



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

KELLY CRISTINA SARMENTO SILVA

**INFLUÊNCIA DE ADITIVOS QUÍMICOS NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DA POLPA DE BAUXITA**

BELÉM
2011

KELLY CRISTINA SARMENTO SILVA

**INFLUÊNCIA DE ADITIVOS QUÍMICOS NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DA POLPA DE BAUXITA**

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos

ORIENTADORES: Prof^ª. Dra. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe

Prof. Dr. Célio Augusto Gomes de Souza

BELÉM

2011

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

Silva, Kelly Cristina Sarmento

Influência de aditivos químicos no comportamento reológico da polpa de Bauxita/ Kelly Cristina Sarmento Silva; orientadores, Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe e Célio Augusto Gomes de Souza. _ Belém - 2011

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2011

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

CDD 22.ed. 531.1134

KELLY CRISTINA SARMENTO SILVA

**INFLUÊNCIA DE ADITIVOS QUÍMICOS NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DA POLPA DE BAUXITA**

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

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

DATA DA AVALIAÇÃO: ____/____/____

CONCEITO: _____

BANCA EXAMIDADORA

Prof. Dr. Célio Augusto Gomes de Souza
(FEQ – ITEC – UFPA – Orientador)

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

Prof. Dr. João Nazareno Nonato Quaresma
(FEQ – ITEC – UFPA – Membro)

Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza
(FEQ – ITEC – UFPA – Membro)

Profª Dra. Roseane de Lima Silva
(FEMMA– UFPA – CAMPUS DE MARABÁ– Membro)

Uma pequena fê levará tua alma ao céu;
uma grande fê trará o céu para sua alma.

(Charles Spurgeon)

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos Victor Davi e Ana Carla,
que todos os dias são o meu incentivo e à
minha querida mãe por estar ao meu lado
em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **DEUS** por me dar forças para lutar e nunca desistir dos meus objetivos.

Ao Professor Doutor **Célio Augusto Gomes Souza** pela orientação, confiança depositada e compreensão.

À minha querida orientadora Professora Doutora **Augusta Maria** que não mediu esforços para me instruir tanto na vida pessoal como profissional e será para sempre meu referencial.

Ao meu companheiro de mestrado **Sebastião Brum** pelo fornecimento das amostras e pela contribuição com seus conhecimentos sobre Mineração.

Ao meu eterno e querido mestre **Lênio José Guerreiro de Faria** que, desde o começo da graduação, jamais me abandonou nos momentos de aflição.

Aos meus companheiros de laboratório MSc. **Raimunda; Rayssa Luana e Dílson** (Lab. Reologia), que, além de suas contribuições, transformaram meu ambiente de trabalho um local agradabilíssimo.

À técnica **Lianne Maria Dias** (Laboratório de Análises de Materiais) por estar sempre disponível para ajudar.

Ao meu querido amigo **João** (Lab. Ambiental) pelos seus conselhos e ajuda para realização deste trabalho.

Às minhas amigas **Elza Brandão e Maria Valente** (LEPRON) porque juntas conquistamos o que parecia impossível.

Aos meus amigos do Laboratório de Modelagem e Simulação, principalmente **Simone de Aviz e Clauderino**.

Ao **Wenderson Gomes dos Santos** (THERMTEK) pelo auxílio com o Programa Origin.

Ao CNPq pela concessão da bolsa.

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

Mineração Bauxita Paragominas (MBP), envia através de mineroduto polpa de bauxita com 50% de teor de sólidos para a região Barcarena (PA), totalizando um percurso de 244 km. A viscosidade é um dos parâmetros mais importantes no transporte de bauxita uma vez que, é alterada principalmente pela sedimentação das partículas, influenciando na formação de aglomerados que por sua vez dificultam o bombeamento. O uso de aditivos reológicos pode ser uma alternativa para minimizar a sedimentação e diminuir a viscosidade das polpas concentradas, facilitando seu escoamento no interior do mineroduto. Neste trabalho foram realizadas caracterização da polpa de bauxita transportada por mineroduto, através das análises de pH, Ponto de Carga Zero (PCZ), densidade, análise granulométrica, viscosidade, além de ajustes para os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley. O estudo de parâmetros reológicos foi realizado no viscosímetro Haake VT 550, com sensor tipo cilindros coaxiais SV₁, a 28 °C e taxa de 100 s⁻¹. As análises reológicas mostraram que a polpa de bauxita apresentou comportamento de um fluido não-newtoniano dependente do tempo. A pesquisa para a dependência do fluido com o tempo foi realizada através da curva de histerese, mostrando que a polpa apresentou tendência ao comportamento reopético. A viscosidade cresceu exponencialmente com o aumento do teor de sólidos contendo uma fração de 34,76% de finos. A curva de defloculação possibilitou avaliar a concentração ideal de defloculante em 2,5% correspondendo 62,5 g/t necessários para a redução da viscosidade da polpa de bauxita em estudo. O PCZ da bauxita estimado foi de aproximadamente 3,5 e os valores experimentais tiveram melhor ajuste para o modelo de Herschel- Bulkley.

Palavras chaves: aditivos reológicos; polpa de bauxita, reologia, viscosidade.

ABSTRACT

Mineração Bauxita Paragominas (MBP) transports 50% of solids bauxite pulp to the Barcarena (PA) region through a 244-kilometer pipeline. Viscosity is one of the most important parameters in the transport of bauxite, as a fact of an eventual stop of the process, sedimentation of particles occurs, forming compact bodies of ore which make harder pumping. The use of rheological additives may be an alternative to minimize sedimentation and decrease the viscosity of the concentrated pulp, facilitating the flow inside the pipeline. In this work, it was realized for the bauxite pulp, pH, density and viscosity analysis, particle size analysis. The study of viscosity was performed in a Haake VT 550 viscometer, with a coaxial cylinder sensor type SV1 at 28° C, rate of 100 s⁻¹. The Rheometry analysis showed that the bauxite pulp behaved as a non-newtonian fluid and time dependent. The search for the dependence of the fluid over time was performed by the hysteresis curve, showing that the pulp tended to rheopectic behavior. The viscosity increased exponentially with increased solids content. The fraction of fines in the pulp was 34.76% and the deflocculation curve made possible to evaluate the optimal concentration of dispersant of 2.5% corresponding to 62.5 g/t required to reduce viscosity.

Key words: rheological additives, bauxite pulp, rheology, viscosity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Bauxita (A); Alumina (B); Alumínio (C)	20
Figura 2.2: Percurso Paragominas-Barcarena	20
Figura 2.3: Perfil do solo da região de Paragominas	22
Figura 2.4: A lavra da bauxita e o transporte para área de britagem	23
Figura 2.5: A bauxita em forma de minério	23
Figura 2.6: Mineroduto de Paragominas	26
Fluxograma 2.1: Funcionamento geral de um Mineroduto	27
Figura 2.7: Características do transporte de partículas.	27
Figura 2.8: Teste do ângulo de repouso	28
Figura 2.9: Tubo original utilizado para o teste do ângulo de repouso	28
Fluxograma 2.2: Evolução cronológica e esquemas dos métodos de produção de alumina	29
Quadro 2.1: Modelos Reológicos	33
Figura 2.10: Curvas de histerese de fluidos tixotrópicos e reopéticos	34
Figura 2.11: Modelos reológicos de polpa	36
Figura 2.12: Fluido newtoniano e de Bingham	37
Figura 2.13: Geometria do cilindro concêntrico	38
Figura 2.14: Spindle SV1 utilizado nos ensaios reológicos	39
Figura 2.15: A sedimentação das partículas com o tempo	39
Quadro 2.2: Aditivos utilizados na polpa de bauxita	40
Figura 2.16: Fórmulas estruturais do hexametáfosfato de sódio e poliacrilato de sódio	40

Figura 2.17: Representação da metodologia aplicada para determinação do ponto de concentração ideal de defloculante	41
Figura 2.18: Representação de uma partícula em meio aquoso	43
Figura 2.19: Curva de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.	44
Figura 2.20: Mecanismo de estabilização de suspensões	46
Figura 2.21: Ajuste dos modelos de Casson e Bingham para os dados experimentais de tensão e taxa de cisalhamento da polpa de bauxita (MBP).	48
Quadro 2.3: Classificação das Bombas	50
Figura 2.22: Bomba Centrífuga para Polpas Abrasivas	50
Figura 2.23: Bombas de deslocamento positivo da MBP	52
Figura 2.24: Esquema de uma bomba diafragma utilizada na MBP	53
Figura 2.25: Bombas utilizadas na MBP	54
Figura 3.1: Polpas de bauxita	56
Figura 3.2: Ajuste do fluido de calibração	57
Figura 3.3: Especificações do Spindle SV1	57
Figura 3.4: Programação PSI	58
Figura 3.5: Viscosímetro VT550 HAAKE	59
Fluxograma 3.1: Teste para o eletrólito indiferente.	60
Figura 4.1: Variação da viscosidade com a concentração de sólidos	62
Figura 4.2: Distribuição granulométrica em porcentagem retida acumulada e passante acumulada	63
Figura 4.3: Concentração ideal de hexametáfosfato para polpa com teor de sólido de 50%	64
Figura 4.4: Concentração ideal de poliacrilato de sódio para polpa com teor de sólido de 50%	66

Figura 4.5: Perfil da viscosidade com adição de hexametáfosfato a 2,5%	67
Figura 4.6: Perfil da tensão com adição de hexametáfosfato a 2,5%	67
Figura 4.7: Perfil da viscosidade com adição de poliacrilato 2,5%	68
Figura 4.8: Perfil da tensão com adição de poliacrilato 2,5%	68
Figura 4.9: Histerese da polpa a 50%	71
Figura 4.10: Ajuste para os modelos propostos e o desvio das tensões	74
Figura 4.11: Determinação do ponto de carga zero da bauxita	74
Figura 4.12: Viscosidade da polpa de bauxita para diferentes valores de pH	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: fórmulas químicas e características dos principais constituintes da rocha bauxita.	18
Tabela 2. 2: fluidos de comportamento newtoniano, pseudoplástico, dilatante e Bingham como casos especiais do modelo de Herschel-Bulkley.	32
Tabela 3.1. Preparação das polpas	55
Tabela 4.1: Caracterização da polpa sem aditivos	61
Tabela 4.2: Distribuição granulométrica	62
Tabela 4.3: Polpa a 50% com adição de Hexametáfosfato de sódio	64
Tabela 4.4: Polpa a 50% com adição de poliacrilato de sódio	65
Tabela 4.5: Histerese da Polpa	70
Tabela 4.6: Ajustes para os modelos de Bingham e Hershel-Bulkley	72
Tabela 4.7: Incertezas do Experimento	73

NOMENCLATURA

ALUNORTE- Alumínio do Norte do Brasil

CAP- Companhia de Alumina do Pará

CVRD- Companhia Vale do Rio Doce

DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral

DSM- Dutch State Mines

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

I- Incerteza experimental

I^- - Incerteza para um valor inferior.

I^+ - Incerteza para um valor superior

MBP- Mineração Bauxita Paragominas

PCZ – Potencial de Carga Zero

PSI- Pipeline Systems Incorporated

SUMÁRIO

CAPITULO 1- INTRODUÇÃO	16
CAPITULO 2- REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 BAUXITA	18
2.1.1 Processos de formação da bauxita laterítica	19
2.1.2 A lavra	21
2.1.3 O beneficiamento	23
2.1.4 O transporte	25
2.1.4.1 Transporte da polpa de bauxita em Paragominas	26
2.2 FUNCIONAMENTO DE UM MINERODUTO	27
2.2.1 Características	27
2.2.2 Condição de parada	28
2.3 PROCESSAMENTO DA BAUXITA	29
2.4 REOLOGIA E REOMETRIA	30
2.5 PROPRIEDADES REOLÓGICAS	31
2.5.1 Tensão inicial de escoamento	31
2.5.2 Viscosidade	31
2.5.3 Modelos reológicos	32
2.6 FLUIDOS DEPENDENTES DO TEMPO	33
2.7 REOLOGIA DAS POLPAS	34
2.8 REOMETRIA	38
2.8.1 Ensaio em viscosímetros rotacionais tipo cilindro coaxiais	38
2.8.2 Spindles	39
2.8.3 O efeito da sedimentação de partículas	39
2.9 ADITIVOS REOLÓGICOS	40
2.10 MECANISMO DE ESTABILIZAÇÃO DE SUSPENSÕES	43
2.11 AJUSTE DOS VALORES EXPERIMENTAIS PARA MODELOS REOLÓGICOS	48

2.12	BOMBEAMENTO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO	49
3.0	CAPITULO 3- MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA POLPA DE BAUXITA	56
3.2	ENSAIOS REOLÓGICOS	58
3.3	POTENCIAL DE CARGA ZERO	61
4.0	CAPITULO 4- RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.0	CAPITULO 5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES	79
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A	
	APÊNDICE B	
	APÊNDICE C	
	APÊNDICE D	
	APÊNDICE E	

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor de minério de bauxita com produção em 2008 estimada em 26,6 milhões de toneladas. O estado do Pará contribui com 85%, seguido por Minas Gerais (14%) e outros (1%). Os projetos no estado incluíram a extração de bauxita da mina de Juruti com 2,6 milhões de ton./ano em 2009. Existem projetos para construir uma nova refinaria de alumínio, com capacidade de 7,4 milhões de ton./ano, com investimentos de US\$ 2,2 bilhões, com a bauxita fornecida pela mina de Paragominas (IBRAM, 2010).

As minerações de bauxita geralmente situam-se distantes da área de processamento e transportar grandes quantidades de minério requer uma operação que seja economicamente viável. A mineração bauxita Paragominas (MBP) envia bauxita para o local de processamento (Barcarena-PA) e apesar de o percurso estar perto de rios, seu transporte por navios torna-se inviável, devido durante a estiagem o nível das águas baixarem. O transporte por veículos é inviável devido ao custo com a manutenção e o rápido desgaste.

Sendo assim o transporte via mineroduto foi uma alternativa segura e economicamente viável para fazer o escoamento da bauxita em forma de polpa, durante o percurso de 244 km que atravessa os municípios de Paragominas, Ipixuna do Pará, Tomé-Açú, Acará, Moju, Abaetetuba e Barcarena, passando por baixo de rios.

Um dos efeitos indesejados acontece, quando por alguma razão ocorre uma parada no processo, pois a sedimentação das partículas provoca a formação de aglomerados que por sua vez dificultam o bombeamento.

Os parâmetros mais importantes de monitoramento são o teor de sólidos, a distribuição da granulometria, viscosidade, tensão limite de escoamento e o pH da polpa. Qualquer alteração nos dois primeiros parâmetros será determinante para as propriedades reológicas da polpa de bauxita.

Manter as partículas em suspensão até o final do percurso é um desafio a ser vencido e quanto mais informações forem obtidas sobre o comportamento deste fluido, será de suma importância para melhorar o seu escoamento via mineroduto.

O objetivo do trabalho constou no uso de aditivos químicos modificadores de propriedades reológicas como alternativas para reduzir a sedimentação de partículas, diminuindo a viscosidade de polpas concentradas, facilitando seu escoamento no mineroduto. Os experimentos foram conduzidos de forma a estudar o comportamento reológico da polpa

de bauxita em função da viscosidade, com e sem a adição de aditivos reológicos e os resultados experimentais mostraram que a polpa apresentou características de fluido não-newtoniano. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de Bingham e de Herschel-Bulkley, sendo o modelo de Herschel-Bulkley o de melhor ajuste. Como o pH é um fator relevante na viscosidade, foi realizado o estudo sobre a faixa de pH onde seria obtida a melhor dispersão da polpa, encontrando-se o valor de pH correspondente ao ponto de carga zero para a bauxita. A avaliação do ponto de carga zero permite que sejam estimados os efeitos de aglomeração e dispersão das partículas em uma suspensão.

A seguir serão apresentadas a revisão da literatura, nos capítulos 2 e 3, será relatada a forma como os experimentos foram conduzidos e no capítulo 4 os resultados serão discutidos como forma de validar a pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BAUXITA

A bauxita (Tabela 2.1) é composta por uma mistura impura de minerais de alumínio dentre os quais os mais importantes são: gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), diásporo ($\text{AlO}(\text{OH})$) e boehmita ($\text{AlO}(\text{OH})$), conhecidos como oxi-hidróxidos de alumínio. As proporções destes minerais variam muito, bem como o tipo e a quantidade de impurezas no minério, como óxido de ferro, argila, sílica, dióxido de titânio. Para ser considerada economicamente aproveitável, a bauxita deve apresentar um teor de alumina de Al_2O_3 de 50% a 55%. A coloração da rocha varia de branca a vermelha conforme o teor de óxido de ferro, que pode atingir uma proporção de 25% (SAMPAIO e NASCIMENTO, 2006).

Tabela 2.1- Fórmulas químicas e características dos principais constituintes da rocha bauxita.

	Gibbsita	Boehmita	Diásporo
Fórmula	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\alpha \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\beta \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
% Al_2O_3	65,40	85,00	85,00
Dureza (Mohs)	2,30 - 3,50	3,50 – 5,00	6,50 – 7,00
Peso específico	2,30 – 2,40	3,01 – 3,06	3,30 – 3,50
Sistema Cristalino	Monoclínico	Ortorrômbico	Ortorrômbico

Fonte: SAMPAIO; NEVES (2002).

A bauxita, apesar de ser considerado um minério de alumínio, não é necessariamente uma espécie mineral, mas um sistema heterogêneo formado por óxidos de alumínio hidratados contendo impurezas. Seus principais constituintes são o diásporo ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e a boehmita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), que diferem entre si quanto ao número de moléculas de água de hidratação e quanto à estrutura cristalina, sendo que bauxitas geologicamente mais novas possuem alto conteúdo de gipsita (ALVES e JESUS, 2010).

As principais impurezas presentes na bauxita são compostas de ferro (hematita, óxidos/hidróxidos amorfos e goetita), sílica, titânio e aluminossilicatos, em quantidades que variam com a região de origem, causando alterações no aspecto físico do minério, que pode variar de um sólido marrom-escuro ferruginoso até um sólido de cor creme, duro e cristalino (CONSTANTINO *et al.*, 2002).

2.1.1 Processo de formação da bauxita laterítica

A Província Bauxitífera de Paragominas, situada na Amazônia Oriental, ocupa área de aproximadamente 50.000 km². Caracteriza-se por relevo plano fortemente dissecado, cuja altitude decresce cerca 400 m até menos de 100 m, numa distância de mais de 300 km, entre a Serra do Gurupi, que marca sua borda meridional, e os morros baixos e aplainados dos arredores da cidade de Ipixuna, e sua extremidade norte. Como as demais bauxitas da bacia Amazônica, as bauxitas de Paragominas se formaram por alteração laterítica de depósitos siliciclásticos do Cretáceo (no caso, dos sedimentos do Grupo Itapecuru e da Formação Ipixuna) durante o Paleógeno. Sobre o manto residual existe uma camada de argila essencialmente caulinitica de até 20 m de espessura, que constitui os platôs. O manto laterítico/bauxítico apresenta estrutura acamada, devido à presença de horizontes ricos em Al ou Fe alternados (BASILE *et. al.*, 2005).

Laterização

O termo laterita é empregado para o solo cujos componentes principais são os hidróxidos de alumínio e de ferro, onde as águas pluviais removeram a sílica e diversos cátions. Como a rocha é rica em alumina, a laterita que dela provier terá o nome de bauxita, o principal minério de alumínio. A lateritização baseia-se, fundamentalmente, num processo de diagênese resultando no aumento do caráter eletro positivo dos colóides do solo. Quando o processo se completa, tem-se a transformação dos solos em rocha, o laterito.

Bauxitização

Corresponde ao processo de formação da bauxita dessilicatada e dá-se freqüentemente na presença de calcário. Esse processo caracteriza-se pela predominância de óxido hidratado de alumínio associado ao óxido de ferro, sílica remanescente e outras impurezas. (SAMPAIO *et al.*, 2008).

A Figura 2.1 apresenta a bauxita em sua forma natural (A), a alumina (B), principal produto obtido do seu beneficiamento e os lingotes (C) que se constituem numa forma de comercialização para o produto.

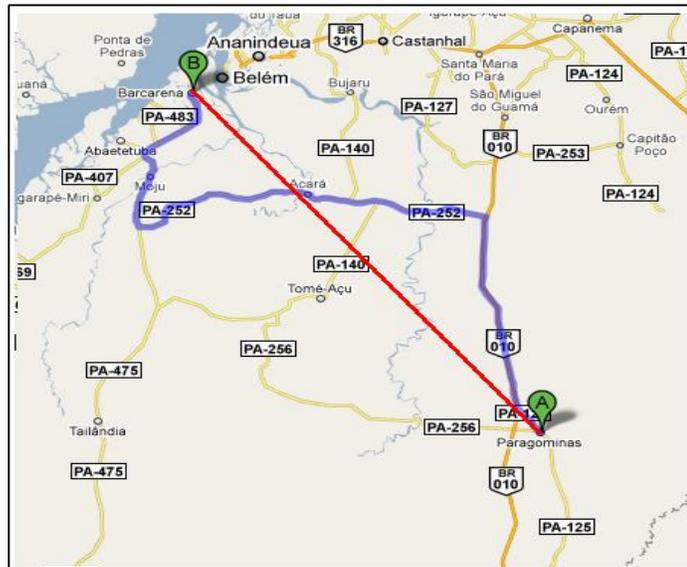
Figura 2.1: Bauxita (A); alumina (B); alumínio (C)



Fonte: Autor

O município de Paragominas possui aproximadamente 20.000 Km² e 90.753 de habitantes em 2010. Estando localizado no nordeste paraense, sua área territorial é formada por extensas florestas e belezas naturais, reflorestamentos, campos e plantios agrícolas. Paragominas ocupa uma posição geográfica estratégica que confere vantagens inquestionáveis aos investidores devido à facilidade de escoamento da produção através da rodovia Belém-Brasília (IBGE, 2011). A Figura 2.2, mostra em vermelho o percurso entre Paragominas e Barcarena.

Figura 2.2: Percurso Paragominas-Barcarena.



Fonte: <http://maps.google.com.br/maps/mm>

Os primeiros estudos de ocorrência de bauxita em Paragominas datam de 1960, na ocasião em que estavam sendo empiçarradas a BR-010 e suas vicinais, quando técnicos descobriram o minério na forma de cascalho sob um capeamento de 17 metros. A grande dificuldade para a exploração do minério na região era o transporte do produto, pois inicialmente pensava-se apenas em fazer o escoamento pelos rios Guamá e Capim pertencentes à região. O transporte por via fluvial era dificultado por depender do período de chuvas, já que em épocas de estiagem o nível das águas é reduzido, impossibilitando o transporte.

Na década de 1970, a ainda CVRD mostrou interesse pela bauxita de Paragominas requerendo, junto ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), autorização para realizar pesquisa mineral entre os rios Capim e Gurupi, objetivando localizar depósitos com potencial significativo que permitissem a produção de bauxita. Assim, as prospeções efetuadas revelaram a existência de grande ocorrência de bauxita no município, a qual ocorre em platôs (planaltos sedimentares de topo plano). Alguns destes, como o chamado Miltônia 3, a cerca de 60 km da cidade, 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 (LOBATO *et al.*; 2003). A Hydro, companhia de alumínio baseada na Noruega, assumiu oficialmente 60% das ações da Vale na mina de bauxita mineração Paragominas e todas as ações da Vale na refinaria de alumina da Alunorte, na fábrica de alumínio da Albrás e no projeto de refinaria de alumina da CAP. Ao mesmo tempo, a Vale se tornou a segunda maior acionista da Norsk Hydro ASA. (NORUEGUESES..., 2011)

A Mineração Bauxita Paragominas (MBP) compreende três atividades: a lavra, o beneficiamento e o transporte da polpa de bauxita pelo mineroduto para refinaria de alumina (Alunorte).

2.1.2 A lavra da bauxita

A maior parte dos minérios de bauxita lavrados são gibbsíticos, seguidos por aqueles compostos de, bohemita e diásporo. As diferenças nas composições dos minerais influenciam o processo dos mesmos.

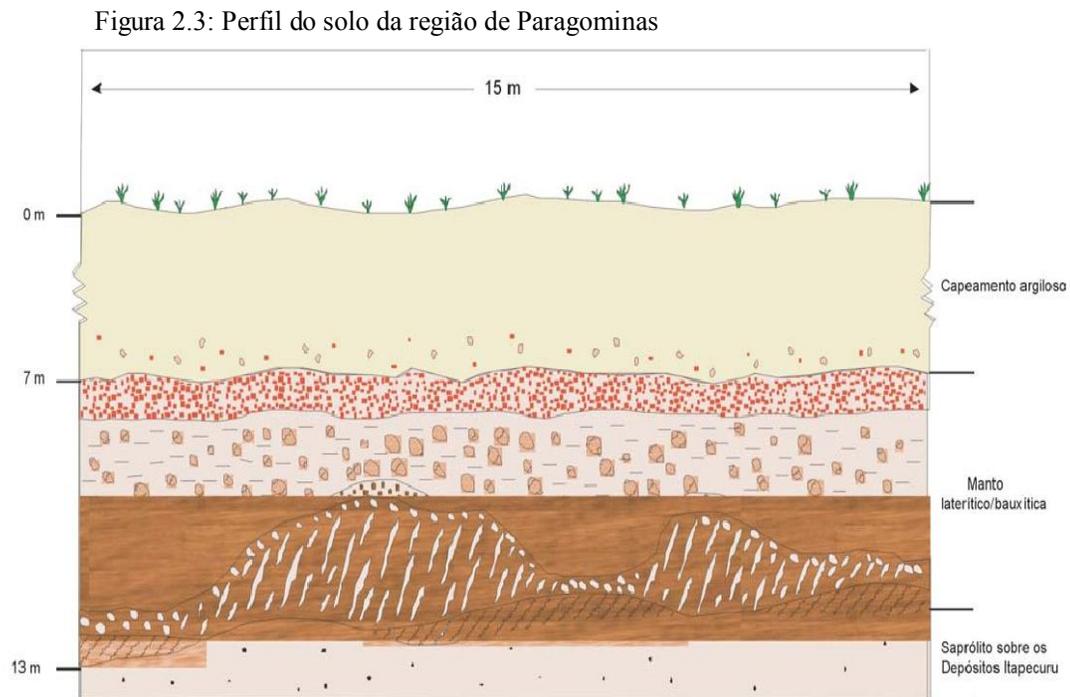
Os métodos de lavra dos minérios de bauxita variam de acordo com a natureza dos corpos mineralizados das jazidas. A lavra destes minérios é feita na maior parte, a céu aberto

segundo o método de lavra em tiras (*strip mining*). Estima-se que o maior número de jazida de bauxita laterítica é lavrada por métodos a céu aberto (RÖHRLICH *et al.*; 2001)

A lavra é a extração da bauxita do local onde está depositada. A cada ano será lavrada uma área de aproximadamente 210 hectares, com operação inteiramente mecânica, sem o uso de explosivos, que se completa em cinco etapas descritas abaixo, (VALE, 2007):

1. Preparação e limpeza da área, incluindo, onde necessário, a retirada da camada estéril. O solo vegetal é estocado para, depois, ser utilizado na recomposição da área lavrada;
2. Abertura da mina, com remoção da camada argilosa que cobre a bauxita;
3. Escavação para retirada da bauxita da mina e seu transporte, em grandes caminhões, para a área de britagem;
4. Recomposição da área lavrada, com reposição do solo retirado.
5. Reflorestamento, com plantio de espécies nativas.

A extração da bauxita requer além da retirada da camada estéril, outras camadas subseqüentes como a de argila que é de aproximadamente 7 m de espessura. A Figura 2.3 apresenta o perfil do solo da região de Paragominas.



Fonte: Basile *et al.* (2005)

A Figura 2.4 mostra a lavra da mina e o transporte em caminhões para a área de beneficiamento. Antes do período de chuva a bauxita é estocada certa quantidade, pois a lavra

neste período fica difícil e o transporte perigoso já que o percurso se dá em regiões com desníveis do solo.

Figura 2.4: A lavra da bauxita e o transporte para área de britagem.



Fonte: Autor

2.1.3 Beneficiamento da bauxita

No beneficiamento de minérios de alumínio para fins metalúrgicos necessita-se de cuidado especial com a razão mássica $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, que provoca um efeito significativo sobre o processo Bayer. Na maioria das vezes, seu valor deve ser maior que 10. Quando há predominância de diásporo no minério de bauxita, o valor da razão mássica torna-se menor que 10. Neste caso, procede-se à sinterização do minério antes de submetê-lo ao processo Bayer para então produzir uma alumina com um determinado teor de Al_2O_3 . No entanto o processo de sinterização eleva o custo de produção de alumina (SAMPAIO *et al.*; 2008)

Nesta etapa a bauxita passa por operações de britagem, moagem até chegar ao tamanho ideal e ser transformada em polpa (Figura 2.5).

Figura 2.5: Bauxita em forma de minério



Fonte: Autor

O beneficiamento que consta no processo de preparação da bauxita consiste em cinco etapas:

2.1.3.1 Britagem

A bauxita oriunda da mina (Miltônia) é despejada por caminhões em uma moega que alimenta o britador primário. Assim, o britador de rolos dentados primário reduz o tamanho das rochas de aproximadamente 1,2 m para 300 mm. Um segundo estágio de britagem reduz o tamanho médio para uma faixa nominal de 200-150 mm.

2.1.3.2 Lavagem

A bauxita britada é lavada para retirada de argila e areia.

2.1.3.3 Classificação

A bauxita é classificada em peneiras e hidrociclones e o minério, acima do tamanho adequado ao transporte, seguem para a moagem. A bauxita, já no padrão de transporte, segue junto com a água da lavagem para a classificação final, onde é separada em rejeito (argila) e produto final (bauxita fina).

2.1.3.4 Moagem

A bauxita é cominuída até que chegue ao tamanho ideal para o transporte no mineroduto

2.1.3.5 Desaguamento e peneiramento final

O estágio de desaguamento consiste em um arranjo de hidrociclones de 10 polegadas e um espessador, sendo o último alimentado pelo *overflow* do primeiro. O *underflow* dos hidrociclones desaguadores mais o *underflow* do espessador, é conduzido por ação da gravidade até as peneiras tipo DSM (DUTCH STATE MINES), as quais foram projetadas para garantir um *top size* de 48# (0,30 mm) para o produto final.

Como o circuito do moinho de bolas foi projetado para produzir 90-95% passante em 0,30 mm, o *oversize* da peneira DSM é dirigido para o moinho de bolas, enquanto a fração *undersize* é bombeada para tanques de estocagem, localizados perto da estação de bombeamento do mineroduto (COSTA, 2010).

Toda água usada no beneficiamento é recuperada, evitando a constante captação de água nova para alimentar a linha de produção.

2.1.4 Transporte

O transporte de minério a longas distâncias utilizando mineroduto tem sido a melhor solução encontrada no equacionamento de um problema complexo no qual, além dos aspectos técnicos, avultam os de ordem econômica.

O investimento elevado com fornecimento e montagem das tubulações, bombas, motores, válvulas e equipamentos auxiliares; o suprimento de energia elétrica; devem apresentar razões, argumentos e resultados econômicos que, traduzidos numericamente possam justificar a adoção do sistema.

Na análise da alternativa do transporte do minério em veículos, o gasto como consumo de combustível e lubrificante, o investimento em veículos e seu rápido desgaste constituem aspectos da maior importância a serem considerados no posicionamento do problema.

Convém notar que o bombeamento só se viabiliza de forma satisfatória com o minério finamente pulverizado, constituindo uma mistura homogênea com cerca de 55% a 65% de pó na água, e que se denomina polpa ou lama (MACINTYRE, 1997)

O escoamento da produção mineral por meio de mineroduto é uma opção atraente para o transporte de grandes quantidades de minério. Sob o ponto de vista econômico e ambiental, é interessante que a polpa seja transportada com maior concentração possível, evitando assim a necessidade de operações com grandes volumes de água. Contudo, aumentar o teor de sólidos na polpa implica na obtenção de altos valores de viscosidade, o que dificulta o seu bombeamento. Além disso, o comportamento reopéxico que algumas polpas concentradas podem apresentar é altamente indesejável ao processo, visto que a reopéxia pode ocasionar em entupimento da linha e no aumento contínuo do gradiente de pressão no decorrer do bombeamento. (COOKE; SPEARINGT, 1993; KLEIN; HALLBOM, 2002).

No caso do bombeamento de polpas com tendência à sedimentação, que é o caso das polpas minerais, a ocorrência do “plug” é um problema comum que ocorre numa parada do processo e que pode dificultar consideravelmente o reinício do bombeamento (CARVALHO, 2003).

No tocante ao processo de bombeamento, uma das propriedades reológicas mais importantes é a viscosidade dinâmica (η) do fluido a ser bombeado, sendo este um parâmetro utilizado na escolha das bombas que serão utilizadas. A viscosidade representa a resistência do material ao fluxo, ou seja, quanto maior for a viscosidade de um fluido, maior será a energia necessária para a seu transporte através de dutos. Portanto, quanto menor for à

viscosidade do material, maior será a facilidade do seu transporte por mineroduto. (NASCIMENTO; SAMPAIO, 2007)

No estado do Pará está em operação o primeiro mineroduto de polpa de bauxita do mundo. Esse mineroduto foi concebido para transportar a polpa de minério de alumínio da usina de beneficiamento, localizada em Paragominas (PA) até a planta química de produção de alumina, situada no município de Barcarena (PA), num percurso de 244 km de extensão. (ARAÚJO *et al.*, 2010)

2.1.4.1 Transporte da polpa de bauxita em Paragominas

O produto final é conduzido até a Alunorte, em Barcarena. A polpa com cerca de 50% de minério cominuído e 50% de água, é bombeada através de mineroduto, um tubo subterrâneo de aproximadamente 20 polegadas de diâmetro com 244 km de extensão, que atravessará sete municípios: Paragominas, Ipixuna do Pará, Tomé-Açú, Acará, Moju, Abaetetuba e Barcarena, ligando Paragominas a Barcarena.

Ao longo do mineroduto existem vários pontos de monitoramento para evitar processos de corrosão, deformações na tubulação, ocorrência de plug (massas compactadas de minério). A alternativa de transporte por mineroduto, além de apresentar custos mais baixos de implantação e operação, tem baixo impacto ambiental e eficiência e segurança operacionais pela utilização de tecnologia avançada, com sistema automático de supervisão, através de fibra ótica instalado em vários pontos de monitoramento do fluxo de minério. (VALE, 2007). A Figura 2.6 mostra o mineroduto em fase de construção, antes de ser enterrado, dando uma noção do tamanho da tubulação que atravessa municípios até chegar ao seu destino final.

Figura 2.6: Mineroduto de Paragominas



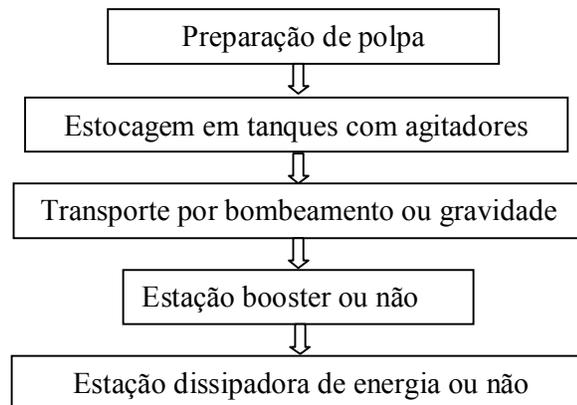
Fonte: Vale (2007)

Um fluido ao escoar através de um duto ou acessório sofre certa resistência ao seu movimento, em razão do efeito combinado da viscosidade e inércia. Essa resistência é vencida pelo líquido em movimento, mediante a dissipação de parte de sua energia disponível ao que comumente se chama de perda de energia, especificamente perda de carga. Embora essa perda de energia seja comumente designada como perda por fricção ou por atrito, não se deve supor que ela ocorra pelo efeito simples do atrito do fluido com as paredes dos dutos e acessórios. Junto às paredes desses componentes pode haver movimento do fluido e a velocidade se eleva de zero até o seu valor máximo, junto ao eixo dos mesmos. Pode-se assim prever uma série de camadas em movimento, com velocidades diferentes e responsáveis pela dissipação dessa energia (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

2.2 FUNCIONAMENTO DE UM MINERODUTO

O fluxograma apresentando as etapas do funcionamento de um mineroduto é mostrado no fluxograma 2.1.

Fluxograma 2.1: Funcionamento geral de um Mineroduto.

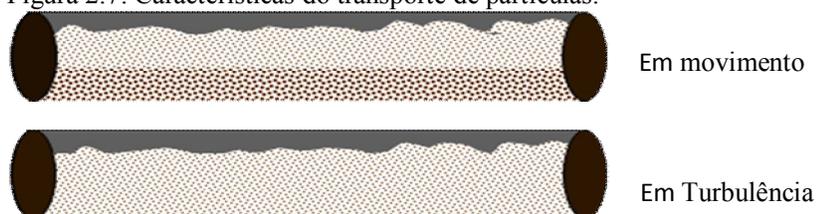


Fonte. Modificado PSI (2006)

2.2.1 Características de um mineroduto:

- Transporte normalmente em regime turbulento, para manter as partículas em suspensão, conforme a Figura 2.7.

Figura 2.7: Características do transporte de partículas.



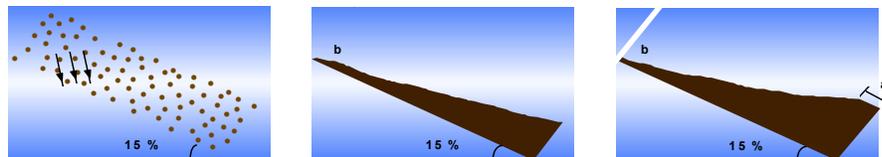
Fonte: PSI (2006)

- b) Tubulação normalmente cheia o tempo todo
- c) Tubulação normalmente enterrada
- d) Sistema de proteção catódica

2.2.2 Condição de Parada do Mineroduto

Quando ocorre uma parada no processo, a bauxita que fica dentro do mineroduto precisa ser repolpada e para isto existe um teste muito importante, chamado teste do ângulo de repouso. Neste teste as partículas são agitadas e depois deixadas em repouso para sedimentar, após as partículas sedimentarem deve haver uma região com água, sobrenadante, para facilitar o retorno da operação. A Figura 2.8 representa o comportamento das partículas.

Figura 2.8: Teste do ângulo de repouso



Fonte: PSI (2006)

O teste de ângulo de repouso fornece uma indicação da probabilidade de formação de *plug* (massa compactada de minério) ou de entupimento no mineroduto após uma parada. A montagem para realização do teste inclui um plano com 15% de inclinação, ou seja, cerca de 8,5 graus da horizontal, e tubos transparentes com comprimento de 1220 mm, diâmetro interno de 63,5 mm (2,5") e espessura de 3,2+/-0,5mm, como mostra o esquema da Figura 2.9. A inclinação do tubo foi especificada de acordo com a maior inclinação do mineroduto, configurando a condição mais propícia para a ocorrência de *plug* (PIPELINE SYSTEMS INC., 1997).

Figura 2.9: Tubo original utilizado para o teste do ângulo de repouso.



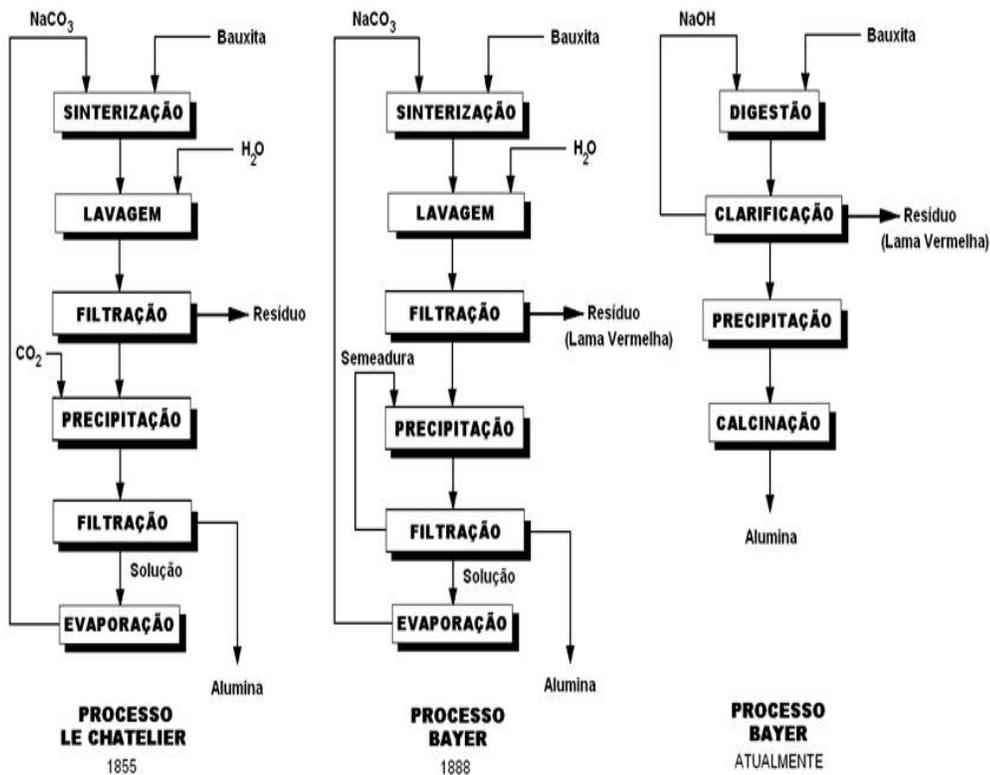
Fonte: Autor

2.3 PROCESSAMENTO DA BAUXITA

O processo Bayer é utilizado para o refino da bauxita (denominada assim devido à primeira mineração comercial ter ocorrido no distrito de *Les Baux*, França) na produção de alumina (Al_2O_3). Anteriormente ao surgimento do processo Bayer, o beneficiamento da bauxita era realizado através do processo *Le Chatelier*, desenvolvido cerca de 30 anos antes por *Louis Le Chatelier*. Esse método consiste no aquecimento da bauxita com Na_2CO_3 a $1200^\circ C$, remoção dos aluminatos formados com água, precipitação do $Al(OH)_3$ através da ação do CO_2 e, finalmente, o $Al(OH)_3$ formado é filtrado, seco e limpo.

O processo *Le Chatelier* foi substituído pelo processo Bayer, devido à drástica redução no custo de produção da Al_2O_3 que este proporcionou. O processo Bayer é utilizado até hoje praticamente sem mudanças significativas, somente com a substituição do Na_2CO_3 pelo $NaOH$ e pela utilização de pressão durante a digestão (HIND *et al.*, 1999). O Fluxograma 2.2 mostra a evolução da produção de alumina desde 1855 até os dias atuais.

Fluxograma 2.2: Evolução cronológica e esquemas dos métodos de produção de alumina.



Fonte: (HABASHI, 2005)

Na refinaria da ALUNORTE, a polpa é desaguada, em filtros de pressão hiperbárica, para atingir 12% de umidade no produto. Em Mendes *et al.*(2008) são citadas as especificações da bauxita para alimentar a refinaria:

- Bauxita gibbsítica;
- Teor de alumina aproveitável > 48%;
- Teor de sílica reativa < 3%;
- Teor insignificante de contaminantes químicos;
- Extração 100% da alumina aproveitável;
- Dessilicificação em aproximadamente 60 minutos a 145- 155°C
- Taxa de sedimentação da lama vermelha maior que 8m/h;
- Compactação da lama maior que 35% de sólidos

A sílica na forma de quartzo tem comportamento inerte no processo Bayer para produção de alumina. Já a sílica que integra a estrutura dos minerais de argila, denominada sílica reativa, reage com a soda cáustica durante a digestão da bauxita, formando compostos insolúveis, e o consumo desse insumo aumenta, em escala geométrica, à medida que cresce o teor dessa impureza no minério. Então para que a bauxita seja utilizada para produção de alumina a mesma deve conter um teor baixo dessa impureza (FLORES e DAMASCENO, 1998)

A gibbsita, a boehmita e o diásporo são os constituintes da bauxita. A alumina possível de ser extraída, sob as condições do processo Bayer de baixa ou alta temperatura, constitui a denominada alumina aproveitável. A gibbsita tem a menor densidade por isso é a mais solúvel nas soluções de soda cáustica. A boehmita é relativamente menos solúvel que a gibbsita nessas soluções e intermediária entre os três, em termos de dureza e densidade. O diásporo é o mais duro, denso e menos solúvel nas soluções cáusticas, dentre os três minerais (PATTERSON, 1984).

2.4 REOLOGIA E REOMETRIA

A Reologia é uma Ciência que surgiu no início do século XX e tem como principal propósito o estudo das deformações e do escoamento dos materiais, como indicado pelos radicais de origem grega *rheos* (fluir) e *logos* (estudo). Seu objetivo consiste no estudo do comportamento mecânico da matéria, ou seja, no estabelecimento de relações entre as forças aplicadas e as deformações resultantes (MACOSCO, 1994) e (BRETAS e D'ÁVILA, 2000).

Como ciência, a reologia tem importância para o entendimento da relação estrutura/propriedade dos materiais, tendo em vista que a variação das propriedades reológicas está intimamente relacionada às mudanças na estrutura, caso sejam mantidas as condições de teste. Já na indústria, o conhecimento do comportamento reológico de matérias-primas e produtos é importante para o projeto de equipamentos e controle dos processos (NASCIMENTO, 2008).

2.5 PROPRIEDADES REOLÓGICAS

2.5.1 Tensão limite de escoamento

A tensão limite de escoamento de escoamento τ_0 pode ser definida como a tensão mínima com base na qual o material efetivamente flui, ou seja, o material se comporta como um sólido para valores de τ inferiores a τ_0 . Cremes, pastas, géis e uma infinidade de produtos são exemplos de fluidos que possuem τ_0 . Sabe-se que, no caso das suspensões, a existência de τ_0 está relacionada à presença de interações entre as partículas que propiciam a formação de uma rede contínua, cuja resistência está relacionada com força dessas interações (UHLHERR *et al.*, 2005).

2.5.2 Viscosidade

A viscosidade representa a resistência do material ao fluxo, ou seja, quanto maior for a viscosidade de um fluido, maior será a energia necessária para o seu deslocamento através de dutos. A viscosidade de uma suspensão é função de fatores tais como a sua composição, distribuição do tamanho, carga superficial e formato das partículas, concentração, temperatura, pH a presença de sais e outros aditivos. Portanto, a variação destes parâmetros pode servir para a modificação da viscosidade (SAMPAIO e NASCIMENTO, 2007). Segundo Baldo (2005), o material particulado em suspensão afeta a viscosidade pelo formato das partículas e pela concentração. No primeiro é devido o impedimento fluidodinâmico do fluxo e no segundo devido o aumento do atrito interno.

2.5.3 Modelos reológicos

A viscosidade de um fluido é função da tensão de cisalhamento e da taxa de cisalhamento, sendo a relação entre elas estabelecida através de dados experimentais. O comportamento reológico é visualizado em um gráfico de tensão versus taxa de cisalhamento e a curva resultante (curva de escoamento ou reograma) é modelada matematicamente

utilizando-se várias relações funcionais. O tipo mais simples de fluido é o newtoniano, em que a tensão (τ) é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) e a relação entre elas é denominada viscosidade absoluta ou dinâmica de acordo com a Equação (2.1), ou seja, a viscosidade absoluta mede a resistência de um fluido newtoniano ao escoamento. Ela é constante e independente da taxa de cisalhamento.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Todos os fluidos que não apresentam este comportamento são denominados não-newtonianos. Uma relação geral que descreve o comportamento de fluidos não-newtonianos é o modelo de Herschel-Bulkley, representado na Equação (2.2).

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.2)$$

Onde:

K é o coeficiente de consistência,

n é o índice de comportamento do escoamento e

τ_0 a tensão limite de escoamento.

Este modelo é apropriado para vários fluidos, pois descreve diferentes comportamentos: newtoniano, pseudoplástico, dilatante e de Bingham. A Tabela 2.2 mostra como estes comportamentos podem ser considerados casos especiais descritos pelo modelo de Herschel-Bulkley (BRAGANÇA, 2008).

Tabela 2.2- Fluidos de comportamento newtoniano, pseudoplástico, dilatante e Bingham como casos especiais do modelo de Herschel-Bulkley.

Modelo	K	n	τ_0
Herschel-Bulkley	> 0	$0 < n < \infty$	> 0
Newtoniano	> 0	1	0
Pseudoplástico	> 0	$0 < n < 1$	0
Dilatante	> 0	$1 < n < \infty$	0
Bingham	> 0	1	> 0

Para os modelos newtoniano e plástico de Bingham, o coeficiente K é normalmente denominado viscosidade (η) e viscosidade plástica (η_p), respectivamente. Uma característica importante dos fluidos que apresentam comportamento de acordo com os modelos de Herschel-Bulkley e plástico de Bingham é a presença da tensão limite de escoamento (τ_0), que representa uma tensão finita requerida para que haja escoamento.

O Quadro 2.1 mostra os principais modelos reológicos descritos na literatura com suas respectivas equações e parâmetros.

Quadro 2.1- Modelos Reológicos

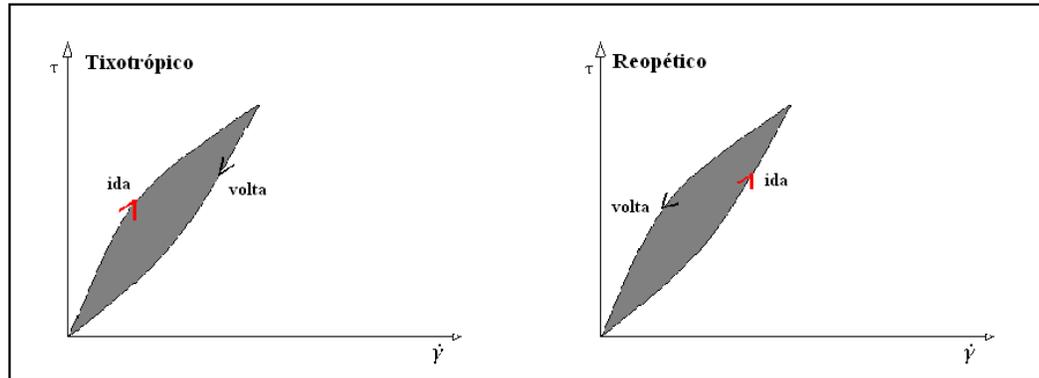
MODELO	EQUAÇÃO	PARÂMETROS
Newtoniano	$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$	Viscosidade dinâmica absoluta
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma}$	Viscosidade plástica e limite de escoamento
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$	Limite de escoamento índice de consistência e de fluxo
Ostwald	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$	Índice de consistência e de fluxo
Casson	$\tau = \sqrt[n]{\tau_0^n + (\eta_p \dot{\gamma})^n}$	Viscosidade plástica, limite de escoamento e índice de fluxo

2.6 FLUIDOS DEPENDENTES DO TEMPO

A mecânica dos fluidos classifica os fluidos dependentes do tempo em tixotrópicos e reopéticos. São considerados tixotrópicos quando a tensão de cisalhamento ou a viscosidade diminui com o tempo, mantendo-se a mesma taxa de cisalhamento. Já os reopéticos apresentam efeito contrário, pois a tensão de cisalhamento ou a viscosidade aumentam com tempo de aplicação de uma taxa de cisalhamento constante (MACHADO, 2002).

Uma forma de detectar se o fluido apresenta comportamento tixotrópico ou reopético é através da histerese, uma área formada entre a curva experimental quando aumentamos e decrescemos a taxa de cisalhamento e verificamos o comportamento do fluxo do fluido. A Figura 2.10 mostra o fenômeno de histerese, que é observado pela área entre as curvas ascendente e descendente, no comportamento de um fluido, quando este é submetido à variação da tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento.

Figura 2.10: Curvas de histerese de fluidos tixotrópicos e reopéticos



Fonte: (SCHARAMM, 2006)

2.7 REOLOGIA DAS POLPAS

Fuerstenau *et al.* (1990) estudaram o efeito de dispersantes (tipo polímeros) na viscosidade de polpas densas na moagem a úmido com bolas. Eles concluíram que as polpas com percentagens de sólidos relativamente baixos, de acordo com os autores menos de 40% sólidos por volume, suas viscosidades aparentes são mais ou menos independentes da distribuição de tamanhos de partículas ou adição de qualquer dispersante.

Healy *et al.* (1993) descreveram o comportamento de polpas de pigmento de dióxido de titânio com diferentes percentagens de sólidos em massa (45, 50 e 55%) em uma taxa constante de cisalhamento (50 1/s), utilizando dispersante (silicato de sódio) em diferentes valores de pH. , para as três percentagens de sólidos a maior viscosidade foi obtida em pH 8,5, sendo decrescentes em direção a menores valores de pH. Este fato pode esta relacionada ao PCZ do titânio que se encontra próximo do valor de pH 8,5.

Shi; Napier-Munn (1996) descrevendo o comportamento de polpas (minério sulfetado de cobre-chumbo-zinco) com diferentes percentagens de sólidos por volume (15, 30 e 45%) e diferentes concentrações de partículas passante em 38 μ m (20, 50 e 95%) constataram que a reologia das mesmas apresentava três tipos de comportamento: Dilatante, pseudoplástico e plástico de Bingham.

Nguyen e Boger (1998) realizaram a caracterização reológica de suspensões de lama vermelha com teor de sólidos diferentes e foi demonstrado que os dados das propriedades de fluxo obtidos podem ser usados para projetar minerodutos e prever as melhores condições de bombeamento.

A influência da reologia não é bem compreendida e, em vista disso, ela é raramente incorporada como uma variável em projetos, análises e otimização. Uma das principais razões 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 Técnicas para a medida da viscosidade (POSSA, 2000).

Boger *et al.*(2000) observaram que suspensões de TiO_2 em seu ponto de carga zero floculam, devido à forças atrativas entre as partículas, produzindo elevadas viscosidades e à medida que o pH desloca-se do ponto de carga zero forças repulsivas entre as partículas produzem suspensões dispersas e diminuem a viscosidade da suspensão, isto em baixas e médias taxas de cisalhamento.

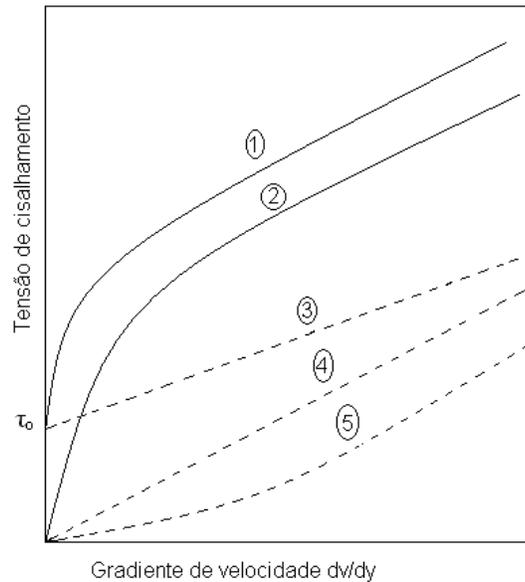
Sofrá e Boger (2002) estudaram o comportamento de suspensões minerais com elevado teor de sólido e concluíram que estes tipos de fluidos apresentam comportamento de fluidos não-newtonianos, sendo necessária uma tensão limite de escoamento para ocorrer a deformação e fluxo da matéria. Além disso, a reologia de suspensões minerais é dependente do tempo e da taxa de cisalhamento.

Até pouco tempo atrás, quando as frações de partículas finas e ultrafinas eram descartadas dos circuitos de beneficiamento, considerava-se a percentagem de sólidos como a única responsável pela variação da viscosidade na polpa. Com a necessidade de beneficiar partículas finas e ultrafinas intensificaram-se os estudos envolvendo essas frações. Com o auxílio de instrumentos mais modernos de medição de propriedades das partículas, outras variáveis foram creditadas como significativas para a viscosidade da polpa. São elas a distribuição de tamanhos das partículas, o pH do meio e a temperatura das polpas. (POSSA, 2002).

A reologia da polpa desempenha um papel importante nos diversos processos de tratamento de minérios, destacando-se classificação, moagem, concentração, sedimentação e filtração. Estes fatores atuam 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 polpas ao longo de dutos não só na usina de beneficiamento, como também em minerodutos. (POSSA, 2004).

A maioria dos fluidos com que estamos familiarizados (água, leite e óleo) apresenta o comportamento do tipo newtoniano. As polpas apresentam um comportamento mais complexo, sendo denominados fluidos “não newtonianos”, exigindo outros parâmetros além da viscosidade para caracterizar seu comportamento. A Figura 2.11 mostra o diagrama tensão de cisalhamento *versus* gradiente de velocidades, usualmente designado por reograma e os vários fluidos estudados pela Reologia. A maior parte das polpas usuais em Tratamento de Minérios pode ser caracterizada como “fluido de Bingham” ou fluido visco-plástico (CHAVES, 2002).

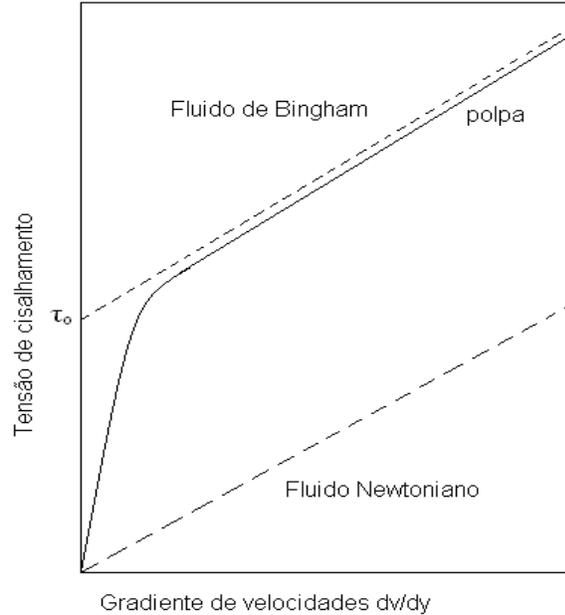
Figura 2.11: Modelos reológicos de polpa: pseudoplástico com tensão de escoamento (1), pseudoplástico (2), plástico (3), newtoniano (4), dilatante (5).



Fonte: Modificado de CHAVES (2002)

O fluido newtoniano pode ser representado por uma reta que passa pela origem e cuja inclinação é a viscosidade. O fluido de Bingham precisa ser cisalhado até um determinado valor limite para começar a escoar e passar a se comportar como fluido newtoniano. De acordo com a Figura 2.12. Este valor τ_0 ou tensão limite de escoamento representa o esforço mínimo que deve ser fornecido para iniciar o escoamento do fluido. O valor da inclinação da reta (correspondente à viscosidade) é chamado de módulo de rigidez. Segundo Nguyen e Boger (1992), o valor da tensão de escoamento denota a transição entre o comportamento de um sólido e um líquido. Uma das principais aplicações desse parâmetro tem sido no projeto e monitoramento do transporte de suspensões através de bombeamento, onde se deseja um valor da tensão de escoamento que possibilite o transporte de suspensões sem a ocorrência de sedimentação de partículas (CHAVES, 2002).

Figura 2.12: Fluido newtoniano e de Bingham



Fonte: Modificado de CHAVES (2002).

A primeira providência para caracterização de um fluido que necessita escoar consiste na determinação em laboratório das características reológicas do mesmo. Isto é realizado com a utilização de viscosímetros e reômetros e a partir destes resultados podem ser definidos parâmetros necessários ao dimensionamento de equipamentos que o processo requer, como as bombas.

Existe um ensaio adicional para medir a abrasividade da polpa, chamado ensaio Miller, que fornece parâmetros para o cálculo do desgaste abrasivo nas tubulações. Entretanto, dada a complexidade dos fenômenos físicos envolvidos, para tubulações de longa distância ou de maior responsabilidade, a forma mais segura e confiável de se determinar o valor da velocidade crítica é a execução de ensaio de bombeamento em circuitos apropriados (“loops”), dotados de visores adequados e da instrumentação necessária para medir as perdas de carga distribuídas e localizadas. Especialmente em sistemas de longa distância, tais ensaios são indispensáveis, pois permitem caracterizar uma velocidade segura de operação, porém próxima o suficiente da velocidade crítica, de modo a minimizar a perda de carga, reduzir o desgaste da tubulação e o consumo de energia (CHAVES, 2002).

2.8 REOMETRIA

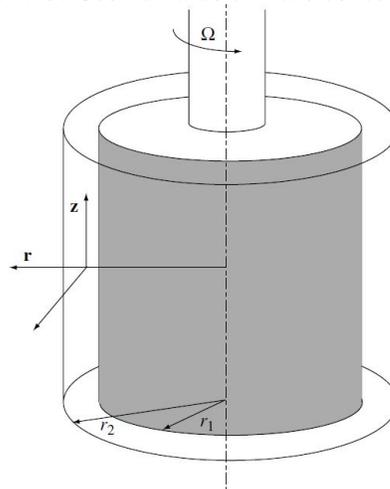
Reometria é o termo utilizado para a descrição do conjunto de técnicas experimentais adotadas na determinação das propriedades reológicas. Os ensaios reológicos são realizados por meio de instrumentos conhecidos como viscosímetros e reômetros (NASCIMENTO, 2008).

2.8.1 Ensaios com viscosímetros rotacionais tipo cilindros coaxiais.

Há um número de viscosímetros comerciais para serem escolhidos de acordo com a sua geometria, as faixas de viscosidades e as taxas de cisalhamento necessárias para o trabalho ou estudo. Os critérios para a escolha devem envolver, principalmente: a natureza do material; se é de baixa ou alta viscosidade; se é elástico ou não; a dependência da temperatura na viscosidade etc. Outra importante consideração é a precisão e exatidão requeridas e se as medidas são para controle de qualidade ou para pesquisa. Os viscosímetros rotacionais são constituídos de duas partes básicas separadas pelo fluido que está sendo analisado. As partes podem ser de cilindros concêntricos (copo e rotor), de placas, de cone e placa ou de discos.

Uma das partes gira em relação à outra e produz cisalhamento no fluido. A viscosidade é medida em função do torque fornecido para produzir uma determinada velocidade angular ou, da velocidade angular necessária para produzir um determinado torque. Eles são mais versáteis que os de fluxo capilar e podem ser usados para fluidos não-Newtonianos. (Possa, 2000). A Figura 2.13 mostra a geometria de um dispositivo de cilindros concêntricos.

Figura 2.13: Geometria do cilindro concêntrico



Fonte: COUSSOT (2005)

2.8.2 Spindles

“Spindles” são acessórios com os quais se realizam os testes de cisalhamento (Figura 2.14). A escolha dos “spindles” é feita de acordo com a faixa de viscosidade na qual o acessório pode trabalhar, ou seja, escolhe-se o dispositivo cuja faixa abranja a viscosidade aproximada do material a ser ensaiado (YABUCHI, 2004).

Figura 2.14: Spindle SV1 utilizado nos ensaios reológicos

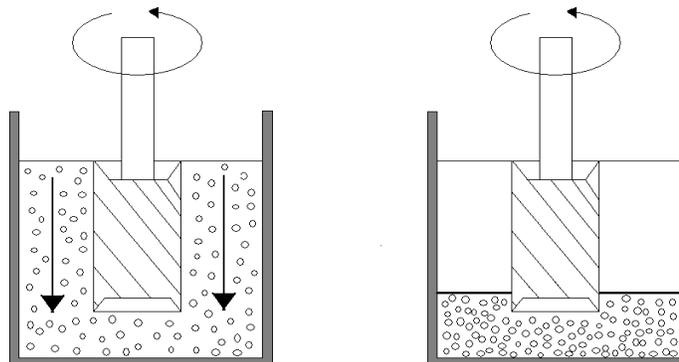


Fonte: Autor

2.8.3 O Efeito da Sedimentação de Partículas

A sedimentação muda a composição da amostra, geralmente isso causa um decréscimo de viscosidade dependente do tempo em comparação com amostras similares onde não ocorre sedimentação de partículas. Se todas as partículas se juntassem no fundo formando uma espécie de massa sólida, isso causaria um atrito maior no fundo do rotor, gerando uma curva de escoamento com crescimento acelerado. A sedimentação das partículas com o tempo é mostrada na Figura 2.15.

Figura 2.15: A sedimentação das partículas com o tempo.



FONTE: Modificado de SCHARAMM (2006)

A sedimentação não pode ser evitada, porém, seus efeitos nos dados de viscosidade podem ser minimizados utilizando-se do seguinte procedimento: imediatamente após o enchimento do sensor, a velocidade do rotor vai aumentando em passos, até atingir uma velocidade limite. Nessa velocidade limite, a amostra sofre maior aquecimento por calor de fricção do que por condutividade térmica da camisa termostática. Sendo assim, a temperatura escolhida pode ser atingida muito mais rapidamente do que deixando a amostra parada. Em altas velocidades, turbulências irão prevenir a sedimentação de partículas. A velocidade do rotor pode ser reduzida rapidamente, e a faixa de baixa velocidade ser mantida por um curto período de tempo, e quase sem sedimentação (SCHARAMM, 2006).

2.9 ADITIVOS REOLÓGICOS

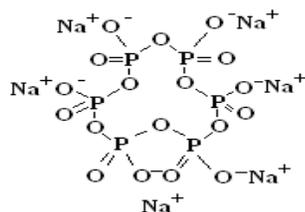
Os aditivos reológicos são modificadores de viscosidade, que dependendo de sua estrutura podem aumentar ou diminuir a viscosidade de um fluido. Sabe-se que algumas espécies como o Na^+ , K^+ , Li^+ e NH^+ são cátions defloculantes, pois conseguem diminuir tanto a viscosidade como a tensão limite de escoamento. Já as espécies $(\text{HO})^+$, Ca^+ , Al^+ , Mg^+ são cátions floculantes, pois aumentam a viscosidade e a tensão limite de escoamento (BALDO, 2005). O quadro 2.2 apresenta informações dos defloculantes utilizados na polpa de bauxita.

Quadro 2.2- Aditivos utilizados na polpa de bauxita

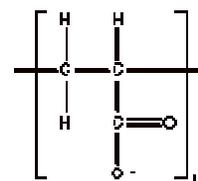
Nome/Fórmula	Função	Estado físico
Hexametáfosfato de sódio (NaPO_3) ₆	Dispersante	Pó
Poliacrilato de sódio ($\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{C}_6\text{O}_{12}\text{Na}_6$)	Dispersante	Solução 47,5%

A Figura 2.16 representa as fórmulas estruturais do hexametáfosfato de sódio (2.16 A) e do poliacrilato de sódio (2.16 B).

Figura 2.16: Fórmulas estruturais do hexametáfosfato de sódio (2.16A) e poliacrilato de sódio (2.16B)



Hexametáfosfato de sódio (2.16 A)



Poliacrilato de sódio (2.16 B)

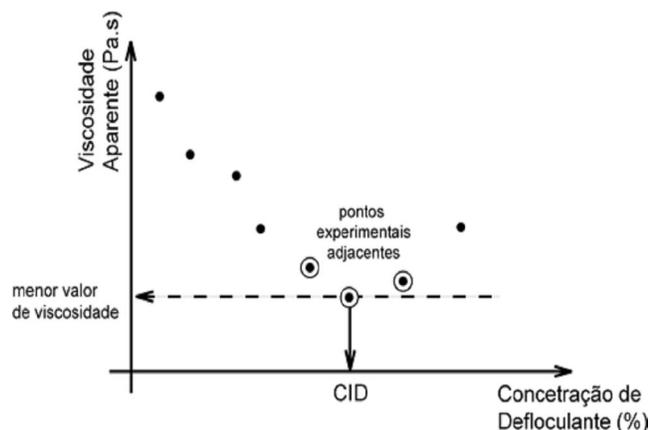
Em um sistema com partículas sólidas suspensas em meio líquido, as forças que atuam são: força gravitacional, que tende a decantar as partículas; força viscosa, que representa a resistência ao movimento das mesmas, e energia entre as partículas e moléculas que causa o movimento Browniano (movimento aleatório das partículas) (PASHLEY, 2004).

Uma máxima dispersão da polpa implica em menor perda de massa e de metal na deslamagem e, conseqüentemente, em uma maior recuperação na flotação (BORGES, 1993).

Em um sistema com partículas sólidas suspensas em meio líquido, as forças que atuam são: força gravitacional, que tende a decantar as partículas; força viscosa, que representa a resistência ao movimento das mesmas, e energia entre as partículas e moléculas que causa o movimento Browniano (movimento aleatório das partículas) (PASHLEY, 2004).

Uma máxima dispersão da polpa implica em menor perda de massa e de metal na deslamagem e, conseqüentemente, em uma maior recuperação na flotação (BORGES, 1993). Uma maneira de expressar a quantidade ideal do aditivo, consta na elaboração da curva de defloculação entre a viscosidade da polpa e a concentração de defloculante adicionada. A Figura 2.17 mostra o perfil de uma curva de defloculação.

Figura 2.17: Representação da metodologia aplicada para determinação do ponto de concentração ideal de defloculante.



Fonte: GOMES *et al.*, (2005).

Atualmente defini-se dispersante como um tensoativo que mantém uma dispersão de partículas estável em um meio em que as partículas não são solúveis (a solubilidade dessas partículas no meio tem que ser menor que 100 μm). No início de séc. XX, os primeiros dispersantes utilizados foram os sabões. Nos anos 50, a chegada dos tensoativos etoxilados iniciou a utilização de nonilfenol etoxilado e alcoóis graxos etoxilados. Foram introduzidos nos anos 60 os polímeros de bloco EO/PO (óxidos de etileno e propileno).

No início da década de 80, passou-se a usar o noneno vinil maleato de sódio e também os poliácridatos de sódio de diversos pesos moleculares. No começo dos anos 90, foram desenvolvidos os dispersantes poliméricos que são os mais aplicados atualmente.

Os polifosfatos são utilizados como defloculantes devido ao seu rendimento. Esta aplicação deve-se aos seguintes fatores:

1. Capacidade para formar complexos com o cálcio e eliminá-lo da solução;
2. Adsorção sobre as partículas, provocando um aumento da carga negativa e impedindo a aproximação das mesmas mediante um mecanismo estérico;
3. Aumenta o pH da suspensão e, como consequência, a carga superficial das partículas.

Os polifosfatos mais utilizados são o tripolifosfato e o hexametáfosfato sódicos. O primeiro proporciona um pH básico ao meio e possui um grande poder de formar complexos. O segundo possui, apesar de apresentar um pH ligeiramente básico, uma estrutura de cadeia longa, o que favorece o mecanismo de repulsão estérica. A efetividade dos poliácridatos, assim como dos demais eletrólitos, é fortemente dependente da área superficial das partículas de argila. Quanto maior a área de superfície, maior será a viscosidade da suspensão e, portanto, maior a concentração de eletrólito necessário para a defloculação (GONÇALVES, 2003).

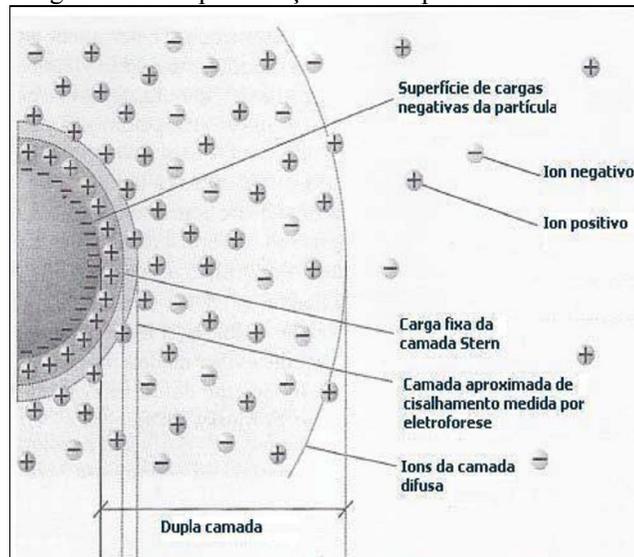
2.10 MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DE SUSPENSÕES

A estabilidade de uma dispersão está relacionada com a força de repulsão entre as partículas. Em sistemas onde forças atrativas dominam, o sistema se torna instável, e as partículas sedimentam, aumentando a viscosidade. Em casos onde as forças repulsivas são fortes, uma suspensão relativamente estável e defloculada é obtida (CASTRO, 2000). A superfície de um sólido torna-se carregada quando este é imerso em um líquido polar (por exemplo, água). Este fato é atribuído tanto aos íons da superfície dissociados ou dissolvidos no líquido, como aos íons da solução adsorvidos na superfície do sólido (GONÇALVES, 2003).

Considerando-se que a carga elétrica dos sólidos suspensos numa polpa aquosa atrai uma “atmosfera” de íons de carga contrária, sendo parte dessa atmosfera difusa, pode-se adotar, como representativa da dupla camada elétrica (VALADÃO, 2007). A Figura 2.18 tem-se uma representação de uma partícula em meio líquido.

A medida do potencial elétrico entre a superfície externa da camada compacta e o meio líquido é chamada de Potencial Zeta e mede o potencial de uma partícula em movimento livre em um líquido. O Potencial Zeta é positivo quando as partículas migram do pólo positivo para o pólo negativo, e negativo quando ocorre o contrário (FURLAN, 2008).

Figura 2.18: Representação de uma partícula em meio aquoso



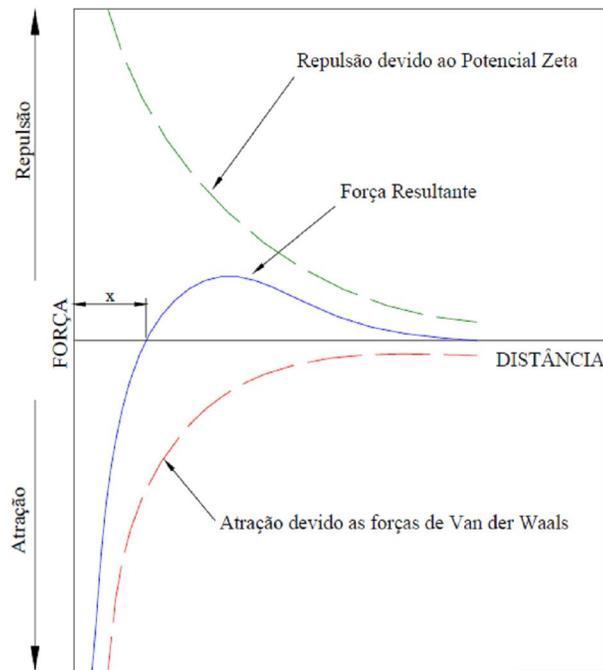
Fonte: Modificado de SILVA (2009)

Santos e Souza (2002), estudaram a influência do pH em suspensões concentradas de óxido de estanho, utilizando poliacrilato de amônio como defloculante. Os resultados experimentais e teóricos mostraram que um meio alcalino favorece a defloculação, levando a uma maior interação entre o polímero e a superfície do óxido.

A viscosidade mínima ocorre quando o potencial zeta é alto e o fator de empacotamento é máximo. Quando o potencial zeta é reduzido, aglomerados são formados e a viscosidade aumenta. (WENG, 2009).

Quando ocorre a interação entre duas partículas, devido ao movimento browniano que as mantém em constante movimento, atuam sobre elas forças de atração (Forças de Van der Waals) e forças de repulsão, produzindo uma barreira de energia (Potencial) que impede a agregação entre as partículas e conseqüentemente a formação de flocos. A Figura 2.19 ilustra através de um gráfico (Força versus distancia) as forças de atração e repulsão representadas respectivamente pelas forças de Van der Waals e pelo Potencial Zeta, através da força resultante é possível verificar que predominam as forças de repulsão (FABRETI, 2006).

Figura 2.19: Curva de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.



Fonte: FABRETI (2006)

Nos óxidos, a densidade de cargas superficiais depende essencialmente do pH da solução, e é determinada por um balanço entre os sítios positivos, negativos e neutros existentes na superfície. Assim, em pHs ácidos, há predomínio de sítios positivos, enquanto que em pHs básicos, predominam os sítios negativos. O pH no qual o número de sítios positivos é igual ao número de sítios negativos é denominado ponto de carga zero (PCZ), e resulta em uma superfície neutra. Para pHs abaixo do ponto de carga zero, há predomínio de sítios carregados positivamente na superfície das partículas, enquanto que em pHs acima do ponto de carga zero, predominam os sítios carregados negativamente (ORTEGA *et al*, 1997).

Cada partícula terá inicialmente uma carga superficial que é positiva, negativa ou neutra, simplesmente porque a partícula está suspensa em água e a suspensão tem um valor de pH que está abaixo, acima ou é respectivamente o ponto isoelétrico daquela partícula. Embora cada partícula tenha um único ponto onde suas cargas são iguais, todas as partículas se comportam similarmente em valores de pH acima e abaixo do seu próprio PCZ (DINGER, 2006).

O pH da polpa é um parâmetro que deverá ser monitorado, pois influencia na viscosidade da polpa de bauxita, uma vez que interfere no equilíbrio de cargas. O fluxo de

partículas em suspensão é expressivamente afetado por suas cargas elétricas superficiais e através do controle do pH pode-se preliminarmente controlar as cargas superficiais da suspensão.

A estabilidade das suspensões é diretamente dependente do modo como as partículas interagem durante o momento de colisão. Uma possibilidade é a formação de aglomerados de partículas. Esses aglomerados são estruturas porosas formadas pela união de diversas partículas primárias que, quando presentes na suspensão, podem absorver parte da água ou do líquido originalmente para a separação das partículas.

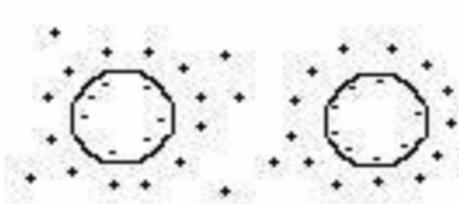
A estabilidade das suspensões pode ser obtida através de mecanismos de estabilização como:

Estabilização eletrostática – é gerada através do desenvolvimento de cargas elétricas na partícula em decorrência da interação da sua superfície com o meio líquido. Figura (2.20 a).

Estabilização estérica – atua através da adsorção superficial de moléculas poliméricas que dificultam a aproximação de outras partículas por impedimento mecânico. É conveniente observar que o uso de polímeros de elevado peso molecular ocasiona um efeito oposto, a floculação. Isto acontece devido a um emaranhamento das partículas que passam a se comportar como aglomerados facilitando o processo de decantação, Figura (2.20 b).

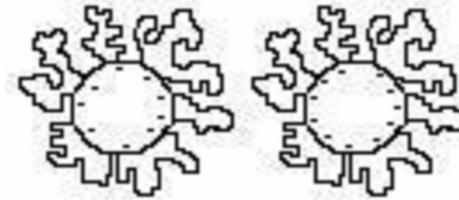
Estabilização eletroestérica – ocorre devido à adsorção superficial de moléculas com grupos ionizáveis ou polieletrólitos. Forma-se uma nuvem de grupos ionizáveis ao redor de cada partícula, conhecida como dupla camada elétrica. À medida que a partícula se movimenta, a nuvem de íons é arrastada junto com ela, de modo que a repulsão Eletroestérica entre estas nuvens soma uma barreira eletrostática ao efeito estérico. Todos estes fenômenos alteram a interface partícula/líquido do sistema, promovendo a dispersão da suspensão. Figura (2.20 c). (ORTEGA *et al.*, 1997).

Figura 2.20. Mecanismos de estabilização de suspensões: (a) através de cargas nas superfícies das partículas, (b) da adsorção de moléculas poliméricas e (c) da adsorção de moléculas ionizadas ou polieletrólitos



(2.20 a)

Estabilização eletrostática



(2.20 b)

Estabilização estérica



(2.20 c)

Estabilização eletroestérica

Fonte: ORTEGA *et al.*(1997)

Para Baldo (2005), a estabilidade eletroestérica é possível devido a alguns efeitos:

- I. A defloculação eletroestérica se torna possível através do uso de sais polieletrólitos de cadeia longa (fosfatos, citratos, tanatos, sulfonatos) e/ou polímeros iônicos ou seus sais (poliacrilatos ou ácido polimeta-acrílico).
- II. Em ambos os casos ocorre uma dissociação em solução, e os íons resultantes contribuem cada um para um tipo de efeito dispersante, repulsão eletrostática ou repulsão termodinâmica.
- III. A defloculação eletroestérica é uma via mais efetiva para se deflocular a maioria das massas cerâmicas uma vez que cria repulsões bastante fortes que se estendem apenas em pequenas distâncias além do efeito de repulsão osmótica.
- IV. A defloculação eletroestérica propicia suspensões com maior teor de sólidos.

2.11 AJUSTES DOS VALORES EXPERIMENTAIS PARA MODELOS REOLÓGICOS.

Os valores de tensão de escoamento podem ser obtidos diretamente ou indiretamente. A medida direta pode ser obtida por meio da tensão de cisalhamento do fluido, quando este começa a escoar. Estes experimentos podem ser realizados com o controle da tensão de

cisalhamento ou da taxa de cisalhamento. Em ambos os experimentos, a tensão de cisalhamento corresponde à primeira evidência do fluido plástico a fluir e é interpretada como a tensão de escoamento. As medidas indiretas para estimar a tensão de escoamento são baseadas na extrapolação dos valores da tensão de cisalhamento contidos no reograma, $\tau \times \gamma$ até o valor em que a taxa de cisalhamento tende a zero. Na prática, este tipo de medida indireta, realizada em viscosímetros convencionais, não é simples, devido à ausência de dados em baixas taxas de cisalhamento, pois ocorre a sedimentação e o deslizamento das partículas na parede do recipiente. Também pode-se realizar o ajuste dos dados experimentais de taxa e tensão de cisalhamento por meio de equações constitutivas desenvolvidas para fluidos plásticos, como os modelos de Bingham, Casson e Herschel-Bulkley (KELESSIDIS E MAGLIONE, 2008).

O modelo matemático mais simples para caracterização dos fluidos não-newtonianos é o modelo proposto por Bingham, mas este modelo não pode ser usado para uma extensão grande de valores de taxa de deformação, pois propriedades importantes dos materiais são desconsideradas usando este método. Cita-se, como exemplo, que a tensão limite de escoamento pode ser o dobro da tensão real (SANTOS, 2003).

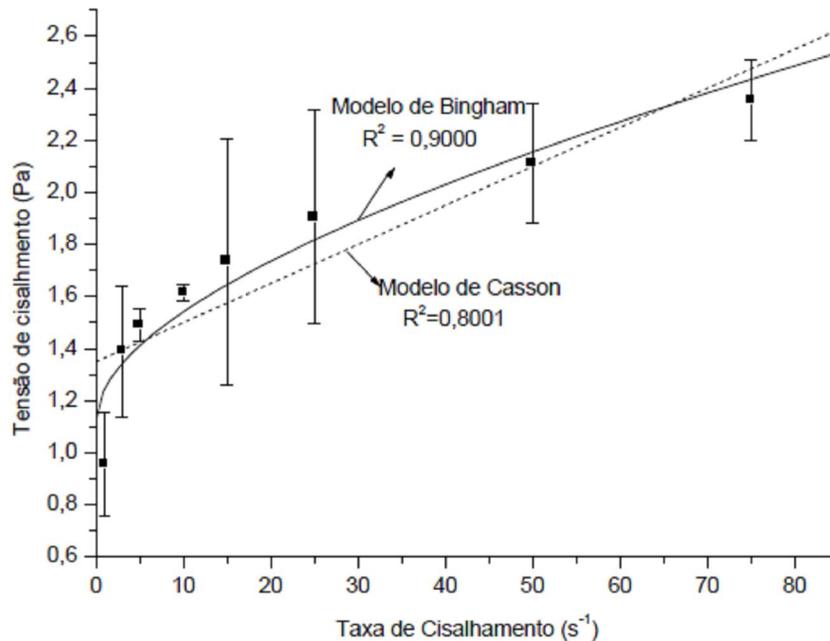
Ao se estimar o valor da tensão limite de escoamento de polpas devemos avaliar o modelo empregado, pois de acordo com a literatura (DZUY e BOGER (1983), KELESSIDIS, 2008) o modelo de Bingham não é recomendado para calcular a tensão de escoamento de polpas concentradas, devido à superestimação da tensão de escoamento quando comparado com outros modelos.

Os parâmetros do modelo reológico proposto de Herschel-Bulkley para argilas caulínicas apresentam os valores de τ_0 (tensão limite de escoamento) e K (índice de consistência) aumentando de forma exponencial com o aumento da concentração em volume de sólidos da mistura. Em contrapartida, o valor de n (índice de comportamento do fluido) diminuindo com a concentração, obedecendo a uma função tipo potência (SANTOS, 2003).

Em Barbato *et al* (2009) foi realizado ajuste dos valores experimentais para os modelos de Bingham, Casson e Herschel-Bulkley em taxas de cisalhamento no máximo 75 s^{-1} , sendo que não foi possível o ajuste dos dados experimentais utilizando o modelo de Herschel-Bulkley, pois os parâmetros encontrados, para este modelo, não foram estatisticamente significativos. Já modelos de Bingham e Casson apresentaram boa previsão em taxas de cisalhamento moderadas ($10 \text{ a } 75 \text{ s}^{-1}$). A Figura 2.21 mostra o perfil reológico da polpa de

bauxita com os ajustes para os modelos Casson e Bingham nas referidas taxas de cisalhamento.

Figura 2.21- Ajuste dos modelos de Casson e Bingham para os dados experimentais de tensão e taxa de cisalhamento da polpa de bauxita (MBP).



Fonte: BARBATO *et al.*, 2009

2.12 BOMBEAMENTO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO.

Para deslocar um fluido ou mantê-lo em escoamento é necessário adicionarmos energia, o equipamento capaz de fornecer essa energia ao escoamento do fluido é denominado de Bomba.



Infelizmente não existe um critério único e absoluto na definição do tipo de bomba que melhor atenda a uma determinada aplicação. Muito embora a velocidade específica possa ser considerada como um dos critérios mais importantes, outros critérios, como por exemplo, vazão, carga, tipo de fluido e flexibilidade operacional desejada, podem influir na decisão final (MATTOS *et al.*, 1998).

A escolha do tipo de bomba e dos materiais de suas partes constitutivas depende das características dos produtos bombeados e dos fenômenos físicos e químicos que poderiam vir

a ter lugar durante a passagem do líquido na bomba. É necessário, na escolha, levar em consideração certas circunstâncias como:

Dinâmicas ou	Bombas	Puras ou radiais
--------------	---------------	-------------------------

1. Grau de concentração
2. Natureza dos constituintes da mistura
3. Temperatura
4. Grau de alcalinidade ou acidez
5. Grau de resistência do material à corrosão
6. Presença de sólidos em suspensão
7. Pureza do produto a ser bombeado
8. Segurança e confiabilidade da instalação
9. Materiais empregados

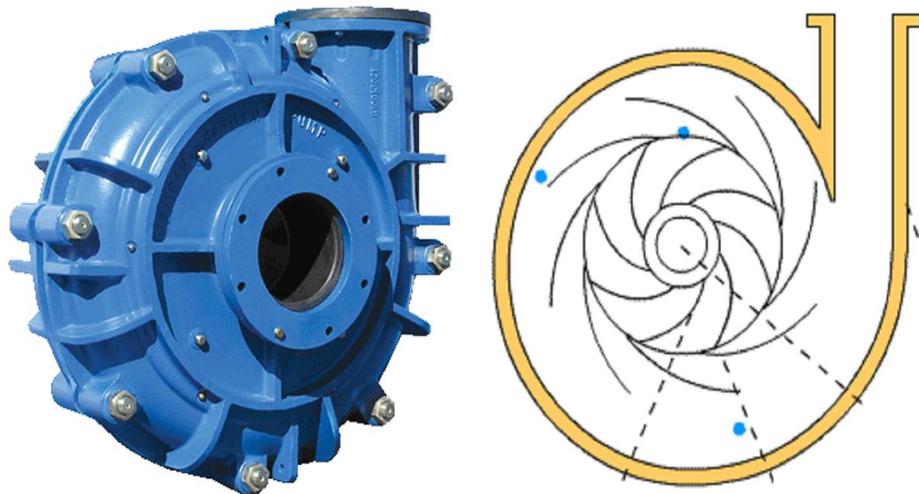
São empregadas geralmente bombas centrífugas, com materiais construtivos capazes de oferecer considerável resistência à abrasão. Além dessa exigência fundamental, as bombas para essa finalidade devem possuir as peças dimensionadas com espessuras que possibilitem o desgaste sem necessidade de reposição com muita frequência; ser projetadas de modo a reduzir o desgaste a um mínimo; permitir desmontagem e montagem rapidamente por ocasião da substituição de peças gastas (MACINTYRE, 1997)

		Tipo Francis
		Bombas de fluxo misto
		Bombas de fluxo axial
		Bombas periféricas ou regenerativas
Volumétricas ou Deslocamento Positivo	Bombas Alternativas	Pistão
		Êmbolo
		Diafragma
	Bombas rotativas	Engrenagens
		Lóbulos
		Parafusos
		Palhetas Deslizantes

Fonte: Bombas, 2010

Centrífugas: As bombas centrífugas são aquelas em que a energia fornecida ao líquido é primordialmente do tipo cinética, sendo posteriormente convertida em grande parte em energia de pressão. A energia cinética pode ter origem puramente centrífuga ou de arrasto, ou mesmo uma combinação das duas, dependendo da forma do impelidor. A conversão de grande parte da energia cinética em energia de pressão é realizada fazendo com que o fluido que sai do impelido passe em um conduto de área crescente.

Figura 2.22: Bomba Centrífuga para Polpas Abrasivas



FONTE: pt.weirminerals.com/products.../tzpm_pump.aspx

Particularmente as centrífugas, ocupam maior parcela do mercado. Esta preferência decorre fundamentalmente das seguintes qualidades:

- podem ser acionadas diretamente por motor elétrico sem necessidade de modificadores de velocidade, sendo mesmo comum operarem a velocidades dos motores comerciais de 1750 rpm e 3550 rpm;

- trabalham em regime permanente, o que é de fundamental importância em grande número de aplicações.

- fornecem boa flexibilidade operacional, pois a vazão pode ser modificada por recirculação, fechamento parcial de válvula na tubulação de descarga ou, alternativamente, por mudança de rotação ou diâmetro externo do impelidor;

- normalmente requerem menores cuidados de manutenção que as alternativas;

- cobrem uma ampla faixa de vazão, indo desde vazões moderadas com as centrífugas até altas vazões com as axiais;

- o preço pode ser considerado favorável em correlação com as vazões obtidas.

(MATTOS *et al.*, 1998).

Deslocamento Positivo ou alternativo:

Estas bombas são empregadas para trabalhar com altas pressões. A descarga do fluido é pulsante. No seu movimento o êmbolo se afasta do cabeçote provocando a aspiração do fluido através de uma válvula de admissão. Na etapa de retorno o fluido é comprimido obrigando o fluido a sair pela válvula de descarga. Seu funcionamento é pulsante já que o fluido fica confinado no cilindro durante a aspiração. Estas bombas podem ter um ou vários cilindros. A pulsação diminui conforme aumenta o número de cilindros (ALÉ, 2010).

As bombas de deslocamento positivo utilizadas na MBP são do tipo: Pistão e Diafragma. Em Moreira e Soares (2010) são citadas algumas particularidades deste tipo de bomba como aplicação, vantagem e desvantagem.

Aplicações:

- bombeamento de água de alimentação de caldeiras, óleos e de lamas;
- imprimem as pressões mais elevadas dentre as bombas;
- pequena capacidade;
- podem ser usadas para vazões moderadas.

Vantagens:

- podem operar com líquidos voláteis e muito viscosos
- capaz de produzir pressão muito alta.

Desvantagens:

- produz fluxo pulsante;
- capacidade: intervalo limitado;
- opera com baixa velocidade;
- precisa de mais manutenção;

A Figura 2.23 apresenta as bombas de deslocamento positivo da MBP.

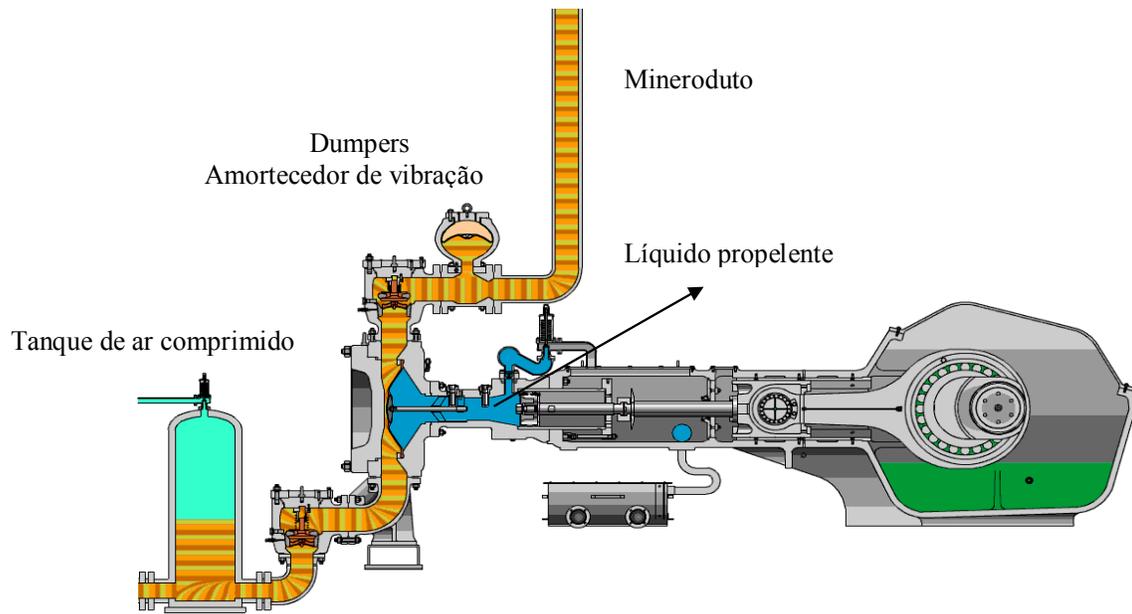
Figura 2.23: Bombas de deslocamento positivo da MBP



Fonte: Autor

O esquema de funcionamento de uma bomba de deslocamento positivo da MBP é mostrado na Figura 2.24. Sendo que a polpa ao ser recebida neste tipo de bomba já adquiriu uma energia cinética fornecida pela bomba centrífuga e com isto favorecendo o escoamento da polpa dentro do Mineroduto.

Figura 2.24: Esquema de funcionamento de uma bomba deslocamento positivo para transporte de polpas minerais em dutos



FONTE: WEIRMINERALS, 2011

Abaixo são descritas algumas particularidades da Figura 2.23 quanto a suas condições de operação.

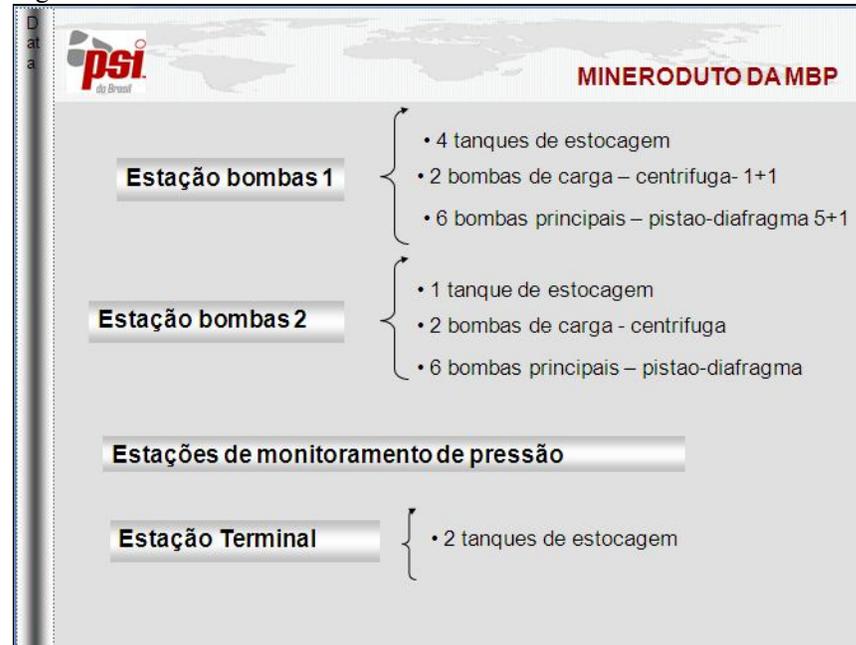
- Capacidades de até 1000 m³/h
- Faixa de acessórios com autopreparação
- Pressões de até 300 bar
- Viscosidades médias de até 8.000 cP (mPas)
- Abrasividade extrema
- Alta corrosividade
- Temperatura elevada
- Tamanho de partículas de até 8mm
- Conteúdo de sólidos de até 75%

A principal diferença entre uma bomba de pistão e uma bomba de diafragma de pistão é o diafragma genuíno que protege o pistão e o revestimento do contato correção com as polpas abrasivas. O diafragma é um projeto pré-moldado que elimina o alongamento do elastômero. Seu longo tempo de fadiga permite rotinas anuais de manutenção. A posição do

diafragma é controlada em ambas as direções do tempo através da adição ou remoção do fluido propulsor que enche a cavidade entre o pistão e o diafragma. Uma haste guia conecta-se a um inserto e permite o controle da posição. Vários elementos relacionados ao serviço fazem com que o diafragma não se flexione uniformemente (WEIRMINERALS, 2011).

MBP possui duas estações de bombas com as especificações da Figura 2.25

Figura 2.25: Bombas utilizadas na MBP



Fonte: PSI (2006).

A seguir materiais e métodos serão apresentados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios foram utilizadas polpas de bauxita provenientes da Mina de Miltônia, região de Paragominas-PA, mantendo-se fixa sua granulometria.

A elaboração da curva de defloculação (viscosidade *versus* concentração de defloculante) constou no preparo de uma solução de hexametáfosfato de sódio e poliacrilato de sódio nas seguintes concentrações: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5%.

A caracterização do fluido num dos modelos existentes na literatura constou nos ensaios de variação da tensão de cisalhamento com a taxa que foi conduzida a partir da metodologia PSI e da metodologia recomendada no manual do instrumento. A pesquisa da dependência temporal do fluido foi analisada através da elaboração da curva de histerese.

3.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA POLPA DE BAUXITA

3.1.1 Teor de sólidos

A concentração das amostras (% S) de polpa de bauxita foi obtida através da Eq. (3.1), sendo adquirido o valor 60% de sólidos. A partir desta realizou-se diluições para as concentrações desejadas.

$$\%S = \frac{M_s}{M_p} \times 100 \quad (3.1)$$

M_s = massa de sólidos

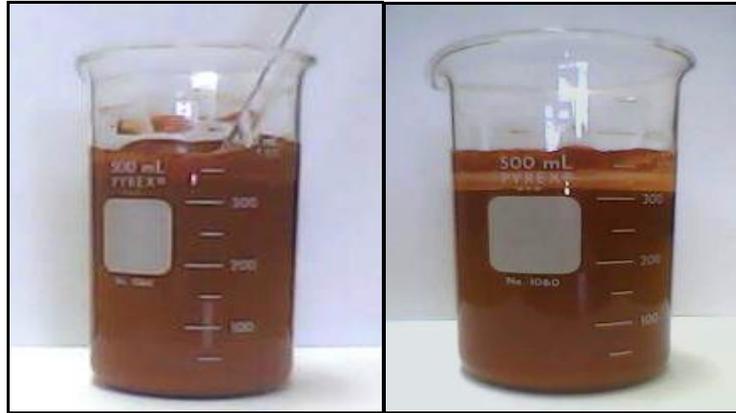
M_p = massa de polpa (sólido + água)

Tabela 3.1- Preparação das polpas

Polpa concentrada (%)	Polpas preparadas (%)
60	46
	48
	50
	52
	54

A polpa de bauxita é mostrada na Figura 3.1.

Figura 3.1: Polpas de bauxita



Fonte: Autor

3.1.2 pH

A determinação do pH foi realizada por meio de um pHmetro de bancada digital modelo HANNA, HI 9321 .

3.1.3 Densidade da polpa

A Eq. (3.2) expressa o valor da densidade da polpa (d_p) em função da massa total da polpa (m_p) e do volume total da polpa (v_p).

$$d_p = \frac{m_p}{v_p} \quad (3.2)$$

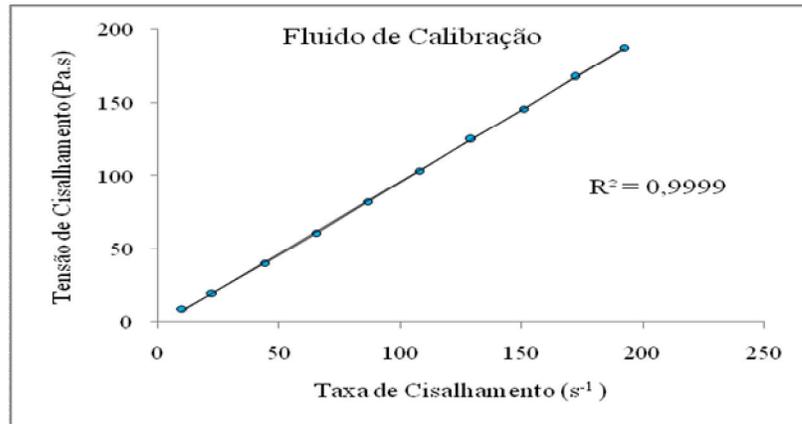
3.1.4 Análise granulométrica

A análise granulométrica de um material compreende parte da sua caracterização, por meio da determinação do tamanho de partículas e da frequência com que ocorrem em uma determinada faixa de tamanhos (LIMA, 2001). A distribuição granulométrica foi obtida através peneiramento utilizando a Série Tyler e Malvern para o material fino, que segundo a literatura abrange a faixa granulométrica de 37 até 10 μm .

3.2 ENSAIOS REOLÓGICOS

Para assegurar a confiabilidade do equipamento foi realizada a calibração do instrumento, utilizando o óleo OP 400 de comportamento característico de um fluido newtoniano. A representação gráfica deste ajuste é mostrada na Figura 3.2.

Figura 3.2: Ajuste do fluido de calibração



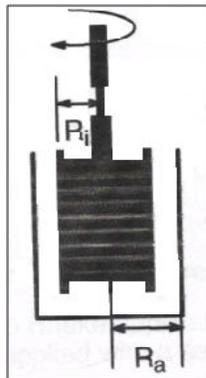
Fonte: Autor

O fluido de calibração ajustou-se ao modelo newtoniano proposto, assegurando a calibração do viscosímetro usado nos experimentos com a polpa de bauxita.

3.2.1 Especificações do spindle SV1

Para estimar desvio dos valores experimentais foram utilizados dados específicos do sensor SV1. O desvio calculado foi para as tensões obtidas na varredura de 0 a 200 s⁻¹ obtida no viscosímetro VT550. A Figura 3.3 apresenta o spindle SV1 com suas respectivas correlações.

Figura 3.3: Especificações do Spindle SV1



$$\frac{R_a}{R_i} \leq 1,2$$

$$f_{cor} = \frac{0,01}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot R_i^2}$$

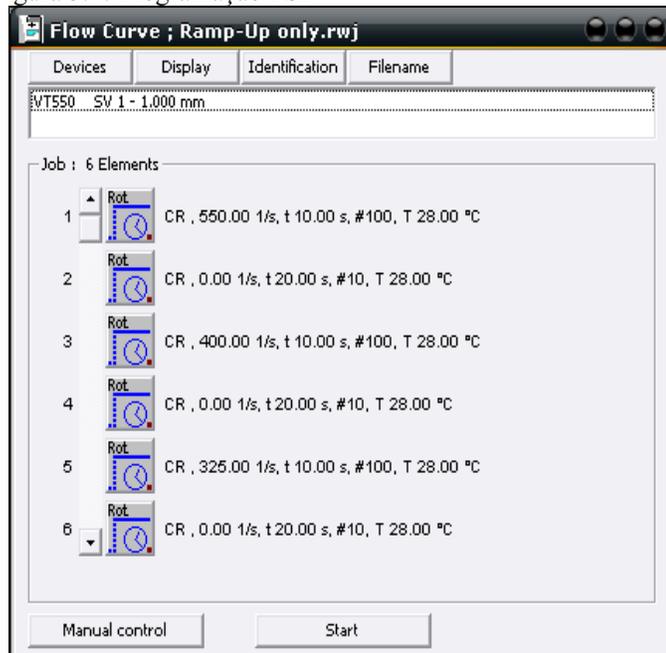
Fonte: Manual VT550

3.2.2 Ajuste dos valores experimentais para dois modelos existentes na literatura

Metodologia PSI

O método utilizado para estimar o modelo reológico é através da variação da taxa de cisalhamento com a tensão de cisalhamento, no entanto a PSI (PIPELINE SYSTEMS INCOORPORATED) desenvolveu para Vale uma metodologia para ser utilizada no VT 550 usando spindle do tipo cilindro coaxial a fim de minimizar a sedimentação. Esta metodologia consiste na aplicação de uma elevada taxa de cisalhamento (550 s^{-1}) promovendo uma varredura até 40 s^{-1} , entre uma taxa e outra existe um critério de parada, tempo de cisalhamento 10s e tempo para a homogeneização manual de 20s. A programação estabelecida no viscosímetro é apresentada na Figura 3.4 e o gráfico obtido no **Apêndice C**, sendo que o valor zero no gráfico representa a parada entre as taxas.

Figura 3.4: Programação PSI



Fonte: Autor

3.2.3 Metodologia da variação da taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento

Curvas de fluxo e viscosidade foram obtidas na varredura de taxa 0 a 200 s^{-1} no tempo de 100 s. Os valores de viscosidade utilizados para elaboração da curva de defloculação foram obtidos na taxa constante de 100 s^{-1} e tempo de cisalhamento 10s. A Figura 3.5 corresponde ao viscosímetro utilizado para obtenção dos valores experimentais.

Figura 3.5: Viscosímetro VT550 HAAKE



Fonte: Autor

3.2.4 Histerese

Com o objetivo de verificar a dependência do fluido com o tempo de cisalhamento, ou seja, fluidos que apresentam variação da viscosidade mesmo quando submetidos a uma taxa de cisalhamento constante, foi elaborada a curva de histerese.

A programação para realização do teste de histerese seguiu a metodologia referenciada por (ARAÚJO, 2007) adaptada.

(I) Rampa de aumento de taxa de cisalhamento (γ) de 0 a 200 s^{-1} em 100 s;

(II) Permanência a 200 s^{-1} por 10 s;

(III) Rampa de diminuição de taxa de cisalhamento (γ) de 200 a 0 s^{-1} em 100 s.

3.3 POTENCIAL DE CARGA ZERO

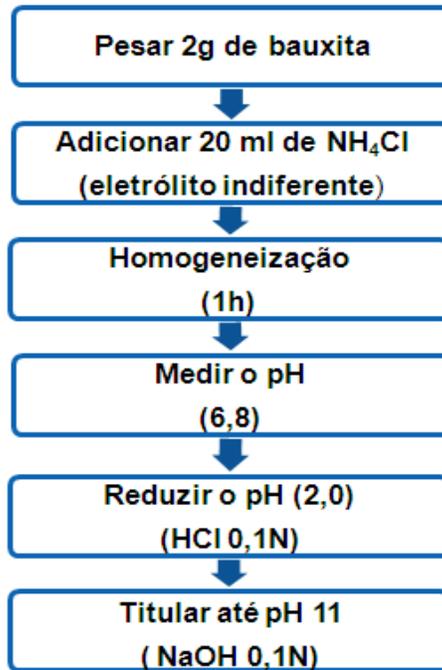
Como uma forma de evidenciar a variação da viscosidade com o pH do meio em estudo avaliou-se o ponto de carga zero (PCZ) da bauxita. O procedimento utilizado foi a titulação potenciométrica segundo a metodologia de Van Raij and Peech (1972). As titulações são feitas adicionando-se volumes conhecidos de ácido ou de base à suspensão, sendo registrados os valores resultantes de pH.

Inicialmente foi feita uma pesquisa para a escolha do possível eletrólito indiferente (não altera o pH do meio) à superfície da partícula, sendo escolhido o cloreto de amônia. O procedimento padrão para a determinação de um eletrólito indiferente baseia-se na construção de curvas do volume do eletrólito adicionado versus o pH da suspensão, em diversas concentrações do eletrólito avaliado. Curvas com um mesmo ponto de carga zero indicam que o eletrólito não tem nenhum efeito nas cargas superficiais das partículas de bauxita.

3.3.1. Preparação das soluções

Soluções de cloreto de amônia 1N, 0,1N, 0,01N e 0,001N foram usadas na preparação das suspensões de bauxita, que tiveram seu pH ajustado com ácido clorídrico 0,1N e posteriormente, foram tituladas com hidróxido de sódio 0,1N. O fluxograma 3.1 apresenta as etapas para o teste do eletrólito indiferente.

Fluxograma 3.1: Teste para o eletrólito indiferente.



A seguir os resultados e discussões serão apresentados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterizações da matéria – prima

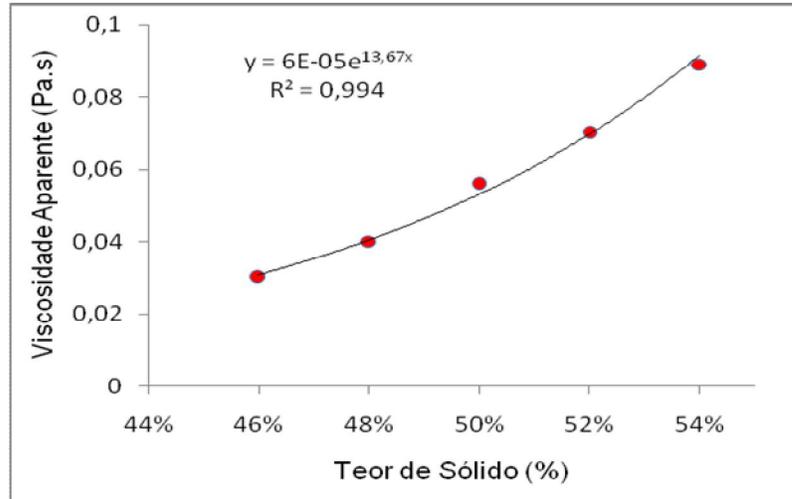
Na preparação das polpas foi observado que após a secagem ($T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$) e tempo de 15 h para os ensaios dos teores de sólidos o tamanho médio das partículas muda e isto impede que a mesma seja transformada novamente em polpa (repolpada). A tentativa de reaproveitar essa bauxita nos ensaios reológicos mostrou que a viscosidade reduziu muito, diferenciando-se de uma polpa elaborada de acordo com o item 3.1.1. A Tabela 4.1 apresenta a caracterização da polpa através dos resultados médios dos ensaios em triplicata, para os parâmetros: densidade, pH e viscosidade, antes do uso dos aditivos reológicos.

Tabela 4.1- Caracterização da polpa sem aditivos

Polpa (%)	Densidade (g/ml)	pH	η (Pa.s)
46	1,40	6,9	0,030
48	1,42	6,7	0,040
50	1,46	6,8	0,056
52	1,51	6,9	0,070
54	1,53	6,7	0,089

A partir dos dados anteriores, elaborou-se a curva apresentada na Figura 4.1, onde é mostrado que o perfil da viscosidade cresce exponencialmente com o aumento do teor de sólidos. Esta tendência poderá ser explicada pela diminuição do fluido suspensor (água), uma vez que a função do fluido é favorecer o escoamento da polpa diminuindo as interações entre as partículas. Este comportamento também foi observado por Barbato (2009).

Figura 4.1: Variação da viscosidade com a concentração de sólidos



4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica das partículas é mostrada na Tabela 4.2,

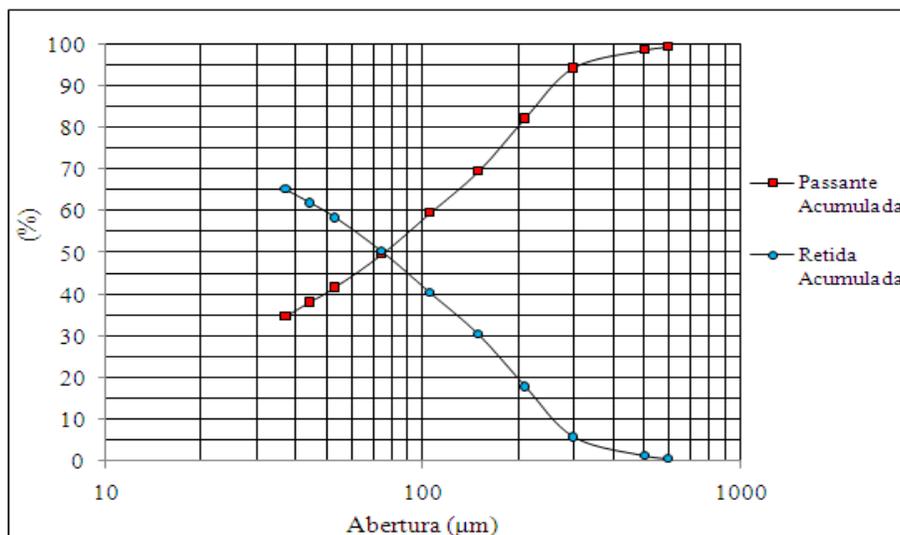
Tabela 4.2- Distribuição granulométrica

Série Tyler (#)	Abertura (m)	Passante Acumulada
28	595	99,55
32	500	98,67
48	297	94,25
65	210	82,18
100	149	69,62
150	105	59,5
200	74	49,63
270	53	41,61
325	44	38,1
400	37	34,76
-	20	30,36
-	10	24,22

As partículas, de um modo geral, podem apresentar diferentes formas e esta característica irá influenciar diretamente algumas das suas propriedades como o empacotamento e a fluidez (Braga e Couto, 2007).

A Figura 4.2 apresenta o gráfico percentual do material passante acumulada e o retida acumulada x abertura, onde é observado que 34,76% das partículas de bauxita estão abaixo de 37 m e o d_{50} das partículas corresponde ao tamanho de 74 m. O diâmetro médio calculado foi de 1, 795 mm.

Figura 4.2: Distribuição granulométrica.



Para um teor de sólidos de 45% e quantidade de finos maior que 20%, as polpas de minério sulfetado de cobre-chumbo-zinco apresentaram um comportamento pseudoplástico com tensão de escoamento (SHI, 1996)

Mesmo quando a polpa é diluída ou constituída de diferentes tamanhos, as interações podem ocorrer, na medida em que as partículas ou flocos se aproximam (Boudreau e Bennett, 1999); sendo assim o uso de defloculante torna-se importante para promover um estado de boa dispersão entre partículas, principalmente em suspensões concentradas.

4.4 INFLUÊNCIAS DA UTILIZAÇÃO DOS ADITIVOS NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DA POLPA DE BAUXITA.

Para obter um resultado satisfatório com o defloculante é necessário ter cuidado com a solução, agitando levemente para não quebrar as ligações e assim a solução perder a eficácia. A concentração ideal de defloculante também depende da quantidade de polpa analisada, pois um volume muito grande ou muito pequeno pode não apresentar resultados significativos.

4.2.1-Adição de hexametáfosfato de sódio

A Tabela 4.3 apresenta o pH e a viscosidade da polpa com 50 % de sólidos após a adição de hexametáfosfato.

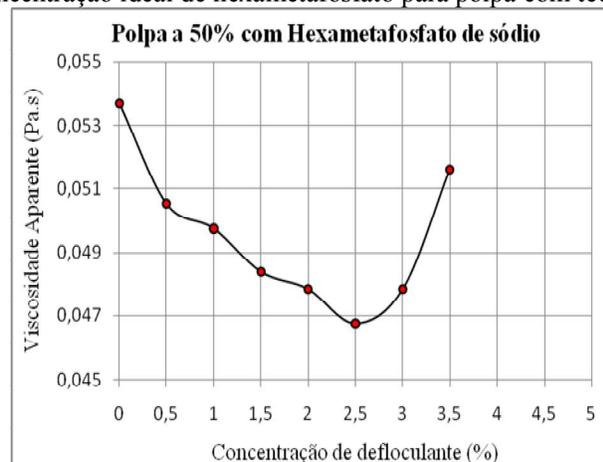
TABELA 4.3- Polpa a 50% com adição de Hexametáfosfato

Hexametáfosfato (%)	η (Pa.s)	pH Polpa
0,0	0,0536	7,01
0,5	0,0505	7,73
1,0	0,0497	7,77
1,5	0,0483	7,87
2,0	0,0478	7,82
2,5	0,0467	7,80
3,0	0,0478	7,72
3,5	0,0516	7,64

Com a adição de hexametáfosfato de sódio o pH manteve-se próximo a faixa operacional da Mineração Bauxita Paragominas que é de 6,7 a 7,8. Por ser um parâmetro importante à estabilização da polpa, o pH foi sempre monitorado.

Nascimento e Sampaio (2008) estudaram o comportamento reológico da polpa de bauxita a 50% com pH entre 5,45 e 9,45 porém não observaram mudanças significativas nas análises reológicas. Com o objetivo de obter-se a quantidade ideal de defloculante, a partir dos valores obtidos na Tabela 4.3, construiu-se a curva de defloculação, onde é observada a variação da viscosidade com a concentração de defloculante mostrada no Figura 4.3.

Figura 4.3- Concentração ideal de hexametáfosfato para polpa com teor de sólido de 50%



O perfil da curva de defloculação demonstra que o menor valor de viscosidade obtido encontra-se na concentração de 2,5% de hexametáfosfato. Embora esta diminuição seja pequena, em uma concentração superior de defloculante (3,0%), foi observado que a

viscosidade aumentou. Como o efeito desejado é a diminuição da viscosidade, concluiu-se que 2,5% (62,5 g/t) seria a quantidade ideal de hexametáfosfato adicionada na polpa de bauxita com teor de 50% de sólidos. Araújo e Nascimento (2008) também estudaram a adição de hexametáfosfato de sódio na polpa de bauxita a 50%, porém foram analisadas apenas duas concentrações 50g/t e 150 g/t e não foi observada efetiva redução de viscosidade.

4.2.2- Adição de poliacrilato de sódio

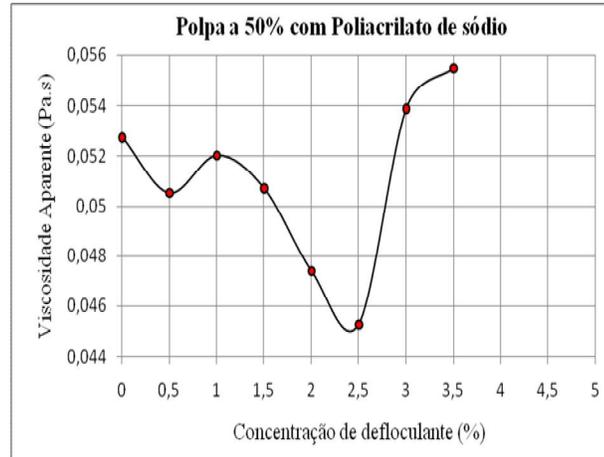
Os ensaios com poliacrilato de sódio adicionado a polpa de bauxita são apresentados conforme a Tabela 4.5, onde se tem os valores de viscosidade da polpa a 50% com adição de defloculante e seus respectivos valores de pH.

Tabela 4.4- Polpa a 50% com adição de poliacrilato de sódio

Poliacrilato (%)	η (Pa.s)	pH
0	0,0527	6,8
0,5	0,0505	6,9
1,0	0,0520	7,10
1,5	0,0507	7,32
2,0	0,0473	7,23
2,5	0,0452	7,48
3,0	0,0538	7,5
3,5	0,0554	7,47

A variação do pH manteve-se na mesma faixa observada com a adição do hexametáfosfato. Os dois defloculantes obtiveram na concentração de 2,5% a máxima redução de viscosidade. Santos *et al.*(2002) avaliaram a interação do poliacrilato com a superfície de um óxido e observaram que o pH influencia no processo de defloculação. Sendo que um pH básico favorece a interação do polímero com a partícula, tornando a defloculação mais eficiente. Com os valores da Tabela 4.4 foi obtido o perfil da curva de defloculação para o poliacrilato de sódio, conforme a Figura 4.4.

Figura 4.4: Concentração ideal de poliacrilato de sódio para polpa com teor de sólido de 50%



Uma vez que o pH da polpa manteve-se praticamente na mesma faixa com a adição dos dois dispersantes, o aumento da viscosidade em concentrações acima de 2,5% poderá ser justificado pelo excesso do defloculante e sua interação com o meio dispersor. De acordo com Hirata *et al.*(1992), após o ponto mínimo ocorre uma repulsão eletrostática entre os polímeros livres carregados e polímeros livres carregados negativamente e polímeros adsorvidos na superfície da partícula, provocando com isto o aumento da viscosidade. Para Ortega (1997) após o recobrimento total da superfície das partículas, qualquer excesso de polímero adicionado irá permanecer em solução e a solubilização de um polímero em meio líquido provoca aumento da viscosidade, sendo este aumento tanto maior quanto maior o seu peso molecular.

4.3 RESULTADO DAS ANÁLISES REOLÓGICAS

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam respectivamente o comportamento da viscosidade e da tensão em diferentes taxas de cisalhamento para polpa de bauxita a 50% com adição de hexametáfosfato na concentração de 2,5%, que representa a quantidade ideal do aditivo.

Figura 4.5: Perfil da viscosidade com adição de a hexametáfosfato 2,5%

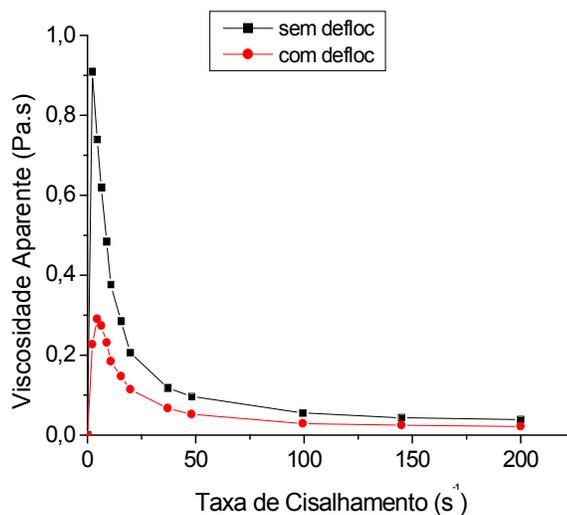
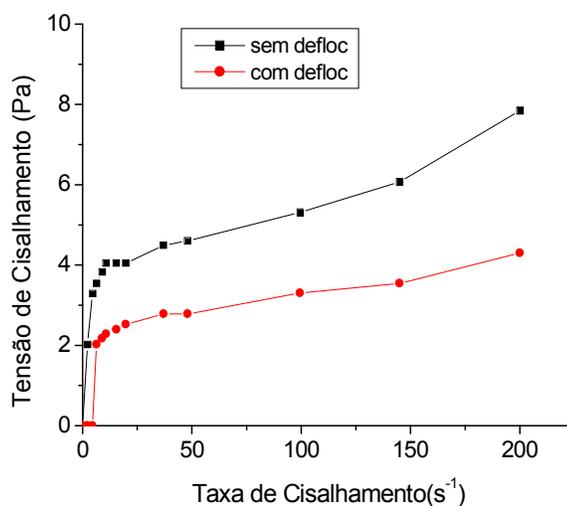


Figura 4.6: Perfil da tensão com adição de hexametáfosfato a 2,5%



A análise da Figura 4.5 mostra que o aumento da taxa de cisalhamento promove a diminuição da viscosidade com o tempo, característica de um fluido não-newtoniano. Com a adição de hexametáfosfato a tensão inicial diminui (Figura 4.6) sendo este, um efeito desejado para o bombeamento da polpa, no sentido de reduzir o consumo de energia do processo.

O perfil das curvas que representam a variação da viscosidade mostra claramente que a adição do defloculante promove a redução da viscosidade. Este fato pode estar relacionado segundo Baldo (2005), ao estado de dispersão promovido pelos fosfatos que combinam o efeito eletrostático e o estérico, causando um afastamento entre partículas, com isto proporcionando a mobilidade do fluido suspensor (água), diminuindo a viscosidade.

As Figuras 4.7 e 4.8 referem-se ao comportamento reológico da polpa a 50%, em diferentes taxas de cisalhamento, com adição de 2,5% de poliacrilato de sódio.

Figura 4.7: Perfil da viscosidade com adição de poliacrilato 2,5%

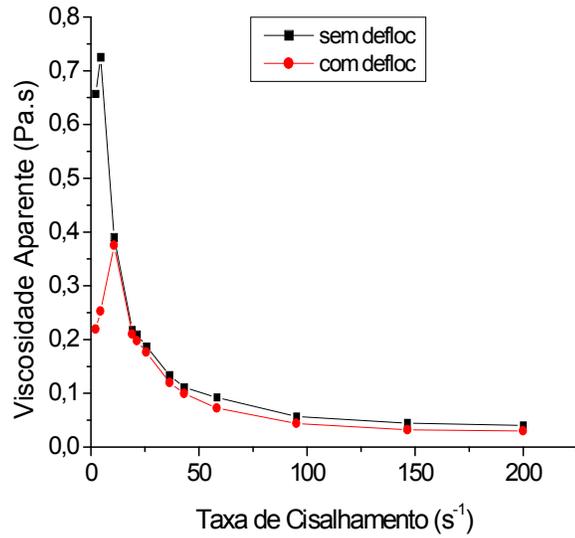
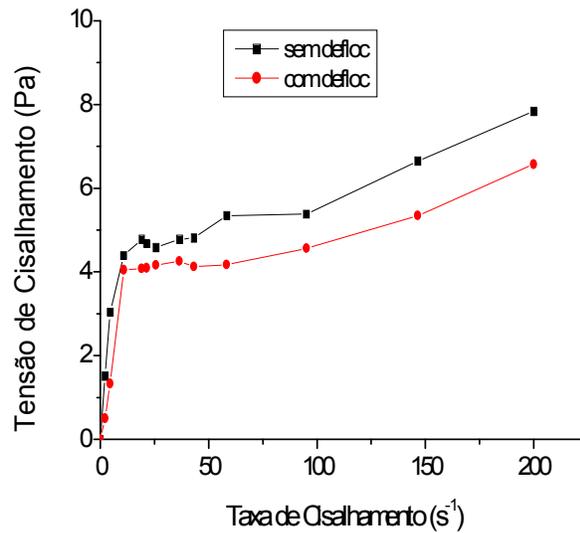


Figura 4.8: Perfil da tensão com adição de poliacrilato 2,5%



As análises reológicas com o poliacrilato de sódio mostraram que tanto a viscosidade como a tensão inicial sofre redução, assim como as apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6 com adição de hexametáfosfato.

Os dados experimentais após a adição do poliacrilato aproximaram-se do perfil da curva sem defloculante, sugerindo que o poliacrilato interage mais com a polpa de bauxita, mesmo em baixas taxas de cisalhamento.

As cargas eletronegativas do poliacrilato adsorvem sólidos ativos presentes no fluido. Nestas adsorções, o polímero neutraliza a carga positiva das partículas carregadas eletricamente sobrando cargas negativas. A repulsão mutua entre as cargas remanescentes, provoca a defloculação (PEREIRA, 2011).

4.3 Histerese

A polpa de bauxita apresentou características de um fluido dependente do tempo, os valores obtidos com a programação estabelecida no item 3.2.4 mostraram que durante o cisalhamento à taxa constante de 200 s^{-1} houve uma elevação, tanto da tensão de cisalhamento como da viscosidade do fluido, a área sombreada da Tabela 4.5 destaca o comportamento destas variáveis.

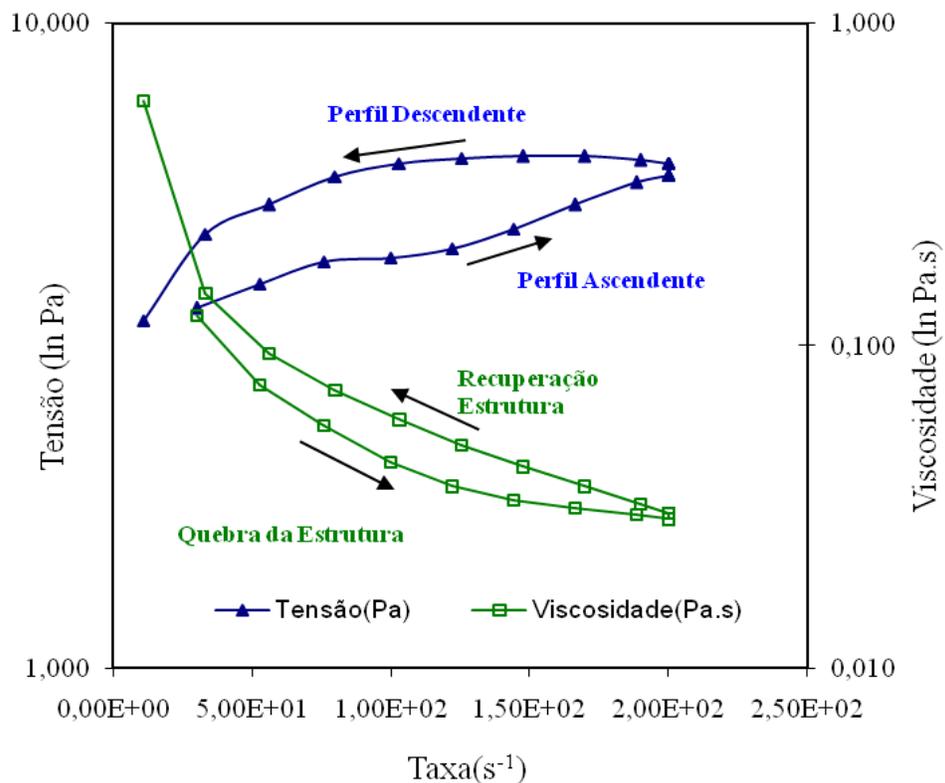
Com a dependência do tempo pode ocorrer dois fenômenos, a tixotropia ou a reopexia. No caso da polpa de bauxita o fenômeno observado foi a reopexia, já que os valores de viscosidade a taxa constante tendem a aumentar com o passar do tempo.

Tabela 4.5- Histerese da polpa a 50%

τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	η (Pa.s)
2,846	9,981	0,341
3,618	30,209	0,124
3,947	52,714	0,076
4,276	75,845	0,057
4,326	99,777	0,044
4,478	121,970	0,037
4,807	144,090	0,033
5,237	166,310	0,032
5,667	188,650	0,030
5,819	200	0,029
6,072	200	0,030
5,819	200	0,029
6,072	200	0,030
6,135	189,813	0,032
6,224	169,710	0,037
6,224	147,550	0,042
6,173	125,300	0,049
6,072	103,016	0,059
5,794	79,941	0,073
5,237	55,973	0,095
4,706	33,161	0,146
3,466	10,896	0,576

A partir dos dados da Tabela 4.5 foi obtido simultaneamente o perfil da viscosidade e da tensão de cisalhamento (Figura 4.9).

Figura 4.9: Histerese da polpa a 50%



Na concentração de 50% o comportamento apresentado foi de fluido com tendência a reopexia, uma vez que, observou-se na curva representativa do fenômeno de histerese, que a estrutura após o cisalhamento recuperou-se, indicando que o tempo de destruição da estrutura foi menor do que o tempo de recuperação. Segundo Araujo e Nascimento (2008) em algumas suspensões concentradas submetidas a taxa de cisalhamento elevadas, a quantidade de líquido é apenas o suficiente para preencher o espaço entre as partículas, devido a grande quantidade de partículas originadas da destruição de aglomerados ou seja, restam poucas moléculas livres para o escoamento, que é observado como um aumento da viscosidade com a taxa de cisalhamento.

A quebra da estrutura durante o cisalhamento envolve dois processos opostos. Por um lado, a taxa de cisalhamento aplicada age para quebrar as ligações da estrutura das partículas ou seus agregados. Por outro, simultaneamente, as colisões das partículas induz a recuperação da estrutura original (NGUYEN e BOGER, 1985).

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

4.5 AJUSTES DOS VALORES EXPERIMENTAIS PARA OS MODELOS DE BINGHAM E HERSCHEL - BULKLEY

A Tabela 4.5 mostra os ajustes propostos para os valores experimentais dos modelos reológicos de Bingham e Herschel-Bulkley. Os valores foram obtidos diretamente do software do viscosímetro VT550, após a varredura da tensão de cisalhamento com a taxa variando de 0 a 200 s⁻¹. As concentrações que tiveram um melhor ajuste foram a partir de 48%, concentrações abaixo deste valor mostram resultados que indicam dificuldade de reprodutibilidade, levando a falta de ajuste de leitura no viscosímetro.

Tabela 4.6- Ajustes para os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

POLPA (%)		Bingham			Herschel-Bulkley			
		τ_0	η_p	R^2	τ_0	K	n	R^2
48		2,732	0,016	0,930	0,100	1,318	0,262	0,970
		2,531	0,015	0,920	0,204	1,124	0,279	0,950
		2,401	0,016	0,900	0,468	0,630	0,394	0,950
	Média	2,555	0,015	0,917	0,257	1,024	0,312	0,957
50		3,119	0,022	0,930	0,704	1,000	0,348	0,957
		3,453	0,017	0,890	0,742	2,615	0,186	0,937
		2,759	0,025	0,911	0,592	2,345	0,222	0,973
	Média	3,110	0,021	0,910	0,680	1,987	0,252	0,956
52		4,821	0,024	0,904	0,592	2,611	0,231	0,943
		4,060	0,030	0,895	0,616	2,402	0,265	0,972
		4,271	0,027	0,845	1,657	3,770	0,198	0,944
	Média	4,384	0,027	0,881	0,955	2,928	0,231	0,953
54		5,589	0,024	0,848	3,614	6,551	0,132	0,960
		5,629	0,024	0,859	2,905	5,937	0,141	0,951
		5,935	0,028	0,868	2,296	5,505	0,160	0,943
	Média	5,718	0,025	0,858	2,938	5,998	0,144	0,951

Com o aumento do teor de sólido tanto a tensão limite de escoamento como os valores da consistência (K), tendem a um crescimento exponencial. Já o índice de comportamento do fluido (n), mostra o desvio do fluido do comportamento de fluido newtoniano.

A polpa de bauxita apresentou melhor ajuste para o modelo de Herschel-Bulkley. O modelo de Bingham é evidenciado em polpas com baixo teor de sólidos.

4.6 AJUSTE DO EQUIPAMENTO

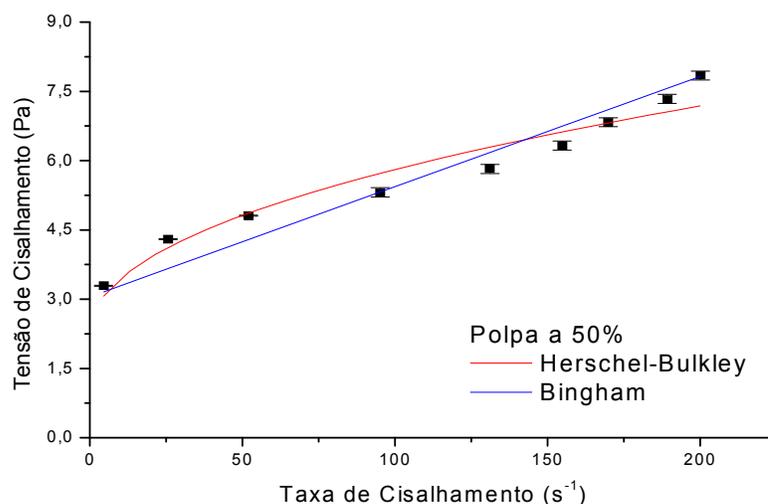
O cálculo da incerteza experimental em torno de 1%, representa a confiabilidade do equipamento quanto aos resultados experimentais obtidos para a tensão de cisalhamento. Este cálculo foi realizado em relação ao torque aplicado no viscosímetro, sendo utilizados como referência os dados do manual do equipamento para o spindle SV1. No apêndice E, são apresentados os cálculos referentes à incerteza experimental do equipamento, que geraram os dados da Tabela 4.7.

Tabela 4.7- Incertezas do experimento

Taxa (s⁻¹)	Tensão (Pa)	Torque (N.m)	Incerteza (%)	I+	I-
4,453	3,289	0,03289	1,0565	3,3237	3,2542
25,63	4,301	0,04301	1,0148	4,3446	4,2573
51,98	4,807	0,04807	1,0027	4,8552	4,7587
95,15	5,313	0,05313	0,9939	5,3658	5,2602
131,1	5,819	0,05819	0,9872	5,8764	5,7615
154,8	6,325	0,06325	0,9820	6,3871	6,2628
169,9	6,831	0,06831	0,9779	6,8978	6,7641
189,2	7,337	0,07337	0,9746	7,4085	7,2654
200,1	7,843	0,07843	0,9720	7,9192	7,7667

Com os dados da Tabela 4.7 foi obtida a Figura 4.10 que apresenta os ajustes aos modelos propostos e os respectivos desvios dos dados experimentais para a polpa de bauxita na concentração de 50% sem defloculante.

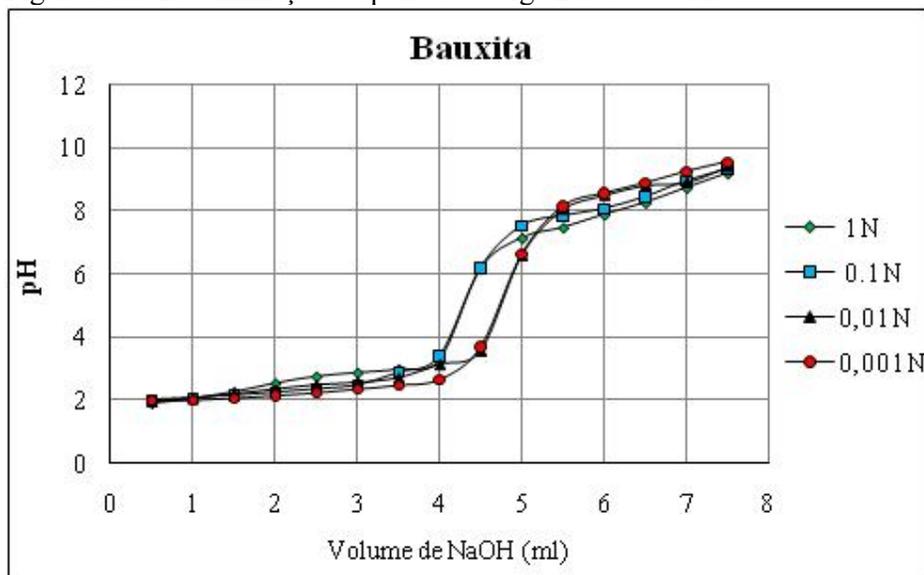
Figura 4.10: Ajuste para os modelos propostos e o desvio das tensões



4.7. RESULTADOS DA PESQUISA DO PONTO DE CARGA ZERO PCZ (pH)

A Figura 4.11 ilustra a variação do pH da polpa em função do volume de titulante (NaOH 1N) e da concentração de NH₄Cl (1N; 0,1N; 0,01N e 0,001N), que corresponde ao eletrólito indiferente. Verifica-se que as curvas tocam-se no mesmo ponto de carga zero (valor de pH 3,48) onde as partículas são independentes da força iônica do cloreto de amônia na faixa de concentração utilizada, ou seja, qualquer alteração será devido as cargas superficiais da bauxita.

Figura 4.11: Determinação do ponto de carga zero da bauxita



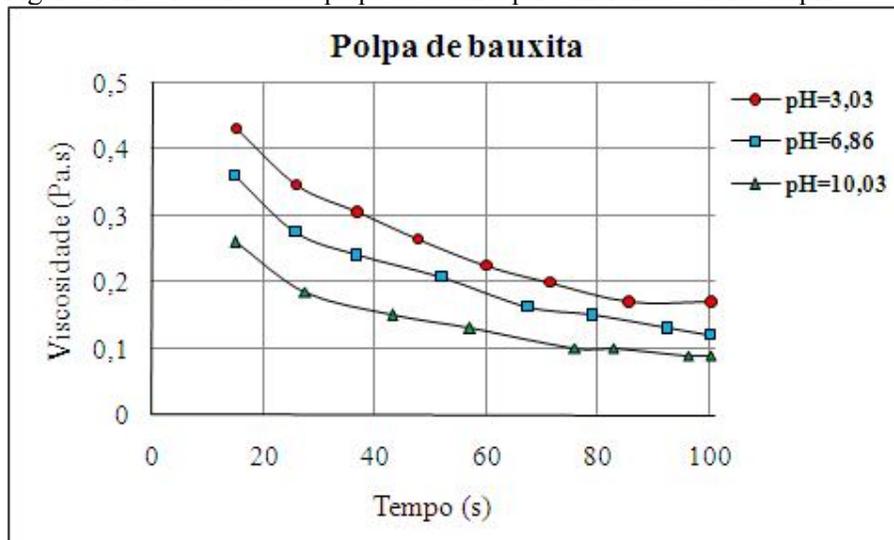
Segundo a metodologia utilizada o ponto de carga zero ocorre no valor em que o pH da suspensão de bauxita muda bruscamente, ou seja, em torno deste valor de pH, a amostra

alcança a neutralidade das suas cargas superficiais. Como mostra a Figura 4.11 isso ocorreu em $\text{pH} = 3,48$.

Em Gouvêa e Murad (2001) foi estimado o PCZ (pH) para uma suspensão de Al_2O_3 (5% volume) e uma solução de SnO_2 (2%) sendo encontrado respectivamente o valores de 8,0 e 3,5.

A Figura 4.12 confirma a influencia do ponto de carga zero na viscosidade da polpa de bauxita. Em valores de pH próximos ao ponto de carga zero a viscosidade é maior, já em valores de pH afastados do PCZ (pH), a viscosidade tende a diminuir e o escoamento tende a ser favorecido.

Figura 4.12: Viscosidade da polpa de bauxita para diferentes valores de pH



A influência do pH na viscosidade da polpa é observada à medida que se trabalha perto do ponto de carga zero (PCZ). Sendo que o pH ideal de operação encontra-se em uma região não muito distante do PCZ para que o equilíbrio das cargas não seja afetado e com isto provocar a sedimentação das partículas. Assim a determinação do ponto de carga zero torna-se fundamental para avaliar o pH ótimo em que a polpa deve ser transportada, levando em consideração que afastando-se do pH em que ocorre o ponto de carga zero, a viscosidade tende a ser menor.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

A polpa de bauxita com teor de sólidos a 50% apresentou características de fluido não newtoniano. O aumento do teor de sólidos influencia diretamente no valor da viscosidade, devido à aproximação das partículas conforme a diminuição do fluido suspensor. Os resultados ressaltaram a evidência do crescimento exponencial da viscosidade da polpa com o aumento do teor de sólidos, já encontrados por outros autores. A polpa em estudo apresentou uma fração de finos ($37\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$) de 34,76% o que pode contribuir para o aumento da viscosidade. O ensaio de histerese confirmou a dependência com o tempo, indicando tendência a reopexia.

Quando adicionados os defloculantes o pH da polpa manteve-se dentro da faixa de operação do processo de escoamento via mineroduto. Os defloculantes empregados no estudo reduziram a viscosidade e a tensão limite de escoamento. O efeito da redução da viscosidade com o poliacrilato sugere que houve uma melhor interação com a polpa de bauxita, quando comparamos as curvas representativas do perfil reológico para a viscosidade entre os dois dispersantes. Este fato pode estar relacionado à estrutura do poliacrilato, combinando efeitos eletrostáticos, estéricos e a faixa do pH da polpa. A partir da curva de defloculação foi encontrada a concentração ideal de 2,5%, correspondendo a 62,5 g/t de defloculante necessários para reduzir a viscosidade da polpa de bauxita. Isto permite um melhor escoamento da polpa no mineroduto, diminuindo a perda de energia ao longo do escoamento na tubulação e menor fricção na sua parede interna.

Polpas com baixo teor de sólidos apresentaram dificuldade de leitura no instrumento, levando-se a estimar que outra geometria de spindle seria mais indicada.

Os modelos propostos indicaram que para concentrações abaixo de 50% o ajuste para Bingham e Herschel-Bulkley fica próximo (92% e 96%) respectivamente. Em concentrações superiores a 50% há um ajuste melhor para o modelo de Herschel-Bulkley (95%), em relação ao modelo de Bingham (86%).

O estudo do ponto de carga zero PCZ (pH) mostrou como os efeitos do aumento ou diminuição do pH influenciam na viscosidade, o valor de pH encontrado foi 3,5. Como o pH da polpa encontra-se na faixa de 6,7 a 7,8 através do estudo pôde-se observar que no pH em que a bauxita está sendo transportada, há um favorecimento da dispersão das partículas, facilitando o escoamento além de ser um valor de pH que dificulta processos de corrosão no mineroduto.

5.2 SUGESTÕES

- Para concentrações menores que 50% de sólidos, utilizar outro tipo de spindle visando melhor reprodutividade das curvas experimentais.
- Utilizar outros defloculantes com objetivo de diminuir mais a relação entre a quantidade em grama de defloculante por tonelada de suspensão, visando a reduzir mais a viscosidade da polpa de bauxita.
- Variar mais a granulometria e realizar o estudo reológico com e sem defloculante.
- Avaliar outro tipo de eletrólito indiferente no estudo do ponto de carga zero PCZ (pH).
- Intensificar o estudo da influência do pH na viscosidade da polpa de bauxita.

REFERÊNCIAS

ALÉ, J. A. V. **Sistemas de Bombeamento**. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Faculdade de Engenharia – FENG, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica. 2010. p.230 (Apostila).

ALVES, R. C. B.; JESUS, V. K. F. **Processo Bayer**. Universidade Federal do Paraná, Faculdade de Engenharia Química, Curitiba. p.18. 2010

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

SAMPAIO, L.C.; NASCIMENTO, C.R.; Propriedades Reológicas da polpa de bauxita-I. Estudo da influência da concentração e da distribuição granulométrica. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTIFICA DO CETEM/MCT, 14. **Anais...** .2006, p. 1-7. Rio de Janeiro

BALDO. J.B.; Ecodefloc: Um novo conceito em defloculantes. In: Encontro de Mineradores e Consumidores, 12, Santa Catarina, Brasil, 2005.
Disponível em:< <http://www.abceram.org.br/asp/12emc/prog.asp>> acesso em 20 de março de 2011.

BARBATO, C.N. **Estudo Reológico da Polpa de Bauxita**, Exame de Qualificação ao Doutorado - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

BASILE, K., CALAF, J. M., LOBATO, A. C. C., LEITE, A. S. L., DUARTE, C. H. D. A. **Caracterização e Gênese dos Depósitos de Bauxita da província Bauxitífera de Paragominas**, Noroeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará/Oeste do Maranhão. 2005.

BODREAU, B.P., BENNETT, R.H. New Rheological and Porosity Equations for Steady-State Comparation, **American Journal of Science**, v.299,p.517-528. 1999.

BORGES, A. A. M.; PERES, A.E.C., Influência do estado de dispersão na flotabilidade de minério oxidado de zinco, In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS 2, São Paulo/Brasil, p. 771-787.1993.

BRAGANÇA, A.; **Avaliação de reagentes alternativos para substituição da cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro**, Dissertação de (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008, p. 102.

BRAGA, P.F.A; COUTO,H.J.B: In: Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais-CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2007

BRETAS, R.; D'AVILA; **Reologia dos Polímeros Fundidos**. São Carlos, SP, Brasil.2000

BURKE, M. R. GREENWOOD, K. KENDALL, Experimental methods for measuring the optimum amount of dispersant for seven Sumitomo alumina powders, **Journal of Materials Science**, v.33, p.5149 – 5156.1998.

CASTRO, R. H. R.; GOUVÊA, D. Estudo da estabilidade de dispersões de SnO₂ utilizando L-Arginina ou quitosana como dispersantes, **Cerâmica**, v.46, n.300, p.214-219, 2000.

CARVALHO, M.R. **Interferência de Cátions Ca⁺² nas Etapas de Deslamagem e Flotação de Minério de Ferro**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto-Escola de Minas, Belo Horizonte, 2003, p.67.

CHAVES, A.P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2. ed.São Paulo: Signus, 2002.

CONSTANTINO, V.R.L et al.Preparação de Compostos de Alumínio a partir da bauxita, **Química Nova**, v.25, n.3, São Paulo,p.490-498,2002. Disponível em:
<http://www.scielo.br/php?script=sci_arttext&pid=SO10040422002000300024&Ing=pt&nrm=iso>).

COOKE, R.; SPEARINGT, A.J.S. Technical note-the influence of binder addition on the hydraulic transportation of backfill containing full gold-plant tailings. **J.S. Afr. Inst. Min. Metall.**, v. 93, n.6, p. 143-146, 1993.

COSTA, JAIME HENRIQUE BARBOSA DA. **Modelagem Matemática da Operação de Escrubagem da Bauxita Paragominas**. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p. 135, São Paulo, 2010

COUSSOT, PHILIPPE. **Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials: applications in industry and environment**, 2005.

DINGER, DENNIS. Medidas de Pontos Isoelétricos sem o Uso de Analisador de Potencial Zeta. **Cerâmica Industrial**, v.11, n.3, p. 23-24, 2006.

DZUY,N.Q; BOGER, D.V.Yield Stress Measurement for Concentrated Suspensions. **Journal of Rheology**.27.p.321-349.1983.

FABRETI, ALINE AKABOCHI, **Pós-tratamento de efluente de lagoa de estabilização através de processo físico-químico**, Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2006, p.159.

NORUEGUESES compram Albrás e Alunorte, Diário do Pará n. 11. Disponível em:
<www.diariodopara.diarioonline.com.br/N-88443-CADEIA+DO+ALUMINIO++++NORUEGUESES+COMPRAM+ALBRAS+E+ALUNORTE.html> Acesso em 03 de maio de 2010.

FLORES, R.C.C., DAMASNENO, E.C., **A bauxita e a indústria de alumínio**. São Paulo, EPUSP, 1998. p. 26.

FURLAN, F.R. **Avaliação da Eficiência do Processo de Coagulação-Floculação e Adsorção no Tratamento de Efluentes Têxteis**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina / Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos. 2008. p.151

FUERSTENAU et al. A multi-torque model for the effects of dispersants and slurry viscosity on Ball milling. **International Journal of Mineral Processing**, v.28,p.81-98. 2000.

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

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

GOUVÊA, D.; MURAD, B.S.S. Estudo sobre a Influencia das Concentrações de Sólidos e de um Dispersante sobre a Cinética de Eletroforese do SnO₂. **Cerâmica**, v.45, n.292-293, p. 103-106, 2001.

HABASHI, FATHI. **A short history of hydrometallurgy. Hydrometallurgy** 79 p.15–22. 2005.

HEALY, T.W. *et al.* **Particulate fluids- a key concept in advanced mineral processing**. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 18, Sidney, 1993. Processing... Australian Institute of Mining and Metallurgy, 1993, v.1, p.47-55.

HIND, A.R., BHARGAVA, S. K., GROCOTT, S. C., The surface chemistry of Bayer process solids: a review, **Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects**, v. 146, n. 1-3, p.359-374, 1999.

HIRATA, Y.; NISHIMOTO, A.; ISHIHARA, Y. **Effects of Particle Classification**, Ceram. Soc. p. 100, 983. 1992.

HAAKE, **Instruction Manual Viscotester VT550**. 1996

IBRAM (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO).

Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001126.pdf>. Acesso: 06 de dezembro de 2010

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA e ESTATISTICA. 2011. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>

JOHNSON, S B.; FRANKS, G.V.; SCALES, P. J.; BOGER, D. V.; HEALY, T. W. **Surface chemistry–rheology relationships in concentrated mineral suspensions**. Int. J. Miner. Process. v.58, p. 267–304, Austrália, 2000.

KELESSIDIS, V.C., MAGLIONE, R. Yield Stress of water-bentonita dispersions. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**. v.318,n. 1-3, p. 217-226. 2008.

LIMA, R.M.F.; da LUZ, J.A.M 2001. In: Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais-CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2007

LOBATO *et al.*; 2003. In: SILVA JÚNIOR, M. B. **A Gestão dos Recursos Hídricos e a Mineração Industrial na Amazônia: Os casos da Pará Pigmentos S/A e da Mineração Bauxita Paragominas-Pará**. Dissertação de Mestrado 150p. Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

MENDES, F.A.; FEITOSA, F.E.; SUGDEN, D.; DELBONI JR., H.; SILVA, A. O. Desing, simulation and operation of miltônia beneficiation circuit. In: INTERNATION ALUMINA QUALITY WORKSHOP, 8. Darwin, 2008

NASCIMENTO, CHRISTINE RABELLO. **Reologia e Reometria Aplicadas ao Estudo de Polpas Minerai**s. Rio de Janeiro, Brasil: CETEM/MCT, 2008. 53p. (Série Rochas e Minerai

s Industriais, v.12).
NGUYEN, Q.D.; BOGER, D.V. Tixotropic Behavior of Concentrated Bauxite Residue Suspensions. Departamento f Chemical Engineering, University of Melbourne. **Rheologica Acta** v.24, p.427- 437, Austrália, 1985

NGUYEN, Q.D.; BOGER, D.V. Measuring the flow properties of yield stress fluids. **Annual. Rev. Fluid Mech.** v.24, p. 47-88. Austrália, 1992

NGUYEN, Q.D.; BOGER, D.V. Application of rheology to solving tailings disposal problems. **International Journal Mineral Processing**. v.54, p. 217–233, Austrália 1998

MACINTYRE, A.J. BOMBAS E INSTALAÇÕES DE BOMBEAMENTO, 2. Ed., Rio de Janeiro, 1997.

MACOSCO, C. W. **Reology: principles, Measurements and applications**. Minneapolis, VCH publishers, inc., 1994.

MATTOS, EDSON EZEQUIEL DE; FALCO, REINADO DE. BOMBAS INDUSTRIAIS, 2. Ed., Rio de Janeiro, 1998.

ORTEGA, F. S., PANDOLFELLI, V.C., RODRIGUES, J.A. e SOUZA, D.P.F. Aspectos da Reologia e da Estabilidade de Suspensões Cerâmicas. Parte II: Mecanismo de Estabilidade Eletrostática e Estérica. **Cerâmica**. v.43, p.77-83. 1997

PASHLEY, R. M.; KARAMAN, M. E. Applied Colloid and Surface Chemistry. Nova York: John Wiley & Sons, 2004. p 188.

PATTERSON, 1984. In: COSTA, JAIME HENRIQUE BARBOSA. **Modelagem matemática da operação de escrubagem da bauxita de Paragominas-PA**. Tese Doutorado 2010, 135p. Escola Politécnica, São Paulo.

PEREIRA, EUGÊNIO. **O uso de Inibidores de Argilas como Solução de Problemas em Sondagens**. Disponível em http://www.systemmud.com.br/index.php?PG=literatura_home > acesso em 30 de março de 2011.

POSSA, MARIO VALENTE; LIMA, JOSÉ RENATO B. DE. Comportamento Reológico de Polpas de Minério – **Série Tecnologia Mineral**, 77. p. 37, CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2000

POSSA, MARIO VALENTE **Comportamento Reológico de Polpas de Minério**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

POSSA, MARIO VALENTE, A importância da reologia da polpa no beneficiamento de partículas finas por processos de cicloneamento e de Moagem. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 19. Recife, novembro de 2002. **Anais...**

PIPELINE SYSTEMS INC, 1997. In: BRAGANÇA, ANA; **Avaliação de reagentes alternativos para substituição da cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro**, Dissertação de Mestrado, 2008.

RÖHRLICH, M.; MISTRY, M.; RUHRBERG, M. e MARTENS, P.N. (2001). **Bauxita**. In: Rochas e Minerais Industriais. LUZ, A.B. e LINS, F.A. F (Eds). 2. ed., CETEM/MCT, 2001, pp.311-336.

SAMPAIO, D.; PIPELINE SYSTEMS INCOORPORATED, (PSI DO BRASIL), 2006.

SAMPAIO, J.A.; NEVES, C.H.B. **Bauxita**, MSL MINERAIS S. A. CETEM, dezembro, 2002

SAMPAIO, J. A., ANDRADE, M. C.e DUTRA, A. J. B., **Bauxita**. In: Rochas e Minerais Industriais. LUZ, A.B. e LINS, F.A. F (Eds). 2ª ed., CETEM/MCT, 2008, pp.311-336.

SAMPAIO, L.C; NASCIMENTO, C.R. Propriedades Reológicas da polpa de Bauxita- I. Estudo da Influência da Concentração e da Distribuição Granulométrica. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTIFICA DO CETEM/MCT, 14. **Anais...** 2007.p.1-7.

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

SANTOS, FRANCISCO LLEDO. Estudo Teórico-Experimental em via de Determinação de Lei de Atrito em Escoamento de Fluidos Hiperconcentrados, Dissertação de Mestrado 150 p. (2003) Universidade Estadual Paulista- UNESP/ Departamento de Engenharia Civil.

SCHARAMM, GEBHARD; **Reologia e Reometria: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

SHI, F.N.; NAPIER-MUNN, T. Measuring the rheology of slurries using an on-line viscometer **Int. J. Miner. Process.** v.47 p.153-176, 1996

SILVA, MAURÍCIO COSTA CABRAL da, **Clarificação do concentrado gerado no tratamento de água por ultrafiltração: estudo de caso na Represa do Guarapiranga**, Dissertação (Mestrado), 110 p. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária Escola Politécnica da Universidade São Paulo. 2009

SOFRÁ, FIONA; BOGER, D.V. Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. **Chemical Engineering Journal** v.86, p.319–330, 2002

VALADÃO, GEORGE EDUARDO SALES; ARAÚJO ARMANDO CORRÊA; **Introdução ao Tratamento de Minério**; UFMG, 234p. 2007.

VALE. Mineroduto de Paragominas. Disponível em < <http://www.vale.com> >. Acesso em: 05 de junho de 2010.

VAN RAIJ, B.V., PEECH, M. Electrochemical properties of some oxisols and alfisols of the tropics. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.36, p. 587-593, 1972.

YABUCHI, SILVIO TOSHIO; **Estudo Teórico- Experimental para a Determinação da Velocidade de Frentes de Lama Escoamento em Canais**, Dissertação (Mestrado), 84 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2004.

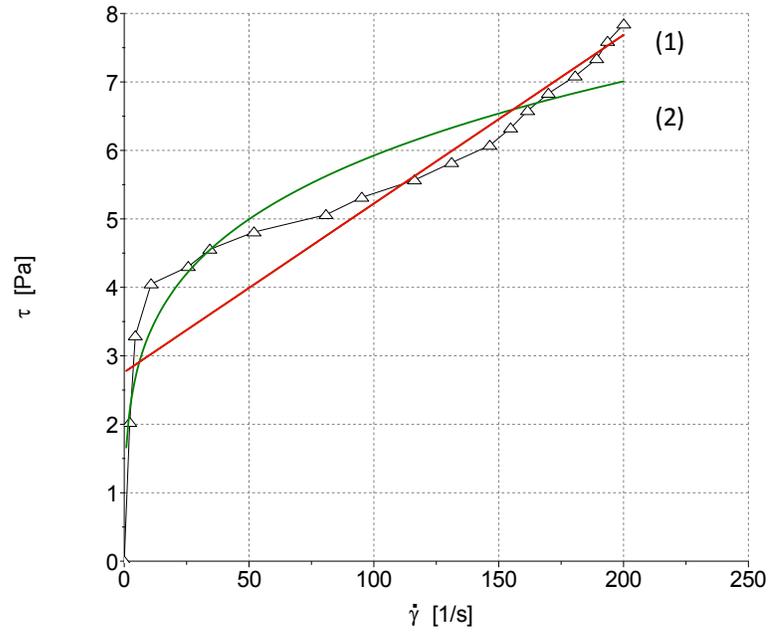
WENG, LEANDRO YIN. **Adição de Amido em Massa Comercial para Produção de Louça de Mesa por Colagem sob Pressão**. Dissertação de mestrado. Engenharia de Materiais, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.2009. Curitiba, 2009.

WEIRMINERALS. Bombas de Deslocamento Positivo. Disponível em < http://pt.weirminerals.com/products_services/piston_diaphragm_pumps/piston_diaphragm_pumps/geho_zpm_pumps.aspx >. Acesso em: 03 de agosto de 2010.

Apendice A

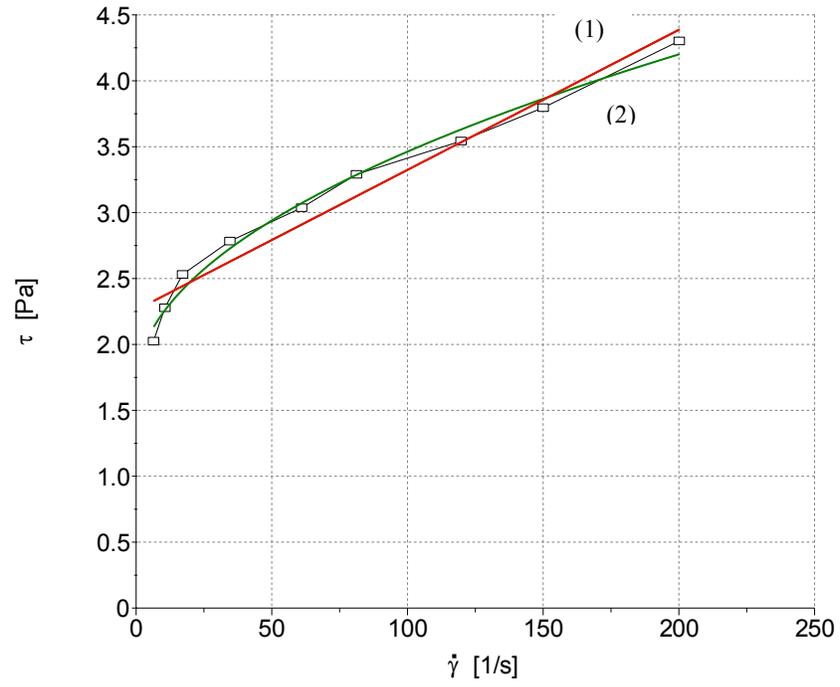
Gráficos da polpa de bauxita a 50% sem adição de defloculante com adição de defloculante.

Polpa a 50% sem defloculante



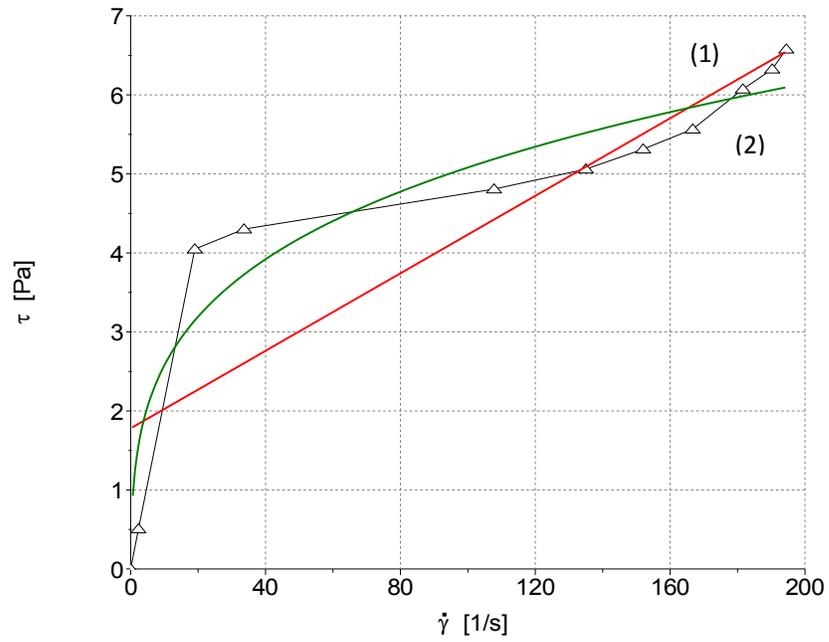
Bingham (1)	Herschel-Bulkley (2)
τ_0 : 3,11 (Pa)	τ_0 : 0.68 (Pa)
η_p : 0,02	K : 1,99
R² : 0.91	n : 0.25
	R² : 0.96

Polpa a 50% com hexametafosfato a 2,5%



Bingham (1)	Herschel-Bulkley (2)
τ_0 : 2.26 (Pa)	τ_0 : 1.674 (Pa)
η_p : 0.01063	K : 0.1798
R² : 0.9784	n : 0.4987
	R² : 0.9942

polpa a 50% com poliacrilato a 2,5%

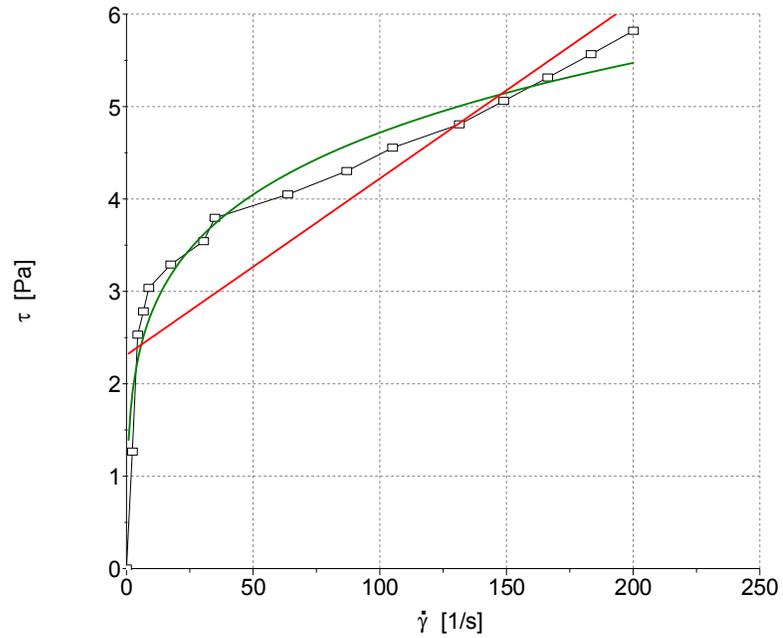


Bingham (1)	Herschel-Bulkley (2)
τ_0 : 1,779 (Pa)	τ_0 : 0,9064(Pa)
η_p : 0.02452	K: 2,025
R^2 : 0.8754	n: 0.2354
	R^2 : 0.9665

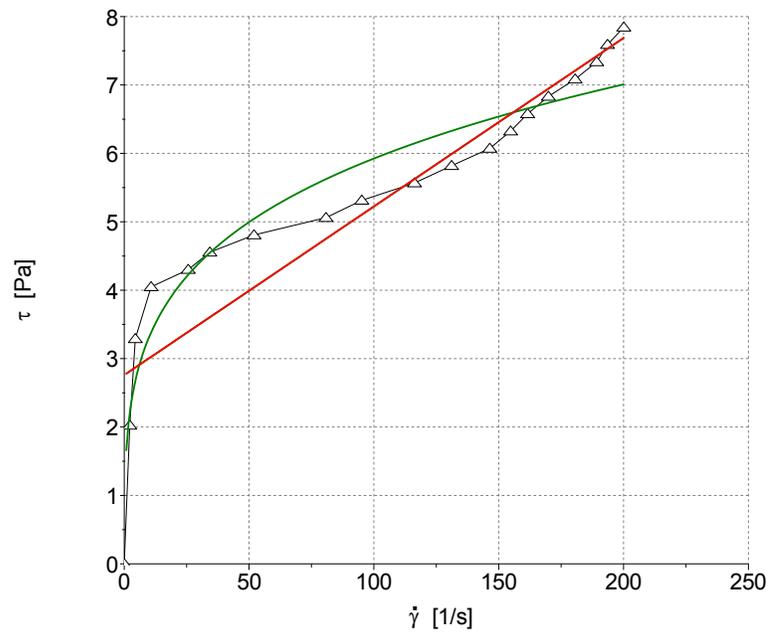
Apêndice B

Gráficos com ajuste para os modelos propostos sem adição de defloculante.

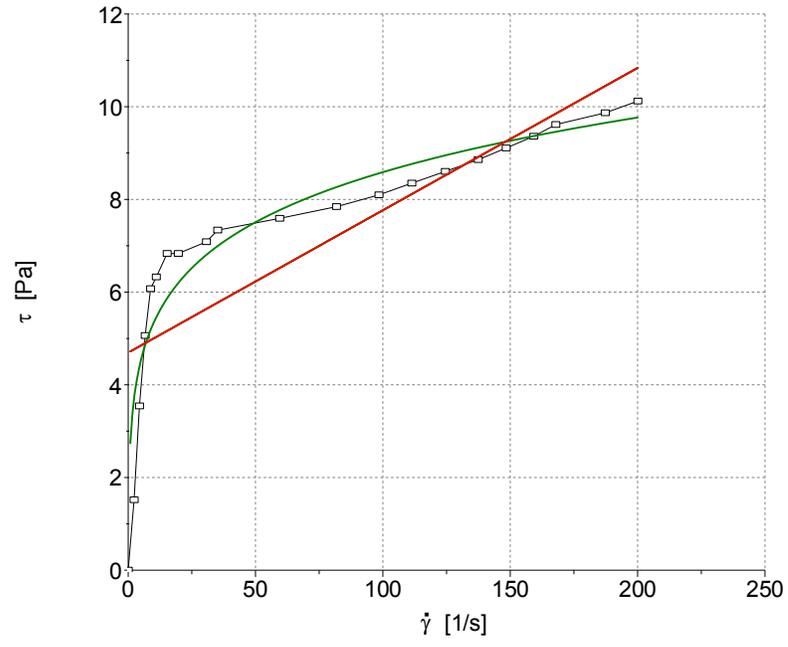
Polpa de bauxita a 48%



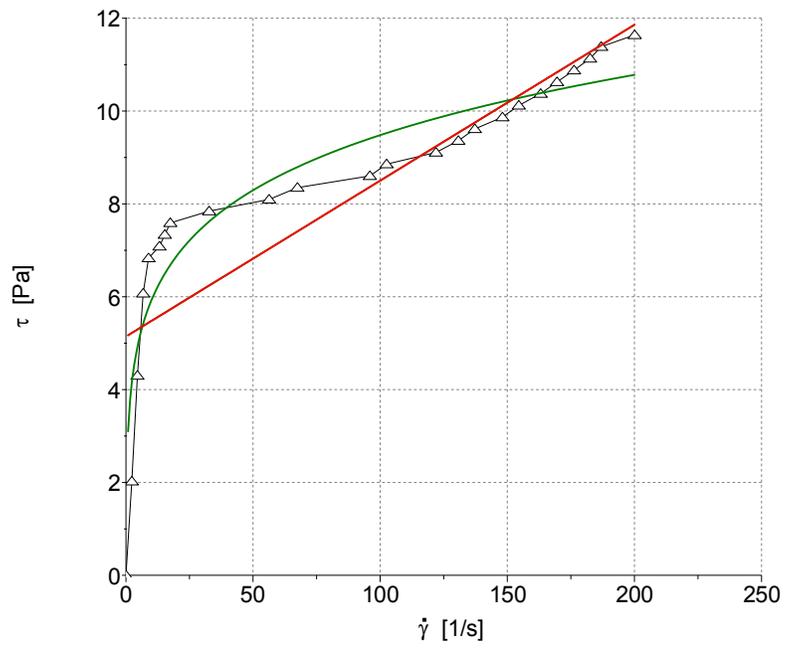
Polpa a 50% sem defloculante



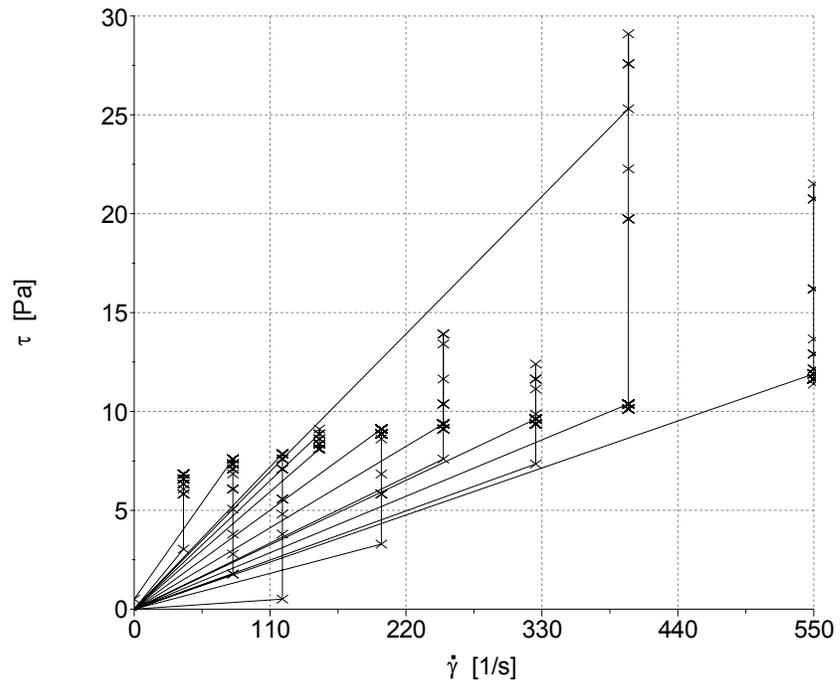
Polpa a 52%



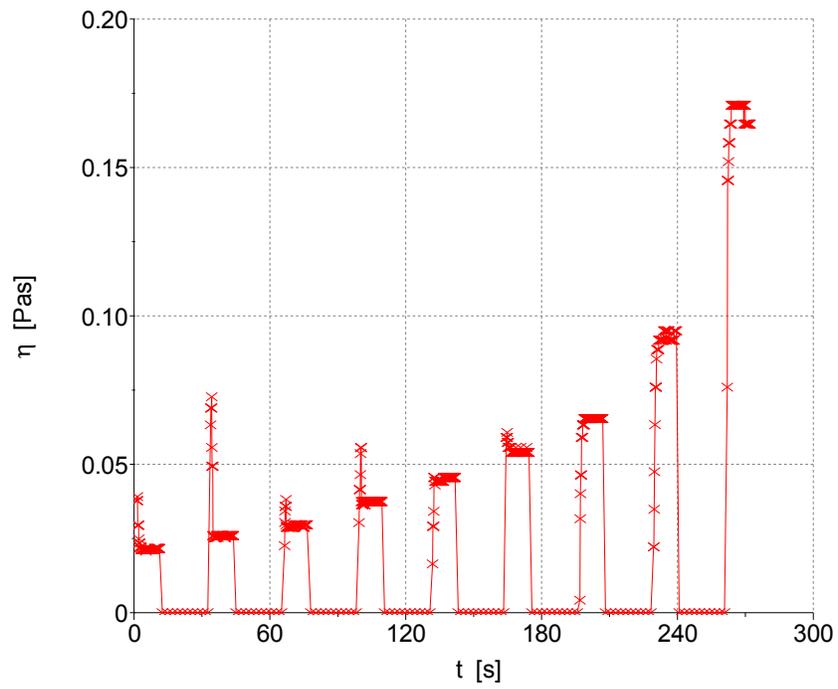
Polpa a 54%



Polpa a 50% (modelo PSI)

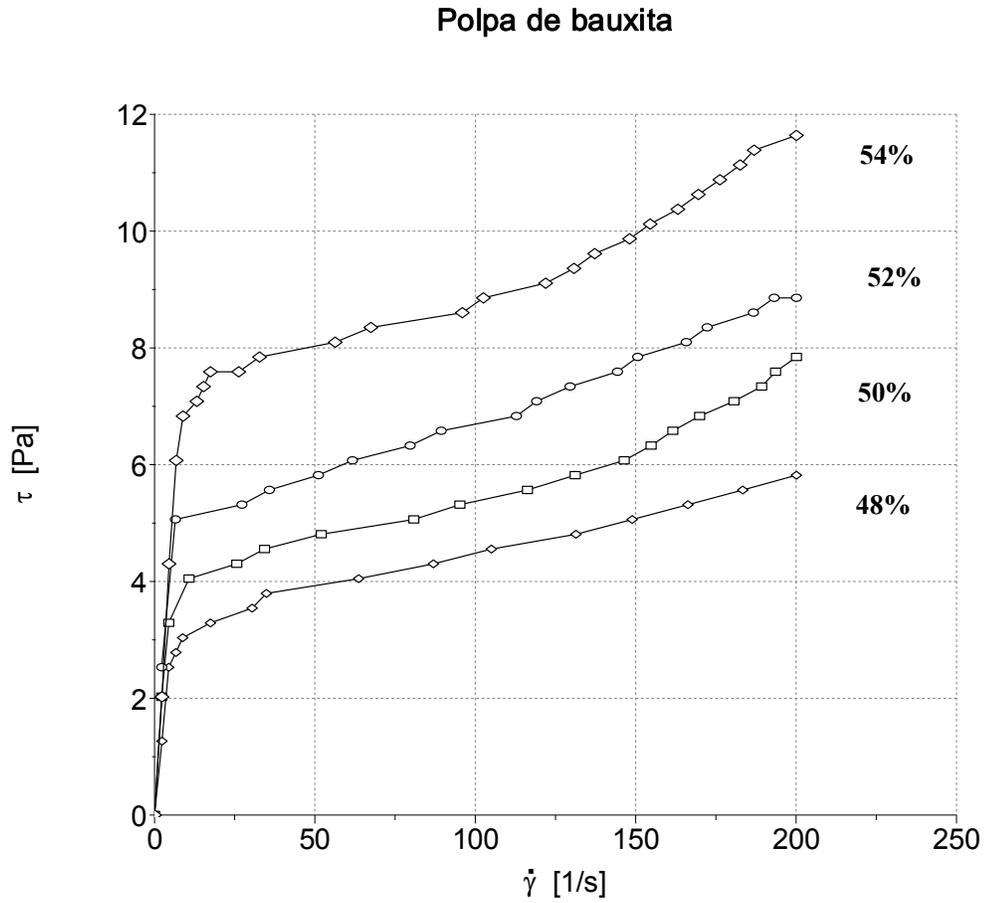


Polpa a 50% (modelo PSI)



Apêndice D

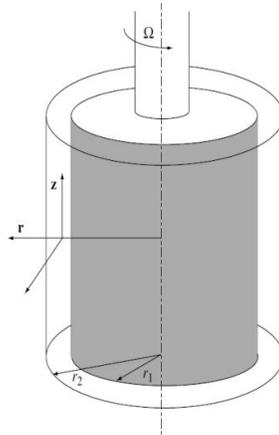
Perfil das curvas de fluxo com aumento do teor de sólido.



Apêndice E

DEDUÇÕES PARA O SPINDLE SV1

Cilindro coaxial



Definições:

$$T = F \cdot r_i$$

$$A = 2\pi r_i L$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{T}{r_i \cdot 2\pi r_i L}$$

Medidas do sensor SV1:

$$r_i = 10,1\text{mm} = 0,0101\text{m}$$

$$L = 61,4\text{mm} = 0,0614\text{m}$$

#Equação para tensão no SV1:

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_i^2 L} \quad (\text{equação geral}) \quad (1)$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_i^2 L \cdot F_c} \quad (\text{equação específica}) \quad (2)$$

Fator de correção:

$$F_c = \frac{0,01}{2\pi r_i^2 L} \text{ (Manual HAAKE)}$$

Torque para SV1

A partir de (1) e (2):

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_i^2 L F_c}$$

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

Desvio para as medidas do SV1

$$\delta r_i = 0,025 \text{ mm} = 0,000025 \text{ m}$$

(obs. Experimentais do equipamento)

$$\delta L = 0,5 \text{ mm} = 0,0005 \text{ m}$$

(obs. Experimentais do equipamento)

$$\delta T = 0,015 \text{ Ncm} = 0,00015 \text{ Nm}$$

(desvio do Torque. $T_{\text{máx}}=0,5\% \cdot 3 \text{ N.cm}$) → manual HAAKE

A tensão e suas variáveis influentes:

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

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

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

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

Equação para a obtenção da incerteza:

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