa-se, em

taxas crescentes de cisalhamento, um abrupto aumento inicial da tensão. Em contrapartida, em valores de taxa de cisalhamento superiores a, aproximadamente, 50 s^{-1} observa-se um decréscimo da tensão em função da taxa aplicada. Segundo Moreira (2014) e Mota Lima e Souza (2007), picos de tensão ao se iniciar o experimento de análise são comuns em fluidos de característica tixotrópica e este comportamento pode ser entendido como a quebra dos aglomerados (flocos) que acontece em função da taxa de cisalhamento e do tempo.

Figura 31 – Histerese polpa -400#.



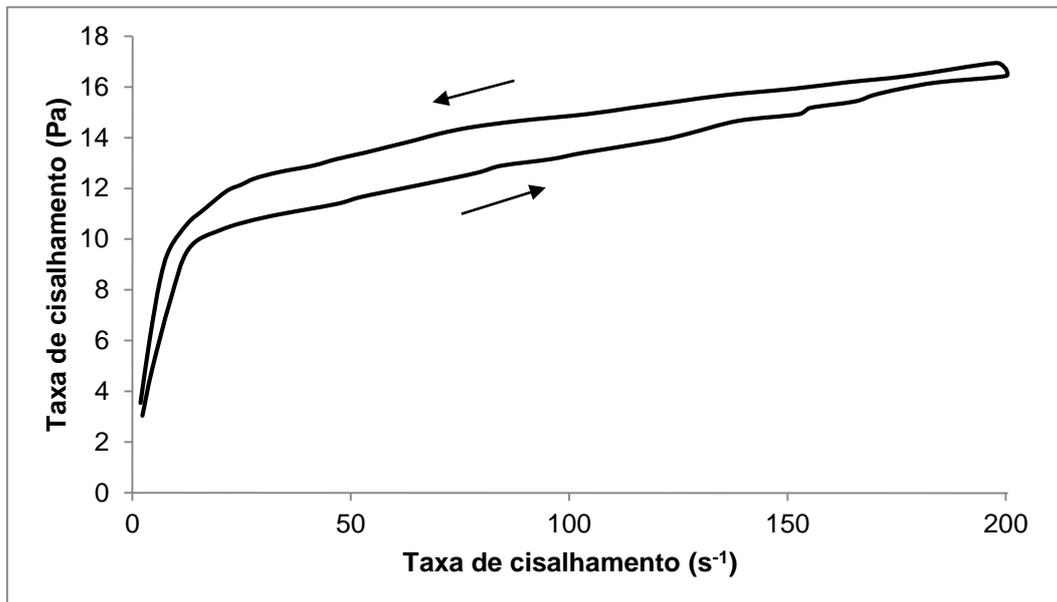
Fonte: Autora, 2015.

Segundo Labanda e Llorens (2005) a tixotropia é um fenômeno típico de suspensões floculadas, consistindo na diminuição da viscosidade aparente em função do tempo de aplicação a uma taxa de cisalhamento constante. Tem-se, para sistemas floculados, que o aumento da agitação contribui para uma maior velocidade na formação dos flocos e que a partir de uma determinada taxa de cisalhamento, que é característica de cada sistema, as forças tangenciais resultantes da agitação promovem a quebra dos flocos formados, ocasionando uma diminuição da viscosidade (BALTAR, 2010).

De acordo com Araújo e Nascimento (2001), a utilização de aditivos poliméricos para dispersão de partículas de bauxita se justifica, desde que o polímero não atue como um floculante no meio.

Para efeito comparativo, na Figura 32 tem-se a histerese da polpa de bauxita formulada com a fração mais fina (-400#) e isenta de poliacrilato de sódio.

Figura 32 – Histerese polpa -400# sem adição de poliacrilato de sódio.



Fonte: Autora, 2015.

Observa-se comportamento reopético para polpa não aditivada, entretanto a magnitude da área de histerese é pequena. Silva (2003) e Pileggi (2001) em seus estudos atribuíram a magnitude da área de histerese ao grau de estabilidade da suspensão, evidenciando que quanto menor a área de histerese maior a eficiência da dispersão das partículas no meio fluido.

Relacionando-se a uma taxa de cisalhamento constante ($\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$), os valores de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente encontrados para os perfis crescentes e decrescentes de taxa durante os ensaios de histerese, tem-se que a utilização de partículas de bauxita de granulometria fina, em comparação com as partículas de granulometria mais grosseira, na formulação das polpas com teor de sólidos constante e igual a 50 %, elevou a viscosidade do sistema, como se pode observar na Tabela 10.

Tem-se que o efeito de aumento da viscosidade promovido pela aditivação do meio com o polímero poliacrilato de sódio pode ser usado para retardar a sedimentação das partículas de diâmetro médio entre $127\mu\text{m}$ e $48,5\mu\text{m}$, mantendo-as em suspensão durante o escoamento. Já a aditivação da polpa de bauxita formulada com a fração mais fina, que corresponde a um diâmetro médio de

partícula menor que $37\mu\text{m}$, promove a floculação do meio, elevando a viscosidade em cerca de 22%.

Tabela 10 – Viscosidade aparente e tensão de cisalhamento dos perfis de ida e volta a uma taxa constante.

Frações	Diâmetro médio (μm)	Taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$)	Viscosidade aparente (Pa.s)	Tensão de cisalhamento (Pa)
-100#+150#	127	Ida	0,048	4,764
		Volta	0,069	6,915
-150#+200#	89,5	Ida	0,039	3,985
		Volta	0,053	6,705
-200#+270#	63,5	Ida	0,044	4,491
		Volta	0,061	6,135
-270#+325#	48,5	Ida	0,051	5,123
		Volta	0,059	5,882
- 400# (com PAS)	<37	Ida	0,160	15,430
		Volta	0,140	14,170
- 400# (sem PAS)	<37	Ida	0,131	13,410
		Volta	0,148	14,93

Fonte: Autora, 2015.

6 CONCLUSÕES

Os resultados de DRX mostraram que a bauxita estudada é essencialmente gibbsítica, apresentando, em menores proporções, goethita, caulinita, hematita e anatásio. A composição mineralógica total das amostras de bauxita avaliadas não variou com o fracionamento granulométrico, observando-se incremento na concentração dos minerais identificados na fração mais grossa ($D_{\text{médio}} = 297 \mu\text{m}$) para a fração mais fina ($D_{\text{médio}} < 37 \mu\text{m}$), analisadas.

A geometria de cilindros concêntricos utilizada não se mostrou eficaz quanto à avaliação das propriedades reológicas das polpas de bauxita formuladas com as partículas de diâmetro médio maiores que $127 \mu\text{m}$ (frações +48#, -48#+65# e -65#+100#) devido à rápida sedimentação observada nas polpas formuladas.

O aditivo polimérico a base de poliacrilato de sódio promoveu a defloculação da polpa de bauxita formulada com frações de diâmetro médio entre 127 e $48,5 \mu\text{m}$. Com o mesmo aditivo polimérico, no entanto, observou-se floculação da amostra de bauxita com diâmetro abaixo de $37 \mu\text{m}$.

Quanto menor o tamanho da partícula, maior a quantidade de poliacrilato de sódio necessária à estabilização das polpas de bauxita formulada com frações de diâmetro médio entre 127 e $48,5 \mu\text{m}$.

Durante os ciclos de aumento e decréscimo da taxa de cisalhamento estipulados, as curvas de fluxo obtidas para as amostras de bauxita a diferentes granulometrias aditivadas com as respectivas concentrações ótimas de poliacrilato de sódio encontradas, apresentaram comportamentos de fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo, evidenciando comportamento reopético para as frações com granulometrias entre 127 e $48,5 \mu\text{m}$ e comportamento tixotrópico para fração fina de diâmetro médio menor que $37 \mu\text{m}$.

Os experimentos de avaliação da dependência do tempo para as suspensões de bauxita formuladas a 50% (m/m) de sólidos indicaram que a magnitude da área de histerese entre as curvas relaciona-se com o tamanho médio das partículas.

7 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Realizar ensaios de curva de viscosidade *versus* concentração de aditivo alterando-se o pH do meio;

Realizar os ensaios reológicos com outras geometrias de spindle para se verificar possíveis correlações entre os resultados obtidos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em: <http://www.abal.org.br>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2015.

ANGÉLICA, R. S. **Relatório de Caracterização Mineral por Difractometria de Raios-X**. Instituto de Geociências – UFPA, 2012.

Araújo, D. G. e Nascimento, C. R. Efeito da Aditivção nas Propriedades Reológicas nas Características de Sedimentação da Polpa de Bauxita – I Ensaios Preliminares. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CETEM/MCT 16. **Anais...** 2001. p. 22- 28. Rio de Janeiro.

ARAÚJO, M. S.; FRANÇA, S. C. A.; BARBATO C. N.; Estudo Reológico de polpa de Bauxita da Região Nordeste do Pará. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CETEM/MCT, 17. **Anais...** 2009.p.22-28. Rio de Janeiro.

ARENARE, D.S. Estudos de concentração de bauxitas por métodos de concentração gravítica. 2009. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

AUTHIER-MARTIN, M.; FORTÉ, G.; OSTAP, S.; SEE, J. The mineralogy of Bauxite for producing smelter-grade alumina. **Journal of mineralogy overview**, v. 53, n. 12, p. 36 – 40. 2001.

AVELAR, Angela Nair. Influência da mineralogia na etapa de separação da lama vermelha no processo Bayer. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral), Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

Baltar, C.A.M. Processos de Agregação, Capítulo 13. In.: Adão B. da Luz, et. al. Tratamento de Minérios (5 a Edição). CETEM, Rio de Janeiro, 2010.

BANFIL, P.F.G.; SAUNDERS, D. C. On the viscometric examination of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 11, p. 363-370, 1981.

BARBATO, C. N. et al. **Avaliação estatística das variáveis que influenciam a viscosidade da polpa de bauxita do Pará com alto teor de SiO₂ reativa**. *Matéria (Rio J.)*, v. 18, n. 4, 2013.

BARBATO, Carla Napoli. **Estudo reológico de suspensão de bauxita**. Rio de Janeiro, 2011. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

BÁRDOSSY, G.B. (1997). *LesBauxetl'histoire de la bauxita*: Académie des sciences/Elsevier, Paris, v. 324, p. 1031-1040.

BARNES, H. A., HUTTON, J. F., WALTERS, K. **An introduction to rheology**.1 ed. New York: Elsevier, Rheology Series 3, p. 199, 1989.

BARNES, H.A., J. *Non-newtonian Fluid Mech*, 81, 133 f., 1999

BISCO, Ana Paula Resende. **A influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 2009.

BRAGANÇA, Ana Cristina Calil Ramos. **Avaliação de reagentes alternativos para substituição da cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro**. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro 2013. Brasília: DNPM, 2013.

BRUM, Sebastião Martins. **Estudo da influência da granulometria no comportamento reológico de polpa de bauxita e no fator de atrito**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

BRUM, Sebastião Martins. Imagens para dissertação [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <izabela.reis@hotmail.com> em 07/12/2015.

BURANASRISAK P.; NARASINGHA, M. H. Effects of Particle Size Distribution and Packing Characteristics on the Preparation of Highly-Loaded Coal-Water Slurry. International Journal of Chemical Engineering and Applications. vol. 3, no. 1, pp. 31-35, 2012.

CARVALHO, A. et al. Brazilian bauxites. São Paulo: USP/FAPESP, 1997 p. 195 – 208.

CARVALHO, E. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Caulim e Carbonato de Cálcio: Competição na Indústria de Papel: Série de Estudos e Documentos**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPQ, n. 41, 1997.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C.. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 333, p. 18-32, mar. 2009 .

CLARKE, B. **Rheology of Coarse Settling Suspensions**. Transactions of the Institute of Chemical Engineering. 45:1251, 1967.

CONSTANTINO, Vera R. Leopoldo et al. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático**. Química Nova. São Paulo, v.25, n.3, Maio 2002.

COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia/Construção Civil) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DEWAR, R. J.; JOYCE, M. J. **The thixotropic and rheopetic behavior of maize starch and maltodextrin thickeners used in dysphagia therapy.** Carbohydrate Polymers, vol. 65, p. 296-305, 2006

DIAS, C. L. P., SILVA, L. M., PERES, A. E. C., VALADÃO, George Eduardo Sales Utilização de reagentes auxiliares na filtragem. Revista da Escola de Minas, v.57, p.229 - 234, 2004.

DINGER, D.R., **Rheology for ceramists**, Kearney: Morris Publishing, 2002.

DUMAN, O.; TUNÇ, S.; ÇETINKAYA, A. Electrokinetic and rheological properties of kaolinite in poly(diallyldimethylammonium chloride), poly(sodium 4 – styrene sulfonate) and poly(vinyl alcohol) solutions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.** 394, 23-32, 2012.

ERSOY, B. Effect of pH and polymer charge density on settling rate and turbidity of natural stone suspensions. *International Journal of Mineral Process*, v. 75, p. 207-216, 2005.

FERREIRA, E. E.; BRANDÃO, P. R. G.; KLEIN, B.; PERES, A. E. C. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. Revista da Escola de Minas, v.58, n.1, p. 83-87, 2005.

FERREIRA, E. E.; BRANDÃO, P. R. G.; KLEIN, B.; PERES, A. E. C. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. *Rem: Rev. Esc. Minas.* 2005, vol.58, n.1, p. 83-87.

FERREIRA, Lucas Delleon. **Desenvolvimento de equipamento de laboratório para o estudo de fenômenos eletrocinéticos no processo de adensamento de resíduos de mineração.** 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

FLÔRES, J.C.C. (1992) **Bauxita: características, usos e comparação de metodologias de pesquisa.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

GOMES, C.M.; REIS, J.P; LUIZ, J.F; OLIVEIRA, A.P. N; HOTZA, D. **Defloculação de massas cerâmicas triaxiais obtidas a partir do delineamento de misturas.** Cerâmica v.51, n.320, p.336-342, 2005.

GONÇALVES, P. S.; **Influência do Caulim nas Características Reológicas de Esmaltes Cerâmicos; Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN);** 2003.

GONÇALVES, Silvane Gonçalves e. **Influência da granulometria e de aditivos no comportamento reológico do rejeito de lavagem da bauxita.** 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Pará. Belém, 2014.

GONÇALVES, S. G.; FERREIRA, K. C.; BRUM, S. M.; SOUZA, J. A. S.; FELIPE A. M. P. F. Efeito de aditivos no comportamento reológico do rejeito da bauxita. Cerâmica, v. 61, p. 1-5, 2015

GREENWOOD, N. N.; EARNSHAW, A. **Chemistry of the elements**. 2 ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1997, p. 216 – 277.

GREGORY, J.; BARANY, S. Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures. *Advances In Colloid And Interface Science*, v. 169, p. 1 – 12, 2011.

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

HYDRO. Disponível em: <http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Operacoes-no-Brasil/Hydro-Paragominas-mina/>. Acesso em: 9 de março de 2015.

KIRK, O. *Encyclopedia of chemical technology*. 4^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1992, vol. 2, p. 252-267.

KLEIN, B.; HALLBOM, D.J. **Modifying the rheology of nickel laterite suspensions**. *Minerals Engineering*, v.15, p.745-749, 2002.

KOTSCHOUBEY et al. **Caracterização e Gênese dos Depósitos de Bauxita da Província Bauxítica de Paragominas, Nordeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará/Oeste do Maranhão**. Departamento de Geoquímica e Petrologia, Centro de Geociências – UFPA, 2005.

LABANDA, J.; LLORENS, J. Influence of sodium polyacrylate on the rheology of aqueous Laponite dispersions. *J. Colloid Interface Sci.* v. 289, p. 86–93, 2005.

LIMA, R. M. F.; LUZ, J. A. M. **Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes**. *Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto* , v. 54, n. 2, p. 155-159, 2001 .

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. *Introdução ao Tratamento de Minérios*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

MACEDO, A. J. B.; BAZANTE, A. J.; BONATES, E. J. L. Seleção do método de lavra: arte e ciência. *Rem, Rev. Esc. Minas*. 2001, v.54, n.3, p. 221-225, 2001.

MACHADO, J. C. V. (2002); *Reologia e Escoamento de Fluidos*. Rio de Janeiro: Interciência.

MACOSKO, C. W. **Rheology: Principles, Measurements and Applications**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1994.

MELO, Klismeryane Costa. **Avaliação e modelagem reológica de fluidos de perfuração base água**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

MINERAÇÃO PARAGOMINAS S/A. Laboratório de Físico-Química. Relatório Resumo de Resultados. Paragominas, 2013.

- MONTALVO, Miguel Eduardo del Aguila. **Escoamento de emulsões óleo em água através de micro-capilares**. 2008. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.
- MORENO, R. *Reología de Suspensiones Cerâmicas*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2005.
- Mota Lima, A. B.; Souza, D. P. F. Efeitos das variáveis de formulação de suspensões sobre o comportamento reológico e sobre a microestrutura de filmes cerâmicos NiO-YSZ. *Revista Matéria*, v. 12, n. 2, pp. 383 – 393, 2007
- MOURA JÚNIOR, Maurício Donato. **Estudo reológico de fluidos de perfuração em diferentes temperaturas**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Ciência e Tecnologia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis com Sustentabilidade Ambiental) – Faculdade de Engenharia Química. Universidade Federal de Sergipe.
- NASCIMENTO, Aurellis Carvalho. **Influência do tamanho de grão da zircônia estabilizada com ítria e das propriedades reológicas de barbotinas anódicas sobre as características microestruturais de filmes de anodo usados em pilhas a combustível de óxido sólido**. 2007. 123 f. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
- NASCIMENTO, C. R. Caracterização e determinação do comportamento de consolidação da polpa de bauxita. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 325-329, 2010.
- NASCIMENTO, C. R. E SAMPAIO, J. A. **Estudo Reológico da Polpa de Bauxita**. Séries de Capacitação Institucional, Rio de Janeiro, 2007.
- OLIVEIRA, R.I.; STUDART, A.R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C.; *Dispersão e Empacotamento de Partículas - Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico*. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 224 p., 2000.
- ORTEGA, F. S.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A.; SEPULVEDA, P. A. **Defloculação e Propriedades Reológicas de Suspensões de Alumina Estabilizadas com Dispersantes Poliacrílicos**. *Cerâmica Industrial*, v. 2, p. 34-37, 1997b.
- ORTEGA, F. S.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A.; SOUZA, D. P. F. **Artigo revisão: Aspectos da Reologia e da Estabilidade de Suspensões Cerâmicas. Parte III: Mecanismos de estabilização eletroestérica de suspensões com alumina**. *Cerâmica*, v. 43, p.112-118, 1997a.
- PASCOAL, C.; PANDOLFELLI, V. C. (2000). Bauxitas refratárias: composição química, fases e propriedades - Parte II: *Cerâmica*, Set., vol.46, nº.299, p.131-138.
- PAWLIK, M.; LASKOWSKI, J. S. Evaluation of flocculants and dispersants through rheological tests. In: *Polymers in Mineral Processing. 38th Annual Conference of Metallurgists of CIM*, Quebec, Canada, p. 541 – 555, 1999.
- PEREIRA, F. T. (2012). Aumento de Produtividade da Frota de Caminhões Rodoviários com a Padronização de Cargas – Mineração Paragominas S.A. VII

Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Subterrânea (CBMINA), Belo Horizonte, MG. 02 p.

PILEGGI, R. G. Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários. 2001. 187 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2001.

Pimentel, E. N (2009). Aspectos Gerais da Mina de Bauxita Paragominas Estudo comparativo e Elaboração de Modelos Ótimos de Logística Operacional – troca de turnos. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Pará, Marabá, Pa. 6 p – 22 p.

PINTO, R. L. S.; SILVA, K. C. S.; CARDOSO, D. N. P.; Macêdo, E. N.; FELIPE, A. M. P. F. Determinação do ponto de carga zero da bauxita da região nordeste do Pará. *Cerâmica* (São Paulo. Impresso), v. 58, p. 465-467, 2012.

POSSA, M. V. Reologia no tratamento de minérios. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p.535-568.

POSSA, M. V., NASCIMENTO, C. R. Reologia no Tratamento de Minérios. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A., França, S. C. A. (Eds). Tratamento de Minérios. 5a ed. Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2010, p.597-636.

POWERS, M. C. **A new roundness scale for sedimentary particles**. *Journal of Sedimentary Petrology*. V. 23, p. 117-119, 1953.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais. 1ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2007.

SAMPAIO, João Alves; ANDRADE, Mônica Calixto; DUTRA, Achilles Junqueira Boudort. Bauxita. In: Rocha e Minerais Industriais: Usos e especificações. CETEM, 2005, p. 279-304.

SAMPAIO, L. C., NASCIMENTO, C. R. "Propriedades reológicas da polpa de bauxita-I Estudo da influência da concentração e distribuição granulométrica". In: *Jornada de Iniciação Científica-CETEM, XIV*. Rio de Janeiro, 2006.

SANTOS, I. M. G.; SOUZA, A. G.; SENSATO, F. R.; LEITE, E. R.; LONGO, E. R.; VARELA, J. A. Rheological properties of tin oxide suspensions. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 22, n.8, p.1297-1306, 2002.

SANTOS, Wagner Martins dos. **Mineralogia e geoquímica da bauxita derivada do anortosito, Barro Alto, Goiás**. 2011. 186 f. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade de Brasília. Brasília, 2011.

SCHRAMM, G. **Reologia e Reometria: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Artliber, 2006. 232 p.

SHAW, D. J. Introdução a química dos colóides e de superfícies. São Paulo: Edgard Blucher, 1975. p.180.

SILVA, F. A. N. G.; GARRIDO, F. M. S.; MEDEIROS, Marta Eloisa; SAMPAIO, J. A.. Processo de Redução do Teor de Sílica Reativa Contida em Bauxita para Posterior Utilização no Processo Bayer. Pedido de patente Nº: BR 10 2012 004629 6 A2, INPI, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, José Geraldo da. **Reologia e microestrutura na estabilização de suspensões concentradas de Al_2O_3** . 134 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2003.

SILVA, Kelly Cristina Sarmento. **Influência de aditivos químicos no comportamento reológico da polpa de bauxita**. 2011. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

SILVA, M. G. P.; et al. Avaliação de equações pertinentes aos projetos hidráulicos com fluidos de perfuração, pastas de cimento e fluidos de completação no escoamento tubular e anular, Relatório Técnico Interno, nº 675–12009, Vol.1, CENPES/PETROBRAS, 1989.

SLAWOMIRSKI, M.R. **Rheological behavior of oil well drilling fluids**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 12, p. 115- 123, 1975.

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

STUDART, A.R., AMSTAD, E., ANTONI, M., et al., Rheology of Concentrated Suspensions Containing Weakly Attractive Alumina Nanoparticles, Journal of the American Ceramic Society, v. 89, n.8, p. 2118-2425, 2006.

TABILO-MUNIZAGA, G.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. Rheology for the food industry. Journal of Food Engineering, v. 67, p. 147-156, 2005.

TOTOU, Adriano Raimundo. **Efeito da dispersão na deslamagem e flotação de polpas de minérios hematíticos Itabíricos**. 2010. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

ULLMANN'S ENCYCLOPEDIA. Industrial inorganic chemicals and products. Weinheim: Willey-VCH, 1998, vol. 1, p. 25-83.

VALETON, I., 1972. Bauxites: Development in Soil Science, vol. 1. , Elsevier Publishing Company, Amsterdam.

WANG, Q., HEISKANEN, K.I Dispersion of Single Minerals. International Journal of Mineral Processing. v. 35, p. 121-131, 1991.

YUE, J., KLEIN, B. Influence of rheology on the performance of horizontal stirred mills. *Minerals Engineering*, v. 17, p. 1169-1177, 2004.