



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

SILVANE GONÇALVES E GONÇALVES

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DE ADITIVOS NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DO REJEITO DE LAVAGEM DA BAUXITA**

BELÉM

2014

SILVANE GONÇALVES E GONÇALVES

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DE ADITIVOS NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DO REJEITO DE LAVAGEM DA BAUXITA**

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos

ORIENTADORES: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

Prof.^a Dra. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe

BELÉM

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Gonçalves, Silvane Gonçalves e

Influência da granulometria e de aditivos no comportamento reológico do rejeito de lavagem da bauxita / Silvane Gonçalves. – 2014

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

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2014

1. Aditivos 2 . Reologia 3. Rejeito de bauxita I. Título

CDD 22. ed. 531.1134

SILVANE GONÇALVES E GONÇALVES

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DE ADITIVOS NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DO REJEITO DE LAVAGEM DA BAUXITA**

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

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

DATA DA AVALIAÇÃO: ___/___/___

CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dra. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe
(FEQ – ITEC – UFPA – Orientador)

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

Prof. Dr. Cláudio José Cavalcante Blanco
(FAESA – ITEC – UFPA – Membro)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais pelo amor, apoio e confiança dedicados a mim. E aos meus irmãos que sempre torceram pelas minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me confortar nos momentos mais difíceis e por dar-me força, perseverança e coragem para continuar em busca da realização dos meus sonhos.

A professora Dr^a. Augusta Maria Paulain Felipe, pelas orientações, conselhos e dedicação para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. José Antonio da Silva Souza, pelas orientações e ensinamentos que me foram transmitidos ao longo desses dois anos.

Ao mestre Eng. Sebastião Martins Brum pela parceria sem a qual a realização deste trabalho não seria possível.

Ao meu amigo e colega de mestrado Dilson Nazareno pelos conselhos, ensinamentos teóricos e práticos que me foram repassados.

A minha família que sempre me confortou e torceu pelo meu sucesso.

A todos os meus amigos que direta ou indiretamente ajudaram na realização deste trabalho.

“Cada sonho que você deixa pra trás é um pedaço do seu futuro que deixa de existir”.

Steve Jobs

“Somos todos geniais. Mas se você julgar um peixe por sua capacidade de subir em árvores, ele passará sua vida inteira acreditando ser estúpido”.

Albert Einstein

RESUMO

Na mineração da bauxita no município de Paragominas-PA, são descartados no processo de beneficiamento rejeitos com teor de sólido de 33,5 % e granulometria muito fina com D_{50} abaixo de 5 μm . Esses fatores contribuem para que esta suspensão formada basicamente por silico aluminatos, com elevada concentração de argila caulinita, apresente alta viscosidade e alta tensão inicial de escoamento. Foi realizada análise granulométrica e determinadas as composições químicas e mineralógicas do material. A análise granulométrica foi feita por peneiramento a úmido e as frações finas foram determinadas pela técnica da difração a laser. A determinação da composição química foi feita por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, obtendo-se considerável teor de alumina aproveitável, 21, 28%. A composição mineralógica foi determinada por Difração de Raios-X (DRX), obtendo-se gibsitita, hematita, quartzo e caulinita. Realizou-se a determinação dos fatores de atrito da polpa, utilizando equação para fluidos que seguem o modelo de Herschel-Bulkley e utilizando as correlações de Dodge e Metzner. Utilizou-se o viscosímetro VT550, com sensor tipo cilindros coaxiais SV1, para realizar testes de defloculação e floculação utilizando diferentes aditivos reológicos. Os aditivos utilizados foram: hexametáfosfato de sódio, hidroxamato, sulfato de alumínio, poliacrilato de sódio e poliacrilamida 25% aniônica. A programação foi taxa de cisalhamento de 100 s^{-1} , tempo de 20s e temperatura de 32°C . Os defloculantes podem ser utilizados para melhorar o processo de bombeamento e os floculantes podem ser utilizados como auxiliares no processo de sedimentação nos espessadores, auxiliando no processo de separação sólido-líquido. Foram realizadas ainda, análises de viscosidade em polpas com diferentes pH e em amostras passante a 400# Tyler, com o objetivo de avaliar se a granulometria e o pH influenciavam no comportamento dos aditivos. Pelo estudo observou-se que a granulometria e o pH influenciam no comportamento dos aditivos, pois quanto menor a granulometria mais eficiente é a atuação do aditivo e o seu comportamento como floculante ou defloculante está condicionado ao ajuste do pH.

Palavras – chave: aditivos, reologia, rejeitos de bauxita.

ABSTRACT

In the bauxite mining in Paragominas-PA city, tailings are discarded in the processing with 33,5% of solids content and small granulometry with D_{50} below 5 μm . These factors contribute to this suspension basically formed by sílico aluminates, with high concentrations of kaolinite clay, have high viscosity and high initial tension flow. It was performed granulometric analysis and determined the chemical and mineralogical composition of the material. The granulometric analysis was made by wet sieving and the small particles were determined by laser diffraction. The determination of the chemical composition was made by Fluorescence Spectrometry X-ray, identifying considerable amounts of alumina available, 21,28%. The mineralogical composition was determined by X-ray diffraction (XRD), obtaining gibbsite, hematite, quartz and kaolinite. It was performed the determination of the friction factors pulp, using equation to fluids that have Herschel-Bulkley behavior and using the Dodge and Metzner correlations. It was used VT550 viscosimeter, with coaxial cylinder sensorSV1, to make defloculation and flocculation test using different rheological additives. The additives used were: sodium hexametaphosphate, hydroxamate, aluminum sulphate, sodium polyacrylate and 25% anionic polyacrylamide. The trials were realized in shear rate of 100 s^{-1} , time 20s and temperature of 32°C . It was performed also, analysis of viscosity of pulps with different pH and in samples less $38\mu\text{m}$ (400# Tyler), with the objective of evaluate how the particle size and pH influenced in the behavior of additives. The study showed that particle size and pH influence on the behavior of additives, because if the particle size is very small better is the behavior of the additive. The behaviors of the additives as flocculation or defloculation depend of the pH.

Key-words: additives, rheology, bauxite tailings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma beneficiamento da bauxita do minério de Paragominas.	20
Figura 2 - Classificação reológica dos fluidos	21
Figura 3 - Modelo de placas paralelas utilizadas por Newton para explicar a viscosidade de um líquido.	22
Figura 4 - Curva de fluxo para fluido Newtoniano	23
Figura 5 - Curva de fluxo para diferentes tipos de fluido	25
Figura 6 - Comportamento dos fluidos tixotrópicos e reopéticos	26
Figura 7 - Formação de cadeias e camadas de uma suspensão sob a ação de fluxo de cisalhamento.....	31
Figura 8 - Esquema da dupla camada em uma superfície de carga positiva.....	32
Figura 9 - Esquema representativo das forças atuantes na estabilização de suspensões	33
Figura 10 - Energia potencial de interação entre duas partículas (repulsão eletrostática).	34
Figura 11 - Ilustração dos mecanismos de estabilização de suspensões: (a) estabilização eletrostática, (b) estabilização estérica e (c) estabilização eletroestérica.....	36
Figura 12 - Mecanismos de floculação por pontes poliméricas.....	39
Figura 13 - Ligações de polímeros entre as partículas (agregação) e restabilização das partículas coloidais (quebra dos flocos).	39
Figura 14 - Mecanismo de floculação por neutralização de carga.....	40
Figura 15 - influencia da troca de cátion na dupla camada elétrica.....	41
Figura 16 - Viscosímetro viscoteste 550.....	47
Figura 17 – corpo cilíndrico, sensor sv1	47
Figura 18 - Distribuição granulométrica do rejeito da bauxita	51
Figura 19 - Difratograma do rejeito da bauxita.....	53
Figura 20 - Curva de calibração do viscosímetro.	53
Figura 21 - Perfil de escoamento para o fluxo observado e predito pelo modelo de Herschel-Bulkley	54
Figura 22 - Histerese do rejeito.....	55
Figura 23 - Variação da viscosidade aparente com mudanças de pH.....	56
Figura 24 - Curva de defloculação com hexametáfosfato de sódio em pH 6,5.	57
Figura 25 - Curva de defloculação com hexametáfosfato de sódio em pH 6,5 (passante a 400#Tyler).....	58
Figura 26 - Curva de defloculação com hidroxamato em pH 6,5.	59
Figura 27 - Curva de defloculação com hidroxamato em pH 6,5 (Passante a 400#Tyler).	59
Figura 28 - Curva de defloculação com sulfato de alumínio em pH 6,5.	60
Figura 29 - Curva de floculação com sulfato de alumínio em pH 4,5	61
Figura 30 - Curva de floculação com sulfato de alumínio em pH 4,5 (passante a 400#Tyler).62	
Figura 31 - Curvas de defloculações com poliacrilato de sódio em pH 4,5 e 6,5	63
Figura 32 - Curva de floculação com poliacrilato de sódio em pH 8,5	64
Figura 33 - Curva de defloculação com poliacrilato de sódio em pH 6,5 (Passante a 400#Tyler).....	65
Figura 34 - Curva de defloculação com poliacrilamida em pH 6,5 e 8,5.	66
Figura 35 - Curva de floculação com poliacrilamida em pH 4,5.....	66

Figura 36 - Curva de defloculação com poliacrilamida em pH 6,5 (passante a 400#Tyler) ...	67
Figura 37 - Curvas dos fatores de atrito f x Reg	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos empíricos de escoamento de fluidos.	26
Tabela 2 - Tipos de flocculantes.	38
Tabela 3 - Caracterização do rejeito	50
Tabela 4 - Distribuição granulométrica do rejeito	50
Tabela 5 – Caracterização físico-química.	51
Tabela 6 - Caracterização química (Análise de traços).....	52
Tabela 7 - Modelagem para equação de Herschel-Bulkley	54
Tabela 8 - Parâmetros avaliados para os diferentes aditivos utilizados.....	68
Tabela 9 - Parâmetros para o cálculo do fator de atrito	69

NOMENCLATURA

CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DLVO	Metodologia de Análise de Energia de Integração dos Colóides
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
FORTRAN	Fórmula Translation
MPSA	Mineração Paragominas S/A.
MRN	Mineração Rio do Norte
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração

LISTA DE SIMBOLOS

Al_2O_3	Alumina
$Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$	Caulinita
$Al_2O_3.3H_2O$	Bohemita; Diásporo
$Al_2O_3.3H_2O$	Gibbsita
Fe_2O_3	Hematita
SiO_2	Quartzo
τ	Tensão de cisalhamento
τ_0	Tensão limite de escoamento
ρ	Massa específica
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede
$\dot{\gamma}$	Gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento
η	Viscosidade aparente
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
$^{\circ}C$	Temperatura em graus Celsius
cm	centímetro
g/l	gramas por litro
m	metro
g/ton	grama por tonelada
Pa	Pascal
$Pa.s$	Pascal segundo
pH	Potencial de hidrogênio
t	Tempo
T	Temperatura
\tilde{a}	Adimensional na fórmula do fator de atrito
D	Diâmetro de partícula
f	Fator de atrito de Fanning
f_{dm}	Fator de atrito por Dodge e Metzner
k	Índice de consistência do fluido
n	Índice de comportamento do escoamento do fluido
R^2	Fator de correlação
Re	Número de Reynolds
Reg	Número de Reynolds generalizado
Re_{MR}	Número de Reynolds segundo Metzner e Reed
$\#$	Mesh
$Tyler$	Escala granulométrica
u	Velocidade do fluido não perturbado
V	Velocidade de partícula
Y	Tensão limite de escoamento adimensional do fluido
μm	micrômetro
ρ_P	Massa específica da polpa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REVISÃO DA LITERATURA	18
3.1	Bauxita	18
3.1.1	Mineração de bauxita em Paragominas-PA.....	19
3.2	Reologia	21
3.2.1	Classificação reológica de fluidos.....	21
3.2.1.1	<i>Fluidos newtonianos</i>	21
3.2.1.2	<i>Fluidos não newtonianos independentes do tempo</i>	23
3.2.1.3	<i>Fluidos não newtonianos dependentes do tempo</i>	25
3.2.2	Reologia no tratamento de polpas minerais.....	27
3.2.3	Variáveis que afetam a reologia de suspensões.....	29
3.3	Estabilização de suspensões	31
3.3.1	Estabilização eletrostática.....	31
3.3.2	Estabilização estérica.....	35
3.3.3	Estabilização eletroestérica.....	36
3.4	Floculação	37
3.4.1	Mecanismo de floculação.....	38
3.5	Defloculação	40
3.5.1	Mecanismo de defloculação.....	41
3.6	Fator de atrito	42
3.6.1	Fator de atrito para fluidos que seguem o modelo de Herschel-Bulkley.....	42
3.6.2	Fator de atrito segundo correlações de Dodge e Metzner.....	43
4	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1	Teor de sólidos	45
4.2	Potencial hidrogeniônico (pH)	45
4.3	Massa específica da polpa	45
4.4	Análise granulométrica	45
4.5	Composição mineral	46
4.6	Análise química	46
4.7	Estudo reológico	47

4.7.1	Determinação do perfil reológico da polpa.....	48
4.7.2	Ensaio de histerese.....	48
4.7.3	Avaliação da viscosidade em diferentes pH.....	48
4.7.4	Curvas de floculação e defloculação.....	48
4.8	Calculo do fator de atrito	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1	Caracterização do material	50
5.2	Análises reológicas	53
5.2.1	Calibração do viscosímetro.....	53
5.2.2	Perfil reológico da polpa.....	54
5.2.3	Curva de Histerese.....	55
5.2.4	Análise da viscosidade com variações do pH.....	55
5.2.5	Curvas de floculação e defloculação.....	56
5.2.5.1	<i>Hexametáfosfato de sódio</i>	56
5.2.5.2	<i>Hidroxamato</i>	58
5.2.5.3	<i>Sulfato de alumínio</i>	60
5.2.5.4	<i>Poliacrilato de sódio</i>	62
5.2.5.5	<i>Poliacrilamida 25 % aniônica</i>	65
5.3	Fator de atrito	69
6	CONCLUSÕES	71
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXO A - Dados sobre lançamento de rejeitos nas barragens	79

1 INTRODUÇÃO

Os rejeitos da lavagem da bauxita produzidos na mina de Paragominas no estado do Pará tratam-se de argilo-minerais com baixo teor de sólido e baixa granulometria.

As propriedades reológicas de suspensões minerais possuem grande influência nas operações de dimensionamento de equipamentos, transporte, mistura, moagem, flotação, entre outras operações industriais. No caso do transporte e armazenamento de rejeitos é importante compreender como as propriedades do material e parâmetros operacionais podem afetar o fluxo e a sedimentação. A realização de estudos reológicos de suspensões minerais é de suma importância, pois cada minério possui um comportamento reológico diferente, não existindo uma padronização. Isso ocorre porque as propriedades reológicas são afetadas por vários fatores, tais como: forma da partícula, percentagem de sólidos, granulometria, temperatura, pressão, composição química da polpa, interações entre as partículas e com a fase aquosa, entre outros fatores. A caracterização reológica permite a determinação das características de propagação e das condições para o gasto mínimo de energia durante o transporte (SOFRÁ E BOGER, 2002).

Em muitos casos, as propriedades reológicas podem ser modificadas para melhorar o processamento por meio da adição de aditivos químicos. Estes aditivos podem ser orgânicos ou inorgânicos e, geralmente afetam o estado de agregação das partículas ou dispersão. Modificadores inorgânicos atuam principalmente afetando a carga de superfície das partículas minerais e, assim, controlam a magnitude de atração ou repulsão eletrostática entre as partículas. A ação dos aditivos orgânicos (polímeros e surfactantes) é uma combinação de forças eletrostáticas e estérica - sendo esta última relacionada ao peso molecular dos aditivos. Enquanto os polímeros de baixo peso molecular atuam como dispersante (reduzindo a viscosidade), os de alto peso molecular induzem a floculação, aumentando o yield stress (Sharma et al. 2006). A capacidade dos aditivos de modificar as propriedades reológicas representa uma oportunidade para melhorar o desempenho dos processamentos minerais. No caso do rejeito da lavagem da bauxita, os aditivos podem ser utilizados para melhorar o processo de bombeamento ou auxiliar no processo de separação sólido-líquido nos espessadores.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo do trabalho é avaliar a influência de aditivos no comportamento reológico do rejeito da lavagem da bauxita, proveniente do beneficiamento da Mina de Bauxita de Paragominas (MPSA) no estado do Pará.

2.2 Objetivos Específicos

- Fazer a classificação granulométrica do rejeito;
- Determinar a composição química e mineralógica do material;
- Avaliar a influência do pH e da granulometria na ação dos aditivos;
- Obter os fatores de atrito para fluidos com comportamento Herschel-Bulkley e comparar com o modelo proposto por Dodge e Metzner.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Bauxita

A bauxita foi descoberta em 1821 por Berthier, na localidade de LesBaux, no sul da França. É essencialmente produto do intemperismo e lixiviação de uma gama variável de rochas, ocorrendo geralmente em clima tropical ou subtropical, caracterizados por taxas de precipitação pluviométrica elevada (AQUINO et. al., 2006; SAMPAIO et al., 2005).

A bauxita é um composto de minerais que contém diversas concentrações de óxidos de alumínio hidratados, bem como impurezas. Os minérios primários são a gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) que são trihidrato de alumina, boemita ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e diásporo ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que são monohidratos de alumina. As impurezas usualmente presentes são minerais de argilas (principalmente caulinita), óxidos de ferro (hematita, goethita), óxido de titânio, óxido de silício, além de uma considerável variedade de elementos menores como cálcio, sódio, magnésio, fósforo, manganês, vanádio e gálio. Em suma, a bauxita trata-se de minério laterítico, com todas as dificuldades que acompanham este tipo de gênese, tais como presença de argilo-minerais, heterogeneidade da jazida e variação significativa de teores dentro da mesma (AQUINO et al., 2006; SAMPAIO et al., 2005).

A coloração da bauxita é determinada pela proporção dos óxidos de ferro. Normalmente, a bauxita é marrom avermelhada, mas também pode ser branca, marrom clara e amarela, dependendo do tipo e da concentração dos minerais ferrosos presentes. Assim, a bauxita branca contém de 2 a 4% de óxidos de ferro, ao passo que na bauxita vermelha essa proporção atinge 25% (SAMPALIO et al., 2005).

A concentração dos minerais de alumínio presentes na bauxita varia dependendo da localização geográfica do minério. Entretanto a preferida é a bauxita rica em gibbsita, já que ela pode ser refinada a temperaturas de digestão mais baixas do que outros tipos de minerais que contêm alumina. As bauxitas com alto teor de gibbsita ocorrem em grandes depósitos em áreas de clima tropical como Jamaica, Brasil, Austrália, Guiné, Guiana, Suriname e Índia, e são as que apresentam maior interesse comercial. As bauxitas ricas em boemita são encontradas em depósitos europeus (França e Grécia), enquanto que aquelas ricas em diásporos, na China, Hungria e Romênia (PRADO et. al., 2012).

O Brasil é o terceiro maior produtor de minério de Bauxita, com produção de 31 milhões de toneladas em 2011. Este volume significa 14,1 % da produção mundial, de 220 milhões de toneladas. A Austrália é líder em produção, com 30,45 % do total, seguida pela China com 21%. As principais empresas produtoras no Brasil são: MRN (44 % da produção nacional), Norsk (29%); CBA (17%); Alcoa (12%); outros (2%). No Brasil, os principais Estados produtores são: PA (85%), MG (14%) e outros (1%) (IBRAM, 2013).

As reservas mundiais de Bauxita somam 29 bilhões de toneladas. O Brasil possui a 3ª maior reserva, com 3,6 bilhões de toneladas de Bauxita metalúrgica. A maior reserva está na Guiné, seguida por Austrália, Brasil e Vietnã (IBRAM, 2013).

Aproximadamente 98% da Bauxita produzida no Brasil são utilizadas na fabricação de alumina, enquanto o restante é destinado às indústrias de refratários e de produtos químicos.

O consumo interno per capita de Bauxita cresceu 100% nos últimos dez anos no Brasil, mas ainda é muito baixo se comparado ao de outros países: 37 Kg nos EUA, 31 Kg no Japão e 3,9 Kg no Brasil (IBRAM, 2013).

As reservas de bauxita no Brasil são tipicamente de origem supergênica onde a gibbsita, rica em alumina aproveitável, aparece na forma de nódulos envoltos por uma matriz argilosa. As usinas de beneficiamento usualmente produzem um só produto, onde a fração mais grossa do minério é aproveitada e a fração fina é descartada como rejeito (FALCUCCI, 2007).

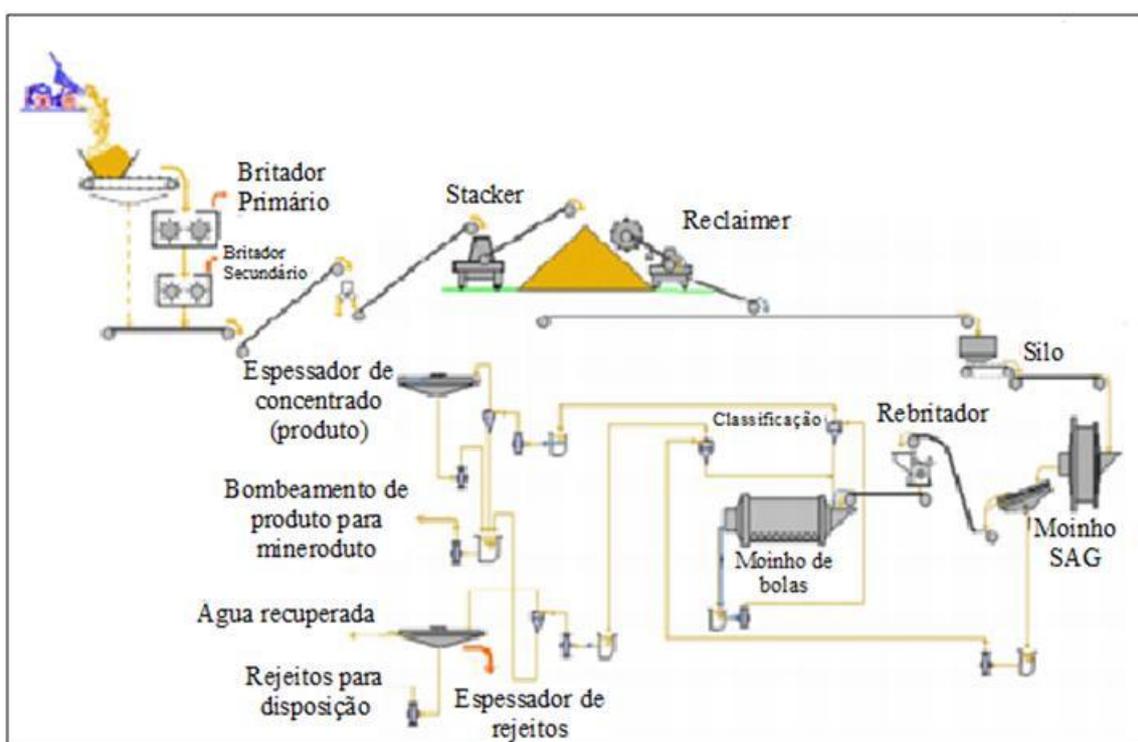
3.1.1 Mineração de bauxita em Paragominas-PA

A Mina de bauxita de Paragominas está localizada a 64 Km do centro urbano da cidade de Paragominas, no nordeste do estado do Pará, e a 350 Km da capital Belém. A mineração em Paragominas começou em 2007. A Hydro é proprietária de 67,9 % da Mineração Paragominas, os outros 32,1 % são de propriedade da companhia brasileira Vale. Paragominas é a terceira maior mina de bauxita no mundo, com capacidade de produção de 9,9 milhões de toneladas anuais (HYDRO, 2013).

Em paragominas, a bauxita ocorre em platôs (terrenos elevados e planos). Alguns, como o chamado Miltônia, a cerca de 60 Km, tem uma camada de bauxita em torno de 2 metros de espessura, coberta com uma camada estéril, principalmente de argila, que tem em média, 11 metros sobre o platô (VALE, 2013).

O beneficiamento da bauxita na mina (Figura 1) consiste nas seguintes etapas: Britagem – Pátio de homogeneização – Transportadores de Correia – Silos – Moagem primária (moinho semi autógeno) – Peneiramento - Classificação - Rebritador – Moagem secundária (moinho de bolas) – Classificação – Espessamento – recuperação da água. No geral, compõe-se de duas linhas paralelas de circuitos iguais, as quais processam um total de 1.900 toneladas por hora de minério (BRUM, 2011; VALE 2013).

Figura 1 - Fluxograma beneficiamento da bauxita do minério de Paragominas.



Fonte: AVELAR, 2011.

O rejeito descartado representa cerca de 25% do material lavrado. A retirada dessa fração, que é considerada resíduo de lavagem, é bombeada com baixa porcentagem de sólido para bacias de contenção, 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. Após a extração do minério é realizada a recomposição da área lavrada através da reposição do solo retirado e posterior reflorestamento com plantio de espécies nativas (BRUM, 2011; QUARESMA, 2009).

O Anexo I ilustra a produção de rejeito da bauxita nos períodos de janeiro a julho de 2013.

3.2 REOLOGIA

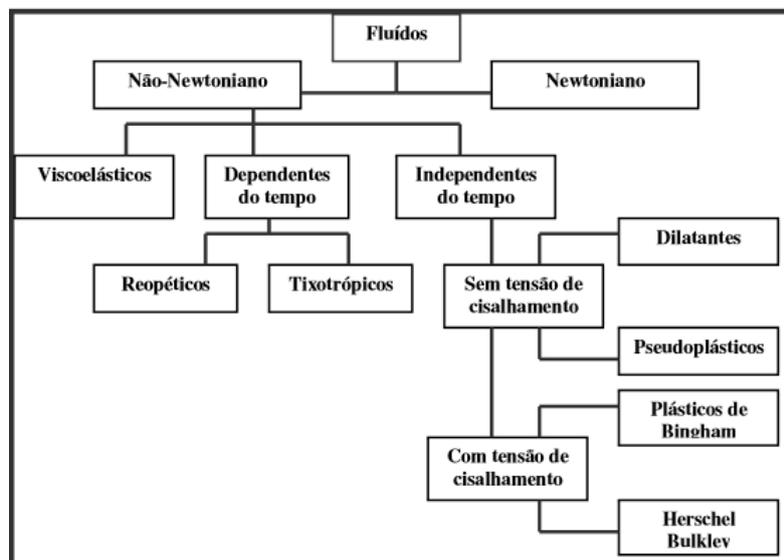
Reologia é o estudo do comportamento deformacional e do fluxo de matéria submetido a tensões, em determinadas condições termodinâmicas ao longo de um intervalo de tempo. Inclui propriedades como: elasticidade, viscosidade e plasticidade.

A viscosidade de um fluido pode ser definida como sendo a propriedade em oferecer uma maior ou menor resistência à deformação, ou seja, a resistência ao cisalhamento, provocada por forças tangenciais. Os líquidos de elevada viscosidade fluem lentamente e os de baixa viscosidade fluem rapidamente (BARNES, 2000).

3.2.1 Classificação reológica de fluidos

A classificação reológica dos fluidos (Figura 2) é de grande importância, pois para resolver problemas reológicos é necessário que seja determinado o tipo de fluido bem como o comportamento do fluxo diante de determinadas condições.

Figura 2 - classificação reológica dos fluidos



Fonte: STEFFE, 1996.

3.2.1.1 Fluidos newtonianos

Nos fluidos newtonianos a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação. Isaac Newton realizou um dos primeiros estudos de escoamento de um fluido. Ele considerou um modelo constituído por duas lâminas paralelas, de mesma área, A , próximas uma da outra, a uma distância, y , entre as quais existe um fluido (Figura 3). Ao se aplicar uma força tangencial F sobre a lâmina superior, mantendo fixa a inferior, cada partícula do fluido percorre uma trajetória paralela às lâminas e com

velocidade constante. No entanto, a velocidade das diversas partículas varia de v , junto à lâmina superior, a zero, junto à lâmina inferior. Newton postulou que a força tangencial F é diretamente proporcional à área A da lâmina e ao gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento dv_x/dy . A relação F/A é denominada tensão de cisalhamento e a relação tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento é denominada viscosidade absoluta ou dinâmica μ . Para fluidos newtonianos a viscosidade é definida como a razão entre a tensão de cisalhamento na direção x , no plano distante y da face superior (τ_{xy}) e o gradiente de velocidade (dv_x/dy), que se desenvolve no reômetro. Logo o perfil de velocidade será definido pela expressão (BARNES et al., 1993):

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (01)$$

Assim,

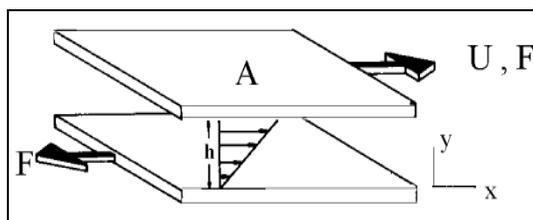
$$\mu = \frac{F/A}{dv_x/dy} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (02)$$

Onde:

τ – tensão de cisalhamento (Pa)

γ – taxa de cisalhamento (1/s)

Figura 3 - Modelo de placas paralelas utilizadas por Newton para explicar a viscosidade de um líquido.



Fonte: BARNES, 1989.

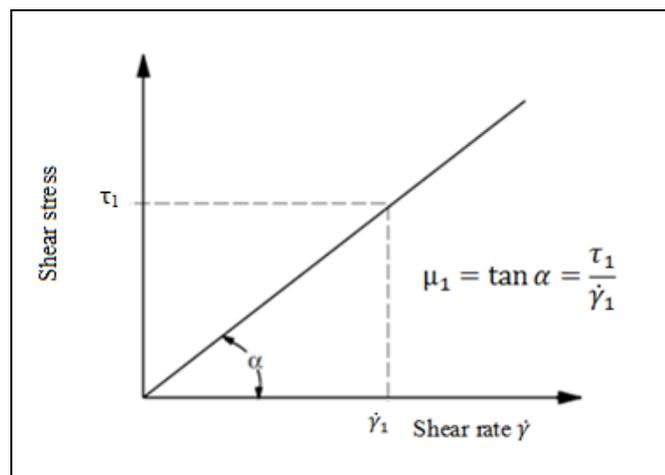
A definição acima corresponde à viscosidade dinâmica ou absoluta. Já a viscosidade cinemática ou difusividade de quantidade de movimento ν é definida como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (03)$$

A viscosidade para fluidos newtonianos é uma propriedade cujo valor independe da taxa ou tensão de cisalhamento (Figura 4), sendo constante a uma dada temperatura. Os fluidos newtonianos podem ser representados por uma reta que passa pela origem e

cuja inclinação (coeficiente angular) é a viscosidade. Eles constituem a maior parte dos líquidos puros, suas misturas simples e os gases. Como exemplos de fluidos newtonianos, podem-se citar os óleos e soluções de polímeros (GOMIDE, 1993; CHAVES, 2002). Num regime laminar, um fluido newtoniano escoar em um tubo como se o fluido fosse constituído por inúmeros cilindros concêntricos com diferentes velocidades, como um telescópio (POSSA 2004).

Figura 4 - Curva de fluxo para fluido Newtoniano



Fonte: SCHARAMM, 1998.

3.2.1.2 Fluidos não newtonianos independentes do tempo

Os fluidos não newtonianos não apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, isto é, os valores da viscosidade mudarão com a variação nos valores da taxa de cisalhamento a uma dada temperatura, portanto não constitui uma propriedade termodinâmica. Esses valores de viscosidade são considerados como viscosidade aparente, podendo aumentar ou diminuir, de acordo com as características de cada fluido (GOMIDE, 1993).

As polpas apresentam comportamento mais complexo, sendo denominados fluidos não newtonianos e exigindo outros parâmetros além da viscosidade para caracterizar seu comportamento (NASCIMENTO, 2008).

Os fluidos não newtonianos podem ser classificados nos seguintes sub-grupos:

1) Fluidos não newtonianos viscoelásticos

São fluidos que apresentam propriedades viscosas e elásticas, retornando parcialmente ao estado original quando a tensão aplicada é retirada (BARNES et al., 1993).

2) Fluidos não newtoniano independente do tempo

Pseudoplásticos - Para alguns fluidos, os valores de viscosidade diminuem com o aumento da taxa de cisalhamento; nesse caso, diz-se que o material possui comportamento pseudoplástico. Este comportamento pode ser encontrado em sistemas coloidais onde as partículas assimétricas, com orientação ao acaso, ficam inicialmente emaranhadas, formando uma rede, dificultando o escoamento. O aumento na taxa de cisalhamento promove à orientação das partículas ou a destruição dos agregados, promovendo à liberação do líquido que estava retido em seu interior, causando consequentemente a queda na viscosidade (ARAÚJO, 2007; POSSA 2004).

Dilatantes— quando a viscosidade aumenta com aumento da taxa de cisalhamento, diz-se que o material possui comportamento dilatante. O comportamento dilatante é encontrado, por exemplo, em certas suspensões com alta percentagem de sólido. Este comportamento deve-se ao efeito da dilatação da polpa, na qual a água adicionada é suficiente apenas para preencher os vazios. A baixas taxas de cisalhamento a suspensão flui normalmente, pois o líquido lubrifica a superfície da partícula, permitindo uma mudança fácil no seu posicionamento. 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 a polpa. A água sendo insuficiente para preencher os novos vazios gerados dá lugar ao aparecimento de forças de tensão superficial, tornando a suspensão mais viscosa (POSSA 2004; SCHRAMM, 1998).

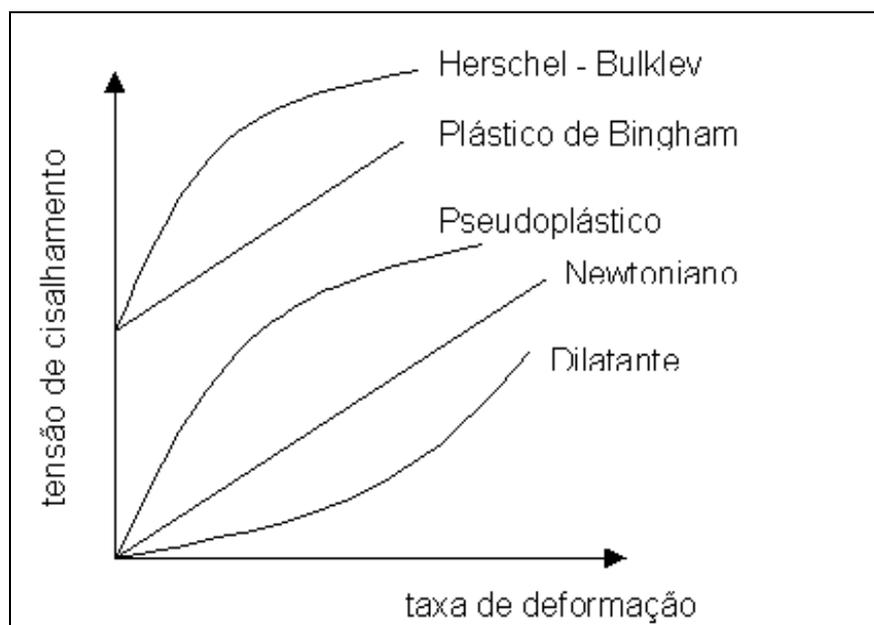
Plásticos - Outros tipos de fluidos não newtonianos são os fluidos plásticos. Esses fluidos necessitam de uma tensão finita, conhecida como tensão de escoamento ou “yield stress”, para que ocorra movimento das partículas. Esse tipo de comportamento é característico de suspensões pseudo-homogêneas de partículas finas ou ultrafinas.

Bingham - são os que necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar. Este tipo de fluido apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, a partir do momento em que se atinge uma tensão de cisalhamento inicial.

Herschel-Bulkley - Este tipo de fluido necessita de uma tensão inicial para começar a escoar. Entretanto, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação não é linear.

A Figura 5 mostra esquematicamente a classificação dos tipos de fluidos independentes do tempo.

Figura 5 - Curva de fluxo para diferentes tipos de fluido



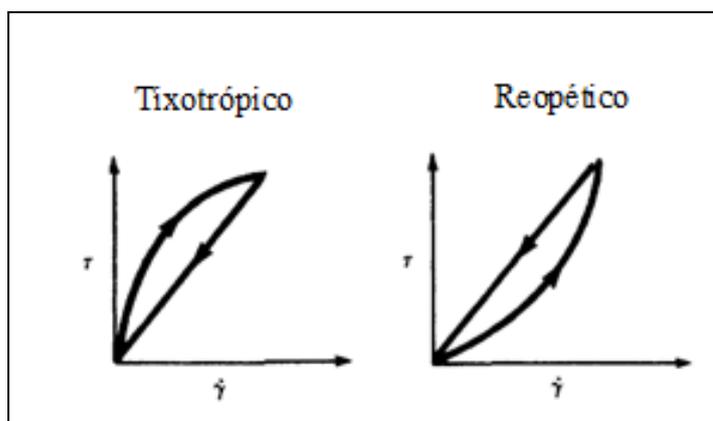
Fonte: FOX et al., 2009.

3.2.1.3 Fluidos não newtonianos dependentes do tempo

Em relação à mudança da viscosidade com o tempo, existem dois tipos de fluidos, o tixotrópico e o reopético (Figura 6). Os fluidos tixotrópicos apresentam uma diminuição da viscosidade com o tempo, quando submetidos a uma taxa de cisalhamento constante. Já os fluidos considerados reopéticos apresentam um aumento da viscosidade com o tempo, retornando a baixa viscosidade inicial quando o fluido fica em repouso. No processamento mineral, esse tipo de comportamento, nas suspensões, é bastante inconveniente, devido às constantes mudanças na viscosidade. Tixotropia é um comportamento muito comum para muitos líquidos enquanto que a reopexia na verdade é muito raro (FERREIRA et al., 2005; SCHRAMM, 1998).

Na tixotropia o processo de recomposição da estrutura é mais lento que o processo de destruição da estrutura inicial. Já os materiais reopéticos apresentam o processo de recomposição da estrutura mais rápido do que o processo de destruição (NASCIMENTO, 2008).

Figura 6 - Comportamento dos fluidos tixotrópicos e reopéticos



Fonte: BRAUN e ROSEN, 2001.

O comportamento não newtoniano é descrito por equações empíricas que, frequentemente, são modificações da Lei de Newton. Na Tabela 1 estão alguns modelos empíricos encontrados na literatura que são empregados na caracterização do escoamento de um fluido (NASCIMENTO, 2008).

Tabela 1 - Modelos empíricos de escoamento de fluidos.

	Modelos
Ostwald de Waele (Lei da Potência)	$\tau = \kappa \cdot \dot{\gamma}^n$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma}$
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + \mu_{ap}^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$
Sisko	$\tau = \eta_\infty \cdot \dot{\gamma} + m \cdot \dot{\gamma}^n$

Onde:

τ tensão de cisalhamento (Pa);

κ índice de consistência do fluido sendo:

$\kappa = \mu$ para fluido newtoniano;

$\kappa = \mu_{ap}/(\dot{\gamma})^{n-1}$ para fluido não-newtoniano ($\mu_{ap} = \tau/\dot{\gamma} = \kappa (\dot{\gamma})^{n-1}$);

$\dot{\gamma}$ taxa de cisalhamento (1/s);

n índice do comportamento do fluido sendo:

$n = 1$ para fluido newtoniano;

$n < 1$ para fluido pseudoplástico;

$n > 1$ para fluido dilatante.

τ_0 tensão limite de escoamento;

η_p viscosidade plástica ou de Bingham;

K e n' parâmetros do modelo Herschel-Bulkley;

m e n parâmetros do modelo Sisko;

η_∞ valor limite que a viscosidade assume em altas taxas de cisalhamento.

3.2.2 Reologia no tratamento de polpas minerais

As polpas, quando bombeadas, apresentam comportamento bastante diferente dos líquidos. Com isso, em análises de polpas é necessário considerar as propriedades do líquido, do sólido e a interação entre ambos. Isso acarreta uma faixa de comportamentos particulares para cada polpa específica, tendo limitações próprias de velocidade e parâmetros reológicos e de escoamento (NASCIMENTO, 2008).

Suspensões diluídas tendem a ter comportamento Newtoniano e, na medida em que a concentração aumenta o efeito das interações entre as partículas vai se tornando relevante nas propriedades reológicas, podendo ocasionar um comportamento não Newtoniano (NASCIMENTO, 2008).

A reologia da polpa desempenha um papel muito importante nos diversos processos de tratamento de minérios, destacando-se, fragmentação, classificação, moagem, concentração, sedimentação e filtração. Todas essas operações, na maioria dos casos, envolvem a realização do processamento na forma de suspensões - misturas de minério com uma fase líquida, normalmente a água. Logo, essas operações serão influenciadas pela resistência dessas suspensões em se deformar ou fluir, quando submetidas à força de cisalhamento ou pressão, ou seja, a viscosidade da suspensão influenciará nas etapas de processamento. A viscosidade atua significativamente na velocidade de sedimentação das partículas, sendo esta dependência mais fortemente verificada à medida que diminui o tamanho da partícula. A reologia tem participação também no transporte de rejeitos e de concentrados ao longo de dutos não só na usina de beneficiamento, como também em minerodutos (FERREIRA et. al. 2005; POSSA e LIMA, 2000).

O conhecimento da viscosidade de soluções é um fator de fundamental importância para os cálculos de engenharia que envolvem a seleção de equipamentos e o dimensionamento de bombas e tubulações, assim como para a implementação de um efetivo controle dos processos. A influência da reologia não é bem compreendida e, em

vista disso, ela foi, no passado, pouco avaliada pelos pesquisadores da área de processamento mineral. Mas, recentemente, diversos estudos têm sido publicados relacionando as variáveis reológicas das suspensões de minérios com a eficiência das etapas de processamento mineral, em especial na classificação e moagem. Uma das principais razões para a não utilização de medidas reológicas na análise e otimização de projetos é a dificuldade de estudar a reologia de suspensões instáveis, que ocorrem em grande parte dos processos de beneficiamento de minérios, aliada à falta de normas para a medida da viscosidade (FERREIRA et. al. 2005; POSSA e LIMA, 2000).

Existem diferentes fatores que influenciam na viscosidade de polpas como, por exemplo, a percentagem de sólidos, distribuição de tamanhos das partículas, o ambiente químico e a temperatura das polpas (POSSA e LIMA, 2000).

A tensão limite de escoamento é uma propriedade reológica que tem grande impacto no processo de bombeamento de polpas. A existência de τ_0 tem relação direta com a estabilidade da suspensão quanto à sedimentação das partículas, tanto que este parâmetro pode ser manipulado (aumentado) visando retardar a sedimentação das partículas no caso de uma parada do bombeamento, evitando entupimentos indesejáveis (FERREIRA et al., 2005).

Nguyen e Boger (1998) comentam que uma polpa com elevada tensão limite de escoamento (τ_0) apresenta uma maior sobrecarga para o motor da bomba no início do processo de bombeamento, entretanto pode ser bombeada por longas distâncias num mineroduto, sem que ocorram problemas de deposição de sólidos na tubulação, pois o fluido pode ser tixotrópico ou até mesmo pseudoplástico.

Existe uma tendência de aumento exponencial de τ_0 com a concentração para diversas polpas minerais. Isso implica na existência de níveis críticos de concentração que, se ultrapassados mesmo por pequenos incrementos, pode até inviabilizar a partida da bomba. Desta forma, o início do bombeamento de um fluido que apresenta τ_0 é uma operação que requer atenção, pois o escoamento só ocorrerá se a pressão gerada pela bomba ocasionar numa taxa de cisalhamento igual ou superior a τ_0 , permitindo o transporte e evitando a deposição de sólidos (SOFRÁ e BOGER, 2002).

De um modo geral, as propriedades reológicas mais importantes no processamento de suspensões minerais são a viscosidade e a tensão limite de escoamento. Estas propriedades têm impacto direto no projeto de equipamentos, na eficiência e no consumo energético de diversas operações industriais, tais como a

moagem a úmido de minérios e o transporte de polpas por minero dutos (NASCIMENTO, 2008).

3.2.3 Variáveis que afetam a reologia de suspensões

As interações entre as partículas microscópicas são regidas por diferentes forças, conseqüentemente, o comportamento macroscópico de suspensões minerais é influenciado pelas interações microscópicas entre as partículas (JOHNSON et al., 2000; FERREIRA et al., 2005).

De acordo com Scharram (1998), a viscosidade é influenciada por seis parâmetros: depende das propriedades físico-químicas da substância, por exemplo, se o líquido é água, óleo, mel, etc., depende da temperatura e da pressão da substância. Há ainda fluidos que são influenciados pelo tempo. O parâmetro taxa de cisalhamento é um fator decisivo que influencia na viscosidade de muitos líquidos, no qual aumentando a taxa de cisalhamento pode aumentar ou diminuir a viscosidade. Existem ainda os fluidos que são influenciados por campo elétrico, essas suspensões contêm partículas dielétricas finamente dispersas tais como alumínio, silicatos e líquidos eletro-condutores tais como água que podem ser polarizadas num campo elétrico. Estes fluidos eletroviscosos podem ter sua viscosidade alterada instantaneamente e reversivelmente de baixa para uma alta viscosidade.

Nascimento (2008) ressalta que a viscosidade tende a diminuir com o aumento da temperatura e aumentar com o aumento da pressão, contudo, essa variação pode ser desprezível para alterações pequenas de temperatura e pressão. Porém a presença de aditivos e a perda de água ou solvente durante a análise, para o caso de aquecimento, podem inverter essa tendência. No caso das suspensões, a viscosidade é sensível à variação da concentração, ao tamanho e distribuição de tamanhos das partículas, a forma e rugosidade das partículas e a qualquer outro fator que modifique o nível de agregação das partículas, tais como a presença de sais, agentes dispersantes ou mudança de pH, ou seja, depende das condições físico-químicas da polpa. Essas variáveis influenciam no surgimento de três forças que são: interação hidrodinâmica, forças entre partículas e difusão browniana.

As forças hidrodinâmicas derivam do movimento relativo entre as partículas no fluido circundante e predominam no caso do escoamento de suspensões de partículas não coloidais (CARNEIRO et al., 2009).

Na interação hidrodinâmica de um sistema água-partícula, o movimento de uma partícula na água é o resultado de um conjunto de forças que agem em diferentes sentidos tais como: força externa aplicada, força peso, empuxo e a força de resistência oferecida pelo fluido à partícula em movimento. Esta última força depende principalmente: da velocidade da partícula, da sua forma, da quantidade de turbulência no seio do fluido e da interação com outras partículas adjacentes ou com as paredes do equipamento que as contém (POSSA, 2004).

As forças entre partículas, geralmente, surgem em sistemas coloidais. Nesses sistemas ocorrem interações ocasionadas por forças atrativas e repulsivas. Nos casos mais simples a força de interação inter-partícula é regulada pela soma das forças de atração de Van der Waals e a repulsão origina-se pela força de dupla camada elétrica, tal como definido pela teoria DLVO (DERJAGUIN e LANDAU, 1941; VERWEY e OVERBEEK, 1948). Em sistemas mais complexos existem ainda outras forças que são eletrostáticas, hidrofóbicas, de hidratação, estéricas, entre outras (CARNEIRO et al. 2009; JOHNSON et al. 2000; Barnes et al. 1993). Mais recentemente foi criada a teoria X-DLVO que é a teoria DLVO estendida, que leva em consideração outro tipo importante de energia de interação, denominada forças estruturais Churaev (1991). Entretanto, a origem destas forças estruturais ainda não está bem estabelecida (POSSA, 2004).

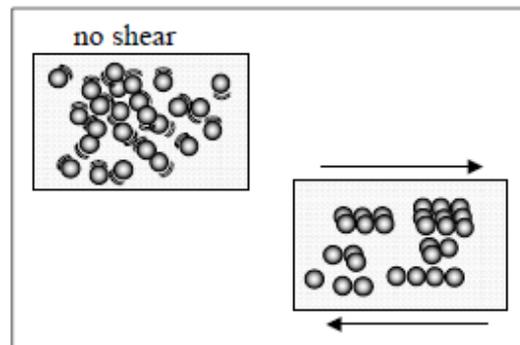
A teoria DLVO explica o comportamento de dispersão / flocculação de partículas finas em solução aquosa. No entanto, esta teoria não pode ser aplicada às partículas em solventes orgânicos, porque os fatores que influenciam na dispersão são muito complicados (SHIBATA et al., 2002).

As forças brownianas ocasionam o movimento de rotação e translação das partículas, sendo relevantes em partículas com tamanho inferior a $1\mu\text{m}$ (BARNES et al., 1993).

O movimento browniano ocorre em partículas dispersas aleatoriamente ao longo da fase contínua devido à ação perpétua do movimento browniano. Essas partículas apresentam uma tendência em migrar de uma região mais concentrada para outra, de baixa concentração, sendo uma consequência direta do movimento Browniano, com trajetórias irregulares, em ziguezague, devido a colisões ao acaso com as moléculas do meio de suspensão, com outras partículas ou com as paredes do equipamento (BARNES, 2000; POSSA, 2004).

Altas taxas de cisalhamento induzem as partículas a se moverem a partir do conjunto de arranjo aleatório para uma situação em que eles começam a se formar em cadeias e camadas (Figura 7), diminuindo conseqüentemente a viscosidade (BARNES, 2000).

Figura 7 - Formação de cadeias e camadas de uma suspensão sob a ação de fluxo de cisalhamento.



Fonte: BARNES, 2000.

3.3 Estabilização de suspensões

A estabilidade de uma suspensão é atingida quando as forças repulsivas são suficientemente grandes para superar as forças de atração (HOTZA, 1997).

A força de atração está sempre presente, devido à tendência das partículas de estarem em contato umas com as outras através da força de Van der Waals, que é função basicamente da natureza da partícula e do solvente, de suas propriedades dielétricas e da distância entre as partículas (HOTZA, 1997; CESARANO e AKSAY, 1988; LINS E ADAMIAN, 2000).

A interação repulsiva é fundamentalmente produzida por dois mecanismos diferentes ou pela ação conjunta de ambos. Um é a repulsão eletrostática, outro mecanismo é a estabilização estérica, e a ação conjunta da estabilização eletrostática e a estérica é denominada de estabilização eletroestérica (HOTZA, 1997; CESARANO e AKSAY, 1988).

Os mecanismos de estabilização eletrostática, estérica e eletroestérica são mais efetivos em suspensões coloidais.

3.3.1 Estabilização eletrostática

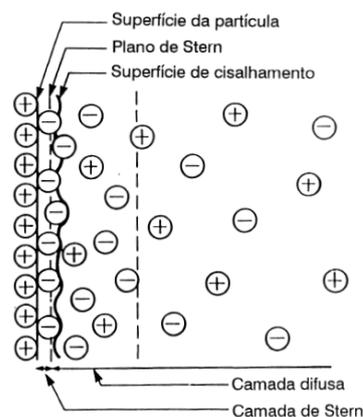
A estabilização eletrostática é conseqüência da presença de dupla camada de íons adsorvidos em partículas carregadas eletricamente, dispersas em um líquido polar (água

ou solvente orgânico) (HOTZA, 1997). O efeito resultante da interação entre as duplas camadas elétricas de partículas com cargas superficiais idênticas é a repulsão, e esta depende da distância entre as partículas, da magnitude da carga ou potencial de superfície e, em muitos casos, do valor do pH do solvente. As interações elétricas são também sensíveis à natureza e à concentração do eletrólito, entretanto em determinadas cargas superficiais, independem da natureza da partícula (LINS E ADAMIAN, 2000).

A dupla camada consiste de uma camada fixa de íons de carga contrária à da superfície da partícula (contra íons), formando a camada de Stern e de uma camada móvel de íons (camada difusa), como mostrado na Figura 8 (HOTZA, 1997).

A quantidade de contra-íons adsorvidos na superfície da partícula é limitada, porém a interação é muito eficiente. Estes contra-íons não são capazes de neutralizar totalmente a carga superficial da partícula, apenas reduzindo linearmente o potencial elétrico de superfície ou potencial de Stern ao longo da camada difusa. As forças de repulsão necessárias para evitar a aglomeração das partículas, dependem diretamente do potencial elétrico ou potencial de Stern ao redor destas partículas, o que faz com que a queda do potencial de Stern, no interior da camada difusa, seja influenciado pelo tipo de íon adsorvido (CERUTTI, 2005).

Figura 8 - Esquema da dupla camada em uma superfície de carga positiva



Fonte: SHAW 1992, apud HOTZA, 1997.

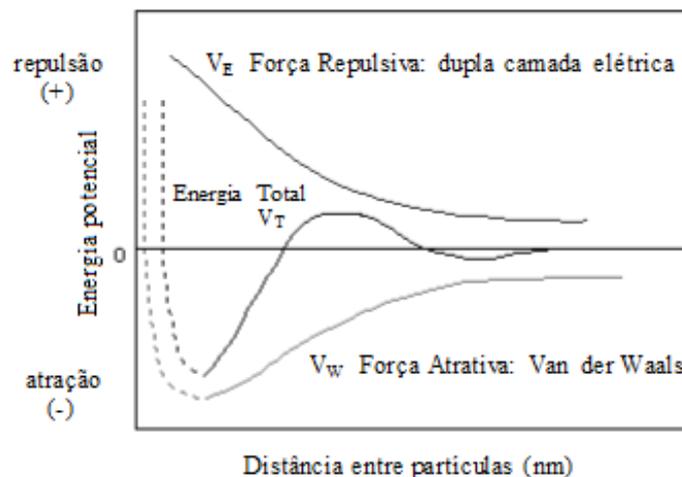
Quando duas partículas se aproximam, a presença da dupla camada elétrica faz com que ocorra uma força repulsiva, que dependendo das condições da suspensão, pode superar as forças de atração de Van der Waals, estabilizando a suspensão. As interações entre as forças de Van der Waals e as elétricas são virtualmente aditivas. Quando se

admite que apenas essas duas forças determinam o grau de estabilidade dos colóides, tem-se a conhecida teoria DLVO - em referência a Derjaguin-Landau e Verwey-Overbeek, duplas de cientistas russos e holandeses, respectivamente, que nos anos 40 desenvolveram independentemente essa teoria (LINS e ADAMIAN, 2000).

Curvas de energia potencial como função da separação entre as partículas, d , têm sido quantificadas para a repulsão eletrostática pela teoria DLVO. O procedimento comum consiste em calcular a energia livre total de interação (V_T) em função da distância de separação (d) entre as partículas. Uma suspensão é estável termodinamicamente quando o valor da energia potencial de interação entre as partículas, V_T , é negativo. Pela teoria DLVO, a energia total V_T (Figura 9) é igual à adição da energia atrativa devida às forças de Van der Waals (V_W) com a energia repulsiva decorrente da interação entre as duplas camadas elétricas (V_E) (LINS e ADAMIAN, 2000; HOTZA, 1997).

$$V_T = V_W + V_E$$

Figura 9 - Esquema representativo das forças atuantes na estabilização de suspensões



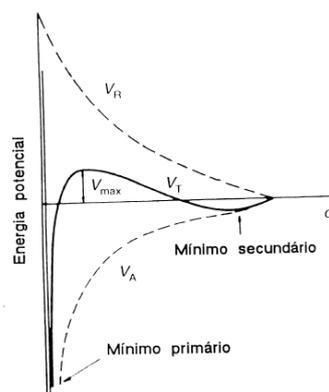
Fonte: LINS e ADAMIAN, 2000.

A Figura 10 mostra a interação de duas partículas de acordo com a teoria DLVO para o mecanismo de estabilização eletrostática. À medida que as partículas se aproximam é atingido um ponto de metaestabilidade, correspondente a um mínimo secundário. Nesse estado, as partículas se mantêm separadas por um filme líquido a uma distância relativamente grande, ou seja, não há floculação. Pode também ocorrer o

mínimo secundário com uma agregação (atração) mais fraca, facilmente desfeita por uma agitação moderada, causando a redispersão do sistema (HOTZA, 1997).

As partículas podem, no entanto, se vencida uma barreira de energia, V_{max} , atingir um estado termodinamicamente mais estável, correspondente a um mínimo primário. Nesse ponto, a distância entre as partículas é a menor possível, o que significa na prática o fenômeno da floculação. Normalmente, a agregação é irreversível. A profundidade do mínimo primário é determinada pela intensidade e alcance da repulsão de Born (ou "hard core repulsion") que as partículas experimentam quando suas nuvens eletrônicas virtualmente se tocam. Na prática, essa distância é difícil de ser definida, sendo comum negligenciar essa repulsão nos cálculos da energia de interação entre partículas. A barreira de energia deve, portanto, ser suficientemente alta a fim de manter a suspensão num estado de relativa estabilidade eletrostática, no ponto de mínimo secundário. Fatores controláveis que influenciam esse processo de estabilização são o valor do potencial zeta, a concentração de íons na solução e o tamanho de partícula. Além disso, o mínimo secundário ocorre geralmente em soluções eletrolíticas concentradas e/ou com partículas relativamente mais grossas (HOTZA, 1997, MORENO, 1992).

Figura 10 - Energia potencial de interação entre duas partículas (repulsão eletrostática).



Fonte: MORENO,1992.

O mecanismo de estabilização eletrostática é fortemente influenciado pela composição química e pH do meio. Dependendo do pH, a superfície das partículas pode apresentar carga negativa, positiva e nenhuma carga. O pH onde a densidade de carga total é zero e chamado ponto de carga zero (PCZ). No caso de solos, se o pH do solo está acima do ponto de carga zero ele possui uma densidade de carga superficial

negativa e possui afinidade por cátions e se o pH for abaixo do PCZ ele possui afinidade por ânions (APPEL et al., 2003).

O pH do meio possui importância na dispersão de argilas que apresentam cargas dependentes de pH (MAURI et al., 2011), como é o caso da caulinita, goetita, hematita e gibbsita (FONTES et al., 2001). Esses são os principais minerais do solo que apresentam cargas variáveis, que são aquelas originárias da adsorção de íons na superfície dos colóides. Apresentam uma dupla camada elétrica completamente reversível e a carga líquida é determinada pelo íon que é adsorvido em excesso. Como principais íons determinantes de potencial na solução do solo são H^+ e OH^- , esses colóides são também chamados de colóides de carga dependente do pH (FONTES et al., 2001; RAIJ, 1973).

Os colóides de carga variável apresentam a possibilidade da hidroxilação da sua superfície, sendo uma característica essencial à formação e desenvolvimento de cargas. Na presença de água, os íons Si, Al ou Fe, por exemplo, localizados na superfície de minerais como caulinita, hematita, goethita e gibbsita, completam sua camada de coordenação com íons hidroxila de modo que toda superfície se torna hidroxilada. Na camada hidroxilada, cargas positivas ou negativas podem ser criadas por protonação ou desprotonação do grupamento hidroxila (FONTES et al., 2001).

A carga e o potencial da superfície variam com a concentração de H^+ e OH^- , íons determinantes de potencial (IDP). Para uma mesma concentração de H^+ ou OH^- , o potencial se mantém constante, mas a carga de superfície varia com a concentração e valência dos eletrólitos (força iônica) da solução (FONTES et al., 2001).

3.3.2 Estabilização estérica

A estabilização estérica é consequência da interação física de substâncias poliméricas de cadeia longa, que são adsorvidas por partículas dispersas em uma suspensão. Com a aproximação das partículas, as camadas adsorvidas se interpenetram e as cadeias poliméricas tendem a se ordenar paralelamente. Desta maneira, no equilíbrio termodinâmico, as partículas permanecem isoladas (HOTZA, 1997).

O sucesso da estabilização estérica depende das características superficiais da partícula, da configuração do polímero adsorvido e da espessura da camada adsorvida (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

As forças atuantes em suspensões aquosas compreendem as forças de Van der Waals (forças de atração) e as forças de repulsão eletrostática geradas pela carga elétrica

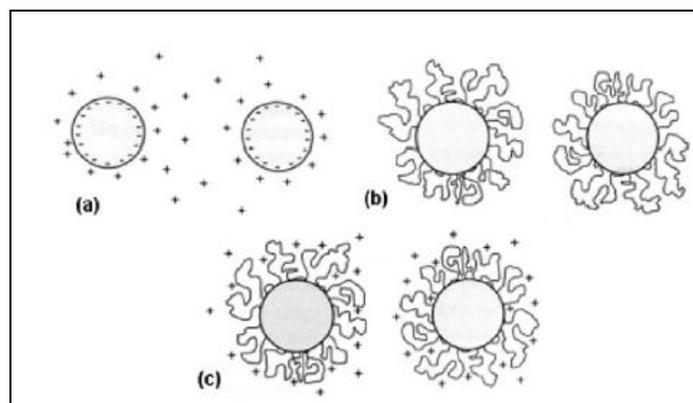
presente na superfície das partículas. Porém, com o uso de um aditivo, as forças de repulsão eletrostática são aumentadas e, com isso, forças de repulsão estérica são geradas, realçando o aumento de densidade local causado pela sobreposição de camadas de aditivo adsorvido. Assim, a força atuante resultante entre as partículas em coexistência com um aditivo é representada pela somatória de todas as forças presentes, isto é, pela somatória das forças de atração de van der Waals e das forças de repulsão eletrostática e estérica. Além disso, a força atuante entre as partículas depende da distância entre elas, que por sua vez está relacionada com a energia de interação entre as partículas (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

3.3.3 Estabilização eletroestérica

A estabilização eletroestérica pode resultar numa melhor estabilização, pois é uma combinação da repulsão eletrostática da dupla camada elétrica e da repulsão estérica. Sendo que a repulsão estérica apresentará maior magnitude se o grau de dissociação do polieletrólito for alto, a camada de aditivo adsorvido for espessa e as cadeias de polímero estiverem projetando-se na solução. Porém existe sempre uma contribuição eletrostática, uma vez que a adsorção de um aditivo normalmente induz a um conjunto de cargas na superfície das partículas. As forças de repulsão eletrostática são determinadas medindo-se o potencial zeta de uma suspensão diluída, enquanto as forças de repulsão estérica são calculadas subtraindo-se a força de repulsão eletrostática da força atuante entre as superfícies das partículas (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

A Figura 11 mostra o comportamento dos mecanismos de estabilização eletrostática, estérica e eletroestérica.

Figura 11 - Ilustração dos mecanismos de estabilização de suspensões: (a) estabilização eletrostática, (b) estabilização estérica e (c) estabilização eletroestérica.



Fonte: OLIVEIRA 2000, apud CASTRO e PANDOLFELLI, 2009

3.4 Floculação

Os principais parâmetros que controlam a eficiência do mecanismo de floculação são: composição química, a agitação do sistema (cisalhamento nos flocos); a concentração de sólidos; o tipo, o peso molecular e a concentração do floculante; o pH e a temperatura do meio (OLIVEIRA e RUBIO, 2011).

É necessário aplicar uma agitação que possibilite o contato adequado entre as partículas evitando a sedimentação e a ruptura dos flocos gerados. A concentração de sólidos influencia na probabilidade de colisões entre as partículas, sendo que alta concentração requer um tempo menor para a ocorrência de colisões entre as partículas e apresenta maior facilidade para a formação de flocos (OLIVEIRA e RUBIO, 2011).

O peso molecular, o tipo e estrutura do polímero governam o desempenho do processo, principalmente no que se refere à aparência do floco e à taxa de sedimentação. Para que a floculação seja eficiente, sugere-se que o tamanho do polímero seja superior à espessura da dupla camada elétrica, o que é mais comum para polímeros de alto peso molecular. Cabe ressaltar que polímeros com peso molecular acima de 10^7 tornam o processo de preparação de solução muito difícil e, portanto, sua seleção deve ser evitada (OLIVEIRA e LUZ, 2001).

A floculação está diretamente relacionada às propriedades físico da suspensão que dependem das interações entre a superfície das partículas e as moléculas do solvente e, tais interações variam com a polaridade do solvente e o caráter da superfície das partículas. Dessa forma, a variação do pH da suspensão é de grande importância para a modificação das cargas superficiais das partículas em suspensão, interferindo também na solubilidade dos floculantes formação de distintas espécies dos solutos (OLIVEIRA e RUBIO 2011).

Elevações na temperatura, normalmente, exercem influência sobre a floculação, aumentando as taxas de difusão do floculante e de colisão das partículas. Existem ainda, polímeros termo sensíveis que são solúveis em baixas temperaturas e insolúveis em altas temperaturas (OLIVEIRA e RUBIO 2011; SAKOHARA et al. 2002).

A concentração do floculante, ou a quantidade ótima de polímero a ser adicionada depende, principalmente, do peso molecular e do caráter iônico do polímero. Sendo que a utilização de concentrações acima da ótima estabelecida não ocasiona um aumento na eficiência, pois o excesso de polímero adsorvido torna as partículas estericamente

dispersas (mecanismo de estericidade) (OLIVEIRA e RUBIO 2011; SHARMA et al., 2006).

São diversos os tipos de floculantes usados em variadas etapas industriais. A Tabela 2 apresenta alguns exemplos de floculantes e sua utilização.

Tabela 2 - Tipos de floculantes.

Floculantes	Usos	Referências
	iônicas e aniônicas são amplamente	
Poliacrilamida	usadas em aplicações no setor mineral	Dias et al., 2004
Sulfato de alumínio	Tratamento de água potável	Constantino et al., 2002
Aluminato de sódio	Tratamento de água potável e industrial	Constantino et al., 2002
- Poliacrilatos		
- Copolímeros de poliacrilatos	floculação de partículas do resíduo	Góis et al. 2003
- Poliacrilamidas	Bayer	
- Copolímeros polihidroxamatados		

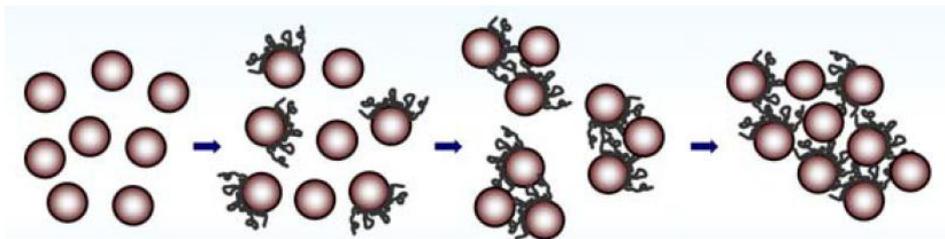
3.4.1 Mecanismo de floculação

A floculação realizada através da utilização de polímeros ocorre quando segmentos de cadeias de polímeros adsorvem sobre mais de uma partícula, ligando assim as partículas em conjunto. Neste mecanismo, os polímeros se adsorvem na interface partícula/solução, via pontes de hidrogênio, forças hidrofóbicas, interações químicas e/ou atração eletrostática, e formam flocos (SHARMA et al., 2006).

Mecanismo com formação de pontes

Os polímeros atuam de forma a anexar partículas vizinhas através de laços e caudas estendidos na solução, atuando como uma ponte (Figura 12). O mecanismo com formação de pontes ocorre com polímeros de peso molecular elevado e não requer uma carga oposta às partículas (DIAS et al., 2004).

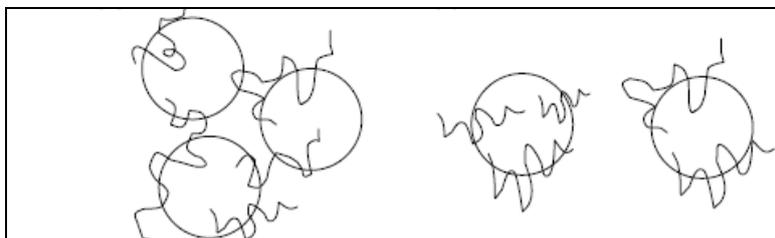
Figura 12 - Mecanismos de floculação por pontes poliméricas



Fonte: NASCIMENTO e RUBIO, 2011.

Uma ligação eficaz requer que os polímeros adsorvidos se estendam longe o suficiente da superfície da partícula para se anexar a outras partículas e também que alguma superfície livre esteja disponível para a adsorção dos segmentos prolongados. Se polímero em excesso é adicionado e adsorvido, as partículas são restabilizadas por superfície de saturação e podem ser estabilizada estericamente, como mostrado na Figura 13 (SHARMA et al., 2006).

Figura 13 - Ligações de polímeros entre as partículas (agregação) e restabilização das partículas coloidais (quebra dos flocos).



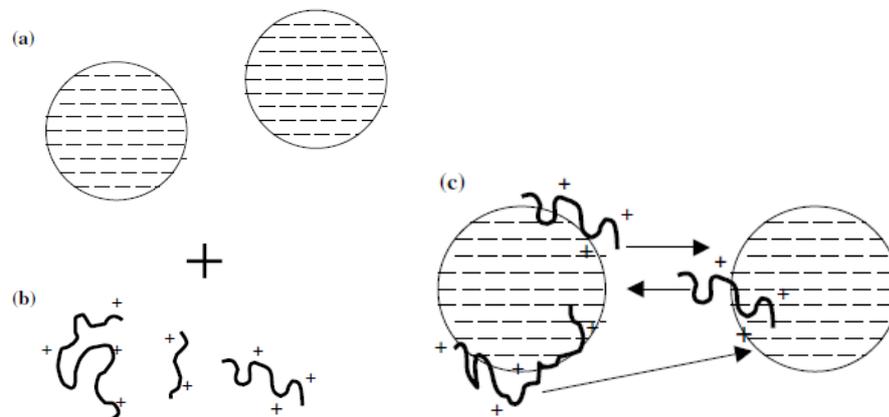
Fonte: SHARMA et al., 2006.

O comprimento da cadeia de polímero é crucial para que ocorram as ligações. Uma cadeia linear de polímero é mais eficaz do que uma cadeia ramificada. A cadeia mais longa (alto peso molecular) tem maiores chances de interagir com mais do que uma partícula (SHARMA et al., 2006).

Mecanismo de neutralização ou adsorção patch

O segundo tipo de floculação é definido como o modelo patch. Nesse modelo um polímero altamente catiônico é adsorvido sobre a superfície das partículas negativas em uma conformação plana conforme mostra a Figura 14 (SHARMA et al., 2006).

Figura 14 - Mecanismo de floculação por neutralização de carga.



Fonte: SHARMA et al., 2006.

Isto promove a floculação por redução das cargas negativas sobre a partícula, que reduz a repulsão entre as partículas. Este efeito é chamado de neutralização de cargas e está associada com a mobilidade eletroforética reduzida. O mecanismo com neutralização de carga ocorre com polímeros de baixo peso molecular, densidade de carga elevada e com cargas contrárias às partículas (DIAS et al., 2004).

3.5 Defloculação

O objetivo dos defloculantes é aumentar a distância entre as partículas de uma suspensão inibindo a sua aglomeração. Uma vez que a força de atração é influenciada pelas propriedades características como composição química, pH, relações entre soluto e solvente, é necessário adicionar quantidades variáveis ou combinar os mecanismos de ação dos defloculantes, a fim de levar a defloculação ótima para cada composição.

Uma suspensão é considerada estável quando as forças de repulsão entre as partículas dominam o sistema partículas e solução. O controle do pH auxilia na defloculação do sistema de partículas óxidas, tornando alguns de caráter extremamente ácido ou básico para poder manter o sistema disperso. Os valores de pH influenciam o potencial de dissociação dos íons do dispersante, assim como a densidade de carga da superfície das partículas, influenciando na quantidade de moléculas adsorvidas à superfície das partículas, e conseqüentemente na eficiência do mecanismo de defloculação e movimentação eletroforética (GELFUSO et al., 2003).

3.5.1 Mecanismo de defloculação

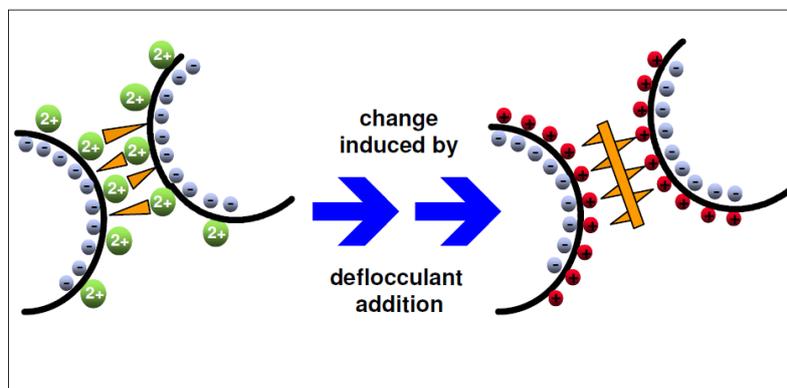
De acordo com Rodrigues Neto et al. (2002), para o caso da argila existem basicamente três mecanismos que atuam individualmente ou em combinação, dependendo do defloculante utilizado:

- Ação eletrostática com troca catiônica e, deste modo, um efeito sobre a espessura da dupla camada elétrica das partículas das matérias-primas;
- repulsão estérica pela introdução de grupos funcionais, que atuam como espaçadores entre as partículas de matérias-primas;
- Captura de cátions.

Ação eletrostática

Em uma suspensão as duplas camadas elétricas são finas, com a presença de cátions bivalentes. A fim de ampliar a dupla camada elétrica e, conseqüentemente, para aumentar o efeito de repulsão, é necessário substituir os cátions bivalentes com os monovalentes. A Figura 15 ilustra este processo.

Figura 15 - influencia da troca de cátion na dupla camada elétrica



Fonte: Zschimmer& Schwarz.

A adição de sal alcalino em uma suspensão de argila pode produzir defloculação. Um sal monovalente como um íon metal alcalino do tipo Na^+ e Li^+ aumenta o potencial zeta de partículas de argila em suspensão. Íons Na^+ adsorvem nas partículas de argila formando uma dupla camada elétrica espessa. Desse modo, as forças de repulsão entre as partículas aumentam, causando a defloculação. Esse mecanismo predomina desde que a estabilização da suspensão seja produzida pela alteração do potencial elétrico da

suspensão. A introdução desses íons diretamente aumenta o pH da suspensão (RODRIGUES NETO et al. 2002).

Repulsão estérica

A repulsão estérica é provocada pela utilização de dispersantes com grupos funcionais que agem como espaçadores entre as partículas de matérias-primas.

A deposição do dispersante sobre a superfície das partículas de matéria-prima produz um efeito repulsivo que leva a uma distribuição uniforme das partículas finas na dispersão em que todas as partículas têm idealmente a mesma distância entre as partículas vizinhas.

A adição de polímeros com grupos funcionais interagem com a superfície da partícula através de compensação de carga. O grupo carregado positivamente oriundo do aditivo interage com a superfície da partícula carregada negativamente. Uma vez que as cadeias de polímeros adicionados contêm grupos funcionais com cargas positivas e negativas, os efeitos atrativos e repulsivos são controlados. Deste modo, existe uma compensação à tendência de aglomeração.

Captura de cátions

Esse mecanismo de estabilização envolve a captura de cátion flocculantes oriundos do líquido ou da estrutura do mineral. Existem certos tipos de substâncias, os quelantes, que tem a capacidade de capturar esses cátions, aumentando o potencial zeta (RODRIGUES NETO et al., 2002).

3.6 Fator de atrito

3.6.1 Fator de atrito para fluidos que seguem o modelo de Herschel-Bulkley

Os trabalhos desenvolvidos por Santos (2006), Quaresma (2007) e Oliveira (2007) obtiveram uma correlação para o cálculo do fator de atrito para fluidos que seguem o modelo de Herschel-Bulkley, mostrada abaixo.

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{f}{2} - \frac{Y^{n/2-n}}{Re^{2/2-n}}}} = \frac{1}{k} \ln \left[Re^{\frac{1}{n}} \frac{(1 - \tilde{\alpha})}{2} \left(\sqrt{\frac{f}{2} - \frac{Y^{n/2-n}}{Re^{2/2-n}}} \right)^{2/2-n} \right] + \frac{(\tilde{\alpha} - 1)(\tilde{\alpha} + 3)}{2k} + C \quad (04)$$

Sendo:

$$\tilde{\alpha} = \frac{2Y^{n/2-n}}{fRe_g^{2/2-n}} \quad (05) \quad Y = \frac{D^2 \rho \tau_0^{2-\frac{n}{n}}}{k^{\frac{n}{n}}} \quad (06)$$

$$f = \frac{2\tau_w}{\rho u_m^2} \quad (07) \quad Re = \frac{\rho u_m^{2-n} D^n}{k} \quad (08)$$

A equação 04 pode ser resolvida numericamente para o fator de atrito de Fanning, admitindo-se os fatores de k e $C(x)$ equivalentes aos resultados experimentais de Kármán-Nikuradse (1993), sendo 0,41 e 5,55 respectivamente.

3.6.2 Fator de atrito segundo correlações de Dodge e Metzner

Dentre as correlações para a predição do coeficiente de atrito, disponíveis na literatura, a correlação semi-teórica proposta por Dodge-Metzner é a mais conhecida e utilizada para o cálculo do coeficiente de atrito para fluidos não newtonianos, escoando em regime turbulento.

Dodge e Metzner (1959) demonstraram que para emulsões com comportamento de fluido não Newtoniano (Pseudoplástico), o fator de atrito pode ser estimado através das seguintes correlações (BRUM, 2011).

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = A_{in} \log [N_R^0 (f)^{1-n/2}] + C_n \quad (09)$$

Ou

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = A_{in} \log [N_{Re,gen} (f)^{1-n'/2}] + C_{n'} \quad (10)$$

Onde

$$C_{n'} = A_{in} \log \left[\frac{1}{8} \left(\frac{6n' + 2}{n} \right)^{n'} \right] + C_n \quad (11)$$

Observando-se que n é o índice de comportamento do fluido e $n' = n \leq 1$

A expressão 10 relaciona o fator de atrito ao número de Reynolds para o fluxo turbulento de fluidos power-law em um tubo liso cilíndrico. Medidas experimentais com fluidos de carbopol resultaram nas seguintes relações:

$$A_{in} = \frac{4}{(n')^{0,75}} \quad (12)$$

$$C_{n'} = \frac{-0,40}{(n')^{1,2}} \quad (13)$$

Inserindo na eq. 10 tem-se a equação 14:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = \frac{4}{(n')^{0,75}} \log \left[N_{Res.gen} (f)^{1-\frac{n'}{2}} \right] - \frac{0,40}{(n')^{1,2}} \quad (14)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra de rejeito de bauxita utilizada na realização dos ensaios é procedente da usina de beneficiamento da Mina de Bauxita de Paragominas no estado do Pará, fornecida pelas empresas Vale e Hydro.

4.1 Teor de sólidos

O teor de sólidos foi obtido por secagem do material em estufa a 100°C até peso constante. Para o cálculo utilizou-se a equação abaixo:

$$\text{Teor de sólidos} = \frac{m_s}{m_p} \times 100 \quad (15)$$

Onde:

m_s = massa de sólido seco (g);

m_p = massa de polpa (sólido + água) (g)

4.2 Potencial hidrogeniônico (pH)

A determinação do pH foi realizada por meio de um pHmetro de bancada digital da *Hanna Instruments*– modelo HI 9321. Antes da leitura a amostra foi agitada por 30s até completa homogeneização.

4.3 Massa específica da polpa

A massa específica da polpa foi calculada empregando a equação (16):

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (16)$$

ρ_p = massa específica da polpa

m_p = massa total da polpa

V_p = volume total da polpa

4.4 Análise granulométrica

Realizada no Laboratório Físico-Químico da Mineração Paragominas S/A – MPSA. Empregou-se um conjunto rotativo de canecas onde as amostras foram homogeneizadas e quarteadas a úmido. Em seguida foram submetidas ao peneiramento

a úmido em um conjunto suspenso de malhas, em escala Tyler: 28#; 32#; 48#; 65#; 100#; 150#; 200#; 325# e 400#. Para as faixas compreendidas por 20 μm ; 10 μm ; 5 μm e 2 μm utilizou-se a técnica da difração a laser em dois modelos *Mastersizer 2000* da *Malvern Instruments*. Cada fração foi seca e pesada de maneira a se obter os percentuais retidos em cada malha.

4.5 Composição mineral

A determinação mineralógica, realizada no laboratório de Difração de Raios-X do Instituto de Geociências UFPA, foi feita em difratômetro de raios-X, modelo X'Pert Pro MPD (PW 3040/60) PANalytical, com goniômetro PW3050/60(θ - θ) e com tubo de raios-X cerâmico de anodo de Cu ($K_{\alpha 1} = 1,540598 \text{ \AA}$) modelo PW3373/00, foco fino longo, filtro K_{β} de Ni, detector X'Celerator RTMS (*Real Time Multiple Scanning*) no modo *scanninge* com *active length* 2,122°. Foram usadas as seguintes condições instrumentais: Varredura 4° a 75° 2 θ , 40 kV, 30 mA, passo 0,02° em 2 θ e tempo/passo de 20 s, fenda fixa 1/4° e anti-espalhamento 1/2°, máscara 10 mm, movimento da amostra spinning, com 1 rps. O resultado foi interpretado no programa X'Pert High Score.

4.6 Análise química

A composição química da amostra, realizada no laboratório do Instituto de Geociências-UFPA, foi determinada por Espectrometria de Fluorescência de Raios-x em espectrômetro WDS sequencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical, com tubo de raios-x cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potencia 2,4 KW.

As amostras foram analisadas em dois modos de preparação:

- a) Disco fundido: 1 g de amostra + 6 g de fundente (tetraborato de lítio – $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), mistura fundida a 1000C por 10 min.
- b) Pastilha prensada: 3 g de amostra + 0,9 g de aglomerante (cera de parafina), mistura prensada com uma carga de 20 toneladas.

As aquisições e tratamento dos dados foram realizados através do software *SuperQ Manager* da PANalytical.

Para a determinação do conteúdo de Al_2O_3 aproveitável utilizou-se a abertura das amostras de bauxita via digestão alcalina (com NaOH a 10%) em bomba parr a 150° C. Em seguida a leitura foi por titulação com ZnSO_4 a 0,025 Molar. (HOLLITT *et al.*, 2001). Para a determinação do conteúdo de SiO_2 reativa realizou-se a abertura das

amostras de bauxita da digestão alcalina (com NaOH a 10%) em bomba parr a 150° C. Posteriormente efetuou-se abertura ácida com HCl concentrado. As leituras foram feitas em AA-*Varian*240 FS. (HOLLITT *et al.*, 2001). Em seguida foi realizada a análise de PPC – perda ao fogo - em mufla a 1000° C.

4.7 Estudo reológico

Realizado no Laboratório de Reologia da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, em viscosímetro da *Haake* Instruments, modelo VT 550 (Figura 16), com sensor tipo cilindros coaxiais SV1 (Figura 17), utilizando-se software Rheowin job manager para a programação de trabalho e rheowin data manager para a análise dos resultados.

Figura 16 - Viscosímetro viscoteste 550.



Figura 17– corpo cilíndrico, sensor sv1



Com o objetivo de assegurar a precisão das análises foi realizada a calibração do equipamento utilizando o fluido newtoniano óleo OP 400. As condições utilizadas foram taxa de cisalhamento de 0 a 200 s⁻¹ e tempo de 120s.

4.7.1 Determinação do perfil reológico da polpa

O perfil reológico foi determinado com o objetivo de avaliar o ajuste dos dados experimentais ao modelo de Hershel-Bulckley, necessário para o cálculo do fator de atrito. O ensaio foi feito sem o uso de aditivo em pH 6,5. Utilizou-se taxa de cisalhamento de 0 a 200 s⁻¹, tempo de 120 s e temperatura de 32°C. A modelagem foi feita a partir do software Rheowin versão 4.97.

4.7.2 Ensaio de histerese

As condições de testes para o ensaio de histerese seguiu a metodologia utilizada por Silva (2011). Rampa de aumento de taxa de cisalhamento de 0 a 200 s⁻¹ em 100 s; permanência a 200 s⁻¹ por 10 s; rampa de diminuição de taxa de cisalhamento de 200 a 0 s⁻¹ em 100 s.

4.7.3 Avaliação da viscosidade em diferentes pH

Realizou-se ensaios na polpa com diferentes pH, com o objetivo de avaliar o seu efeito sobre a viscosidade. Utilizou-se o Na₂CO₃ para aumentar o pH e o NaHSO₄ para diminuir o pH. A programação para os ensaios foi taxa de cisalhamento de 100 s⁻¹, tempo de 20s e temperatura de 32°C.

4.7.4 Curvas de floculação e defloculação

Foram realizados ensaios de defloculação e floculação utilizando os aditivos reológicos: hexametáfosfato de sódio, hidroxamato, sulfato de alumínio, poliacrilato de sódio e poliacrilamida 25% aniônica. A programação para os ensaios foi taxa de cisalhamento de 100 s⁻¹, tempo de 20s e temperatura de 32°C.

Para a realização das análises, foram preparadas soluções dos aditivos hexametáfosfato de sódio, hidroxamato, sulfato de alumínio nas seguintes concentrações: 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6 e 7. Os aditivos poliacrilato de sódio e poliacrilamida 25% aniônica foram preparados em concentrações menores: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 e 1, devido o seu aspecto gelatinoso e difícil utilização em concentrações maiores. Os gráficos foram elaborados a partir da conversão em massa dos aditivos.

Para verificar a influência do pH no comportamento do aditivo, foram feitas análises de viscosidade em polpa com pH 4,5, 6,5 e 8,5.

Avaliou-se também a influência da granulometria na ação do aditivo. Foram realizados ensaios em amostras passante na malha de 400# Tyler, correspondendo a granulometria inferior a 38 μm .

Os aditivos foram escolhidos devido serem utilizados para a estabilização de suspensões minerais.

4.8 Cálculo do fator de atrito

O cálculo do fator de atrito foi realizado de acordo com a programação utilizada por Brum (2011). A resolução para os dois modelos envolve tarefas computacionais para a obtenção do fator de atrito em função do número de Reynolds generalizado. A solução numérica foi realizada a partir do programa em linguagem FORTRAN 90/95, utilizando-se a subrotina ZREAL da biblioteca IMSL (1991) para o cálculo de raízes de equações algébricas não-lineares.

Admitiu-se para os valores de K e $C(x)$ a equivalência aos resultados experimentais de Nikuradse, ou seja, 0,41 e 5,55, respectivamente.

Os parâmetros adotados foram:

D : diâmetro da tubulação(m);

n : índice de comportamento das amostras ensaiadas (resultado dos ensaios em viscosímetro Haake, modelo VT 550 e modelagem reológica via software Rheowin versão 4.97).

τ_0 : tensão limite de escoamento das amostras ensaiadas, unidade ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$).

K : índice de consistência das amostras ensaiadas, unidade (Pa).

ρ_P : massa específica das amostras ensaiadas, unidade (kg/m^3).

Y : tensão limite de escoamento adimensional.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do material

A Tabela 3 mostra as características do rejeito da bauxita.

Tabela 3 - Caracterização do rejeito

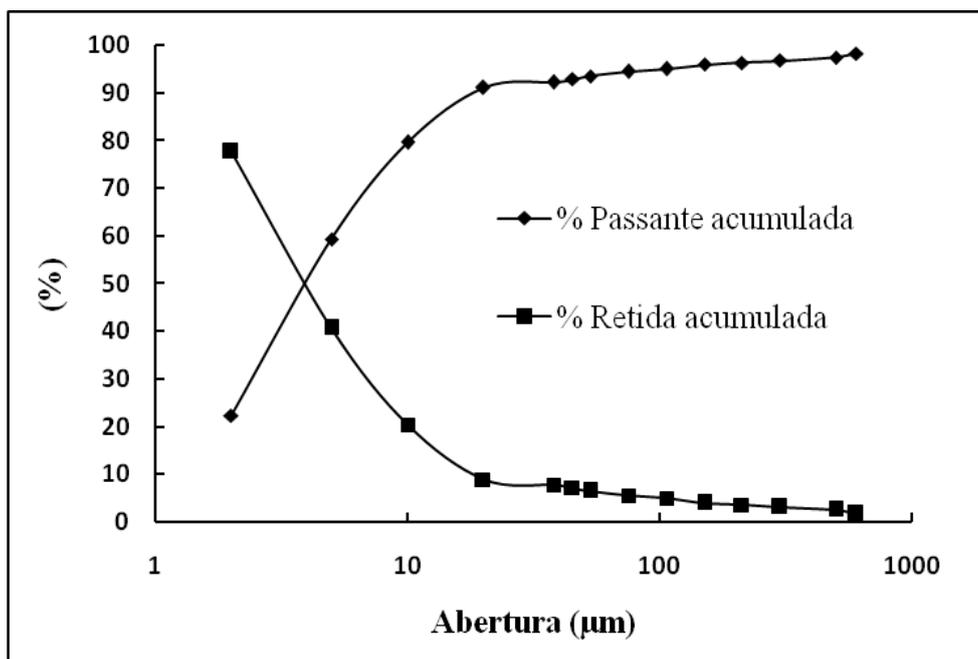
Análise	Resultados
Teor de sólido (%)	33,5
Massa específica (g/cm ³)	1,26
pH	6,5

A granulometria de resíduos de mineração e/ou processamento é uma característica que está estritamente relacionada à mineralogia da rocha de origem mais ao processo de extração e processamento. A Tabela 4 e a Figura 18 mostram os resultados para a análise granulométrica. A distribuição granulométrica indicou que cerca de 90% das partículas possuem tamanhos menores que 0,02 mm; 50% encontram-se abaixo de 0,005 mm e 22,27% estão abaixo de 0,002 mm, conforme pode ser observado na Figura 18.

Tabela 4 - Distribuição granulométrica do rejeito

Diâmetro (mm)	% Passante acumulada
0,6	98,28
0,5	97,45
0,297	96,82
0,21	96,40
0,149	95,98
0,105	95,02
0,074	94,52
0,053	93,51
0,044	92,89
0,037	92,26
0,02	91,15
0,01	79,68
0,005	59,29
0,002	22,27

Figura 18 - Distribuição granulométrica do rejeito da bauxita



De acordo com Oliveira e Rubio (2011), suspensões apresentam o tamanho de partículas entre 1 µm e 100 µm, sendo que para granulometria < 100 µm as partículas são consideradas finas, < 20 µm muito finas e < 5 µm ultrafinas. Lins e Adams (2000) classificam ainda como partículas ultrafinas/quase coloidais as partículas que apresentam dimensões inferiores a 10 µm e coloidais aquelas inferiores a 1 µm. Pelo resultado obtido da análise granulométrica observa-se que o rejeito apresenta D_{50} inferior a 5 µm, portanto é uma suspensão formada por partículas ultrafinas.

Quanto mais finas as partículas, maior será sua área de superfície e mais elas se tornam sensíveis à ação de suas cargas. Aumentando-se as áreas superficiais aumentam-se as cargas elétricas de superfície. Isso tem consequências importantes, por exemplo, na floculação e no espessamento (CHAVES, 2002).

A Tabela 5 apresenta os resultados das análises físico-químicas do rejeito da bauxita.

Tabela 5 – Caracterização Físico-Química.

Composição	%
Al ₂ O ₃ total	42,54
Al ₂ O ₃ aproveitável	21,28
SiO ₂ total	22,00
SiO ₂ reativa	20,03
TiO ₂	1,75
Fe ₂ O ₃	13,55
P ₂ O ₅	<0,1
Perda ao Fogo	19,99
Outros	0,12

De acordo com Quaresma (2009), a bauxita de Paragominas possui teor médio de 50% de alumina aproveitável e 4% de sílica reativa. Análises realizadas mostraram que o rejeito da bauxita ainda apresenta uma quantidade considerável de alumina aproveitável, 21,28 %, que é desperdiçada junto ao descarte do rejeito. Entretanto a utilização desse rejeito apresenta algumas barreiras, uma vez que há a dificuldade de transporte devido a baixa granulometria, com a presença excessiva de finos, que pode intupir as bombas e tubulações. Além disso, o rejeito apresenta altos teores de impurezas como a presença de 20,03% de sílica reativa. Essa sílica é um interferente durante a digestão da alumina no processo Bayer, pois ela é atacada pelo hidróxido de sódio, formando silicato de sódio, o qual reage com a solução de aluminato de sódio para formar um composto insolúvel denominado alumino silicato de sódio. Este produto é descartado do processo na lama vermelha, resultando na perda de soda cáustica e alumina.

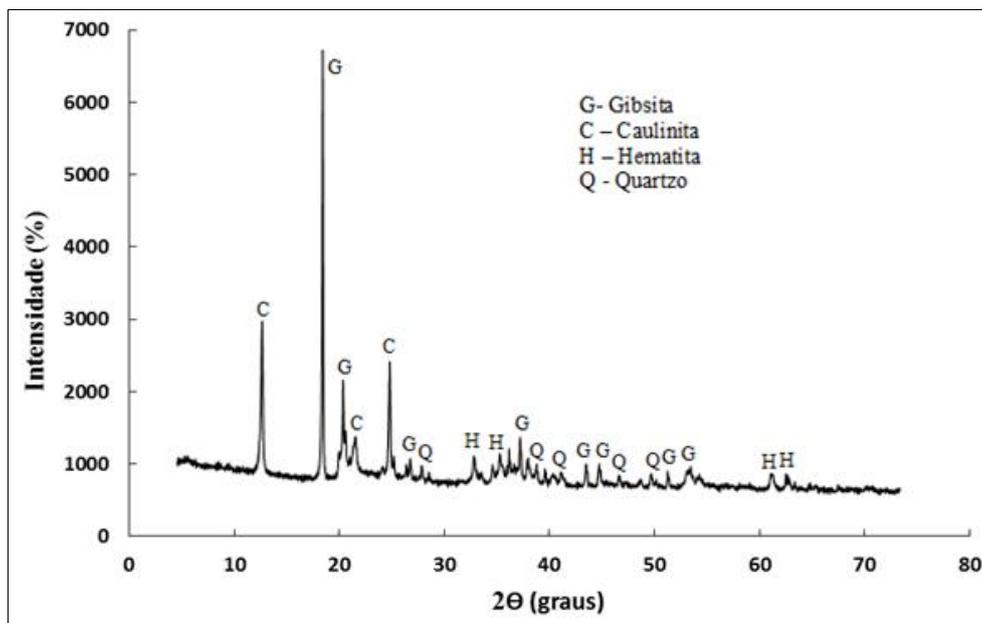
A análise de fluorescência identificou também a seguinte composição em traços (Tabela 6).

Tabela 6 - Caracterização Química (Análise de traços)

Compostos	Valor (ppm)
Zr	399
Mn	166
Cr	177
Ba	93
Pb	81
Sr	81
Ga	65
Co	52
Nb	64
Y	17
Ni	12
Zn	16
Cu	<10

A análise de Difração de Raios-x (Figura 19) identificou as seguintes composições minerais: gibsita, hematita, quartzo e argilominerais como a caulinita. Gibsita, óxidos de ferro e caulinita são os principais colóides responsáveis pelas propriedades de superfície e apresentam uma dupla camada completamente reversível (RAIJ, 1973).

Figura 19 - Difratoograma do rejeito da bauxita

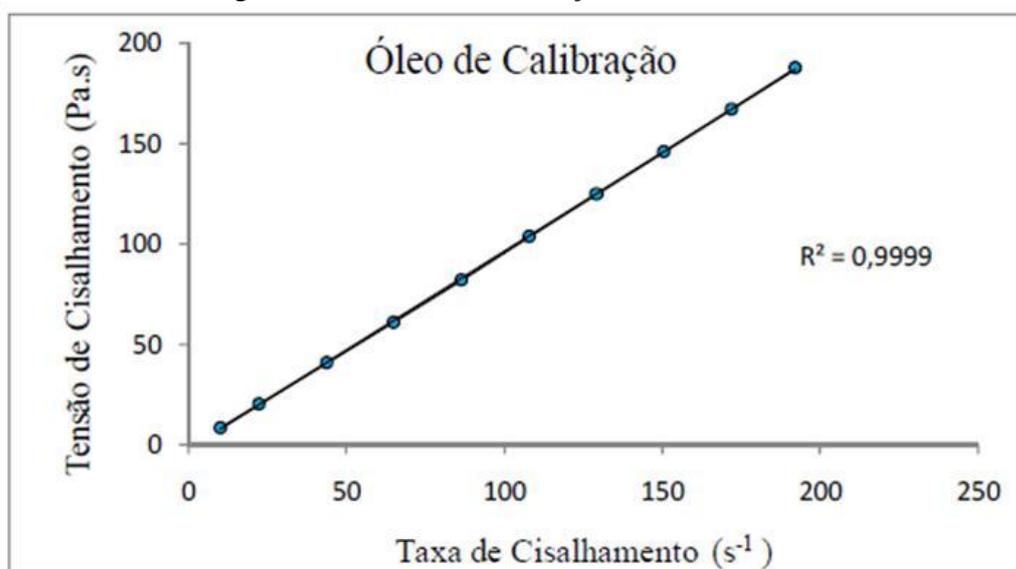


5.2 Análises reológicas

5.2.1 Calibração do viscosímetro

A Figura 20 mostra o comportamento do fluxo estando de acordo para um fluido newtoniano.

Figura 20 - Curva de calibração do viscosímetro.



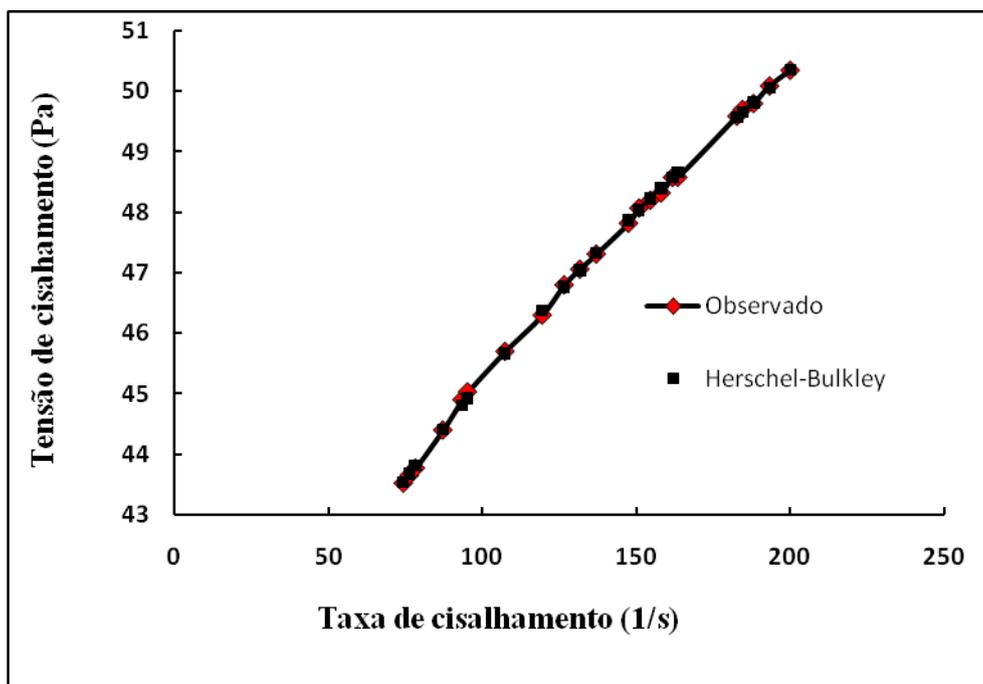
5.2.2 Perfil reológico da polpa

A Tabela 7 mostra os resultados encontrados para o perfil reológico segundo o modelo de Herschel-Bulkley. Observa-se na Tabela 7 e na Figura 21 que os resultados experimentais estão adequados ao modelo de Herschel-Bulkley.

Tabela 7 - Modelagem para equação de Herschel-Bulkley

Modelo	Parâmetros encontrados	Coefficiente de Determinação (R^2)
Herschel-Bulkley		
	$n = 0,4304$	
$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$	$\tau_0 = 30,81(\text{Pa})$ $K = 1,987 (\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	99,85

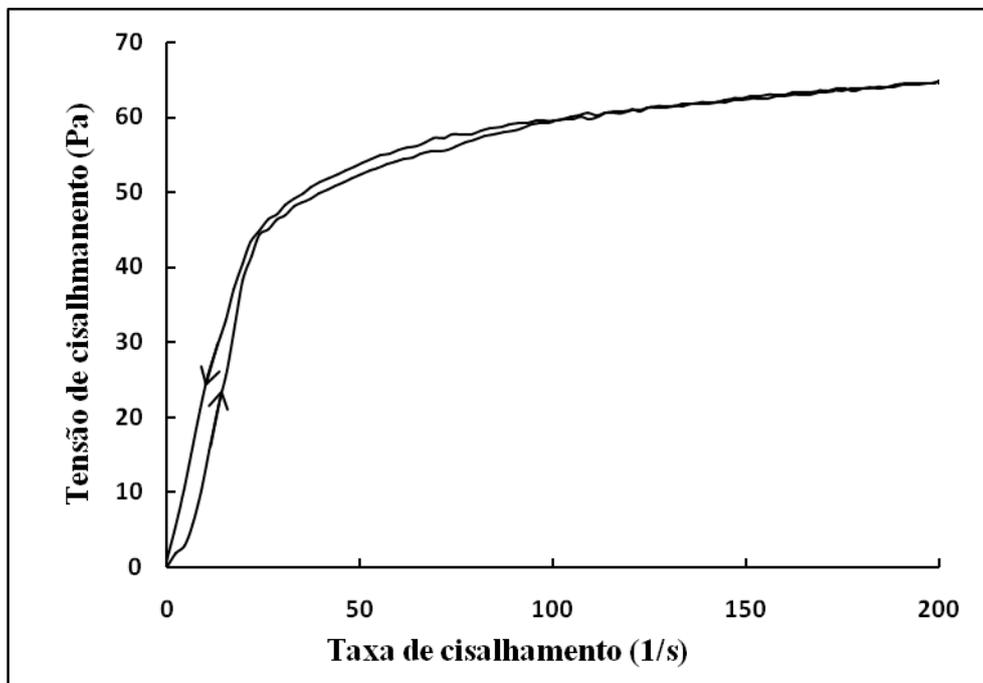
Figura 21 - Perfil de escoamento para o fluxo observado e predito pelo modelo de Herschel-Bulkley



5.2.3 Curva de Histerese

A análise de histerese do rejeito apresentou comportamento reopético, como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Histerese do rejeito

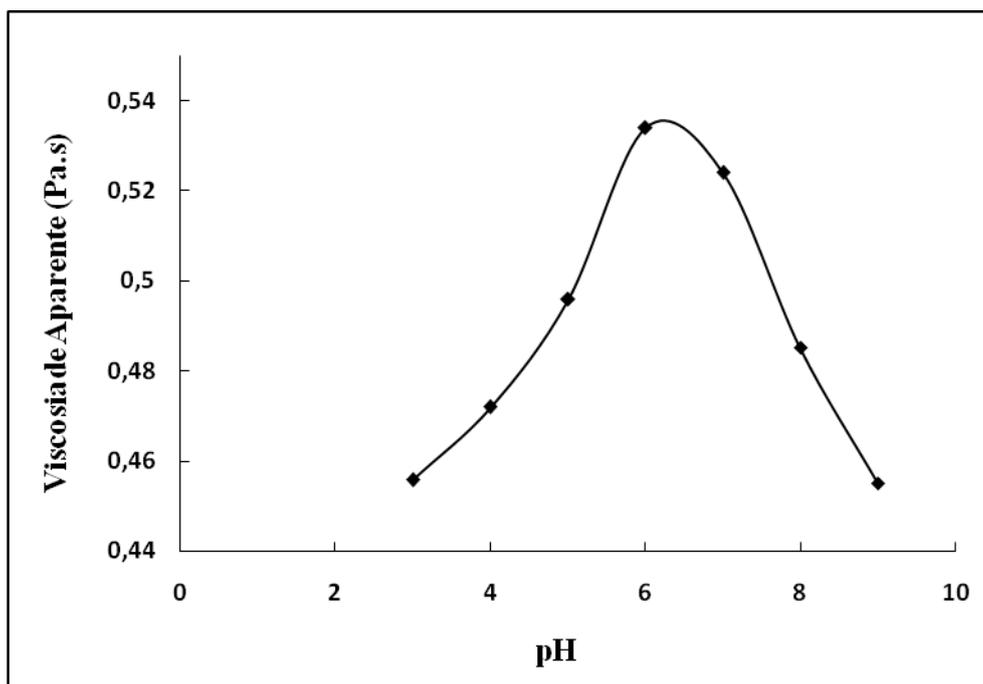


Em processos de bombeamento o comportamento reopético é bastante prejudicial, embora a histerese apresentada seja reduzida no caso do rejeito em estudo, a variação do comportamento do fluido com o tempo, pode promover a obstrução das tubulações durante o escoamento devido às alterações na viscosidade (KLEIN e HALLBOM, 2002). Esse comportamento chama a atenção para a necessidade de uso de aditivos dispersantes para facilitar o escoamento e evitar possíveis paradas durante o bombeamento ou até mesmo reduzir gastos com energia durante a partida da bomba.

5.2.4 Análise da viscosidade com variações do pH

Na Figura 23, observa-se que a variação de pH exerce forte influência na viscosidade, pois à medida que o meio torna-se mais ácido ou básico a viscosidade tende a diminuir.

Figura 23 - Variação da viscosidade aparente com mudanças de pH



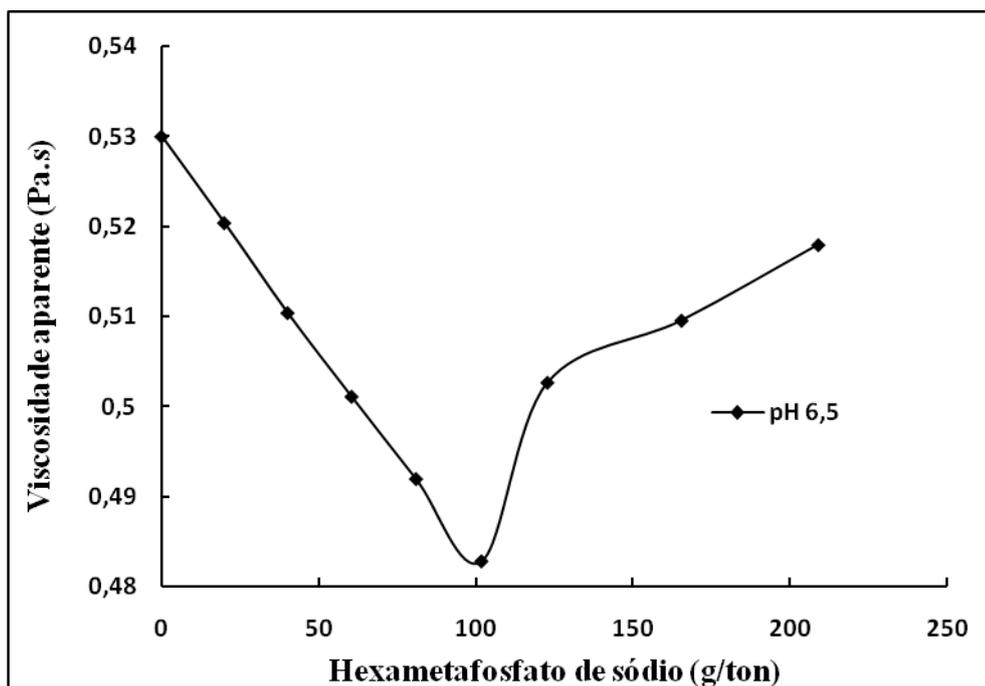
A variação de pH ocasiona o surgimento de cargas elétricas na superfície das partículas que apresentam cargas dependentes de pH como é o caso da caulinita, hematita e gibbsita (MAURI et al., 2011, FONTES et al. 2001; RAIJ, 1973) presentes no rejeito da bauxita conforme Figura 20. Com isso, ocorre repulsão eletrostática como resultado da formação de dupla camada elétrica em torno das partículas (CESARANO e AKSAY, 1988).

5.2.5 Curvas de floculação e defloculação

5.2.5.1 Hexametáfosfato de sódio

A adição de diferentes quantidades de hexametáfosfato de sódio (Figura 24) apresentou ponto ótimo para defloculação com a adição de 101,75 g/ton.

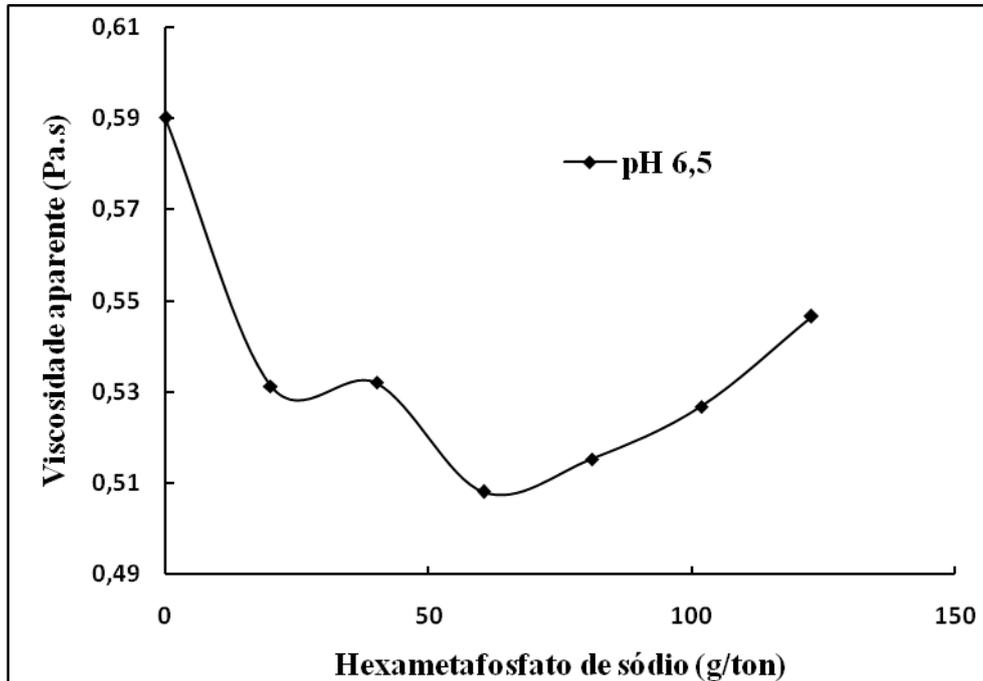
Figura 24 - Curva de defloculação com hexametáfosfato de sódio em pH 6,5



Como a suspensão possui quantidade considerável de óxidos de alumínio, a defloculação ocasionada pelo hexametáfosfato de sódio pode ter ocorrido de acordo com as considerações feitas por Andreola et al.(2004) para o caso da argila. Nesse mecanismo os ânions do hexametáfosfato de sódio interagem com os átomos expostos de alumínio, surgindo um complexo aniônico. O aumento de carga superficial negativa aumenta a força de repulsão entre as partículas e causa a defloculação. O hexametáfosfato de sódio pode atuar também através da substituição dos cátions floclantes que podem estar dissolvidos por cátions Na^+ , adsorvendo nas partículas de argila, aumentando a espessura da dupla camada elétrica e causando a dispersão (ANDREOLA et al., 2004; RODRIGUES NETO et al., 2002).

A fração abaixo da malha 400# Tyler, facilitou a defloculação quando o hexametáfosfato de sódio foi utilizado (Figura 25), pois o ponto ótimo de defloculação foi obtido para a adição de 60,43 g/ton, resultado inferior ao obtido para o rejeito normal (Figura 24).

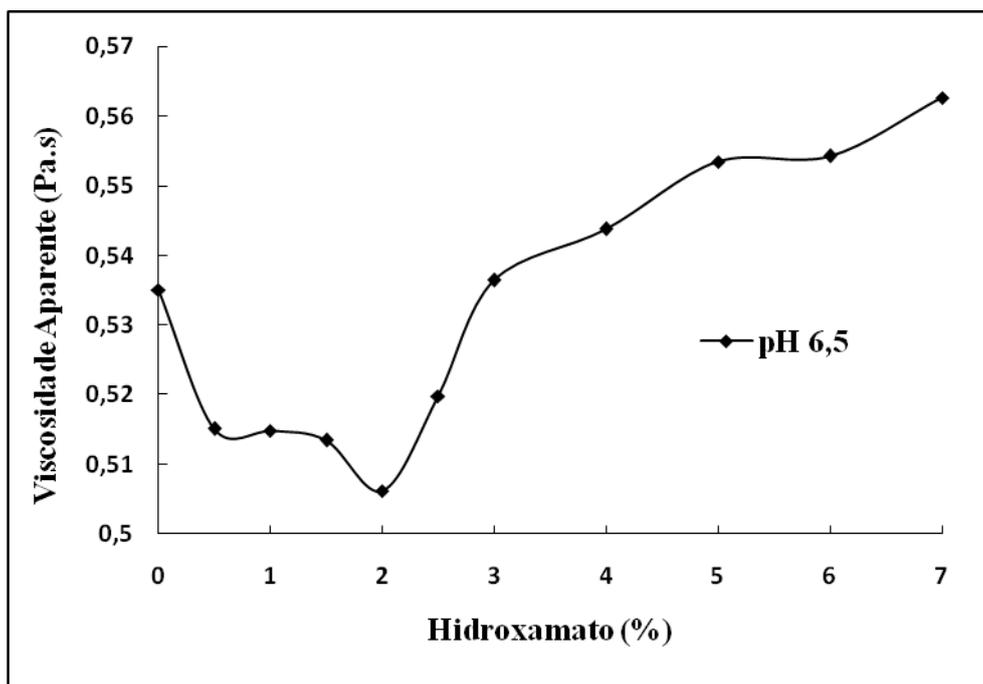
Figura 25 - Curva de defloculação com hexametáfosfato de sódio em pH 6,5 (passante a 400#Tyler)



5.2.5.2 Hidroxamato

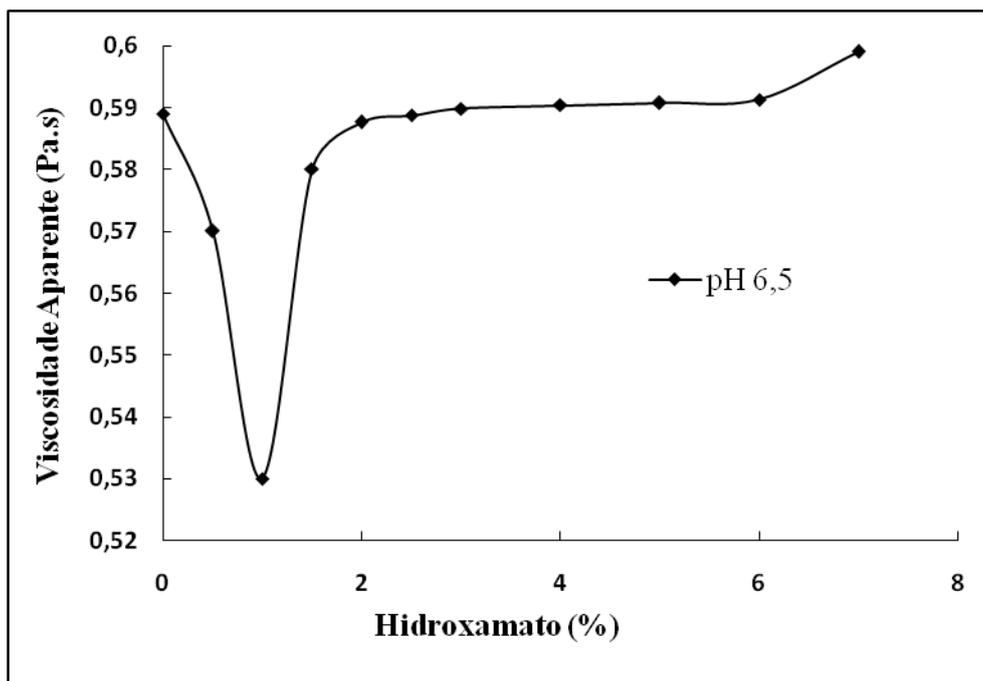
O hidroxamato apesar de ter sido desenvolvido para atuar como floculante na indústria de alumina, comportou-se como defloculante no rejeito da bauxita (Figura 26). Isso pode ter ocorrido devido o pH da amostra utilizada ser 6,5, e de acordo com Góis et al. (2003), o seu uso como floculante apresenta grande eficiência no auxílio do processo de sedimentação e clarificação da lama vermelha que se destaca por apresentar pH alcalino.

Figura 26 - Curva de defloculação com hidroxamato em pH 6,5



Para a amostra passante a 400 # Tyler (Figura 27) obteve-se um ponto mínimo para defloculação com a adição de 1%.

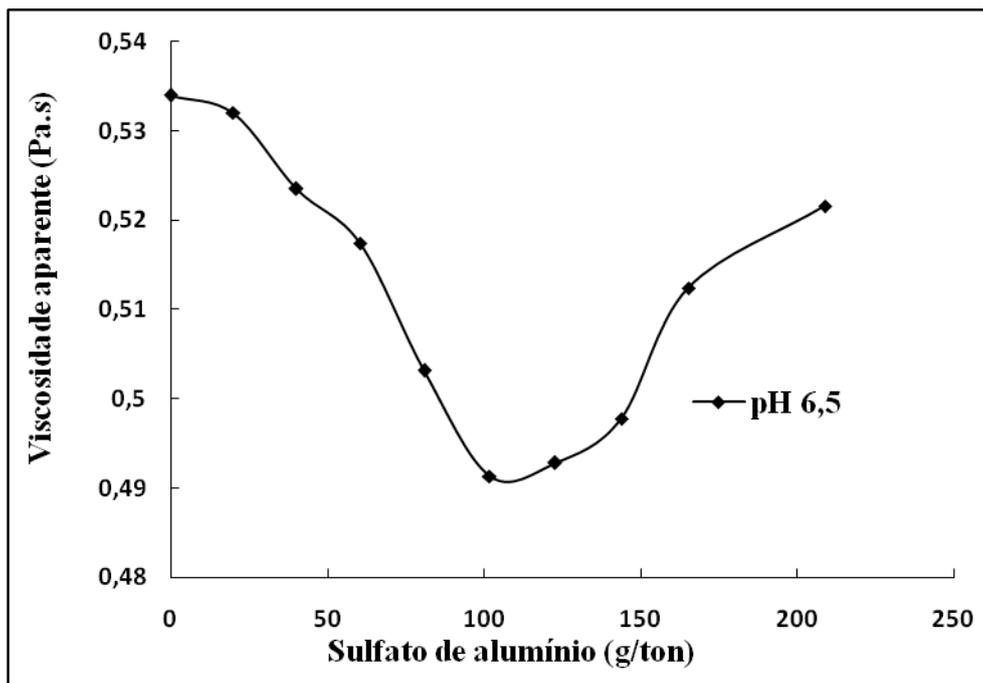
Figura 27 - Curva de defloculação com hidroxamato em pH 6,5 (Passante a 400#Tyler)



5.2.5.3 Sulfato de alumínio

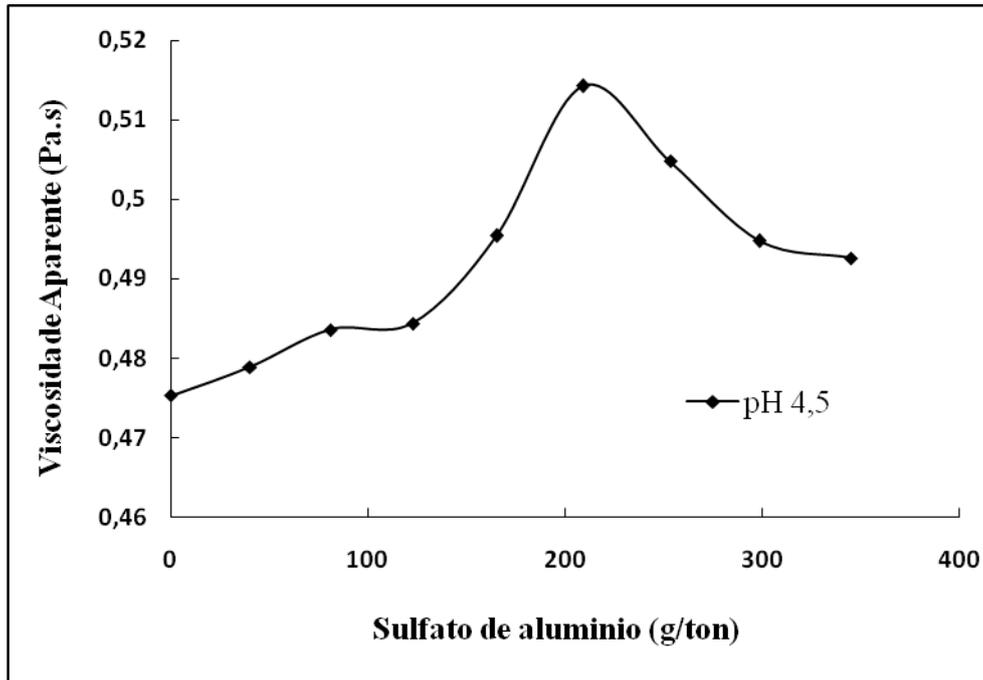
Pela Figura 28 observa-se que o sulfato de alumínio defloculou a amostra que apresentava pH 6,5.

Figura 28 - Curva de defloculação com sulfato de alumínio em pH 6,5



Observa-se pela Figura 29 a importância da variação de pH da suspensão na modificação das cargas superficiais das partículas e também na solubilidades dos aditivos, pois em pH 4,5 o sulfato de alumínio comportou-se como floculante.

Figura 29 - Curva de floculação com sulfato de alumínio em pH 4,5

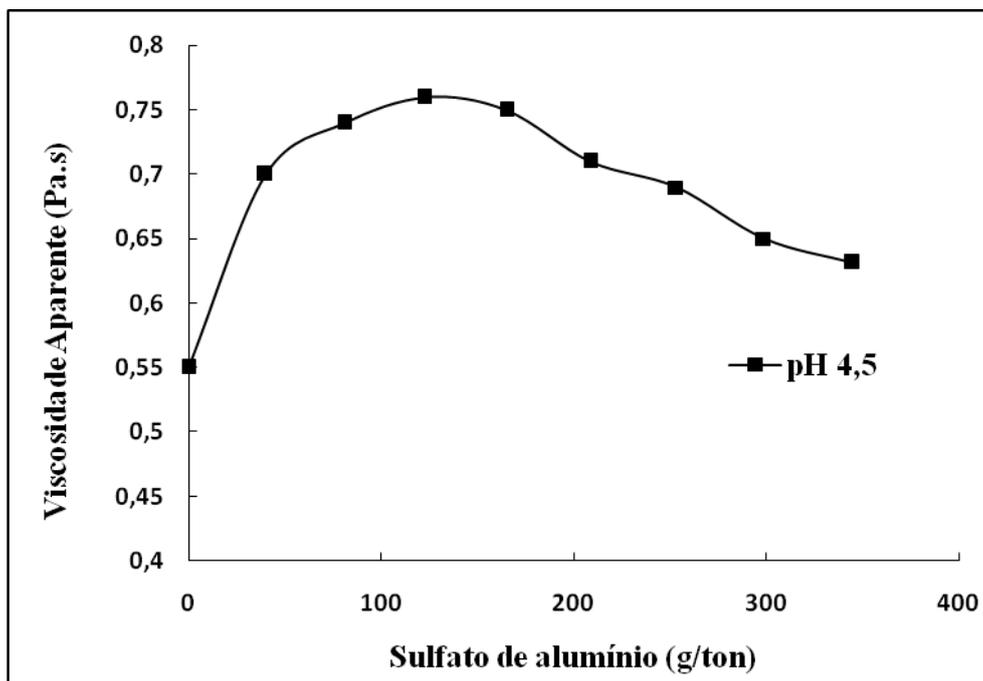


De acordo com Oliveira e Cruz (2001), o sulfato de alumínio atua através do mecanismo de neutralização de cargas superficiais. A neutralização pode ter ocorrido nas partículas de quartzo, pois de acordo com Guedes et al. (2004) o quartzo apresenta $pcz\ 2$ e para um valor de pH maior que o pcz a carga superficial é negativa. Com isso nas condições da suspensão, pH 4,5 e 6,5, as partículas de quartzo estão provavelmente com carga superficial negativa podendo interagir com os íons Al^{3+} do sulfato de alumínio. As interações de neutralização podem ter ocorrido mais fortemente com o quartzo devido os outros principais constituintes do rejeito da bauxita gibsita, hematita e caulinita, provavelmente não apresentarem nas condições da suspensão, pH 4,5 e 6,5 cargas fortemente negativa, pois de acordo com Sposito (1994) a gibsita possui $pcz\ 9,1$ e Guedes et al. (2004) encontrou os valores de $pcz\ 7,1$ e $4,0$ para a hematita e caulinita, respectivamente.

Entretanto é importante destacar que o pcz de suspensões reflete a participação de cada um dos constituintes da mistura e de outros fatores como, por exemplo, as áreas superficiais específicas dos diferentes constituintes do sólido suspenso (GUEDES et al. 2004).

A amostra passante a 400# Tyler melhorou o processo de floculação, pois se reduziu a adição de 208,85 g/ton (Figura 29) para 122,73 g/ton (Figura 30).

Figura 30 - Curva de floculação com sulfato de alumínio em pH 4,5 (passante a 400#Tyler)

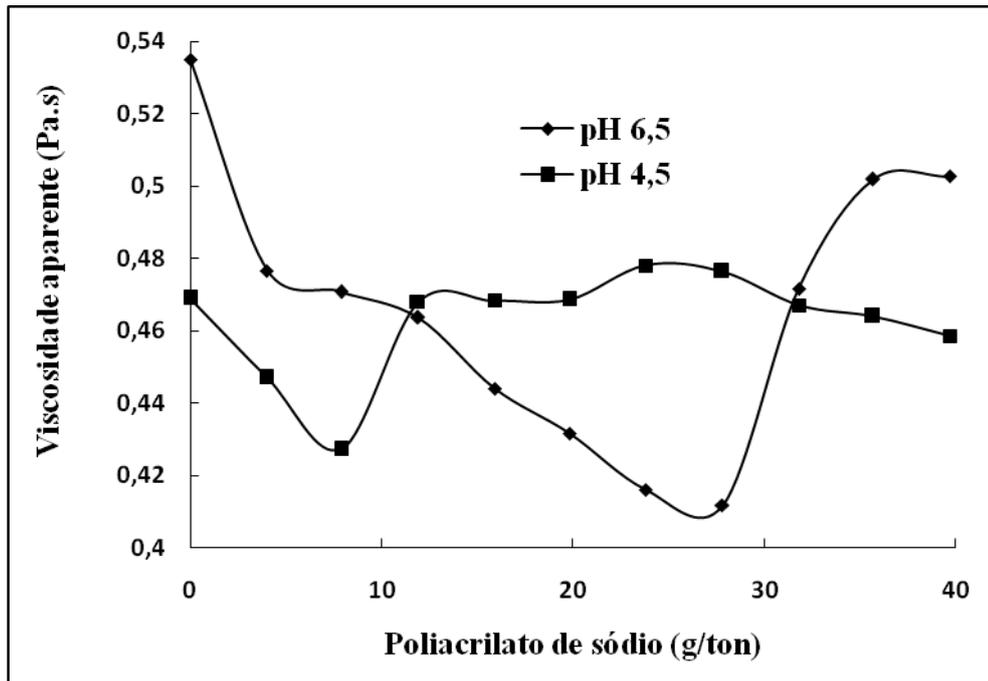


5.2.5.4 Poliacrilato de sódio

Os resultados para os testes reológicos realizados com variações de pH e diferentes concentrações de poliacrilato de sódio mostou que o pH exerce forte influência na atuação do aditivo reológico, conforme Oliveira e Rubio (2011).

Pela Figura 31 observa-se que o poliacrilato de sódio comportou-se como defloculante em pH 4,5 e 6,5.

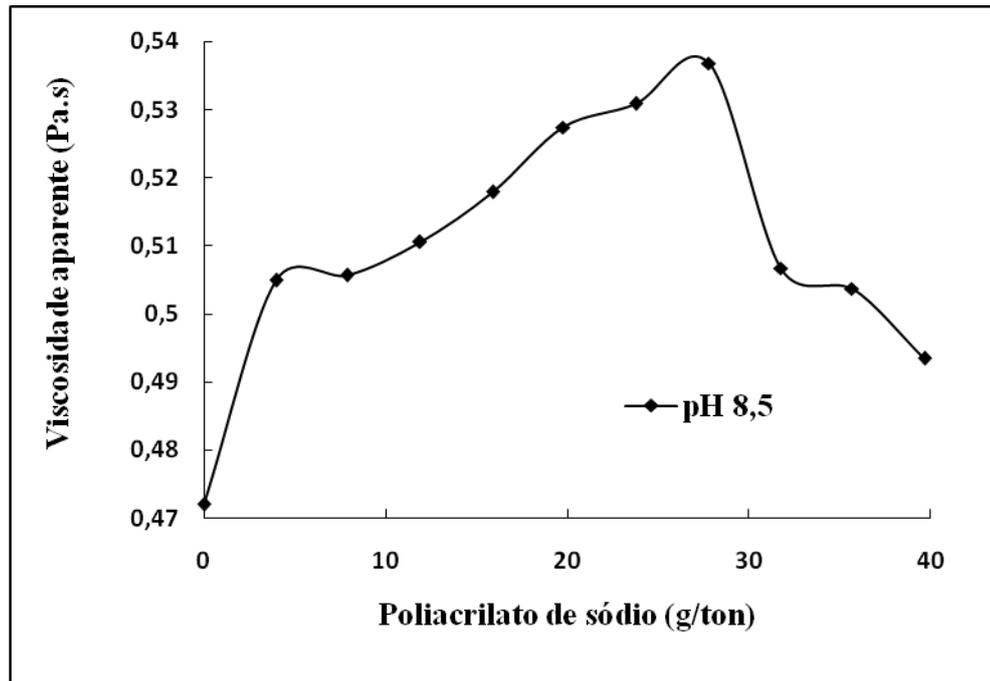
Figura 31 - Curvas de deflocações com poliacrilato de sódio em pH4,5 e 6,5



A deflocação (Figura 31) ocorre devido o polímero apresentar conformação enovelada na suspensão, com isso há dificuldade de ligação entre duas ou mais partículas. Entretanto, à medida que se aumentam as quantidades de aditivos adicionados, a suspensão começa a flocular devido esse aumento ocasionar o surgimento de ligações entre as moléculas de poliacrilato de sódio e a superfície das partículas. A floculação que ocorre depois da deflocação acontece até uma quantidade limite de polímero adicionado, conforme a Figura 31, posteriormente a viscosidade aparente começa a diminuir novamente devido ocorrer, de acordo com Sharma et al. (2006), excesso de polímero em solução sendo as partículas restabilizadas por superfície de saturação.

Para a amostra com pH 8,5 (Figura 32) o poliacrilato de sódio comportou-se como floculante.

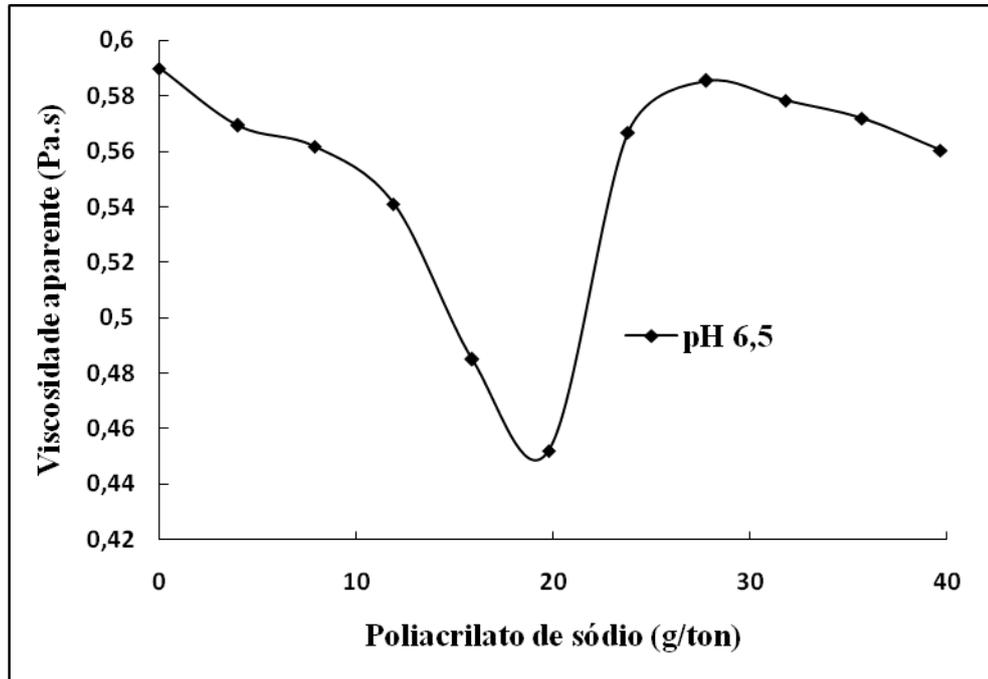
Figura 32 - Curva de floculação com poliacrilato de sódio em pH 8,5



A floculação (Figura 32) ocorre quando o polímero apresenta conformação estendida na suspensão adsorvendo-se a diferentes partículas através de laços e caudas aglomerando-as. Entretanto, à medida que aumentou a concentração de poliacrilato de sódio, as pontes entre as partículas se desfizeram, devido à porcentagem da superfície recoberta por moléculas do polieletrólito se aproximar de 100%, ocorrendo a defloculação.

A amostra passante a 400# Tyler (Figura 33) obteve dispersão máxima para a adição de 19,8 g/ton.

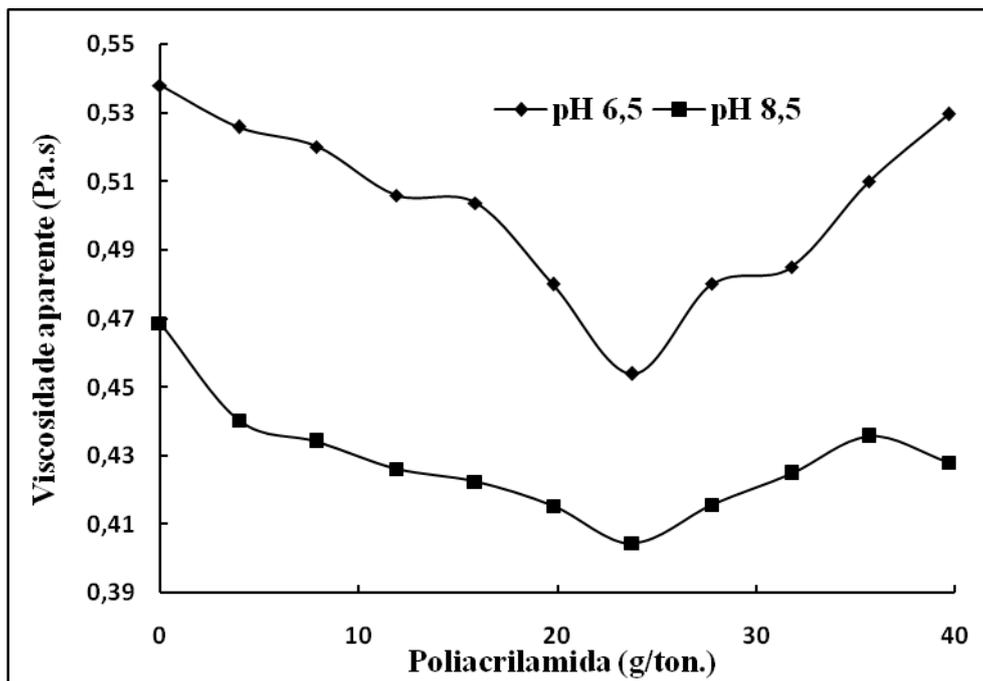
Figura 33 - Curva de defloculação com poliacrilato de sódio em pH 6,5 (Passante a 400#Tyler)



5.2.5.5 Poliacrilamida 25 % aniônica

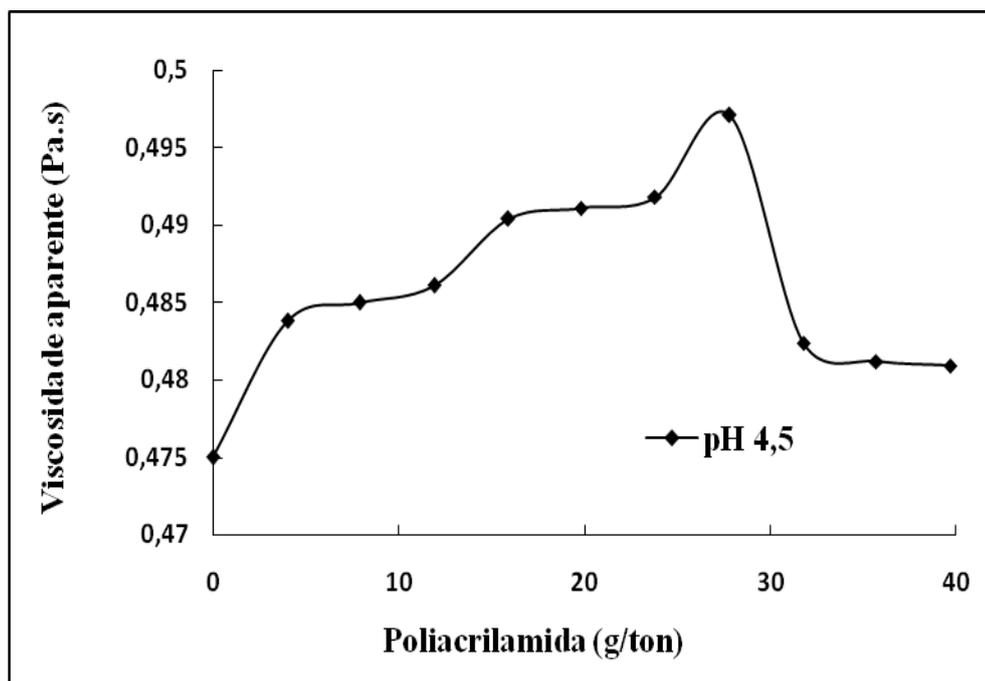
A Figura 34 mostra o comportamento da amostra diante do mecanismo de repulsão eletroestérica, ocasionado pela dupla camada elétrica e pela ação da poliacrilamida 25% aniônica. A defloculação ocorreu porque a amostra provavelmente apresenta densidade de carga superficial negativa em pH 8,5 devido o rejeito apresentar um alto teor de óxidos de alumina (Tabela 5) e de acordo com Sales et al. (2007) a densidade total de carga superficial da alumina em pH básico é negativa, por sua vez o dispersante é aniônico, apresentando superfície carregada negativamente, com isso não há a adsorção de alta afinidade do polieletrólito a diferentes partículas de alumina o que ocasionaria a aglomeração. O ponto ótimo de dispersão foi encontrado para a adição de 23,8 g/ton.

Figura 34 - Curva de defloculação com poliacrilamida em pH 6,5 e 8,5



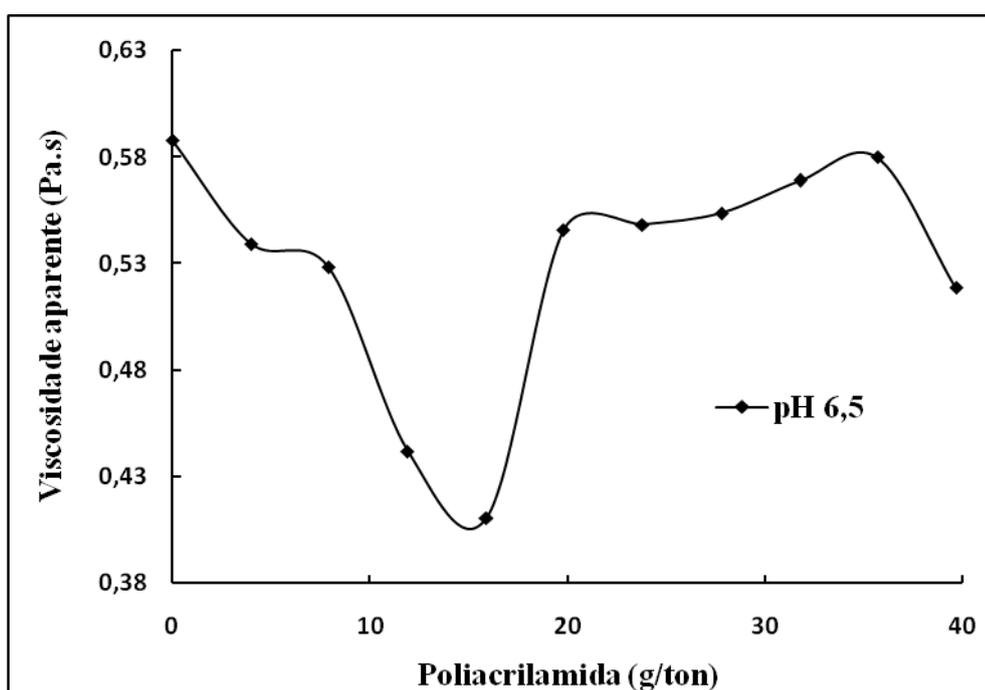
Para a amostra com pH ácido (Figura 35) a poliacrilamida atuou como floculante. Isso ocorreu devido à poliacrilamida utilizada ser uma espécie 25 % aniônica e a densidade de carga superficial das partículas provavelmente é positiva, pois o rejeito apresenta altos teores de óxidos de alumina e de acordo com Sales et al. (2007) a densidade total de carga superficial da alumina em pH ácido é positiva. Com isso ocorre de acordo com os trabalhos de Ortega et al. (1997) e Sharma et al. (2006) adsorção de alta afinidade de moléculas negativas sobre uma superfície positiva, ligando as partículas em conjunto e floculando a suspensão.

Figura 35 - Curva de floculação com poliacrilamida em pH 4,5



A repulsão eletrostática foi mais eficiente no rejeito passante a 400# Tyler. A Figura 36 mostra o ponto ótimo de dispersão a 15,9 g/ton, resultado inferior ao obtido na amostra não tratada (Figura 34). A redução da granulometria contribuiu para que o polieletrólito atuasse de forma mais efetiva, devido esse mecanismo de repulsão ser mais eficiente em suspensões coloidais (CERUTTI, 2005).

Figura 36 - Curva de defloculação com poliacrilamida em pH 6,5 (passante a 400#Tyler)



A Tabela 8 mostra os resultados obtidos para os aditivos utilizados.

Tabela 8 - Parâmetros avaliados para os diferentes aditivos utilizados.

Aditivo	pH	Comportamento	Quantidade adicionada (%) e (g/ton)		Viscosidade inicial e no ponto máximo ou mínimo (Pa.s)	Varição da viscosidade
Hexametáfosfato de sódio	6,5	Defloculante	2,5	101,75	0,53-0,483	Redução em 8,9%
Hexametáfosfato de sódio (amostra peneirada)	6,5	Defloculante	1,5	60,43	0,59-0,508	Redução em 13,88 %
Hidroxamato	6,5	Defloculante	2,0	*	0,535-0,506	Redução em 5,38%
Hidroxamato (amostra peneirada)	6,5	Defloculante	1,0	*	0,589-0,530	Redução em 10,03%
Sulfato de alumínio	6,5	Defloculante	2,5	101,75	0,534-0,491	Redução em 7,99%
Sulfato de alumínio	4,5	Floculante	5,0	208,85	0,475-0,514	Aumento em 8,20%
Sulfato de alumínio (amostra peneirada)	4,5	Floculante	3,0	122,73	0,55-0,760	Aumento em 38,16 %
Poliacrilato de sódio	6,5	Defloculante	0,7	27,8	0,535-0,412	Redução em 23,05%
Poliacrilato de sódio	4,5	Defloculante	0,2	7,9	0,469-0,427	Redução em 8,90 %
Poliacrilato de sódio	8,5	Floculante	0,7	27,8	0,472-0,537	Aumento em 13,73%
Poliacrilato de sódio (amostra peneirada)	6,5	Defloculante	0,5	19,8	0,59-0,452	Redução em 23,39%
Poliacrilamida	6,5	Defloculante	0,6	23,8	0,538-0,454	Redução em 15,61%
Poliacrilamida	8,5	Defloculante	0,6	23,8	0,469-0,4045	Redução em 13,70%
Poliacrilamida	4,5	Floculante	0,7	27,8	0,475 – 0,4971	Aumento em 4,65%
Poliacrilamida (amostra peneirada)	6,5	Defloculante	0,4	15,9	0,588-0,4108	Redução em 30,14%

*A quantidade adicionada de hidroxamato está somente em porcentagem devido o aditivo utilizado ser líquido.

Pela Tabela 8 observa-se que o peneiramento é inviável para os defloculantes hexametáfosfato de sódio, hidroxamato e poliacrilato de sódio, pois o aumento da concentração de finos com o peneiramento, apesar de potencializar a ação dos aditivos, aumenta a viscosidade aparente inicial devido o teor de sólido utilizado ser o mesmo valor, 33,5%, para as análises. Consequentemente os valores obtidos para a viscosidade aparente nos pontos mínimos das curvas de defloculação são superiores aqueles obtidos para a amostra não peneirada. A exceção foi a poliacrilamida que entre os aditivos utilizados apresentou o mais alto valor de redução da viscosidade aparente inicial, 30,14%, com o peneiramento.

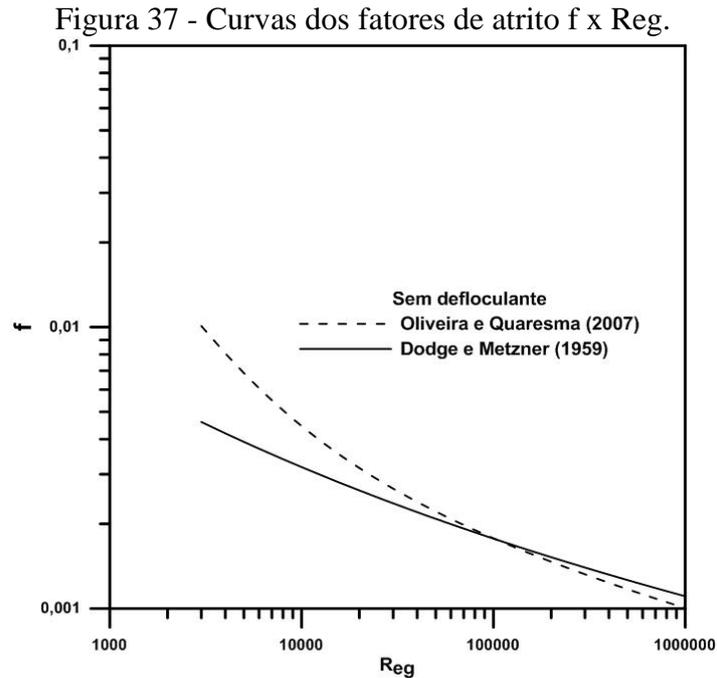
5.3 Fator de atrito

Os parâmetros obtidos para o cálculo do fator de atrito após modelagem para Herschel Bulkley são mostrados na Tabela 10.

Tabela 9 - Parâmetros para o cálculo do fator de atrito

Parâmetros	
D (m)	0,508
n	0,4304
τ_0 (Pa)	30,81
K (Pa.s ⁿ)	1,987
ρ (Kg/m ³)	1260

Os fatores de atrito obtidos pelas correlações desenvolvidas por Quaresma (2007) e Oliveira (2007) se aproximaram dos fatores da literatura teórico-experimental de Dodge e Metzner, para valores de número de Reynolds generalizado próximos e superiores a 100000. Pode-se observar esse comportamento pelas proximidades das curvas de fatores de atrito em função do número de Reynolds generalizado (Figura 37).



Pela Figura 37 observa-se que o fator de atrito decresce consideravelmente em função do aumento do número de Reynolds generalizado. Com isso observa-se que as condições operacionais de escoamento, mas especificamente o número de Reynolds, é um dos fatores de grande importância na escolha, por exemplo, de tubulações, pois o número de Reynolds contribuirá para um alto ou baixo fator de atrito, interferindo na qualidade da tubulação e no seu tempo de vida útil.

6 CONCLUSÕES

A utilização dos aditivos reológicos: hexametáfosfato de sódio, hidroxamato, sulfato de alumínio, poliacrilato de sódio e poliacrilamida 25% aniônica, apresentaram comportamento defloculante na suspensão em pH 6,5 procedente da mina.

O comportamento dos aditivos sulfato de alumínio, poliacrilato de sódio e poliacrilamida 25% aniônica como floculante ou defloculante dependente da variação do pH do meio.

A utilização de polímeros aniônicos no rejeito da bauxita comporta-se como floculantes em pH ácido e defloculante em pH básico, portanto a presença de cargas superficiais na suspensão é de grande importância para o modo de atuação do aditivo.

O sulfato de alumínio apresentou comportamento floculante em pH 4,5 e sua atuação melhorou com o peneiramento da amostra, apresentando 38,16% de aumento na viscosidade aparente inicial da polpa.

O peneiramento realizado a 400# Tyler retirou a sílica livre que apresentava tamanho superior a 38 μm . Com isso restaram na suspensão partículas de dimensões quase coloidais, melhorando a atuação dos aditivos.

A utilização dos aditivos hexametáfosfato de sódio, hidroxamato e poliacrilato de sódio em polpa passante a 400#Tyler apesar de potencializar a ação dos aditivos como dispersantes não reduziu a viscosidade aparente inicial a valores inferiores aos obtidos na amostra não peneirada. A exceção foi a poliacrilamida 25% aniônica que apresentou redução de 30,14% na viscosidade aparente para a amostra peneirada.

Os fatores de atrito obtido para o modelo de Herschel-Bulkley se aproximam dos fatores da literatura teórico-experimental de Dodge e Metzner para valores de número de Reynolds generalizado próximos e superiores a 100000.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Determinar o pcz do rejeito da bauxita para afirmar com maior clareza o comportamento das cargas elétricas com a variação do pH da suspensão.

Realizar ensaios de sedimentação nos aditivos que apresentaram comportamento floculantes para verificar a taxa de sedimentação e a capacidade de clarificação dos aditivos.

Realizar testes com polímeros de diferentes pesos moleculares e diferentes cargas elétricas para verificar a influência no comportamento e na eficiência.

Analisar os custos e a viabilidade tecnológica de uso dos aditivos estudados.

REFERÊNCIAS

- ABD-EL-KHALEK, D.E.; ABD-EL-NABEY, B.A. Evaluation of sodium hexametaphosphate as scale and corrosion inhibitor in cooling water using electrochemical techniques. **Desalination**, Egypt, 311, jan. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 21 out. 2013.
- ANDREOLA, F. et al. The role of sodium hexametaphosphate in the dissolution process of kaolinite and kaolin. **Journal of the European Ceramic Society**, Italy, v. 24, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 21 out. 2013.
- Appel, Chip et al. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electro acoustic mobility. **Geoderma**, v.113, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 24 out. 2013.
- AQUINO, T.F. et al. Caracterização físico-química e mineralógica da bauxita de santa catarina para a produção de refratários com baixo teor de óxido ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17, 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2006. p. 767-778.
- ARAÚJO, Diego Goyannes. Propriedades reológicas da polpa de bauxita – ii. avaliação do rotor tipo vane. In: XV JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – CETEM, 2007. Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br>>. Acesso em: 15 dez. 2013.
- ARIAS, Manuel; BARRAL, M. Teresa; DIAZ-FIERROS, Francisco. Effects of iron and aluminium oxides on the colloidal and surface properties of kaolin. **Clays and clay minerals**, Spain, v. 43, n. 4, 1995. Disponível em: <<http://www.clays.org/journal/archive/volume%2043/43-4-406.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2013.
- AVELAR, Angela Nair. **Influência da mineralogia na etapa de separação da lama vermelha no processo bayer**. 2011. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.
- BARNES, Howard A. **A handbook of elementary rheology**. 1st ed. United Kingdom: University of Wales, 2000. 210p.
- BARNES, H. A., HUTTON, J. F., WALTERS, K. **An introduction to rheology**. 3rd ed. United Kingdom: Elsevier Science Publisher, 1993. 199p.
- BRAUN, David B; ROSEN, Meyer R. **Rheology modifier handbook: Practical use and application**. 1st ed. New York: Willam Andrew Publishing, 2000. 513p.
- 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.

CARNEIRO, Diego AboulHosn; NASCIMENTO, Christine Rabello; SAMPAIO, João Alves. Efeito da aplicação de polímeros de baixo peso molecular na viscosidade da polpa de bauxita. In: XVII JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA- CETEM, 2009. Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 2009. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br>>. Acesso em: 7 out. 2013.

CASTRO, A. L., PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão de empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v.55, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 15 jun. 2013.

CERUTTI, Bianca Machado. **Estabilização de suspensões aquosas de alumina pela adição de taninos e quitosana quaternizada**. 2005. 96f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade de São Carlos. São Paulo, 2005.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e prática de tratamento de minérios**. 2. ed. São Paulo: Signus, 2002. 250 p.

CESARANO, Joseph; AKSAY, Ilhan A. Stability of aqueous α -al₂O₃ suspensions with poly(methacrylic acid) polyelectrolyte. **Journal of the American Ceramic Society**, v.71, n. 14, p. 250-55, 1988.

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.

DIAS, Charleston de Lellis Pimenta et al. Utilização de reagentes auxiliares na filtragem. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 57, n. 4, out/dez. 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

FALCUCCI, André. **A influência de flocculantes poliméricos na formação de pastas minerais**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

FERREIRA, Eliomar Evaristo et al. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 58, n.1, jan./mar. 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 2 jun. 2013

FERREIRA, H. Set al. Análise da influência do tratamento de purificação no comportamento de inchamento de argilas organofílicas em meios não aquosos. **Cerâmica**, v. 54, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 6 dez. 2013.

FONTES, Maurício Paulo F.; CAMARGO, Otávio Antônio de; SPOSITO, Garrison. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v.58, n.3, jul./set 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 23 out. 2013.

FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; McDONALD, Alan T. Conceitos fundamentais. In: _____. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 7 ed. Rio de Janeiro: , LTC, 2009. Cap. 2, p. 18-42.

GELFUSO, M. V., PEREIRA JÚNIOR, F. S., THOMAZINI, D. Influência do defloculante na deposição de alumina por eletroforese. **Cerâmica**, v.49, n. 312, out/dez. 2003. Disponível em: < <http://www.scielo.br> >. Acesso em: 4 jan. 2014.

GÓIS, Cristiane Corradi; LIMA, Rosa Malena Fernandes; MELO, Antônio Cardoso. Sedimentação de resíduo bayer utilizando flocculantes hidroxamatos e poliacrilamida. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.56, n.2, abr./ jun. 2003. Disponível em: < <http://www.scielo.br> >. Acesso em: 4 out. 2013.

GOMIDE, Reinaldo. **Fluidos na Indústria**. v. 2, São Paulo, 1993.

GONÇALVES, Silvane Gonçalves et al. Avaliação da influencia do pH na ação de aditivos reológicos no rejeito da bauxita de Paragominas-PA. **13º Encontro de Profissionais de Química da Amazônia**. Belém-PA, 2013.

GUEDES, Claudia Dumans et al. Coagulação/floculação de suspensões ricas em óxidos de ferro por sulfato de alumínio. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n. 5, 2004. Disponível em: < <http://www.scielo.br> >. Acesso em: 29 jan. 2014.

HOTZA, Dachamir. Artigo revisão: Colagem de folhas cerâmicas. **Cerâmica**, v. 43, 1997. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 19 set. 2013.

HOLLITT; Michael John et al. Process for removing reactive silica from a bayer process feedstock. United States Patent Number 6,309,615, 2001.

HYDRO. Disponível em: <<http://www.hydro.com/pt/Aluminio/A-Hydro-no-Brasil/Sobre-a-Hydro/Escritorios/Paragominas/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2013.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração –Disponível em:< <http://www.ibram.org.br> > Acesso em: 03 fev. 2013.

JOHNSON, Stephen B. et al. Surface chemistry–rheology relationships in concentrated mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**.v. 58, feb. 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 22 set. 2013.

KLEIN, B.; HALLBOM, D. J. Modifying the rheology of nickel laterite suspensions. **Minerals Engineering**, v.15, n.10, out. 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 24 out. 2013.

LINS, Fernando Freitas; ADAMIAN, Rupen. Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais. **Série Tecnologia Mineral**,v.78. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000, 29p. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br>>. Acesso em: 27 out. 2013.

MAURI, Jocimar et al. Dispersantes químicos na análise granulométrica de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, 2011. Disponível em: < <http://www.scielo.br> > Acesso em: 22 nov. 2013.

MORENO, R. The role of slip additives in tape casting technology: part I -¾ solvents and dispersants. **American Ceramic Society Bulletin**, v.71, n. 10, p.1521-31, 1992.

NASCIMENTO, Christine Rabello. Reologia e reometria aplicadas ao estudo de polpas minerais. **Série Rochas e Minerais Industriais**, v. 12. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008, 53p. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br>>. Acesso em: 17 out. 2013

NGUYEN, Q.D.; BOGER, D.V. Application of rheology to solving tailings disposal problems. **International Journal of Mineral Processing**, v. 54,1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 jun. 2013.

OLIVEIRA, Ana Paula Almeida; LUZ, Adão Benvindo. Recursos hídricos e tratamento de água na mineração. **Série Tecnologia Ambiental**, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, v. 24, 2001, 36 p. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/>>. Acesso em: 17 nov. 2013.

OLIVEIRA, Cristiane; RUBIO, Jorge. Mecanismos, técnicas e aplicações da agregação no tratamento mineral e ambiental. **Série Tecnologia Ambiental**: Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011, 69 p. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/>>. Acesso em: 2 set. 2013.

OLIVEIRA, R. P. **Lei do atrito para escoamento turbulento de fluidos não-newtonianos utilizando os modelos reológicos de herschel-bulkley e mizrariberk**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará. Belém, 2007.

ORTEGA, F.S. et al. Defloculação e propriedades reológicas de suspensões de alumina estabilizadas com dispersantes poliacrílicos. **Cerâmica Industrial**, v.2, n. 5/6, 1997. Disponível em: <<http://www.ceramicaindustrial.org.br>>. Acesso em: 25 set. 2013.

POSSA, Mario Valente; LIMA, José Renato B. Comportamento reológico de polpas de minério. **Série Tecnologia Mineral**, v.77, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000, 37 p. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/>>. Acesso em: 22 set. 2013.

POSSA, Mario Valente. Reologia no tratamento de minérios. In: LUZ, Adão Benvindo da; SALVADOR, João Alves Sampaio; ALMEIDA, Luiz M. de. **Tratamento de Minérios**. 4ª ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. p. 535-570.

PRADO, C. M. R. et al. Estudo da ativação ácida e tratamento térmico de bauxita extraída de jazidas em Minas Gerais, Brasil. **Cerâmica**, v.58, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 14 out. 2013.

QUARESMA, J. N. N. **Relatório técnico projeto**: Experimentos e Simulação em Escoamentos Não-Newtonianos. Faculdade de Engenharia Química – Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará. Belém, 2007.

QUARESMA, Luís Felipe. **Relatório técnico 22**: Perfil da Mineração de Bauxita. J.Mendo Consultoria. 2009.

ROCHA, V. A. Obtenção de argila organofílica por adsorção de cloreto de dodeciltrimetilamônio e caracterização mineralógica. In: XIV JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – CETEM, 2006. Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 2006. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br>>. Acesso em: 15 jun. 2013.

RODRIGUES NETO, J. B. et al. Comparative study of deflocculation mechanisms in colloidal clay suspensions. **Qualicer**, Spain, 2002. Disponível em: <<http://www.qualicer.org>>. Acesso em: 05 nov. 2013.

SALES, Luciano Leal de Moraes et al. Influência do pH sobre a estabilidade de suspensões de alumina estabilizadas eletrostericamente. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 1, jan./fev. 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 24 jun. 2013.

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

SAKOHARA, Shuji; KIMURA, Takashi; NISHIKAWA, Kazuo. Flocculation mechanism of suspended particles using the hydrophilic/hydrophobic transition of a thermo sensitive polymer. **Kona**, n. 20, 2002. Disponível em: <http://www.kona.or.jp/search/20_246.pdf>. Acesso em: 15 set. 2013.

SCHRAMM, Gebhard. **A practical approach to rheology and rheometry**. 2nd ed. Germany: Haake, 1998. 291p.

SHARMA, B.R.; DHULDHOYA, N. C.; MERCHANT, U.C. Flocculants - an ecofriendly approach. **Journal of Polymers and the Environment**, 14, may. 2006. Disponível em: <<http://www.taiyolucid.com/pdf/flocculants.pdf>>. Acesso em: 03 set. 2013.

SHIBATA, Junji et al. Dispersion and flocculation behavior of fine metal oxide particles in various solvents. **Kona**, n. 20, 2002. Disponível em: <http://www.kona.or.jp/search/20_263.pdf>. Acesso em: 8 set. 2013.

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

SOFRÁ, Fiona; BOGER, David V. Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. **Chemical Engineering Journal**, v. 86, n.3, april 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 29 set. 2013.

SPOSITO, Garrison. **The Environmental Chemistry of Aluminum**, 2nd ed., 1994.

STEFFE, J.F. **Rheological methods in food process engineering**. 2. ed. Freeman Press, 412p., 1996.

SANTOS, Tatiane C.; MENDES, Kamilla Cavalcante; MACÊDO, Emanuel Negrão. Uma Equação do Atrito para Escoamentos Turbulentos de Fluidos de Herschel-Bulkley. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ, 2006, Santos - São Paulo - Brasil. **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2006. v. 1. p. 1-10.

TEWARI, P. H.; MCLEAN, A. W., Temperature dependence of point of zero charge of alumina and magnetite. **Journal of Colloid Interface Science**, v. 40, 1972. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 12 fev. 2014.

TRIDIB, Tripathy; BHUDEB, Ranjan de. Flocculation: a new way to treat the waste water. **Journal of Physical Sciences**. v. 10, 2006. Disponível em: <<http://vidyasagar.ac.in/journal/math/vol10/JPS10art9.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

VALE. Disponível em: <http://saladeimprensa.vale.com/pt/versao_imprensa/prt_detail.asp?tipo=2&id=11160>. Acesso em: 15 fev. 2013.

ANEXO A – Dados sobre lançamento de rejeitos nas barragens.

LANÇAMENTO DE REJEITOS NAS BARRAGENS - ANO 2013											
Mês	Horas Calendário	Dados KM									
		Alimentação das Usinas em base seca (t)	Recuperação Mássica (%)	Produção Usinas em base seca (t)	Rejeito de Beneficiamento em base seca (t)	Vazão volumétrica polpa (m3/h)	Densidade polpa DIT_125_015 e DIT_525BP_003 (g/cm3)	% Sólidos	Vazão mássica polpa (t/h)	Volume polpa (m3)	Massa polpa (t)
Jan	744	1.016.070	64,02	650.468	365.601	1.318	1,233	30,23	1.625	980.402	1.209.228
Fev	672	848.063	64,79	549.491	298.573	1.281	1,217	28,49	1.560	861.167	1.048.040
Mar	744	967.254	65,97	638.129	329.125	1.297	1,214	28,11	1.574	964.851	1.170.847
Abr	720	906.724	67,86	615.288	291.436	1.178	1,215	28,27	1.432	848.402	1.030.808
Mai	744	729.841	66,02	481.823	248.018	925	1,226	29,40	1.134	688.389	843.620
Jun	720	655.282	64,63	423.537	231.745	839	1,240	30,93	1.040	604.110	749.156
Jul	744	857.076	60,17	515.708	341.369	1.150	1,250	31,92	1.437	855.662	1.069.321
Ago											
Set											
Out											
Nov											
Dez											
Total	5088	5.980.310	64,79	3.874.443	2.105.867	1.141	1,228	29,64	1.401	5.802.982	7.121.020