



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

SEBASTIÃO MARTINS BRUM

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DE POLPA DE BAUXITA E NO FATOR DE ATRITO**

**BELÉM
2011**

SEBASTIÃO MARTINS BRUM

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DE POLPA DE BAUXITA E NO FATOR DE ATRITO**

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos

ORIENTADORES: Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo

Prof. Dr. José Antonio da Silva Souza

**BELÉM
2011**

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

Brum, Sebastião Martins

Estudo da influência da granulometria no comportamento reológico de polpa de bauxita e no fator de atrito. / Sebastião Martins Brum; orientadores, Emanuel Negrão Macêdo; José Antonio da Silva 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

SEBASTIÃO MARTINS BRUM

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NO COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DE POLPA DE BAUXITA E NO FATOR DE ATRITO**

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

DATA DA AVALIAÇÃO: ___/___/___

CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA

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

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

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

**Prof^a. Dra. Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe
(FEQ – ITEC – UFPA – Membro)**

**Prof. Dr. Marcelo José Raiol Souza
(DTA – UEPA – Membro)**

**Belém
2011**

“O querer liberto: É esta a verdadeira doutrina da vontade de liberdade”.

“Mas esta é a minha doutrina: Quem quiser, algum dia, aprender a voar deverá, antes, saber ficar de pé e caminhar e correr e subir e dançar. Não se voa à primeira”.

Assim falou Zaratustra

Friedrich W. Nietzsche

"Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve...

A vida é muita para ser insignificante".

Charles Chaplin

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”.

Isaac Newton

DEDICATÓRIA

A minha mãe Luiza (D. Zica) e a minha avó Francisca (D. Sinhá), “reforçadas” por Nossa Senhora Aparecida, que todo dia rogo a Elas pela sua proteção.

A minha esposa Nadir Otilia e nossas filhas Nádia Luiza e Natália Luiza, pelo amor, carinho, compreensão, e total apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS** por dar-me forças para enfrentar as dificuldades com muita perseverança.

Ao Professor Doutor **Emanuel Negão Macedo** pela sua orientação, compreensão e confiança depositada.

Ao Professor Doutor **José Antonio da Silva Souza** por seu incentivo e orientações de grande senso prático.

A Professora Doutora **Augusta Maria Paulain Ferreira Felipe**, por suas orientações, dedicação e incansável disposição na condução dos trabalhos até a sua conclusão final.

Aos Professores Doutores **Célio Augusto Gomes de Souza** e **João Nazareno Nonato Quaresma**, grandes guias e incentivadores.

A minha colega de mestrado **Kelly Cristina Sarmento Silva** por seus valiosos ensaios de reologia, discussões, orientações e trocas de experiências.

Ao Professor Doutor **José Carlos Cardoso Filho**, desde os primeiros contatos, com seus incentivos e grande colaboração na disciplina Engenharia das Reações Químicas, a “maior novidade que encontrei” entre as disciplinas do Mestrado.

Ao grande colega e colaborador **Nelson Amorim**, principalmente nas disciplinas de Métodos Matemáticos em Engenharia Química I e Transferência da Quantidade de Movimento, indicando os caminhos a minha retomada destes conhecimentos após quase trinta anos longe da vida acadêmica...

Aos colegas **Edílson Marques Magalhães** e **Clauderino da Silva Batista**, com grandes contribuições nas disciplinas Transferência de Calor e Estágio Docente.

As pessoas amigas do Laboratório de Reologia, MSc. **Raimunda Figueiredo da Silva Maia** e **Dílson Cardoso** por suas valiosas ajudas.

Ao Supervisor do Laboratório Físico-Químico da Mineração Paragominas S/A., **Mário Fernando Ferreira dos Santos** por sua prestimosa colaboração na preparação das amostras e ensaios de granulometria, físico-químicos e reológicos.

Ao colega **Otílio Othon Pires**, químico da Gerência de Desenvolvimento de Processos da MPSA, por sua constante colaboração, orientações, sugestões e incentivo a pesquisa.

Aos Gerentes da Mineração Paragominas S/A., **Fábio de Araújo Mendes** e **Marco Antonio Veisac**, por liberar-me das minhas atividades na Empresa para a realização deste Mestrado, um agradecimento muito especial.

RESUMO

O presente trabalho apresenta estudos de caracterização reológica e determinações de fatores de atrito em três polpas de bauxita, originárias da Mina de Miltônia, Paragominas – Pará, resultantes de condições operacionais com graus diferentes de moagem. Deste modo, a diferenciação básica entre as mesmas reside na distribuição granulométrica. O objetivo é fazer uma proposta de revisão da especificação granulométrica do produto (polpa de bauxita para o mineroduto), permitindo uma comparação com as polpas do projeto (planta piloto) e da operação atual (usina de beneficiamento) quanto a resposta a alterações, principalmente, da viscosidade e fatores de atrito. A polpa proposta incorpora um percentual maior de finos (< 10 microns) em relação as demais polpas. Os benefícios possibilitarão ganhos de recuperação com a incorporação desta parcela de finos, a qual atualmente é descartada para a bacia de rejeitos. O material foi caracterizado por análises granulométricas da série Tyler, físicas e físico-químicas, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de raios-x dispersiva em energia (EDS). Utilizando-se de um viscosímetro de cilindros coaxiais, tipo Searle, abordou-se os aspectos reológicos destas polpas, em função da sua distribuição granulométrica e da variação da concentração de sólidos. As propriedades reológicas avaliadas foram a viscosidade, a tensão de escoamento e também os comportamentos que mostram a dependência da viscosidade com o tempo de aplicação de uma taxa de cisalhamento constante, verificando-se por meio de curva de histerese, a existência ou não da tixotropia e da reopexia. Os resultados experimentais mostraram que para as polpas ensaiadas, a granulometria e a concentração de sólidos são parâmetros relevantes na determinação da viscosidade. Os testes com estas três polpas de bauxita, de granulometrias diferentes, foram realizados a concentrações pré-determinadas, de modo a determinar o modelo reológico cujos parâmetros apresentaram os melhores coeficientes de correlação (R^2), sendo que os melhores ajustes encontrados foram segundo o modelo de Herschel-Bulkley. Os fatores de atrito foram obtidos por formulações que envolvem uma relação logarítmica, utilizando-se da Lei da Parede como método de obtenção das expressões aplicáveis a estes fluidos não-Newtonianos viscoplásticos, sendo comparados com os calculados pelas correlações de Dodge e Metzner e verificou-se que de uma maneira geral há a concordância entre o modelo estudado nas três polpas. A análise dos fatores de atrito na concentração de 50% de sólidos, concentração de bombeio por mineroduto, mostra que o comportamento das polpas estudadas é semelhante, com os melhores ajustes para a faixa de 10.000 a 100.000 Reynolds (faixa média de trabalho para o escoamento turbulento de polpas de minério, homogêneas e heterogêneas).

Palavras-chave: Bauxita; Reologia; Viscosidade; Tensão de Escoamento; Histerese; Fator de Atrito; Escoamento Turbulento.

SUMMARY

This paper presents studies of the rheological characterization and determination of friction factors in three bauxite slurries originating in Miltonia Mine, Paragominas - Para, resulting from operating conditions with different degrees of grinding. Thus, the basic difference between them lies in the size distribution. The goal is to make a proposal to revise the specification of the product particle size (for the bauxite slurry pipeline), allowing a comparison with the slurries of the project (pilot plant) and the current operation (processing plant) and the response to changes, especially, viscosity and friction factors. The slurry proposal incorporates a higher percentage of fines (<10 microns) compared with other slurries. The benefits can earn recovery with the incorporation of this portion of fines, which currently is discarded to the tailings pond. The material was characterized by size analysis of the series Tyler, physical and physical-chemical, electron microscopy (SEM) and X-ray spectrometry energy dispersive (EDS). Testes were conducted in coaxial cylinder viscometer, Searle type, in order to determine the rheological behavior of these slurries, depending on the size distribution and varying the concentration of solids. The rheological properties were measured viscosity, yield stress and also behaviors that show the dependence of viscosity with the time of application of a constant shear rate, verifying through the hysteresis curve, the presence or absence of thixotropy and reopexia. The experimental results showed that for the slurries tested, the particle size and solids concentration are important parameters in determining the viscosity. Tests with these three bauxite slurries of different sizes, were performed at predetermined concentrations, to determine the model whose rheological parameters showed the best correlation coefficients (R^2), and the best fits were found using the Herschel-Bulkley model. The friction factors were obtained for formulations involving a logarithmic relationship, using the Law of the Wall as a method of obtaining these expressions apply to non-Newtonian viscoplastic fluid, and compared with those calculated by Dodge and Metzner correlation and found that in general there is agreement between the model studied in the three slurries. The factor analysis of friction in the concentration of 50% solids, which is the concentration of pumping by pipeline, shows that the behavior of the slurries studied is similar, with the best settings for the range from 10,000 to 100,000 Reynolds (average work range for the turbulent flow of the ore pulp, homogeneous and heterogeneous).

Keywords: Bauxite; Rheology; Viscosity; Yield Stress; Hysteresis; Friction Factor; Turbulent Flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Curvas granulométricas da operação atual (P1) e projeto (P0)	19
Figura 2.1	Perfil laterítico típico de Miltônia 3 e Miltônia 5	23
Figura 2.2	Relação de contato discordante da LF com o Capeamento Argiloso (CAP) e concordante com BCM	24
Figura 2.3	Relação de contato concordante entre o Capeamento Argiloso (CAP) e horizonte das BN ^s	24
Figura 2.4	Associação de nódulos de BN ^s (concreção e cristalizada) com tamanhos de até +- 30 cm	25
Figura 2.5	Testemunho de sondagem, relação de contato discordante entre o horizonte das BN ^s e “LF” subjacente	25
Figura 2.6	Interfácies entre LF e a BC	25
Figura 2.7	Diversos tipos de LF	25
Figura 2.8	Zona de transição (interfácies) entre a laterita ferruginosa (LF) e a bauxita cristalizada (BC)	26
Figura 2.9	Diferentes tipos de BCBA	27
Figura 2.10	BCBA estratificada típica com porções de bauxita amorfa (BA)	27
Figura 2.11	BCBA em blocos	27
Figura 2.12	BA-nódulo em ARV	28
Figura 2.13	BA em blocos alongados de diferentes tamanhos	28
Figura 2.14	Argila variegada	28
Figura 2.15	Mapa das Minas e Refinarias	30
Figura 2.16	Mapa dos <i>Smelters</i>	30
Figura 2.17	Localização da MPSA – Mineração Paragominas S/A.	32
Figura 2.18	Operações de mina	33
Figura 2.19	Método de lavra em tiras	34
Figura 2.20	Fluxograma de processo da Mina de Bauxita Paragominas	35
Figura 2.21	Operação da usina via sala de controle	36
Figura 2.22	Circuito de moagem	36
Figura 2.23	Sistema do Mineroduto	37
Figura 2.24	Esquema de uma bomba de deslocamento positivo	38
Figura 2.25	Bombas de carga	38
Figura 2.26	Bombas principais de deslocamento positivo	38
Figura 2.27	Sala de controle do mineroduto	38

Figura 2.28	Marco zero do mineroduto	38
Figura 2.29	Fluxograma de processo da estação de desaguamento em Barcarena (EDB)	39
Figura 2.30	Estação de desaguamento (EDB) e filtragem na Alunorte	39
Figura 2.31	Reogramas de diferentes tipos de fluidos	42
Figura 2.32	Principais modelos encontrados na literatura	42
Figura 2.33	Curvas de fluxo (A) e de viscosidade (B) – Exemplo de tixotropia	43
Figura 2.34	Etapas do desenvolvimento do modelo e solução (Macêdo, 2002)	46
Quadro 3.1	Descrição das Amostras de Polpa	51
Figura 3.1	Amostras coletadas na Planta Piloto (01) e Tancagem do Mineroduto (02)	51
Figura 3.2	Local de coleta da amostra P0 – Produto final da Planta Piloto	52
Figura 3.3	Local de coleta das amostras P1 e P2 – Produto Final da Usina de Beneficiamento	52
Figura 3.4	Peneiradores suspensos – Fabricação Dialmática	54
Figura 3.5	Equipamentos Malvern	54
Figura 3.6	Curva de calibração do viscosímetro	56
Figura 3.7	Spindle SV1 (Fonte: manual Haake VT550)	57
Figura 4.1	Escala gráfica das amostras de polpa	59
Figura 4.2	Resultados EDS e fotomicrografias (5.000 X) obtidas por MEV para as amostras de polpa de bauxita	60
Figura 4.3	Viscosidade aparente x concentração de sólidos	62
Figura 4.4	Curvas de histerese das polpas estudadas (a), (b) e (c)	64
Figura 4.5	Ajuste para os modelos propostos	67
Figura 4.6	Curvas de fluxo das polpas a 46% sólidos	69
Figura 4.7	Curvas da viscosidade aparente das polpas a 46% sólidos	69
Figura 4.8	Curvas de fluxo das polpas a 48% sólidos	70
Figura 4.9	Curvas da viscosidade aparente das polpas a 48% sólidos	70
Figura 4.10	Curvas de fluxo das polpas a 50% sólidos	71
Figura 4.11	Curvas da viscosidade aparente das polpas a 50% sólidos	71
Figura 4.12	Curvas de fluxo das polpas a 52% sólidos	72
Figura 4.13	Curvas da viscosidade aparente das polpas a 52% sólidos	72
Figura 4.14	Curvas de fluxo das polpas a 54% sólidos	73
Figura 4.15	Curvas da viscosidade aparente das polpas a 54% sólidos	73
Figura 4.16	Rampas tensão x tempo para a polpa projeto a 54% sólidos	75
Figura 4.17	Rampas tensão x taxa para a polpa projeto a 54% sólidos	75

Figura 4.18	Rampas viscosidade x taxa para a polpa projeto a 54% sólidos	76
Figura 4.19	Ajuste por Herschel-Bulkley para a polpa projeto a 54% sólidos	76
Figura 4.20	Curvas dos fatores de atrito $f \times \text{Reg}$ para a polpa projeto	81
Figura 4.21	Curvas dos produtos $f \cdot \text{Reg} \times \text{Reg}$ para a polpa projeto	82
Figura 4.22	Curvas dos fatores de atrito $f \times \text{Reg}$ para a polpa operação atual	83
Figura 4.23	Curvas dos produtos $f \cdot \text{Reg} \times \text{Reg}$ para a polpa operação atual	83
Figura 4.24	Curvas dos produtos $f \times \text{Reg}$ para a polpa proposta	84
Figura 4.25	Curvas dos produtos $f \cdot \text{Reg} \times \text{Reg}$ para a polpa proposta	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Perfil laterítico típico de Miltônia 3 e Miltônia 5	23
Tabela 2.2	Produção e consumo de alumínio primário	31
Tabela 2.3	Capacidade produtiva das maiores minas de bauxita do mundo (Fonte: ABAL/2009)	31
Tabela 2.4	Equações, parâmetros reológicos e exemplos de fluidos não-Newtonianos	42
Tabela 4.1	Análise Granulométrica das Amostras de Polpa	59
Tabela 4.2	Diâmetros Médios das Amostras de Polpa	60
Tabela 4.3	Resultados das Análises Físico-Químicas	61
Tabela 4.4	Resultados dos ensaios da histerese	65
Tabela 4.5	Resumo das propriedades físicas e reológicas das polpas	66
Tabela 4.6	Incertezas do experimento	67
Tabela 4.7	Comparação dos parâmetros da modelagem	68
Tabela 4.8	Resultados da Modelagem a 54% de sólidos	74
Tabela 4.9	Parâmetros para o cálculo dos fatores de atrito	78
Tabela 4.10	Intervalos de Reg com melhores ajustes dos fatores $f \times f_{dn}$	79
Tabela 4.11	Intervalos de Reg, para 50% sólidos, com melhores ajustes dos fatores $f \times f_{dn}$	80
Tabela 4.12	Fator de atrito (f) $\times n$; Produto $f \cdot Re \times n$ para polpa projeto	81
Tabela 4.13	Fator de atrito (f) $\times n$; Produto $f \cdot Re \times n$ para polpa operação atual	82
Tabela 4.14	Fator de atrito (f) $\times n$; Produto $f \cdot Re \times n$ para polpa proposta	84

NOMENCLATURA

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ALUNORTE	Alumínio do Norte do Brasil S/A.
CAP	Companhia de Alumina do Pará
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CETÉM	Centro de Tecnologia Mineral
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLVO	Metodologia de Análise de Energia de Integração dos Colóides
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
DSM	Dutch State Mines
EDS	Espectrômetro de Raios-X Dispersivo em Energia
FORTTRAN	Formula Translation
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
I	Incerteza
I ⁻	Incerteza para um valor inferior
I ⁺	Incerteza para um valor superior
MPSA	Mineração Paragominas S/A.
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MRN	Mineração Rio do Norte
OF	Overflow
OS	Oversize
PSI	Pipeline Systems Incorporated
PIG	Pipeline Inspection Gauge
ROM	Run of Mine
SAG	Semi Autogenous Grinding
UF	Underflow
US	Undersize

LISTA DE SIMBOLOS

$3\text{H}_2\text{O}$	Água
Al_2O_3	Alumina
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Caulinita
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Bohemita; Diásporo
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Gibbsita
Fe_2O_3	Hematita
$\text{FeO}(\text{OH})$	Goetita ou limonita
SiO_2	Quartzo
TiO_2	Anatásio
$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em graus Celsius
cm	centimetro
g/l	Gramas por litro
m	metro
mm	milimetro
Mtpa	Milhões de toneladas por ano
Pa	Pascal
pH	Potencial de hidrogênio
rpm	Rotações por minuto
t	Tempo
T	Temperatura
$\frac{du}{dy}$	Gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento
#	Mesh
ã	Adimensional na fórmula do fator de atrito
C	Constante na fórmula do fator de atrito
C_v	Concentração em volume
C_w	Concentração em peso
D	Diâmetro de particula
D_{32}	Diâmetro médio de Sauter
d_p	Densidade da polpa
Eh-pH	Potencial de oxidação-redução e potencial hidrogeniônico
f	Fator de atrito de Fanning

f_{dm}	Fator de atrito por Dodge e Metzner
g	Aceleração da gravidade
k	Índice de consistência do fluido
m_p	Massa de polpa (sólido + água)
m_p	Massa da polpa
m_s	Massa de sólido seco
n	Índice de comportamento do escoamento do fluido
R^2	Fator de correlação
Re	Número de Reynolds
Re_g	Número de Reynolds generalizado
Re_{MR}	Número de Reynolds segundo Metzner e Reed
Tyler	Escala granulométrica
u	Velocidade do fluido não perturbado
V	Velocidade de partícula
V_p	Volume da polpa
Y	Tensão limite de escoamento adimensional do fluido
τ	Tensão de cisalhamento
τ_0	Tensão limite de escoamento
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa específica
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede
$\dot{\gamma}$	Gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento
η	Viscosidade aparente
μ	Viscosidade
μm	micrômetro
μ_p	Coefficiente de rigidez ou viscosidade plástica
ρ_P	Massa específica da polpa

SUMÁRIO

1	CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO	18
1.1	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	18
2	CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	BAUXITA	21
2.2	NATUREZA DOS DEPÓSITOS DE BAUXITA DE PARAGOMINAS	22
2.3	PERFIL DOS DEPÓSITOS DE BAUXITA DE PARAGOMINAS	23
2.3.1	Capeamento argiloso (CAP)	24
2.3.2	Bauxita nodular (BN)	24
2.3.3	Laterita ferruginosa (LF)	25
2.3.4	Bauxita cristalizada (BC)	26
2.3.5	Bauxita cristalizada com bauxita amorfa (BCBA)	26
2.3.6	Bauxita amorfa (BA)	27
2.3.7	Argila variegada (ARV)	28
2.4	MINERALOGIA DA BAUXITA DE PARAGOMINAS	28
2.5	RESERVAS E PRINCIPAIS PRODUTORES DE BAUXITA	29
2.6	APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA BAUXITA	31
2.7	A MINA DE BAUXITA PARAGOMINAS	32
2.7.1	Introdução	32
2.7.2	Operação de Mina	33
2.7.3	Operação de Usina	34
2.7.4	Mineroduto	37
2.8	REOLOGIA	40
2.8.1	Reologia e Viscosimetria	40
2.8.2	Modelos Reológicos	40
2.8.2.1	Fluidos Inelásticos	40
2.8.2.2	Fluidos viscoelásticos e soluções poliméricas	43
2.8.2.3	Reologia das Polpas Minerai	44
2.9	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O CÁLCULO DO FATOR DE ATRITO	46
2.9.1	Introdução	46
2.9.2	Fator de atrito para o modelo de Herschel-Bulkley	48
2.9.3	Fator de atrito segundo correlações de Dodge e Metzner	49
3	CAPITULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	POLPA DE BAUXITA	51

3.2	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA POLPA DE BAUXITA	52
3.2.1	Teor de sólidos	52
3.2.2	pH	53
3.2.3	Massa específica da polpa	53
3.2.4	Análise granulométrica	53
3.2.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Raios-X Dispersiva em Energia (EDS)	54
3.2.6	Análises Físico-Químicas	55
3.2.7	Avaliações Reológicas	55
3.2.7.1	Metodologias de Execução dos Ensaios	55
3.2.7.2	Calibração do Equipamento	56
3.2.7.3	Metodologia da Incerteza dos ensaios reológicos	56
3.3	METODOLOGIAS DE RESOLUÇÃO DOS FATORES DE ATRITO	57
3.3.1	Metodologia de solução da equação do fator de atrito segundo o modelo de Herschel-Bulkley	57
3.3.2	Metodologia de solução das correlações de Dodge e Metzner	58
4	CAPITULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	59
4.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTRÔMETRO DE RAIOS-X DISPERSIVO EM ENERGIA (EDS)	60
4.3	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	60
4.4	ENSAIOS REOLÓGICOS	61
4.4.1	Influência da concentração de sólidos e da distribuição de tamanhos na viscosidade das polpas	61
4.4.2	Ensaios de Tixotropia e Reopexia	63
4.5	COMPARAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA MINA E OS RESULTADOS OBTIDOS NO TRABALHO EXPERIMENTAL	66
4.6	AJUSTE DO EQUIPAMENTO	67
4.7	MODELAGEM REOLÓGICA	68
4.8	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS FATORES DE ATRITO	77
4.8.1	Considerações	77
4.8.2	Polpas ensaiadas e modeladas segundo Herschel-Bulkley	77
4.8.3	Resultados dos fatores de atrito	79
4.8.4	Tabelas e curvas ilustrativas dos fatores (f) e (fdm)	80

5	CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	86
	REFERÊNCIAS	88
	ANEXO A Metodologia PSI	91
	ANEXO B Resultados da Modelagem Reológica – Polpa Projeto	101
	ANEXO C Resultados da Modelagem Reológica– Polpa Oper. Atual	102
	ANEXO D Resultados da Modelagem Reológica – Polpa Proposta	103
	ANEXO E Resultados da Modelagem Reológica – Comp. Amostras	104
	ANEXO F Tendência a Reopexia Polpa Projeto	105
	ANEXO G Tendência a Reopexia Polpa Operação Atual	106
	ANEXO H Tendência a Reopexia Polpa Proposta	107
	APÊNDICE A Cilindro Coaxial e Suas Definições	108

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O transporte de fluidos geralmente é realizado por meio de dutos. Este tipo de transporte é responsável pelo deslocamento de fluidos entre os tanques de estocagem e as unidades de processamento, nas plantas industriais e entre grandes distâncias como os minerodutos, oleodutos e gasodutos. Este sistema de tubulação é composto de seções retas, curvas, válvulas dentre outros tipos de acessórios que oferecem resistência ao escoamento.

O deslocamento do fluido é promovido por bombas que fornecem energia necessária para que aconteça o escoamento do fluido ao longo do sistema de tubulação. Portanto, no dimensionamento de bombas é necessário conhecer a perda de carga ocasionada nas seções retas e nos acidentes que compõem o sistema de escoamento. Para a estimativa das perdas de carga é necessária a determinação de fatores de atrito e de coeficientes de perdas de carga, dentre outros parâmetros do fluido, os quais contribuirão para a determinação da potência do sistema de bombeamento a utilizar.

De um modo geral, o estudo do escoamento de fluidos Newtonianos em dutos encontra-se bastante desenvolvido. Em relação a parte reta da tubulação, na literatura, existem inúmeras correlações implícitas e explícitas para a estimação dos fatores de atrito, tanto no regime laminar quanto no regime turbulento. Quanto aos coeficientes de perdas de carga, para a maior parte dos acidentes, podem ser encontrados em várias tabelas disponibilizadas na literatura.

Para o escoamento de fluidos não-Newtonianos, as correlações encontradas na literatura para a predição de fatores de atrito, quase sempre, fornecem valores discordantes ou são específicas a certas características apresentadas pelo fluido em determinadas condições de escoamento. Com relação aos coeficientes de perda, há poucos trabalhos na literatura e a maior parte deles é dedicada ao escoamento em regime laminar.

Os fluidos não-Newtonianos apresentam uma relação não linear entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento ou possuem uma tensão crítica para iniciar o escoamento. Podendo, ainda, ser dependente do tempo ou apresentar características viscoelásticas. Neste sentido, existem vários modelos para a representação da relação entre a tensão cisalhante e taxa de deformação.

Um tipo de fluido bastante comum nos processos industriais é o pseudoplástico. Os fluidos pseudoplásticos apresentam viscosidade aparente

decrecente com aumento da taxa de deformação. Como exemplo, pode-se citar: as soluções poliméricas, tintas de impressão, alguns derivados de petróleo, suspensões de minério de ferro e amido, dispersões argilosas e etc. (Machado, 2002).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é propor uma revisão da especificação granulométrica do produto (polpa de bauxita para o mineroduto), em face a dificuldades operacionais verificadas em escala industrial da bauxita, as quais impossibilitam a obtenção da especificação granulométrica definida em projeto (planta piloto), conforme demonstrado na Figura 1.1, onde há desvios significativos nas extremidades da curva, em destaque:

- Extremidade esquerda: geração de finos, extrapolando o patamar projetado de no máximo 24,50 % passante em 10 micrômetros.

Consequência: descarte de parte do produto para rejeitos com perda de produção

- Extremidade direita: geração de grossos, extrapolando o patamar de projeto de 100% passante em 0,30 mm (48# Tyler). Observa-se o valor alcançado de aproximadamente 94 a 95% passante em 0,30 mm.

Consequência: desgaste no mineroduto por atrito das partículas “grosseiras”.

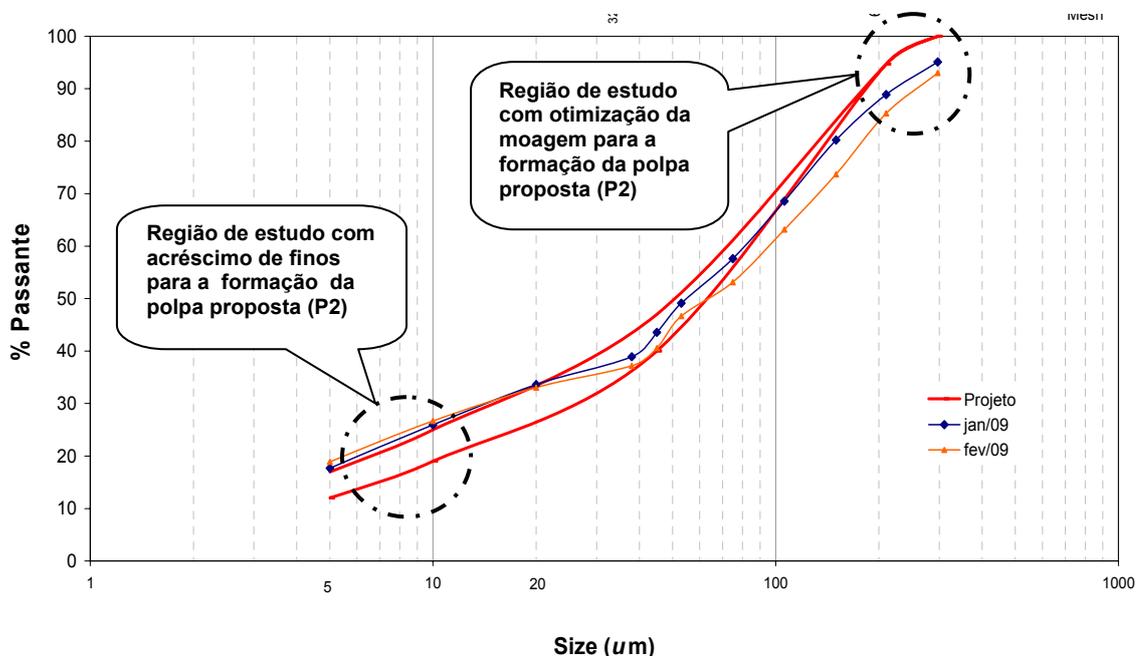


Figura 1.1 – Curvas granulométricas da operação atual (P1) e projeto (P0)

Desta maneira os objetivos específicos do trabalho constituíram-se em:

- Obtenção de uma polpa proposta (P2) com 26,50 % passante em 10 micrômetros e 96,95% passante em 0,30 mm (48# Tyler);
- Comparação desta polpa com as polpas do projeto (P0) e operação atual (P1) quanto as propriedades da viscosidade e fatores de atrito, de modo a confirmar a viabilidade técnica, operacional e comercial da polpa proposta (P2).

A polpa proposta incorpora um percentual maior de finos (< 10 microns) em relação as demais polpas e um acréscimo da fração passante em 0,30 mm (48# Tyler) em relação a polpa da operação atual.

Os benefícios possibilitarão ganhos de recuperação com a incorporação desta parcela de finos, a qual atualmente é descartada para a bacia de rejeitos e minimização do desgaste da tubulação do mineroduto com redução desta fração de 0,30 mm (48#).

Este trabalho visa também a determinação experimental de modelos reológicos de polpas de bauxita, através de análises para a determinação dos parâmetros como a viscosidade, a tensão de cisalhamento e as propriedades de tixotropia e reopexia.

Na seqüencia dos trabalhos realizou-se o modelamento matemático teórico das equações de atrito para as aplicações envolvendo estas polpas de bauxita, utilizando-se as equações de transporte, as quais foram solucionadas via metodologias adequadas.

Os testes com estas três polpas de bauxita, de granulometrias diferentes, foram realizados a concentrações pré-determinadas, de modo a determinar os modelos reológicos cujos parâmetros apresentaram os melhores coeficientes de correlação (R^2), sendo que os melhores ajustes encontrados foram segundo o modelo de Herschel-Bulkley.

Os fatores de atrito foram obtidos por formulações as quais envolvem uma relação logarítmica, utilizando-se da Lei da Parede como método de obtenção das expressões aplicáveis a estes fluidos não-Newtonianos viscoplásticos.

Finalizando, através de simulações computacionais, os resultados dos fatores de atrito são comparados a fatores de atrito calculados pelas correlações de Dodge e Metzner (1959).

CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BAUXITA

Segundo Dana-Hurlbut (1976), bauxita é uma mistura de óxidos de alumínio hidratados de composição indefinida. Algumas bauxitas têm composição que se aproxima de perto à gibbsita, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, mas em sua maioria são uma mistura, contendo ferro, usualmente. Como resultado disso, a bauxita não tem sido considerada como uma espécie mineral e, em uma classificação rígida, o nome bauxita deveria ser usado, somente, como um nome de rocha (bauxito).

Os seus constituintes principais são: a gibbsita; a bohemita, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e o diásporo, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, qualquer deles podendo ser o dominante. Cliachita é o nome proposto para o constituinte amorfo e de granulação muito fina do bauxito. Cristalograficamente considera-se uma mistura, pisolítica, em concreções granulares arredondadas; maciça, terrosa, semelhante à argila.

Quanto as suas propriedades físicas tem-se: a dureza (escala Mohs) variando de 1 a 3; a densidade entre 2 e 2,55; o brilho vai de opaco a terroso; a cor podendo ser branca, cinza, amarela e vermelha; translúcida.

A bauxita foi descoberta em 1821 por Berthier, na localidade de Les Baux, no sul da França. É uma rocha de origem laterítica, resultante da ação do intemperismo sobre rochas aluminosas, em clima tropical ou subtropical, ocorrendo a lixiviação da sílica e concentração de resíduos ricos em óxidos de alumínio e outros compostos. Apresenta coloração avermelhada, rica em alumínio, com mais de 40% de alumina (Al_2O_3) total. A presença de óxido de ferro determina a coloração da rocha, assim a bauxita branca contém de 2% a 4% de Fe_2O_3 e bauxita vermelha atinge até 25% de óxido de ferro.

De modo geral, na bauxita, o alumínio que é passível de extração pode estar presente principalmente como $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (gibbsita) e/ou $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (bohemita ou diásporo); onde os demais constituintes podem ser: Fe_2O_3 (hematita); $\text{FeO}(\text{OH})$ (goethita ou limonita); SiO_2 (quartzo); TiO_2 (anatásio) e principalmente $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (caulinita) (MINA DE BAUXITA PARAGOMINAS, 2009).

Nota-se que a caulinita contém alumínio em sua estrutura e a sílica (SiO_2) presente na caulinita corresponde à sílica reativa, sendo um “deletério” no processo de refino da alumina.

As bauxitas brasileiras são gibbsíticas (tri-hidrato). São muito raras ocorrências de boehmita ou diásporo. A classificação da bauxita, em termos de

aproveitamento industrial, está baseada no seu conteúdo de óxido de ferro (Fe_2O_3) e Al_2O_3 total, sendo:

- a) Bauxita Metalúrgica, com Fe_2O_3 variando entre 6 e 27%, com SiO_2 Reativa variando entre 1,0 a 5,0% e Al_2O_3 Aproveitável variando entre 35 a 54%.
- b) Bauxita não Metalúrgica, com Fe_2O_3 variando abaixo de 2,5%, com SiO_2 Reativa variando entre 5 e 7% e Al_2O_3 Total acima de 50%.

Além da sua utilização na obtenção do óxido de alumínio, as outras aplicações de destaque são: Refratários; Abrasivos; Produtos químicos; Cimentos de alta alumina e Próteses humanas (SAMPAIO, 2005).

Em termos de produção mundial, reserva lavrável e reserva total, o Brasil juntamente com a Austrália, China, Guiné e Jamaica, ocupam posição de destaque.

2.2 NATUREZA DOS DEPÓSITOS DE BAUXITA DE PARAGOMINAS

A origem das bauxitas pode ser considerada sob dois pontos de vista: físico-químico e pedológico. Na primeira consideração são envolvidos processos de intemperismo físico e químico e dissolução de minerais pré-existentes e neoformação de novos minerais e/ou fases amorfas, envolvendo interações entre clima, cobertura vegetal, condições de Eh-pH (potencial eletroquímico-potencial hidrogeniônico), hidrólise e oxidação-redução.

Este intemperismo deu-se sobre tipos de rochas formadas por aluminossilicatos, sob condições de clima quente e úmido, associado às oscilações do lençol freático e atividades biológicas em terrenos estáveis condicionados a suaves movimentos epirogenéticos. Envolve complexas interações entre rocha fonte, ambiente físico-químico e intemperismo, controlado pelo clima, cobertura vegetal, condições de Eh-pH.

Do ponto de vista pedológico, considera-se bauxita uma espécie de solo enriquecido, principalmente, com alumínio e ferro. Assim sendo, sua origem e evolução seguem o processo de formação de solo. (MINA DE BAUXITA PARAGOMINAS, 2009).

São responsáveis para a formação da bauxita na região em estudo os seguintes fatores:

- Geológicos: Estabilidade geológica;
- Petrográficos: Rocha aluminosa e porosa, barreiras;
- Climáticos: Clima tropical, precipitações abundantes;
- Morfológicos: Profundidade do lençol freático e superfícies antigas (platôs).

2.3 PERFIL DOS DEPÓSITOS DE BAUXITA DE PARAGOMINAS

O perfil laterítico típico (Tabela 2.1 e Figura 2.1), nos platôs em estudo (Miltônia 3 e Miltônia 5) é representado por: CAP (capeamento argiloso, denominado de Argila de Belterra); BN (bauxita nodular pisolítica e/ou concreção); BNC (bauxita nodular cristalizada); LF (laterita ferruginosa e/ou laterita ferruginosa gibbsítica); BC (bauxita cristalizada); BCBA (bauxita cristalizada associada à bauxita micro e/ou criptocristalizada porcelanado); BA (bauxita associada a argila variegada, com diversas cores contrastantes) e ARV (argila variegada com ou sem fragmentos bauxíticos). Os perfis estudados em trincheiras, poços e testemunhos de sondagem sugerem a existência de dois horizontes bauxíticos (BN e BC) de origens e evoluções diferentes, com as características apresentadas a seguir.

Tabela 2.1 – Perfil Laterítico Típico de Miltônia 3 e Miltônia 5

	Camada	Espessura em metros		Classificação
		Média	Faixa	
CAP	Argila de Capeamento	11,0	0 - 17	Estéril
BN	Bauxita Nodular	1,3	0,3 - 2,1	Minério Marginal
LF	Laterita Ferruginosa	0,9	0 - 2,1	Estéril
BC	Bauxita Cristalizada	1,5	0,5 - 4,5	Minério
BCBA	Bauxita Cristalizada/Amorfa	1,0	0,5 - 2,5	Minério Marginal
BA	Bauxita Amorfa	0,3	-	Estéril
ARV	Argila Variegada	-	-	Piso do depósito

(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

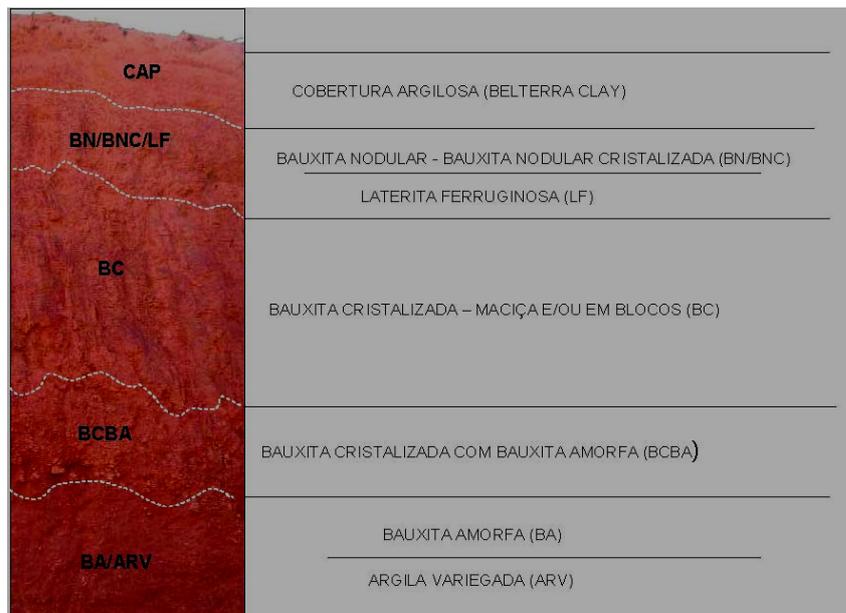


Figura 2.1 - Perfil laterítico típico de Miltônia 3 e Miltônia 5
(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

2.3.1 Capeamento Argiloso (CAP)

As Figuras 2.2 e 2.3 mostram o capeamento argilo-arenoso gibbsítico (CAP), de coloração mais clara que as camadas LF, BC e BN, sendo relativamente homogêneo, denominado Argila de Belterra. As espessuras são menores nas bordas e pode atingir até 20 metros nas porções centrais dos platôs.

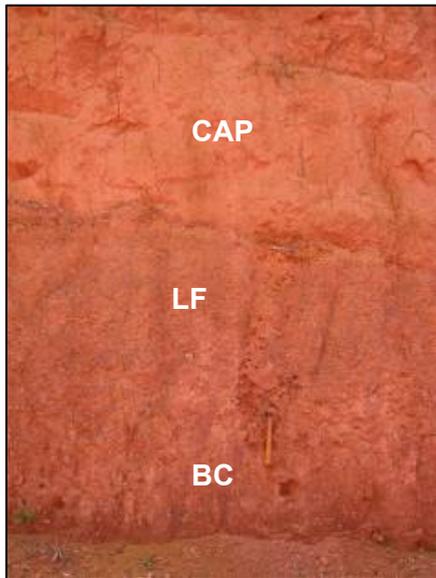


FIGURA 2.2 – Relação de contato discordante da LF com o Capeamento Argiloso (CAP) e concordante com BC

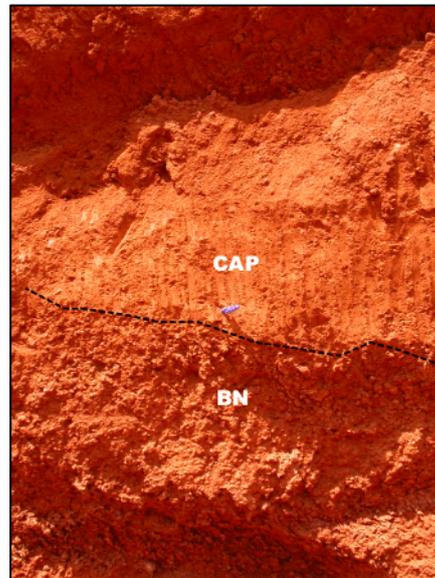


FIGURA 2.3 – Relação de contato concordante entre o Capeamento Argiloso (CAP) e horizonte das BN

(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

2.3.2 Bauxita Nodular (BN)

Conforme ilustrado pelas Figuras 2.4 e 2.5 vê-se que esta litologia é constituída por um horizonte caracterizado por variações faciológicas, representado por três fácies (aspectos característicos) de bauxita nodular: pisolítica, concreção e cristalizada. Os nódulos milimétricos a centimétricos, encontram-se distribuídos de maneira granocrescente no sentido da base e constituem corpos bastante descontínuos, formando lentes com diferentes tamanhos e composições. A espessura do horizonte das BN, quando ocorre, pode atingir até, aproximadamente, 2,0 metros, estando ou não presente os três fácies (aspectos característicos).

A característica é sempre nodular, jamais maciça ou estratificada. Os nódulos podem ser homogêneos (apenas bauxita) ou na forma de concreção (pisolitos ferruginosos com cimento bauxítico). Estes nódulos podem, também, ocorrer associados a pisolitos ferruginosos soltos.



FIGURA 2.4 - Associação de nódulos de BN (concreção e cristalizada) com tamanhos de até ± 30 cm.



FIGURA 2.5 - Testemunho de sondagem, relação de contato discordante entre o horizonte da BN e "LF" subjacente.

(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

2.3.3 Laterita Ferruginosa (LF)

Conforme ilustrado pelas Figuras 2.6 e 2.7 vê-se as características deste horizonte e os seus principais tipos. Predominantemente é pseudopisolítica a pseudo-nodular, normalmente concreção na porção basal, granocrescente e teor crescente em gibbsita no sentido da base. Nódulos podem se apresentar com superfícies polidas tipo "porcelanada". As espessuras oscilam desde frações ou ausentes, e até 2.0 m, aproximadamente, na porção sul dos platôs.

Na base, em regra, os nódulos ferruginosos parcialmente desferrificados encontram-se cimentados por material bauxítico. A razão entre nódulos e cimento bauxítico diminui com a profundidade, transformando-se em bauxita cristalizada ferruginosa com nódulos esparsos preservados no topo.



FIGURA 2.6- Interfácies entre a LF e a BC. Nódulos e/ou fragmentos ferruginosos parcialmente desferrificados, cimentado com material bauxítico poligenético, cristalizado e microcristalizado.



FIGURA 2.7 - Diversos tipos de LF apresentando diferentes graus de contaminação por bauxita.

(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

2.3.4 Bauxita Cristalizada (BC)

A Figura 2.8, mostra a bauxita cristalizada em blocos e/ou maciça, sendo que, tanto na forma maciça como em blocos está associada à matriz argilosa na proporção, em média, de 25 a 30% desta. O topo, em regra, é ferruginoso devido ao interfácies transicional (transição entre *fácies*) entre a BC e a LF sobrejacente. O teor de ferro decresce no sentido da base. A transição para o *fácies* subjacente (BCBA) é representada por uma zona de transição muito irregular com superfície não definida e muito sinuosa. A espessura média é em torno de 1,50 a 2,00 metros.

Este é o depósito mineral propriamente dito a ser explorado para a produção de bauxita.

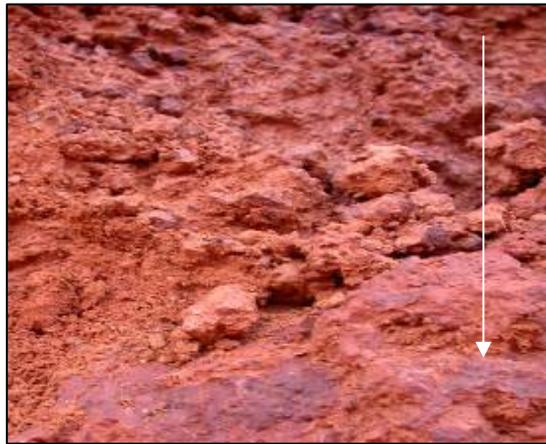


Figura 2.8 - Zona de transição (interfácies) entre a laterita ferruginosa (LF) e a bauxita cristalizada (BC).

(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

2.3.5 Bauxita Cristalizada com Bauxita Amorfa (BCBA)

As Figuras 2.9, 2.10 e 2.11, mostram a bauxita cristalizada associada ou não à bauxita porcelanada (micro e/ou criptocristalizada) cinza claro a marrom claro, predominando esta ou aquela. Normalmente preserva em maior ou menor escala, dependendo do estágio evolutivo, características texturais do protominério sedimentar. O contato com a litologia subjacente (BA), também, é gradacional. O interfácies utilizado na separação das duas litologias é caracterizado pelo aumento excessivo de matriz argilosa com aparecimento de indícios de caulinição (argila variegada). A espessura média fica em torno de 1,0 m em Miltônia 3 e 0,50 m em Miltônia 5.

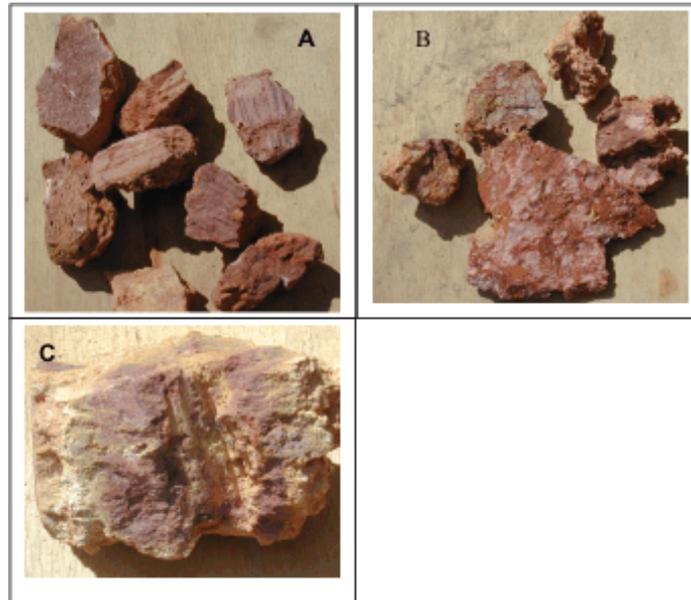


Figura 2.9 - Diferentes tipos de BCBA; (A) estratificadas diversas, (B) típica e (C) heterogênea.

(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)



Figura 2.10 – BCBA estratificada típica com porções de bauxita amorfa (BA) associada com argila creme.



Figura 2.11 – BCBA em blocos, idem anterior (estratificada amarela arroxeadada) com porções de BA em argila acastanhada.

(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

2.3.6 Bauxita Amorfa (BA)

Conforme demonstram as Figuras 2.12 e 2.13, esta bauxita representa o fácies caulinzado do perfil laterítico. O percentual mínimo de bauxita em relação a matriz argilosa, para ser considerada BA, fica em torno de 15% a 20%. Em percentuais inferiores a litologia recebe a denominação de argila variegada (ARV), contendo traços de bauxita e/ou rocha saprolitizada.



Figura 2.12 – BA – Nódulo em ARV



Figura 2.13 – BA em blocos alongados de diferentes tamanhos.

(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

2.3.7 Argila Variegada (ARV)

A Figura 2.14 mostra a argila variegada ou saprolito caulinizado, podendo ou não conter traços bauxíticos. Delimita a base do perfil laterítico.



Figura 2.14 – Argila variegada

(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

2.4 MINERALOGIA DA BAUXITA DE PARAGOMINAS

Segundo Kotschoubey *et al.* (2005), análises petrográficas e estudos de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-x, realizados nos horizontes do perfil laterítico, nos platôs da região, mostram a predominância dos seguintes minerais: gibbsita, hematita, caulinita, quartzo, goethita e minerais de titânio como elementos maiores e a presença de turmalina, zircão, micas pirofilita e ilmenita como elementos menores nos horizontes do perfil laterítico.

As bauxitas dos platôs miltônia 3 e 5 são formadas principalmente por gibbsita, hematita, caulinita, quartzo e goethita; não sendo identificada a presença de Bohemita nas amostras analisadas.

O fechamento estequiométrico das amostras de geologia apresenta-se na ordem de 98,53% e percentagem de água de cristalização em torno de 27,19% em amostras de BC e BCBA, demonstrando a predominância de gibbsita nestas amostras. Outros elementos foram identificados em análise de óxidos, porém com valores muito pequenos de 0,05%.

2.5 RESERVAS E PRINCIPAIS PRODUTORES DE BAUXITA

O Brasil possui a terceira maior reserva mundial do minério, 5,9 bilhões de toneladas, localizada na região amazônica, perdendo apenas para Austrália e Guiné.

As Figuras 2.15 e 2.16 ilustram os mapas das minas, refinarias e *smelters* do Brasil.

Além da Amazônia, a bauxita pode ser encontrada no sudeste do Brasil, na região de Poços de Caldas (MG) e Cataguases (MG). O Pará conta com reservas nos municípios de Oriximiná, Paragominas e Juruti. A bauxita é o minério mais importante para a produção de alumínio, contendo de 35% a 55% de óxido de alumínio.

A produção de bauxita e de alumina instalada no Brasil é da ordem de 26 milhões de toneladas/ano de bauxita e 8,6 milhões de toneladas/ano de alumina (Fonte: ABAL-Associação Brasileira do Alumínio, 2009).

Em ordem decrescente, tem-se: Austrália, Guiné, Brasil e Jamaica, com um total de 70% da produção mundial.

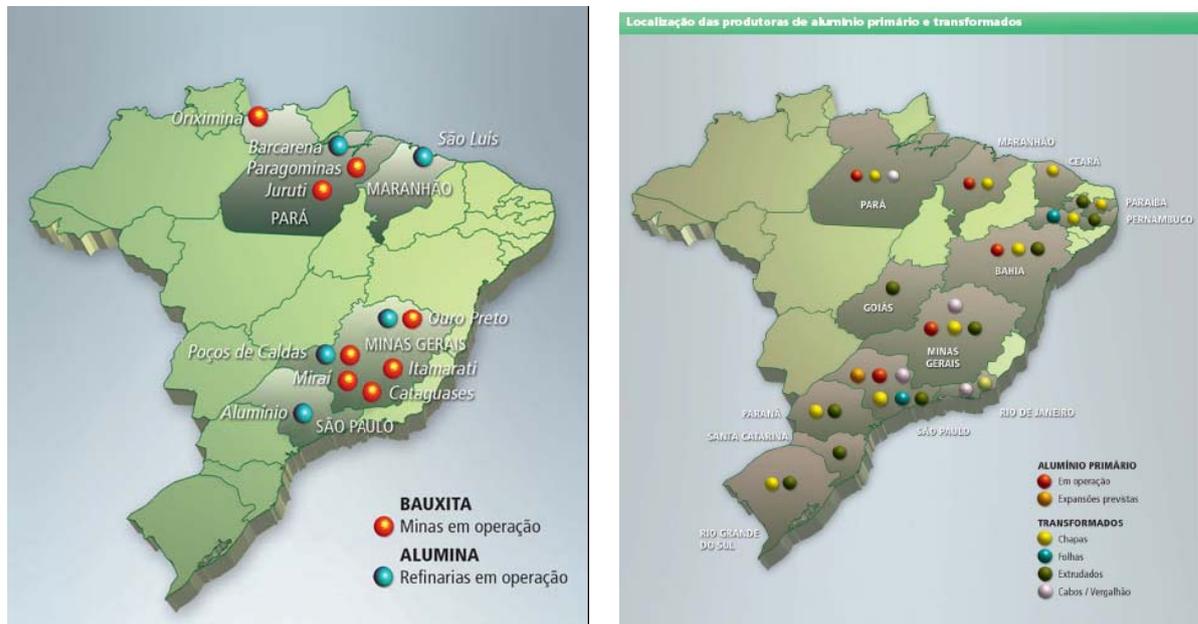
O Brasil possui uma das maiores reservas (no Pará na região de Trombetas, em Juruti e Paragominas e em Minas Gerais).

A produção brasileira de bauxita atingiu 26.074,4 mil toneladas em 2009, uma queda de 7,2% sobre o volume do ano anterior.

O consumo doméstico de bauxita para usos metálicos registrou crescimento de 8,6%, com um volume de 19.443 mil toneladas. Já as exportações do minério, registraram acentuada queda de 51,2%, atingindo o volume de 3.037,2 mil toneladas. Tiveram como principais destinos os Estados Unidos, o Canadá e a Irlanda.

A produção nacional de alumina foi de 8.625,1 mil toneladas em 2009, volume 10,3% superior ao de 2008. O consumo doméstico para usos metálicos foi de 2.880,6 mil toneladas, com queda de 10,1%.

Já as exportações apresentaram acentuado crescimento de 21,0%, atingindo um volume de 5.519,5 mil toneladas, e tiveram como principais destinos o Canadá, a Noruega e a Islândia. (Fonte: ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, 2009).



Figuras 2.15 e 2.16 - Mapas das Minas, Refinarias e Smelters
(Fonte: ABAL/2009)

A produção mundial de alumínio primário em 2009 foi de 36.359 mil toneladas, volume 7,4% inferior ao produzido em 2008, conforme dados do *World Metal Statistics*, publicação editada pelo *World Bureau of Metal Statistics*, detalhados na Tabela 2.2 a seguir. Neste total, a produção da China representou 35%. De acordo com a mesma fonte, reflexo da crise mundial, o consumo mundial apresentou queda de 4,3% em 2009. No total, foram consumidas 35 425 mil toneladas de alumínio primário, contra 37.020 mil toneladas em 2008.

A Tabela 2.2 traz detalhes da produção e do consumo discriminados por continente, conforme divulgado pela *The Aluminum Association Inc.*, em sua publicação *Aluminum Statistical Review* (Fonte: ABAL-Associação Brasileira do Alumínio, 2009).

Tabela 2.2 – Produção e consumo de alumínio primário

Unidade: 1.000 toneladas		
Áreas	2009	
	Produção	Consumo
África	1.551,40	713,9
América	7.267,40	6.115,90
Ásia	17.548,50	21.390,20
Europa	7.777,50	6.813,80
Oceania	2.214,00	390,8
Total	36.358,80	35.424,60

Fonte: ABAL, 2009

Em termos de capacidade produtiva (Tabela 2.3), Paragominas e Trombetas são as maiores minas brasileiras de bauxita:

Tabela 2.3 – Capacidade produtiva das maiores minas de bauxita do mundo

Mina	Localização	Capacidade (Mtpa)	Custo Cash (US\$/t)	Decapeamento	Beneficiamento ou Secagem	Logística	Operador
Huntly	Austrália	18,3	7,0			X	AWAC
Trombetas	Brasil	16,3	12,6	X	XX		MRN
Weipa	Austrália	14,5	11,4		X		Rio Tinto
Boké	Guiné	12,6	15,7		X		Halco
Boddington	Austrália	11,7	8,4			X	Worsley
Willowdale	Austrália	7,1	8,2			X	AWAC
Gove	Austrália	5,8	7,0				Alcan
Kiya-Shaltir	Rússia	5,2	9,6				UC Rusal
Paragominas	Brasil	9,9	20,0	X	X	X	CVRD
Los Pijiguaos	Venezuela	4,3	14,2		X	X	Bauxilum
Discovery Bay	Jamaica	4,1	7,0				St Ann

Fonte: ABAL-Associação Brasileira do Alumínio, 2009

2.6 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA BAUXITA

Mais de 90% do hidróxido de alumínio produzido no mundo usando o processo Bayer é convertido em alumina, sendo que a maior parte (cerca de 90%) da alumina é usada para a preparação de alumínio metálico. Os outros 10% são aplicados em diversos setores da indústria para a fabricação de materiais refratários, abrasivos, velas de ignição, cerâmicas e outros. O hidróxido de alumínio também tem aplicação direta nas indústrias de papel, tintas, vidros, produtos farmacêuticos, cremes dentais e retardantes de chamas, na manufatura de produtos químicos,

Com o objetivo de adequar a polpa de minério a ser bombeada pelo mineroduto em termos de granulometria e qualidade, a planta de beneficiamento possui um circuito de britagem, moagem, peneiramento, ciclonagem e espessamento.

O mineroduto possui 244 km de extensão, 24 polegadas de diâmetro e faz o bombeamento da polpa de minério com uma percentagem de sólidos de 50,5%, através de 6 bombas de deslocamento positivo (GEHO) com capacidade total de até 2.136 m³/h e pressão máxima de descarga de 13,7 MPa. Na Alunorte o desaguamento é realizado através de filtros hiperbáricos com o objetivo de reduzir a umidade da polpa de minério para 12%.

2.7.2 Operação de Mina

Conforme já descrito, as operações de mina, ilustradas na Figura 2.18, consistem basicamente do desmatamento, remoção e transporte do solo vegetal, decapeamento do estéril, escarificação, carregamento, transporte de minério e recomposição do relevo original, bem como as atividades de drenagem e infraestrutura de mina.

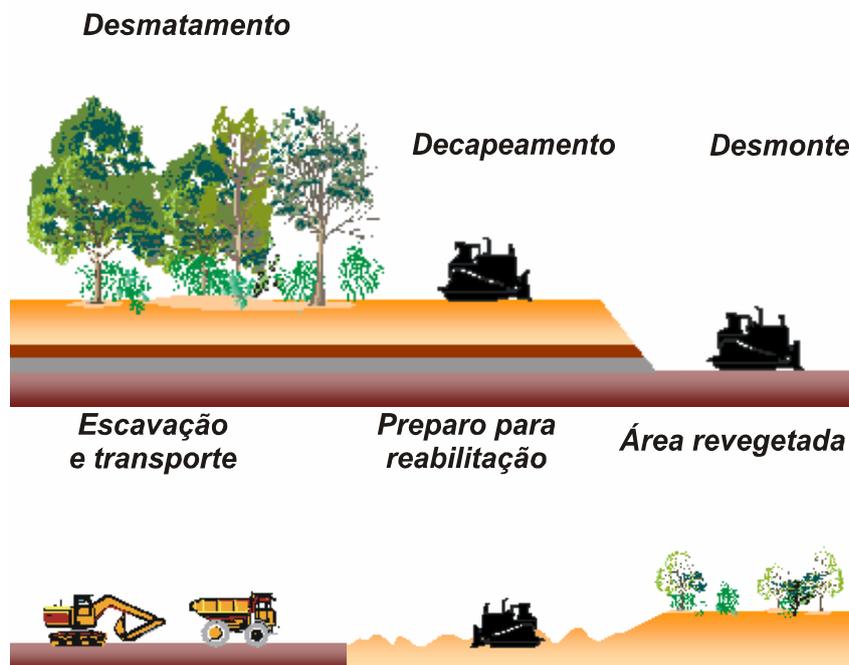


Figura 2.18 – Operações de mina

O método de lavra empregado, conforme demonstrado na Figura 2.19, é lavra em tiras (*“strip mining”*) onde são utilizados tratores de esteira (lâminas de 34 m³ e 44 m³), escavadeiras hidráulicas (caçambas de 15 m³ e 19 m³) e caminhões

fora de estrada (60 m^3) para remoção do estéril. Na lavra do minério utiliza-se também de escavadeiras hidráulicas só que de menor porte (5 m^3) em conjunto com caminhões rodoviários traçados 8x4 ($25 \text{ m}^3/37 \text{ t}$) e uma frota de equipamentos auxiliares visando manter o sistema de drenagem, acessos e desenvolvimento de mina.

A largura das tiras atual varia de 20 a 30 metros dependendo da espessura do decapeamento. Os blocos de lavra têm 200 m de extensão, distância entre os acessos de 400 m e largura dos acessos de 20 metros.

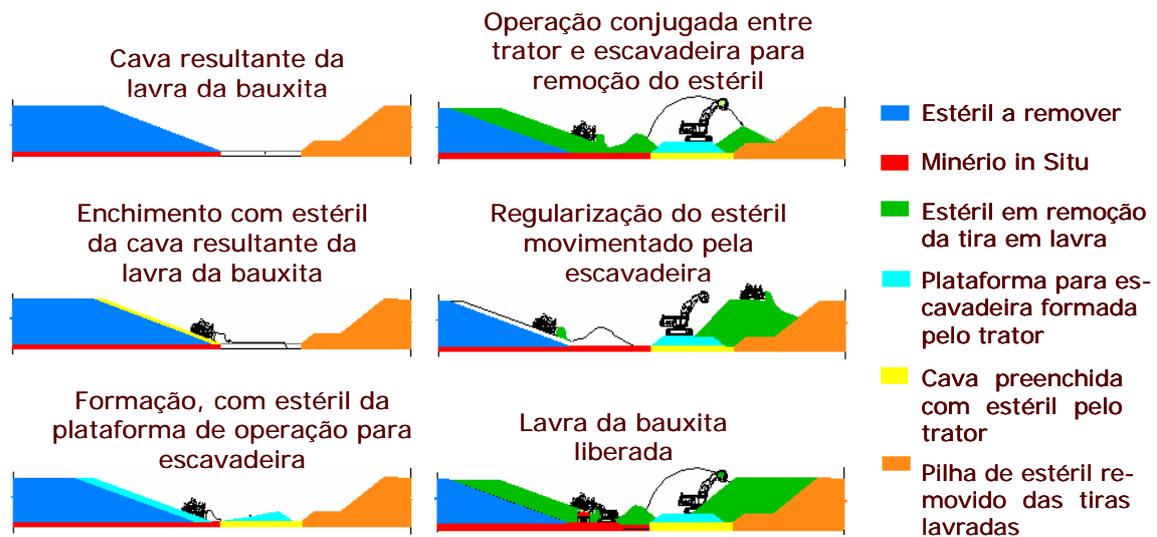


Figura 2.19 - Método de lavra em tiras

2.7.3 Operação de Usina

O processo de beneficiamento da bauxita é realizado a úmido e tem como objetivo principal promover a lavagem da bauxita para retirada de frações argilosas, aumentando o teor de alumina (Al_2O_3) aproveitável e reduzindo o teor de sílica (SiO_2) reativa, além de promover a redução e adequação da granulometria do produto para o seu transporte via mineroduto.

A Figura 2.20 mostra o fluxograma de processo da planta industrial de beneficiamento, constituída por circuitos de britagem, pátio de homogeneização, transportadores de correia, silos, moagens primária e secundária, peneiramento, ciclonagem e espessamento. Compõe-se de duas linhas paralelas de circuitos iguais, as quais processam um total de 1.900 toneladas por hora de minério. Cada linha possui um moinho semi-autógeno (SAG), rebritadores e um moinho de bolas. O processo industrial compreende cinco estágios, como segue:

- ✓ Britagem e estocagem em pilhas;
- ✓ Moagem primária e deslamagem;
- ✓ Moagem secundária;
- ✓ Desaguamento e peneiramento final;
- ✓ Recuperação de água de processo e disposição de rejeitos.

Uma combinação de hidrociclones e espessadores é usada para recuperar a água visando o seu reaproveitamento na usina. Os rejeitos são bombeados para as bacias de rejeitos, onde áreas de secagem natural são cercadas por diques de terra, de modo a construir-se em camadas que parcialmente preenchem o vale adjacente à usina.

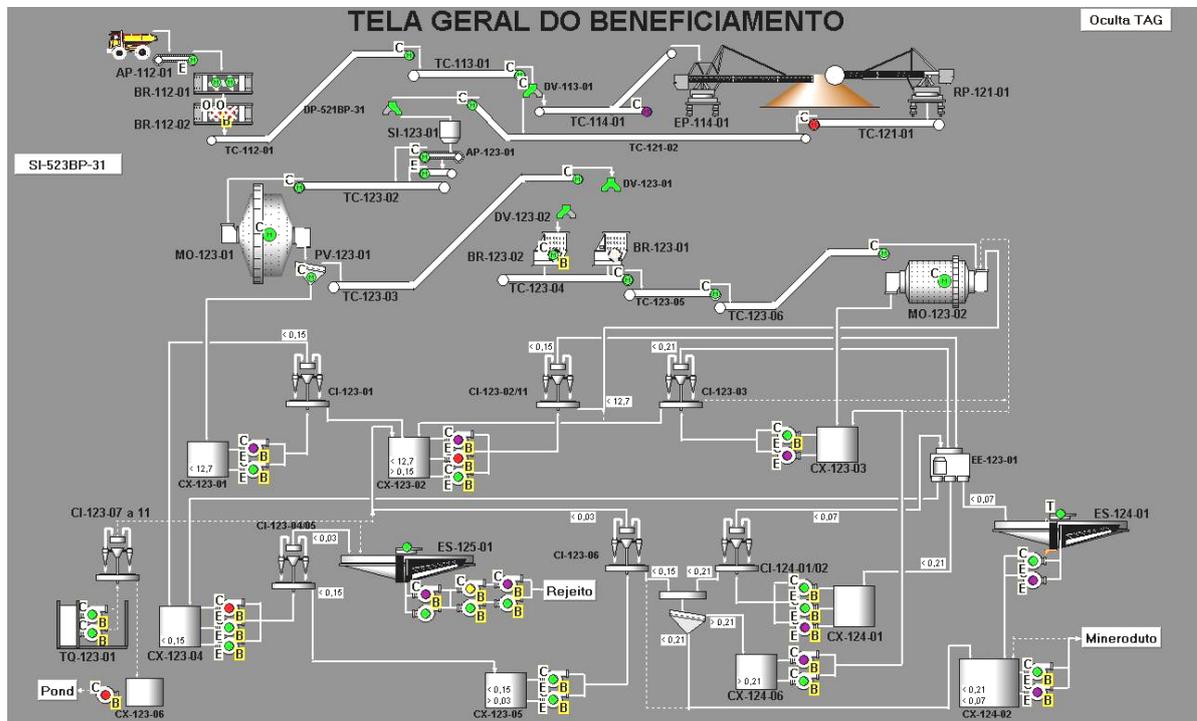


Figura 2.20 - Fluxograma de processo da Mina de Bauxita Paraquominas

As operações envolvidas iniciando pelo abastecimento de minério na moega da britagem, com o tráfego dos caminhões e equipamentos de apoio, seguindo pelas operações unitárias indicadas no fluxograma, são comandadas, de forma centralizada e totalmente automatizada, por uma sala de controle (Figura 2.21) operada por técnicos especializados.

O sistema de automação, controle e supervisão, composto por ferramentas de *hardware* e *software*, propicia recursos amplos para uma operação e supervisão do processo de modo simples, versátil, eficiente e seguro.



Figura 2.21 – Operação da usina via sala de controle
(Fonte: Autor, 2011)

A Figura 2.22 apresenta os circuitos de moagem primária e secundária, respectivamente formados por moinhos SAG (“*semi-autogenous grinding*”), os quais realizam a primeira quebra dos grãos visando a desagregação das frações argilosas do minério, e moinhos tubulares de bolas onde ocorre a segunda quebra dos grãos visando a obtenção da especificação granulométrica do produto final.



Figura 2.22 - Circuito de moagem
(Fonte: Autor, 2011)

2.7.4 Mineroduto

O Mineroduto de Bauxita de Paragominas foi implantado como nova alternativa logística para escoamento da produção de bauxita com objetivo de suprir a expansão da refinaria Alunorte. Para que esse objetivo seja atingido faz-se necessário a implementação de um planejamento que garanta a operacionalidade e a integridade deste sistema, ilustrado, pelas Figuras 2.23 a 2.30 a seguir, envolvendo desde a área de estocagem, estações de bombeamento, tubulação do mineroduto, estação de desaguamento de Barcarena (EDB) e filtragem na Alunorte.

A capacidade instalada atual do sistema é 9,9 Mtpa (milhões de tonelada de bauxita por ano), mas a partir de Dezembro/2013 terá a sua capacidade elevada para 14,85 Mtpa, sendo viabilizada com a implantação de uma estação intermediária de bombeamento (*booster*) composta de tanques de polpas e 06 bombas de deslocamento positivo, em fase de montagem atualmente.

A tubulação do mineroduto inicia-se em Miltônia 3, na cota 120, com um comprimento de 244 km, indo até Barcarena, na cota 30. Esta tubulação de aço API-5L-X70, de diâmetro externo de 24 polegadas, encontra-se enterrada a uma profundidade média de 1,50 m, atravessando 07 municípios (Paragominas, Ipixuna do Pará, Tomé-Açu, Acará, Moju, Abaetetuba e Barcarena) e passando sob a calha de 04 rios (Capim, Acará-Mirim, Acará e Moju).

A Figura 2.29 mostra o fluxograma de processo da estação de desaguamento de Barcarena (EDB), composta de três tanques de polpa, um clarificador (espassador) e sistemas de bomba projetados para receber a polpa e em seguida fazer a transferência deste produto a unidade de filtragem da Alunorte, Figura 2.30, constituída basicamente por um sistema de treze filtros rotativos hiperbáricos que descarregam a bauxita filtrada, com um teor de umidade entre 13 e 14%, em uma correia transportadora e a partir daí é enviada ao processo de refino.

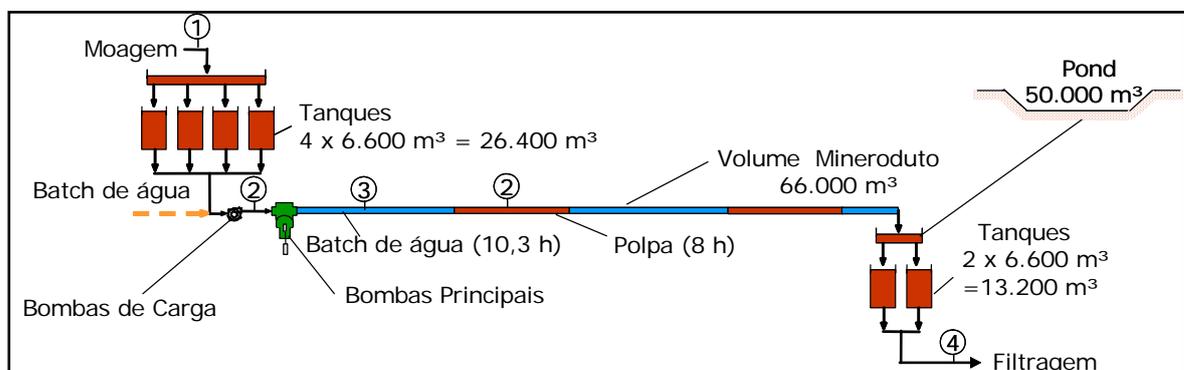


Figura 2.23 – Sistema do mineroduto
(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

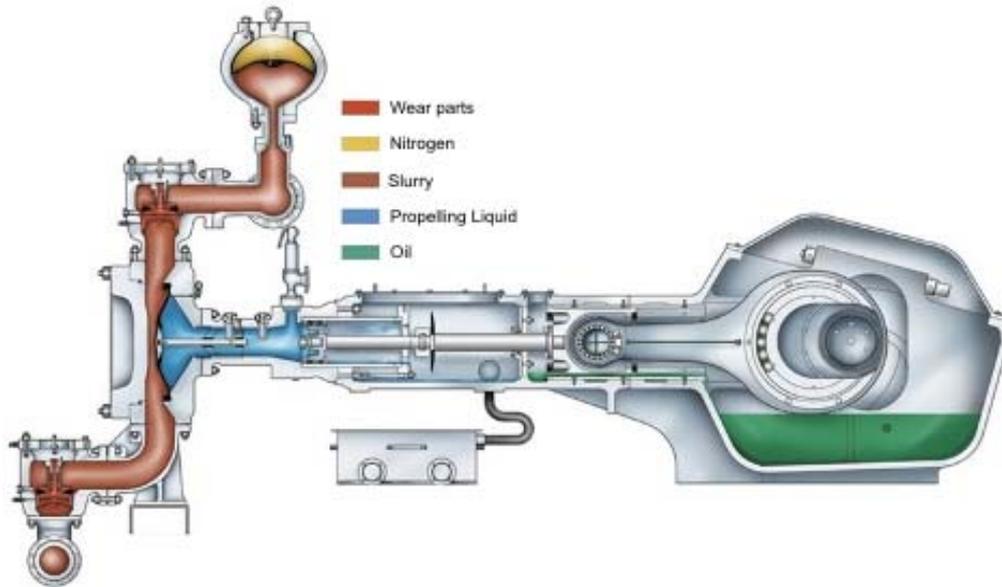


Figura 2.24 – Esquema de uma bomba de deslocamento positivo
(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)



Figura 2.25 - Bombas de carga
(Fonte: Autor, 2011)



Figura 2.26 - Bombas principais de deslocamento positivo
(Fonte: Autor, 2011)

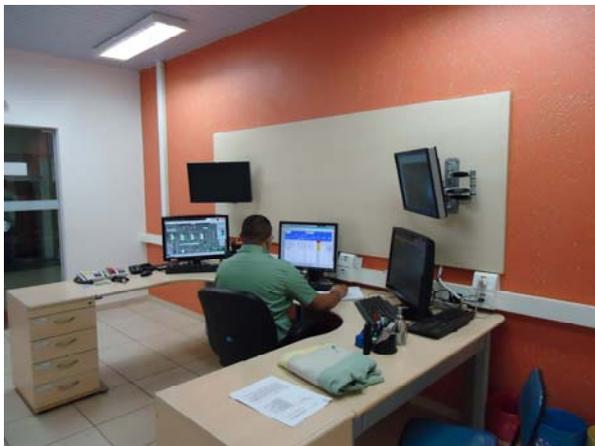


Figura 2.27 – Sala de controle do mineroduto
(Fonte: Autor, 2011)



Figura 2.28- Marco zero do mineroduto
(Fonte: Autor, 2011)

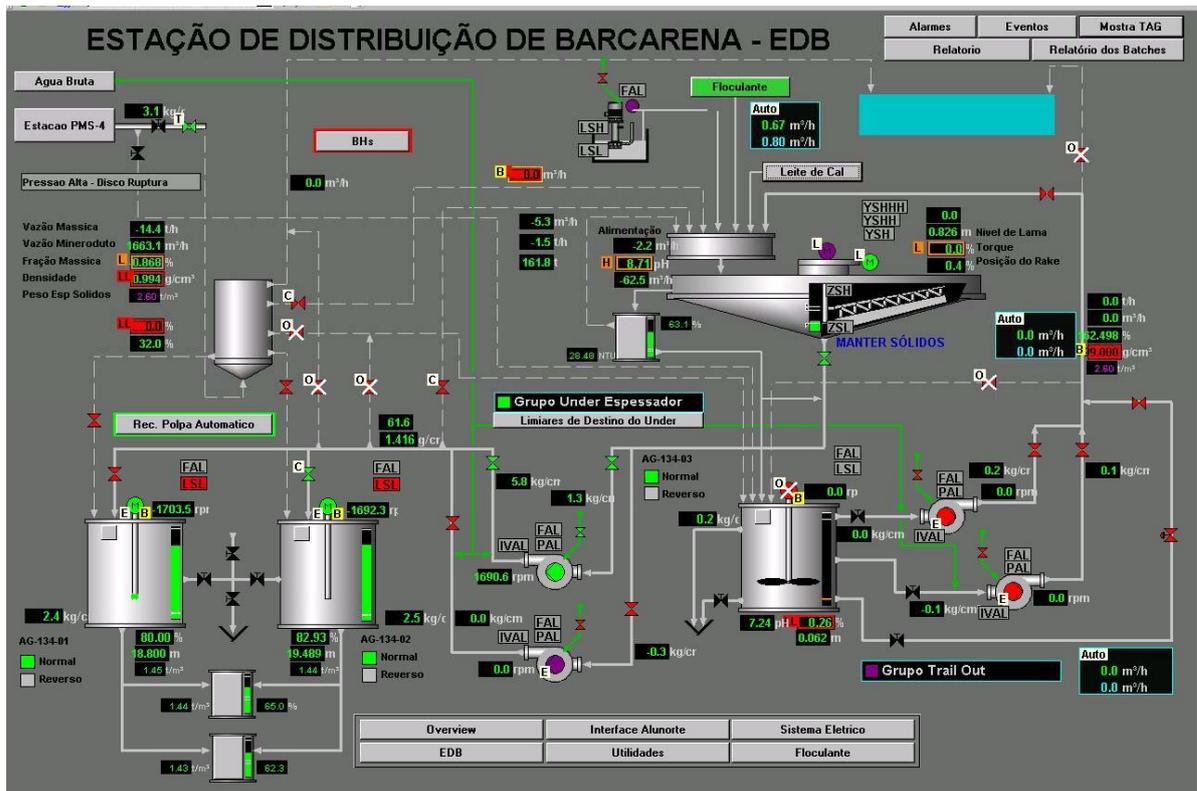


Figura 2.29 – Fluxograma de processo da estação de desaguamento em Barcarena (EDB)
(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

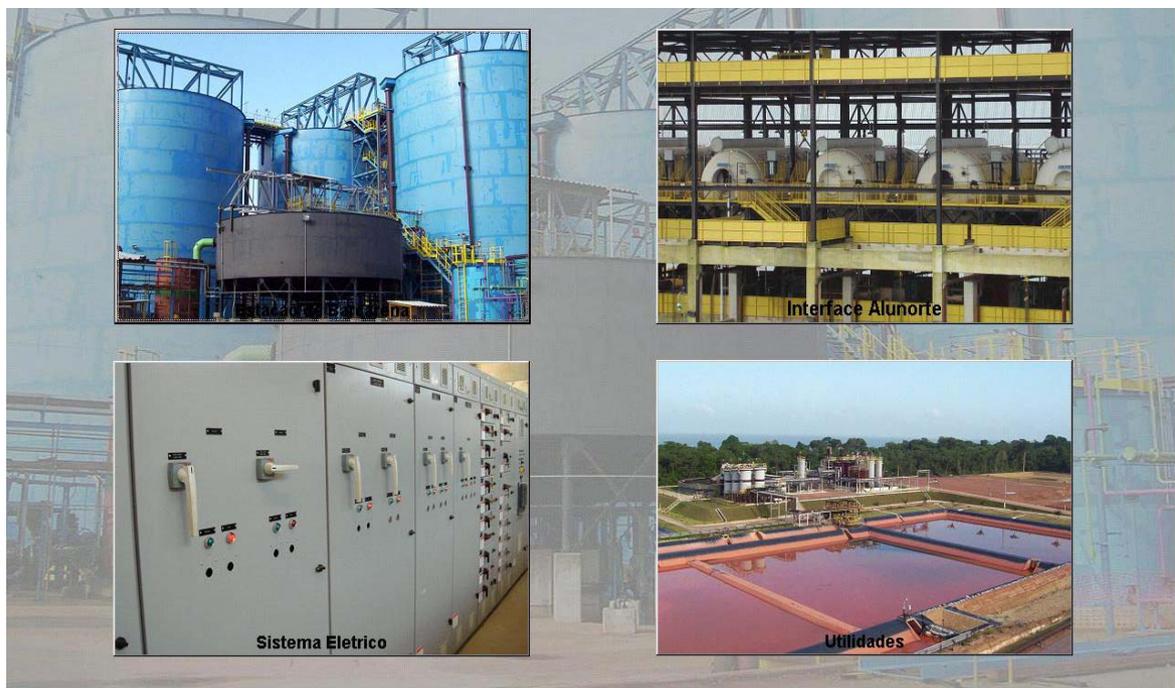


Figura 2.30 – Estação de desaguamento (EDB) e filtragem na Alunorte
(Fonte: Mina de Bauxita Paragominas, 2009)

A realização de programas para o tratamento de inibição da corrosão interna e externa, programas de limpeza e inspeção do mineroduto com utilização de PIG^s (Pipeline Inspection Gauge), programas de manutenção e inspeções preventivas dos equipamentos mecânicos (agitadores, bombas de polpa e água) e também sistemas elétricos e de instrumentação são fundamentais para a confiabilidade e garantia do escoamento da produção através do mineroduto (GANDHI, 2008).

2.8 REOLOGIA

2.8.1 Reologia e Viscosimetria

Define-se reologia (MACHADO, 2002) como sendo a ciência que estuda a deformação e o escoamento de materiais submetidos a tensões, sob determinadas condições termodinâmicas ao longo de um intervalo de tempo, incluindo propriedades tais como: elasticidade, viscosidade e plasticidade.

A viscosidade de um fluido, polpa no caso do tratamento de minérios, é definida como sendo a propriedade que o mesmo apresenta em oferecer uma maior ou menor resistência à deformação, quando sujeita a esforços de escorregamento. O termo viscosidade pode ser entendido como “o atrito interno de um fluido” causado pela atração molecular, o qual provoca uma resistência ao escoamento (BARBATO, 2009).

A viscosimetria é um ramo da mecânica dos fluidos que consiste na prática experimental de medir a resposta reológica dos fluidos, considerados puramente viscosos, onde a componente elástica possa ser desprezada. Consiste portanto na medida de grandezas físicas, tais como velocidade angular, torque, ângulo de deflexão, tempo, etc. O objetivo é que estas grandezas possam ser transformados em unidades de tensão e de taxa de cisalhamento. A partir daí chega-se a viscosidade, através de equações deduzidas a partir de princípios e leis da mecânica clássica (MACHADO, 2002; NASCIMENTO, 2008).

2.8.2 Modelos Reológicos

2.8.2.1 Fluidos Inelásticos

A maioria dos fluidos com aplicação na indústria apresenta comportamento de fluidos independentes do tempo ou puramente viscosos. O modelo mais simples é do fluido Newtoniano em que a tensão de cisalhamento (τ) é diretamente

proporcional à taxa de deformação ($\dot{\gamma}$). A constante de proporcionalidade (μ) é a viscosidade do fluido. A sua equação constitutiva é representada por:

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

Este tipo de comportamento é observado com o ar, água, óleos, alcoóis, dentre outros.

Os demais modelos, com uma certa complexidade, representam os fluidos não-Newtonianos onde a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional a taxa de deformação. A sua equação constitutiva é representada por:

$$\tau = \mu_a \cdot \dot{\gamma}; \quad (2.2)$$

onde μ_a é a sua viscosidade aparente (BIRD, 1960).

A natureza desta relação é o critério utilizado para a classificação dos diversos tipos de fluidos.

Existe um grande número de fluidos não-Newtonianos com bastante relevância. Podemos citar, por exemplo, os fluidos de comportamento da lei de potência (Power-Law), para uma ampla faixa de taxas de cisalhamento, destacando-se as dispersões de polímeros e emulsões. (MACHADO, 2002; ROCHA, 2010; BARNES, 1977)

O modelo “power-law” (Ostwald, 1925) é representado pela equação

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.3)$$

Onde **K** e **n** são parâmetros do fluido, denominados índice de consistência e índice de comportamento de fluxo, respectivamente.

No caso de fluidos não-Newtonianos, com presença de tensão limite de escoamento (τ_c), os principais modelos são da forma:

$$\tau = \tau_c + f(\dot{\gamma}) \quad (2.4)$$

Alguns exemplos importantes são:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_c + \eta_B \cdot \dot{\gamma} && (\text{Bingham e Green} - 1920) \\ \tau &= \tau_c + K \dot{\gamma}^n && (\text{Herschel} - \text{Bulkley} - 1926) \\ \sqrt{\tau} &= \sqrt{\tau_c} + \sqrt{K \dot{\gamma}} && (\text{Casson} - 1959) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Em cada caso, os parâmetros τ_c , n , η_B e K são diferentes e devem ser determinados experimentalmente. Esses modelos são aplicáveis a fluidos como lamas hiperconcentradas, polpas de minério, concretos frescos e tintas. Estes fluidos necessitam de uma tensão finita, conhecida como tensão limite de escoamento, para que ocorra o movimento das partículas (BAILEY, 1998).

Esse comportamento é característico de suspensões pseudo-homogêneas de partículas finas ou ultrafinas. Segundo Nguyen e Boger (1992), o valor da tensão limite 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.

As Figuras 2.31, 2.32 e Tabela 2.4 ilustram as curvas de fluxo (reogramas) e os principais modelos encontrados na literatura (Machado, 2002; Maxey, 2007).

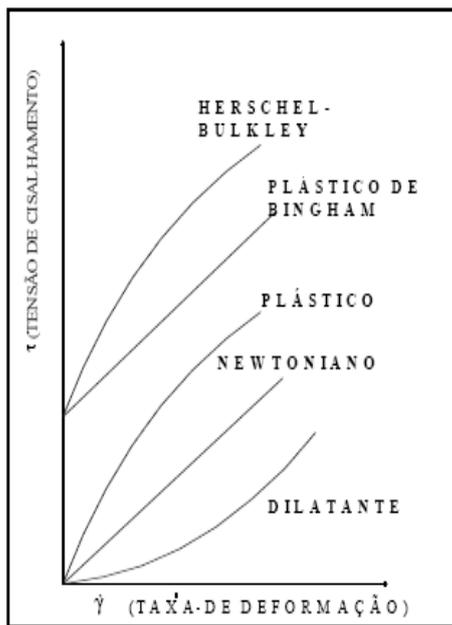


Figura 2.31 - Reogramas de diferentes tipos de fluidos

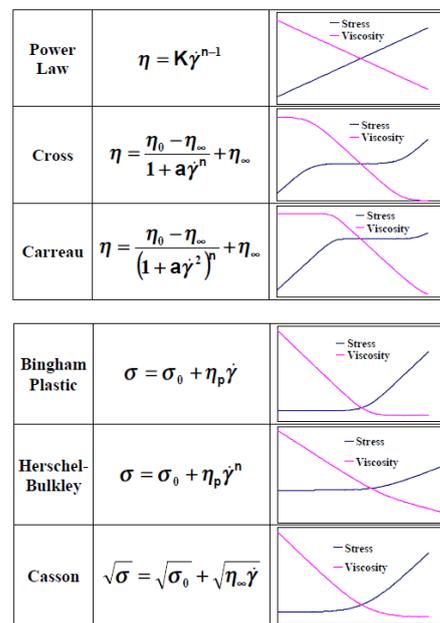


Figura 2.32 – Principais modelos encontrados na literatura

TABELA 2.4 - Equações, parâmetros reológicos e exemplos de fluidos não-Newtonianos

Modelo	Equação	nde*	Parâmetros	Exemplos
Bingham	$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_L$	02	viscosidade plástica e limite de escoamento	dispersões coloidais concentradas
Ostwald	$\tau = K \dot{\gamma}^n$	02	índice de consistência e índice de fluxo	dispersões de polímeros e emulsões
Herschell-Buckley	$\tau = K \dot{\gamma}^n + \tau_0$	03	$K; n; \tau_0$	dispersões de polímeros e/ou argilas
Robertson-Stiff	$\tau = a(\dot{\gamma} + \dot{\gamma}_0)^b$	03	$a; b; \dot{\gamma}_0$	
Casson	$\tau^{1/2} = (\mu_\infty \dot{\gamma})^{1/2} + \tau_0^{1/2}$	02	$\mu_\infty; \tau_0$	dispersões coloidais

*nde = número mínimo de determinações experimentais

Para fluidos com comportamento reológico dependente do tempo é possível a observação do chamado fenômeno da histerese, conforme Figura 2.33, mostrando as curvas de fluxo (A) e de viscosidade (B), ascendentes (I) e descendentes (II) em relação a taxa de cisalhamento. Neste caso demonstra a tixotropia de um fluido não-Newtoniano pseudoplástico (SCHRAMM, 2006).

. Este implica que a viscosidade dos sistemas sujeitos a uma força por um tempo t não é a mesma quando medida no mesmo tempo t depois de interrompida a perturbação (BARNES, 1977; ROCHA, 2010). Estes fluidos, constituídos por suspensões onde os seus componentes possuem uma elevada anisotropia, apresentam variação da viscosidade com o tempo quando são submetidas a taxas de cisalhamento constantes. Este fenômeno é conhecido como tixotropia, quando ocorrer queda da viscosidade com o tempo, ou reopexia, quando for observado o aumento da viscosidade com o tempo.

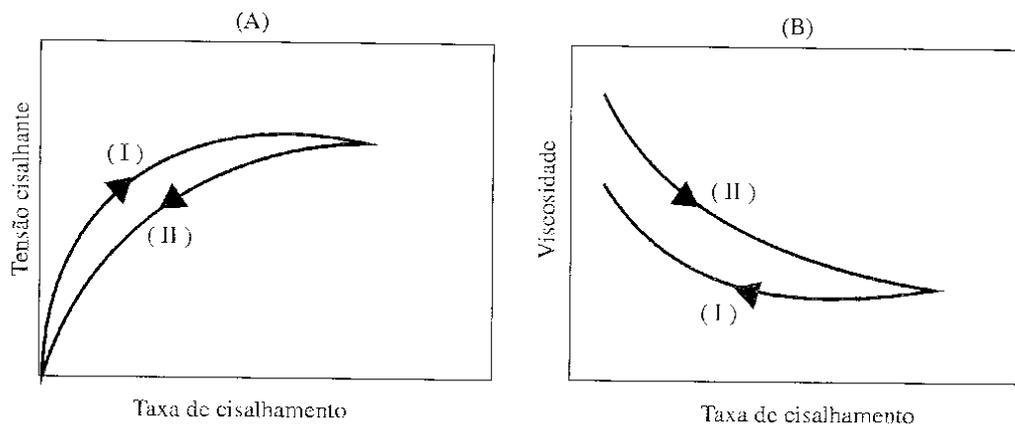


Figura 2.33 – Curvas de fluxo (A) e de viscosidade (B) – Exemplo de tixotropia

Existem casos em que a literatura usa erroneamente o termo “tixotrópico” no lugar de “pseudoplástico” (BARNES, 1977; ROCHA, 2010) na classificação dos materiais. A pseudoplasticidade e também a pseudoplasticidade com limite de escoamento é uma característica que significa a queda da viscosidade (*“shear-thinning”*), com o aumento da taxa de cisalhamento, mas sem ocorrer variação com o tempo.

2.8.2.2 Fluidos viscoelásticos e soluções poliméricas

A grande maioria dos fluidos apresenta um comportamento reológico que os classifica entre os líquidos e sólidos: eles são chamados de viscoelásticos. Deste modo, a viscosidade e a elasticidade são duas possibilidades de resposta à tensão a

que são submetidos. O comportamento sólido (distensão) ou líquido (fluxo) vai depender das características relacionadas ao tempo natural de relaxação e ao tempo de duração do experimento (SCHRAMM, 2006).

2.8.2.3 Reologia das Polpas Minerais

De um modo geral, as propriedades reológicas mais importantes no processamento de suspensões minerais são a viscosidade e tensão limite de escoamento.

Estas propriedades têm impacto direto no projeto de equipamentos, na eficiência e no consumo energético de diversas operações industriais, tais como a moagem de minérios a úmido e o transporte de polpa por mineroduto.

A viscosidade pode sofrer variações devido a vários fatores, sendo o que a mesma tende a diminuir com o aumento da temperatura e pode aumentar com o aumento de pressão, mas pode ser desprezível para alterações pequenas de temperatura e pressão (NASCIMENTO, 2008).

O tempo de cisalhamento também pode influir para caso de o material ser tixotrópico ou reopético.

No caso das suspensões, a viscosidade é sensível a variação da concentração, ao tamanho e distribuição de tamanhos das partículas, a forma das partículas e a qualquer outro fator que modifique o nível de agregação das partículas, tais como a presença de sais, agentes dispersantes, agentes flocculantes e mudança de pH.

He *et al.* (2004) comentaram sobre os resultados de estudos diversos de pesquisadores que estudaram a influência da distribuição de tamanhos de partículas na viscosidade da suspensão.

Garcia *et al.* (2003) relataram que a viscosidade aumenta conforme o tamanho da partícula diminui e que a tensão limite de escoamento é proporcional ao número de contatos e a energia total entre as partículas. Também, estes pesquisadores constataram que numa dada concentração da fase dispersa, a diminuição de tamanho da partícula resulta na redução da distância média de separação entre as partículas e, como consequência, num aumento das interações hidrodinâmicas e da viscosidade.

Zhongwu *et al.* (2001), estudaram suspensões de óxidos metálicos e relataram que um dado sistema constituído por partículas tipo esferas sólidas

apresenta viscosidade mínima se comparado com outros sistemas de mesma distribuição de tamanhos de partículas e fração volumétrica.

Bhattacharya (1998), comenta sobre as formas das partículas, relatando que existe um consenso geral de que a viscosidade aumenta conforme aumenta o desvio da esfericidade. No que diz respeito a quantificação da influência que o tamanho das partículas tem sobre a tensão de escoamento, este autor encontrou discrepâncias entre os outros pesquisadores.

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

O perfil da curva de viscosidade pode variar de acordo com o tipo de agregado formado e o percentual de agregação. Quando a forma de atração entre as partículas proporciona o tipo de agregado face a face, este agregado pode se comportar como uma partícula com esfericidade e tamanho maiores e, assim, a viscosidade tende a diminuir com o aumento do número de agregados, desde que a concentração não seja muito alta.

A medida que a concentração aumenta, o número e tamanho dos agregados se eleva e começa a haver a oclusão da água presente na suspensão no interior desses “mega agregados”.

Para um determinado tipo de agregados (face/extremidade, do tipo castelo de cartas) a viscosidade tende a se elevar devido ao aprisionamento da água no seu interior (NASCIMENTO, 2008).

Sofrá e Boger (2002) estudaram as características reológicas da lama vermelha (resíduo do processo Bayer) visando otimizar as operações relativas ao depósito deste resíduo. Os autores verificaram o comportamento pseudoplástico da lama vermelha em diversas concentrações, sendo que a redução da viscosidade foi bem maior para as suspensões com alto grau de teor de sólidos.

O efeito do cisalhamento prévio também foi avaliado por estes pesquisadores, sendo constatado o caráter tixotrópico da suspensão, ou seja, as suspensões cisalhadas por um período anterior as medidas reológicas apresentaram queda da viscosidade e da tensão limite de escoamento. A interação da quantidade de finos e a percentagem de sólidos não pode ser desconsiderada, demonstrando que o efeito da quantidade de finos na tensão de cisalhamento é muito pequeno para pequenas percentagens de sólidos (< 5 a 10%).

2.9 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O CÁLCULO DO FATOR DE ATRITO

2.9.1 Introdução

Para o escoamento de fluidos não-Newtonianos, as correlações encontradas na literatura para a predição dos fatores de atrito, quase sempre, fornecem valores discordantes ou são específicos a certas características apresentadas pelo fluido e determinadas condições de escoamento.

No contexto, a determinação de fatores de atrito de polpas de minério, é possível via modelamento matemático, cujas etapas estão contidas na Figura 2.34, seguir:

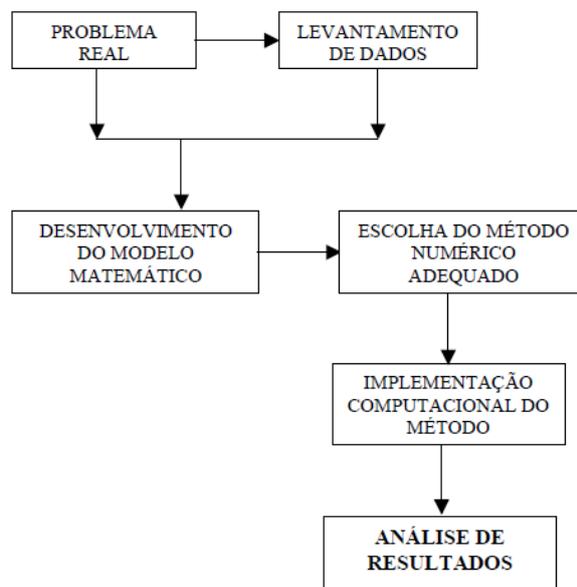


Figura 2.34 – Etapas do desenvolvimento do modelo e solução (Macêdo, 2002).

Considerando-se o regime turbulento para o transporte da polpa de bauxita por tubulações, tanto em mineroduto quanto em instalações intermediárias de bombeamentos de polpas, entre unidades de equipamentos nos processos das operações unitárias (ciclonagens, peneiramentos, espessamentos e rejeitodutos), as partículas se movem ao acaso e através de trajetórias caóticas, a determinação do perfil de velocidades é de grande complexidade.

No regime turbulento, por não ser possível um desenvolvimento teórico, como é o caso do escoamento laminar, as expressões para os fatores de atrito são obtidas de forma empírica e ou semi-empírica através da realização de trabalhos experimentais (Bennet, 1978).

Existem na literatura diversas correlações de previsão do fator de atrito no regime turbulento em tubos lisos para fluidos que seguem o modelo power-law.

Dodge e Metzner (1959) utilizaram como referência a fórmula de von Kármán, a qual relaciona o fator de atrito com o número de Reynolds generalizado definido por Metzner e Reed (1955).

As correlações mais utilizadas para determinar o fator de atrito, no escoamento de fluidos não-Newtonianos, seguem a forma generalizada da equação de Prandtl, representada por,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = A \log(\text{Re} \cdot f^B) + C \quad (2.6)$$

onde A, B e C são parâmetros relacionados às propriedades reológicas do fluido e f o fator de atrito de Fanning, definido por,

$$f = \frac{D}{2\rho V^2} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \quad (2.7)$$

onde D, ΔP , L, V e ρ são o diâmetro do duto, a diferença de pressão ocasionada, o comprimento da seção de tubulação, a velocidade média e a massa específica do fluido respectivamente.

Uma forma baseada na equação de Prandtl é a correlação de Dodge e Metzner (1959), muito citada na literatura, e dada por,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{n^{0,3}} \log(\text{Re}_{\text{MR}} \cdot f^{(1-\frac{n}{2})} - \frac{0,4}{n^{1,2}}) \quad (2.8)$$

onde Re_{MR} é o número de Reynolds definido por Metzner e Reed (1955), para o regime laminar, dado por,

$$\text{Re}_{\text{MR}} = D^n \cdot V^{2-n} \cdot \rho / \frac{k}{8} \left(\frac{6n+2}{n} \right)^n \quad (2.9)$$

onde k é o índice de consistência e n o índice de comportamento do fluido seguindo

o modelo de Ostwald-de-Waele, $\tau = k\dot{\gamma}^n$ (2.3)

onde τ é a tensão cisalhante e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento (WHITE, 1991).

Neste contexto apresentado, para a determinação dos fatores de atrito de polpas de bauxita, em fluxo turbulento, em tubulação circular de diâmetro 0,60 m, modeladas para Herschel-Bulkley, este trabalho recorre a correlações desenvolvidas por Quaresma (2007) e Oliveira (2007), as quais são comparadas com as correlações de Dodge e Metzner (1959), conforme descrito a seguir.

Estas correlações foram desenvolvidas segundo a lei logarítmica de Prandtl (lei da parede), utilizando-se de velocidades características as quais contêm a clássica velocidade de fricção como caso particular (LEIGHTON, 1979).

Considerado, também, escoamento empistonado, que de acordo com as condições de contorno e parâmetros reológicos das polpas (\mathbf{K} , \mathbf{n} e τ_0), permitiu definir uma nova velocidade característica e um novo comprimento característico.

A resolução numérica foi realizada por meio de um código computacional em linguagem FORTRAN, utilizando-se da subrotina ZREAL do IMSL (1991), aplicada a equações não-lineares.

Uma maneira de validar a correlação desenvolvida, verificando a sua consistência é via a análise do comportamento dos parâmetros \mathbf{Y} e \mathbf{n} dos fluidos, de maneira a assegurar o ajuste para o modelo de Herschel-Bulkley.

Finalizando, é realizada a comparação, entre as correlações (estudo e Dodge e Metzner), através de tabelas e gráficos, de modo a verificar a concordância entre estas correlações (QUARESMA, 2007; OLIVEIRA, 2007).

2.9.2 Fator de atrito para o modelo de Herschel-Bulkley

Segundo Quaresma (2007) e Oliveira (2007), para o caso de fluidos não-Newtonianos que seguem o modelo reológico de Herschel-Bulkley, as tensões cisalhantes são descritas a partir da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \tau_{rz} &= \tau_0 + \left(-\frac{du}{dr}\right)^n; \text{ para } \tau_{rz} \geq \tau_0 \\ \frac{du}{dr} &= 0 \quad ; \text{ para } \tau_{rz} < \tau_0 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Onde τ_{rz} é a tensão de cisalhamento; τ_0 é a tensão limite de escoamento; $\frac{du}{dr}$ é gradiente de velocidade; \mathbf{k} e \mathbf{n} são os índices de consistência e de comportamento para o fluido de Herschel-Bulkley.

A correlação procurada para o fator de atrito para os fluidos que seguem o modelo de Herschel-Bulkley é definida por Quaresma (2007) e Oliveira (2007) segundo a seguinte expressão:

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{f}{2} - \frac{Y^{n/2-n}}{\text{Re}^{2/2-n}}}} = \frac{1}{k} \ln \left[\text{Re}^{1/n} \frac{(1-\tilde{a})}{2} \left(\sqrt{\frac{f}{2} - \frac{Y^{n/2-n}}{\text{Re}^{2/2-n}}} \right)^{2/2-n} \right] + \frac{(\tilde{a}-1)(\tilde{a}+3)}{2k} + C \quad (2.11)$$

Onde os grupos adimensionais que compõem esta equação estão relacionados abaixo:

$$\begin{aligned} \tilde{a} &= \frac{2Y^{n/2-n}}{f \text{Re}_g^{2/2-n}} & Y &= \frac{D^2 \rho \tau_0^{2-n/n}}{k^{2/n}} \\ f &= \frac{2\tau_w}{\rho u_m^2} & \text{Re} &= \frac{\rho u_m^{2-n} D^n}{k} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Esta equação (2.11) pode ser resolvida numericamente para o fator de atrito de Fanning, admitindo-se os fatores de k e $C(x)$ equivalentes aos resultados experimentais de Kármán-Nikuradse (1993), sendo 0,41 e 5,55 respectivamente.

2.9.3 Fator de atrito segundo correlações de Dodge e Metzner

Baseada na equação de Prandtl, sendo muito citada na literatura, podendo ser utilizada para o fluxo turbulento completamente desenvolvido de fluidos Power Law, Dodge & Metzner (1959) desenvolveram uma expressão semi-teórica para o perfil de velocidade junto a uma correlação para f versus Re . O estudo mostra que Reynolds aumenta com o decréscimo de n , e o valor de f reduz para valores decrescentes de n (Malin ,1997).

A expressão resultante proposta foi validada, através de experimentos, com fluidos que não eram de Power Law (Herschel-Bulkley, Bingham e Casson).

Foi demonstrado por Skelland (1967) que:

$$(N_{\text{Re,gen}})_{\text{Power law}} = \frac{D^n V^{2-n} \rho}{8^{n-1} \cdot K [(3n+1) / 4n]^n} \quad (2.13)$$

$$\text{Onde, } N_{\text{Re}}^0 = \frac{D^n \cdot V^{2-n} \cdot \rho}{K} \quad (2.14)$$

Substituindo (2.14) em (2.13), mostra-se que:

$$(N_{\text{Re,gen}})_{\text{Power law}} = \frac{N_{\text{Re}}^0}{8^{n-1} [(3n+1) / 4n]^n} \quad (2.15)$$

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

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = A_{\ln} \log \left[N_R^o(f)^{1-\frac{n}{2}} \right] + C_n \quad (2.16)$$

ou

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = A_{\ln} \log \left[N_{Re,gen}(f)^{1-\frac{n'}{2}} \right] + C_{n'} \quad (2.17)$$

Onde

$$C_{n'} = A_{\ln} \log \left[\frac{1}{8} \left(\frac{6n'+2}{n} \right)^{n'} \right] + C_n \quad (2.18)$$

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

A expressão (2.17) é a forma final da equação relacionando o fator de atrito ao número de Reynolds para o fluxo turbulento de fluidos power-law em um tubo liso cilíndrico.

Medidas experimentais para fluidos de carbopol foram encontradas por Dodge e Metzner resultaram nas seguintes relações:

$$A_{\ln} = \frac{4,0}{(n')^{0,75}} \quad (2.19)$$

$$C_{n'} = \frac{-0,40}{(n')^{1,2}} \quad (2.20)$$

Então, inserindo estas duas expressões em (2.17), tem-se:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = \frac{4}{(n')^{0,75}} \log \left[N_{Re,gen}(f)^{1-\frac{n'}{2}} \right] - \frac{0,40}{(n')^{1,2}} \quad (2.21)$$

Observa-se que para $n' = 1,0$ esta expressão reduz ao caso de fluidos Newtonianos, a qual coincide com a expressão demonstrada por Nikuradse:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 4,0 \log \left[\frac{DV\rho}{\mu} \sqrt{f} \right] - 0,40 \quad (2.22)$$

CAPITULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 POLPA DE BAUXITA

Compõe-se por três amostras de polpa de bauxita, apresentadas no Quadro 3.1 e Figura 3.1, coletadas na Planta Piloto de Paragominas e na Tancagem do Mineroduto (depósitos de polpas já elaboradas, prontas para o bombeamento ao cliente - Alunorte). A partir das mesmas houve a preparação de alíquotas (em triplicata) para os ensaios reológicos em cinco concentrações de sólidos em peso (46%; 48%; 50%; 52% e 54%).

Quadro 3.1 - Descrição das Amostras de Polpa

AMOSTRA	LOCAL DE COLETA	OBSERVAÇÃO
Projeto – P0	Planta Piloto	Amostra base para os estudos de pré-viabilidade e viabilidade do Projeto do Mineroduto
Operação Atual – P1	Tancagem do Mineroduto	Amostra dos batches atuais (produto enviado pelo mineroduto), de acordo com a granulometria aceita pelo cliente Alunorte
Proposta – P2	Tancagem do Mineroduto	Amostra dos possíveis batches com nova especificação de granulometria, a ser negociada com o cliente Alunorte



Figura 3.1 - Amostras coletadas na Planta Piloto (P0) e Tancagem do Mineroduto (P1 e P2)

Os locais da coleta das amostras de polpa estão indicados na Figura 3.2 e Figura 3.3, nas respectivas caixas de produto final da Planta Piloto e Usinas de Beneficiamento.

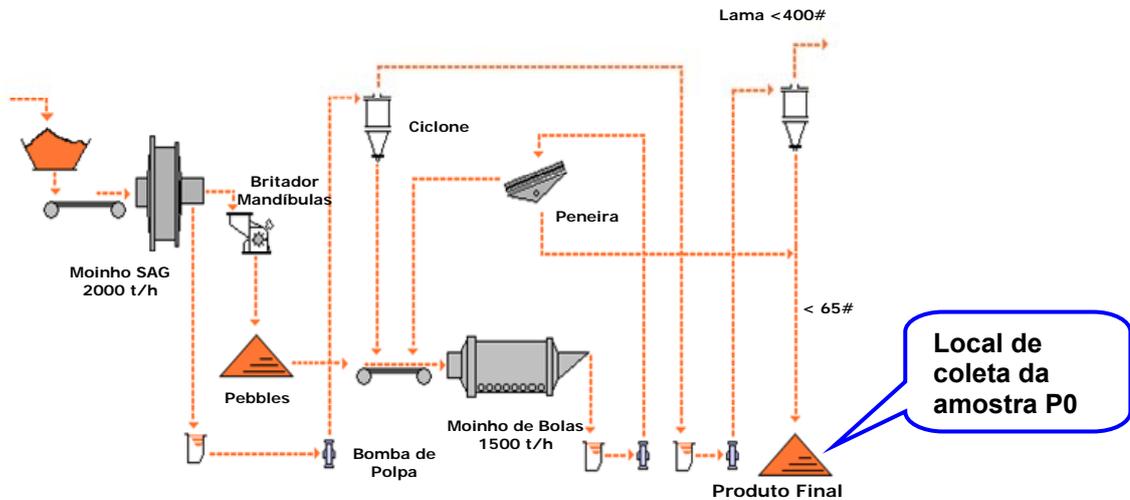


Figura 3.2 – Local de coleta da amostra P0 – Produto final da Planta Piloto

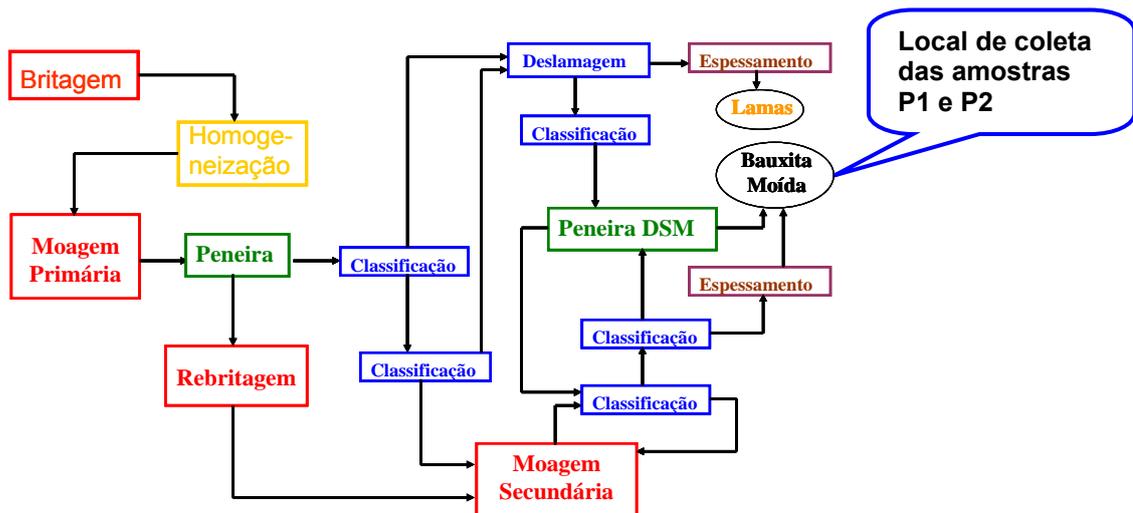


Figura 3.3 – Local de coleta das amostras P1 e P2 – Produto Final da Usina de Beneficiamento

3.2 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA POLPA DE BAUXITA

3.2.1 Teor de sólidos

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

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

Onde,

M_s = massa de sólido seco;

M_p = massa de polpa (sólido + água)

3.2.2 pH

A determinação do pH foi realizada por meio de um pHmetro de bancada digital da *Hanna Instruments* – modelo HI 9321.

3.2.3 Massa específica da polpa

A Equação (3.2) expressa o valor da massa específica da polpa (ρ_p) em função da massa total da polpa (m_p) e do volume total da polpa (V_p).

Para a determinação do volume e a correspondente massa, utilizou-se de uma proveta de 500 ml e de uma balança de precisão de 0,001 g.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (3.2)$$

3.2.4 Análise granulométrica

Realizada no Laboratório Físico-Químico da Mineração Paragominas S/A – MPSA, através de um conjunto rotativo de canecas onde as amostras foram homogeneizadas e quarteadas a úmido. Em seguida foram submetidas ao peneiramento a úmido (Figura 3.4) em um conjunto suspenso de malhas, em escala Tyler: 28#; 32#; 48#; 65#; 100#; 150#; 200#; 325# e 400#. Para as faixas compreendidas por 20 μm ; 10 μm ; 5 μm e 2 μm utilizou-se a técnica da difração a laser em dois modelos *Mastersizer 2000* da *Malvern Instruments* (Figura 3.5). Cada fração é secada e pesada de maneira a se obter os percentuais retidos em cada malha.



Figura 3.4 - Peneiradores suspensos - Fabricação Dialmática



Figura 3.5 – Equipamentos Malvern

3.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Raios-X Dispersiva em Energia (EDS)

No laboratório de microscopia eletrônica de varredura do Museu Emilio Goeldi, realizou-se a análise química qualitativa e semi-quantitativa das amostras utilizando-se de um microscópio eletrônico de varredura acoplado a um espectrômetro de raios-X dispersivo em energia.

O microscópio eletrônico de varredura é da marca LEO, modelo 1450VP, equipado com sistema de obtenção e identificação de padrões de difração de elétrons retroespalhados (EBSD).

3.2.6 Análises Físico-Químicas

Utilizando-se de metodologias consagradas (FURMAN, 1975; BENNETT & REED, 1971) para ensaios de bauxita, conforme procedimentos analíticos do Laboratório da Mineração Paragominas S/A, fez-se a determinação dos elementos Al_2O_3 ; SiO_2 ; Fe_2O_3 e TiO_2 através da abertura por meio da fusão alcalina utilizando o carbonato de sódio (Na_2CO_3) e o tetraborato de sódio ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) como fundentes. Em seguida realizou-se a dissolução da massa fundida com ácido clorídrico (HCl) diluído, com o objetivo de solubilizar todos os elementos. As leituras foram realizadas em equipamento ICP – *Varian 725* – ES.

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

A determinação do conteúdo de SiO_2 reativa realizou-se a abertura das amostras de bauxita através da digestão alcalina (com NaOH a 10%) em bomba parr a 150° C. Posteriormente efetuou-se abertura ácida com HCl concentrado. As leituras foram feitas em AA-*Varian 240 FS*. (HOLLITT *et al.*, 2001).

Em seguida é realizada a análise de PPC – perda ao fogo - em mufla a 1000° C.

3.2.7 Avaliações Reológicas

No Laboratório de Reologia da FEQ-UFGA, utilizou-se um viscosímetro da marca *HAAKE*, modelo VT 550, com sensor tipo cilindros coaxiais SV1, com banho térmico *ThermoHaake C 10*, mantendo-se a temperatura dos ensaios em 28 °C.

3.2.7.1 Metodologias de Execução dos Ensaios

Para a obtenção dos dados experimentais utilizou-se a metodologia PSI (empresa projetista e consultora da operação do mineroduto de Paragominas), a qual consiste basicamente na elaboração de uma rampa padrão para os ensaios, de maneira a minimizar a decantação da polpa no sistema de cilindros coaxiais. Esta metodologia, conforme apresentado no Anexo A, visa a obtenção dos pontos

em velocidade de rotação correspondente inicialmente a taxa de 550 s^{-1} , promovendo uma varredura até 40 s^{-1} , em intervalos de 10 s, adquirindo-se 100 pontos em cada intervalo.

Todos os ensaios foram em triplicata, sendo escolhida a curva mediana como o resultado final.

A programação para a realização dos ensaios de histerese seguiu a metodologia referenciada por (ARAÚJO, 2009) adaptada, conforme as condições operacionais abaixo:

- a) Rampa de aumento de taxa de cisalhamento de 0 a 200 s^{-1} em 100 s, adquirindo 100 pontos
- b) Permanência a 200 s^{-1} por 10 s, adquirindo 10 pontos;
- c) Rampa de diminuição de taxa de cisalhamento de 200 a 0 s^{-1} em 100 s, adquirindo 100 pontos.

3.2.7.2 Calibração do Equipamento

Para assegurar a confiabilidade do equipamento foi realizado um ajuste para um fluido Newtoniano com o óleo de calibração OP 400, nas mesmas condições da polpa de bauxita, ilustrada pela Figura 3.6.

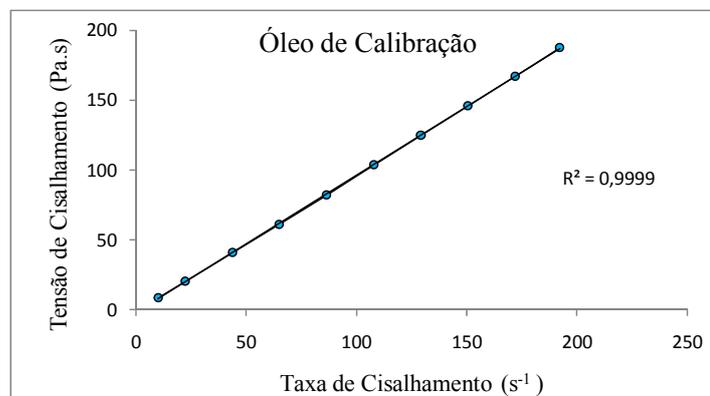
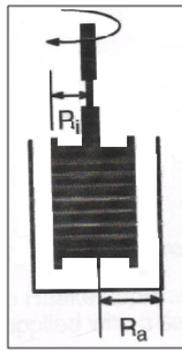


Figura 3.6 – Curva de calibração do viscosímetro

O óleo de calibração ajustou-se perfeitamente como um fluido newtoniano, estando portanto assegurada a confiabilidade do equipamento.

3.2.7.3 Metodologia da Incerteza dos ensaios reológicos

Para estimar desvio dos valores experimentais foram utilizados dados específicos do sensor SV1, conforme demonstrado no Apêndice A. O desvio calculado foi para as tensões obtidas na varredura de 0 a 200 s^{-1} no VT 550. A Figura 3.7 apresenta o *spindle* SV1 com suas respectivas correlações.



$$\left(\frac{R_a}{R_i} \leq 1,1 \right) \quad (3.3)$$

$$f_{\text{cor}} = \frac{0,01}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot R_i^2} \quad (3.4)$$

$$M = \frac{\pi}{15} \frac{R_a^2}{(R_a^2 - R_i^2)} \quad (3.5)$$

Figura 3.7 - Spindle SV1 (Fonte: manual *Haake* VT 550)

Estas correlações são aplicadas para a aferição da viscosidade, expressa por

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{f \cdot M_d}{M \cdot n} \quad (3.6)$$

Onde,

R_i = raio do rotor em [m]

R_a = raio do cilindro (copo) em [m]

M_d = torque em [Ncm]

n = velocidade do rotor [1/min]

Os principais critérios de qualidade para o sistema de medição para o tipo cilindro coaxial referem-se basicamente a:

a) Razão entre os raios , segundo norma DIN 53019 e padrões internacionais,

$\delta = R_a/R_i$, no seguinte intervalo: $1,00 \leq \delta \leq 1,10$

b) Efeitos de borda, relacionados as bordas finais do rotor, sendo minimizados através dos espaços na base e topo do rotor

3.3 METODOLOGIAS DE RESOLUÇÃO DOS FATORES DE ATRITO

3.3.1 Metodologia de solução da equação do fator de atrito segundo o modelo de Herschel-Bulkley

Considerando escoamento unidimensional, totalmente desenvolvido, sendo necessárias análises das condições de contorno no eixo do escoamento e também o fluxo na parede da tubulação.

A resolução envolve tarefas computacionais para a obtenção do fator de atrito em função do número de Reynolds generalizado. A solução numérica foi realizada por meio de um programa em linguagem FORTRAN 90/95, utilizando-se

da subrotina ZREAL da biblioteca IMSL (1991) para o cálculo de raízes de equações algébricas não-lineares.

A equação obtida pode ser resolvida numericamente para o fator de atrito de Fanning. Admitiu-se para os valores de K e $C(x)$ a equivalência aos resultados experimentais de Nikuradse, ou seja, 0,41 e 5,55, respectivamente.

3.3.2 Metodologia de solução das correlações de Dodge & Metzner

Os fatores de atrito calculados pela correlação de Dodge e Metzner (1959) foram obtidos de forma semelhante aos fatores de atrito do modelo de Herschel-Bulkley, utilizando-se da programação FORTRAN 90/95, por meio da subrotina ZREAL da biblioteca IMSL (1991), para o cálculo das raízes das equações algébricas não-lineares.

CAPITULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 mostram os resultados dos ensaios de granulometria das três amostras estudadas.

Verifica-se que a malha de 48 # (0,296 mm) a amostra do projeto apresenta 99,15 % passante nesta abertura, e as amostras da operação atual e proposta se equivalem, mostrando respectivamente 94,25 % e 96,95 % passantes nesta malha.

Na Figura 4.1, verifica-se que no outro extremo das curvas o fator determinante na caracterização das amostras estudadas é a fração passante em 10 μ m, definindo o seu grau de “finura”, indo da amostra mais grossa (projeto), até a amostra mais fina (proposta) e passando pela amostra média (operação atual).

Tabela 4.1 – Análise Granulométrica das Amostras de Polpa

Amostras	(% de Passante Acumulada)													
	10 # 1,680 mm	20 # 0,840 mm	48 # 0,297 mm	65 # 0,210 mm	100 # 0,149 mm	150 # 0,105 mm	200 # 0,074 mm	270 # 0,053 mm	325 # 0,044 mm	400 # 0,037 mm	20 μ m	10 μ m	5 μ m	2 μ m
PROJETO	99,99	99,92	99,15	93,37	78,50	67,87	50,71	40,61	34,97	30,31	21,23	16,38	12,54	5,87
OPER. ATUAL	99,55	98,67	94,25	82,18	69,62	59,50	49,63	41,61	38,10	34,76	30,36	24,22	17,09	7,22
PROPOSTA	99,95	99,64	96,95	85,27	74,48	63,42	52,08	44,58	41,09	38,24	33,02	26,47	18,63	7,88

Curvas Granulométricas das Amostras de Polpa

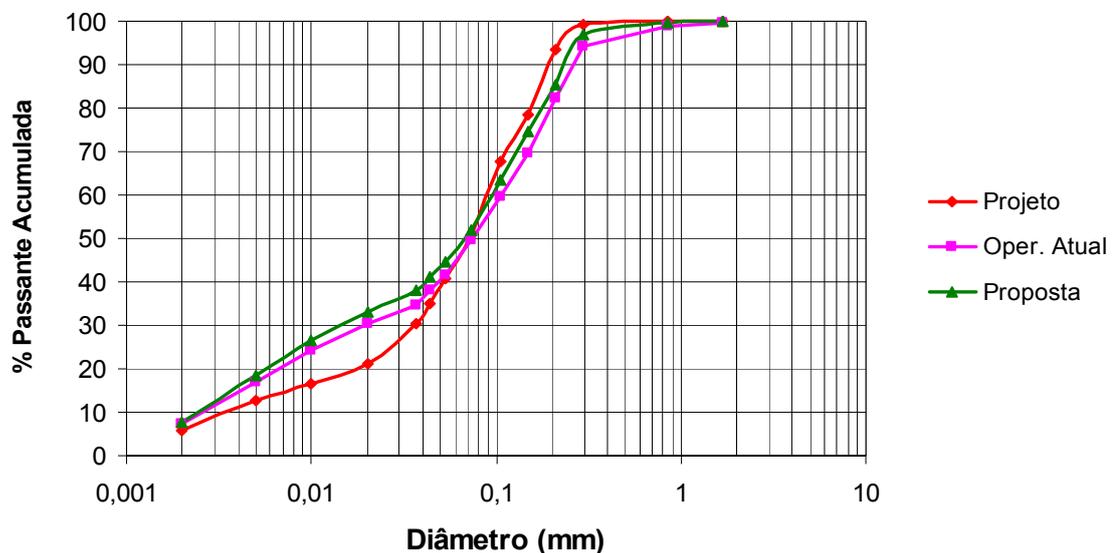


Figura 4.1 – Escala gráfica das amostras de polpa

A Tabela 4.2 mostra os diâmetros médios das amostras, onde a polpa proposta confirma o seu d_{50} ($5,80E-02$ mm), inferior as amostras do projeto ($7,30E-02$ mm) e operação atual ($7,50E-02$ mm), mas por outro lado mostra que o seu

diâmetro de Sauter ($2,04E-05$ mm) é superior as amostras projeto ($1,93E-05$ mm) e operação atual ($2,00E-05$ mm).

O diâmetro médio de Sauter (D_{32}) é um dos diâmetros médios mais importantes, pois está diretamente relacionado com a área superficial por unidade de volume das partículas e também a sua fração volumétrica.

Tabela 4.2 - Diâmetros Médios das Amostras de Polpa

Amostra	d_{50}	Sauter	Massa	Volume	Superfície	Linear
Projeto	7,30E-02	1,93E-05	2,89E+01	1,23E-09	1,07E-05	4,03E-03
Operação Atual	7,50E-02	2,00E-05	3,87E+01	1,26E-09	1,05E-05	4,00E-03
Proposta	5,80E-02	2,04E-05	3,23E+01	1,27E-09	1,04E-05	4,00E-03

4.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTRÔMETRO DE RAIOS-X DISPERSIVO EM ENERGIA (EDS)

Observou-se na Figura 4.2 a heterogeneidade morfológica das amostras e a presença de agregados de partículas de menor tamanho e de formato característico da caulinita. Em análise pontual verificou-se a presença de alumínio e silício em partículas menores e também foi detectado a presença de alumínio em partículas maiores, fato este confirmando o que é observado nas amostras de bauxita intactas, onde a caulinita recobre as partículas do mineral gibbsita (NASCIMENTO, 2010).

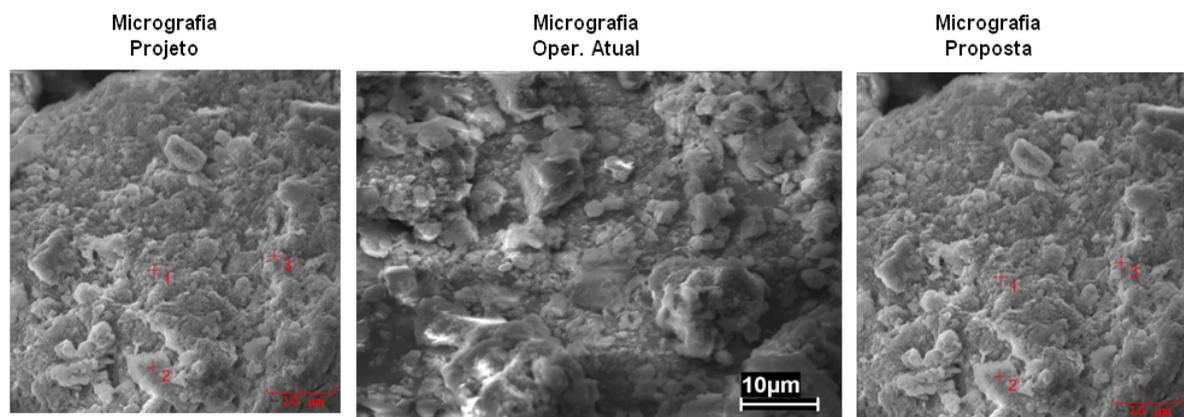


Figura 4.2 - Fotomicrografias (5.000 X) obtidas por MEV para as amostras de polpa de bauxita

4.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

A Tabela 4.3 apresenta os resultados das análises físico-químicas através da qual pode-se observar que na amostra da proposta há um acréscimo no teor do óxido de ferro (Fe_2O_3) e uma ligeira diminuição no óxido de titânio (TiO_2), em 9,89 %

e 17,59 % em relação a polpa operação atual e a polpa projeto respectivamente, com os demais elementos químicos semelhantes a amostra do projeto.

Tabela 4.3 - Resultados das Análises Físico-Químicas

	Projeto	Oper. Atual	Proposta
Al ₂ O ₃ Total (%)	52,73	52,08	52,00
Al ₂ O ₃ Aprov. (%)	48,24	47,75	48,13
SiO ₂ Total (%)	6,62	6,71	6,88
SiO ₂ Reat.(%)	4,84	5,59	4,77
Fe ₂ O ₃ Total (%)	8,51	9,2	10,09
TiO ₂ Total (%)	1,99	1,82	1,64
PPC (%)	27,66	27,36	27,24
Participação dos óxidos (%)	69,85	69,81	70,61

Outro ponto de destaque é a participação maior da caulinita na amostra da operação atual; fato comprovado pela participação maior do elemento SiO₂ reativa nesta amostra (5,59%), sendo justificado pela heterogeneidade do minério.

A participação de óxidos é ligeiramente superior na amostra da proposta, devido ao óxido de ferro (F₂O₃), o que comprova a variabilidade das amostras, em função dos seus depósitos de origem.

Araujo *et al.* (2009), cita que a bauxita é uma associação de minerais conhecidos como oxi-hidróxidos de alumínio, onde suas proporções na rocha variam muito entre os depósitos, incluindo o tipo e a quantidade das impurezas do minério, tais como: óxidos de ferro, argila, dióxido de titânio, entre outras.

4.4 ENSAIOS REOLÓGICOS

4.4.1 Influência da concentração de sólidos e da distribuição de tamanhos na viscosidade das polpas

Na Figura 4.3 observou-se o comportamento da viscosidade em função da concentração de sólidos, para uma taxa de cisalhamento usualmente aplicada no processo de bombeamento, em torno de 100 s⁻¹, mostrando que a concentração de sólidos tem um efeito relevante sobre a viscosidade.

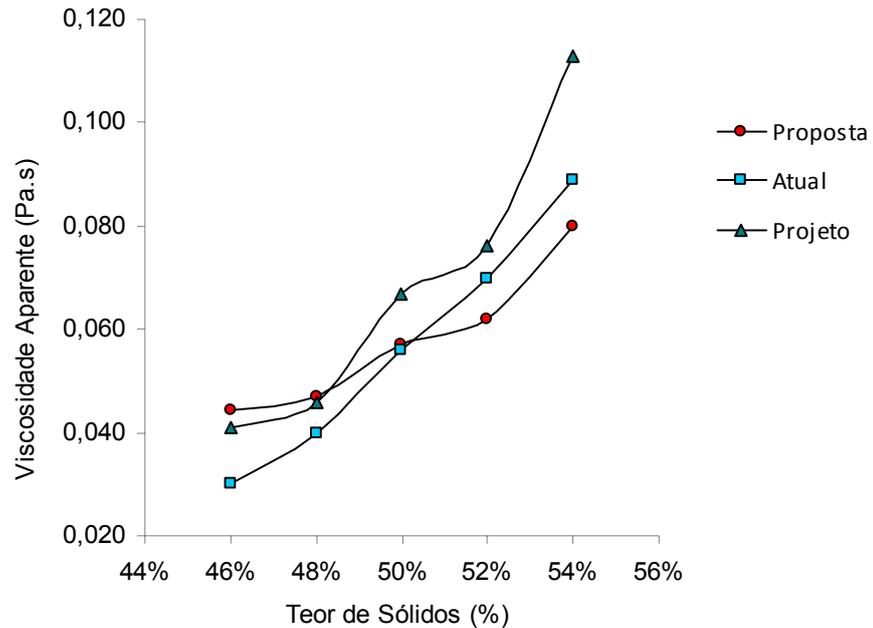


Figura 4.3 – Viscosidade aparente x concentração de sólidos

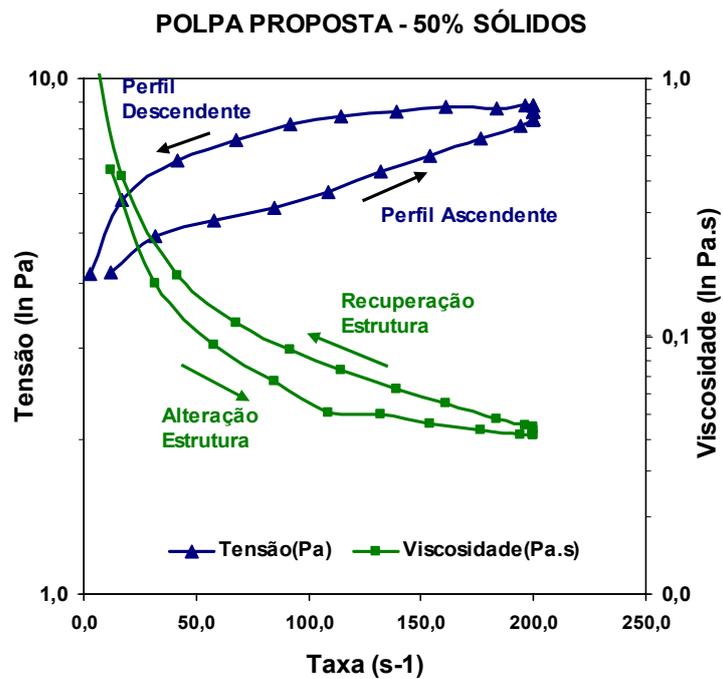
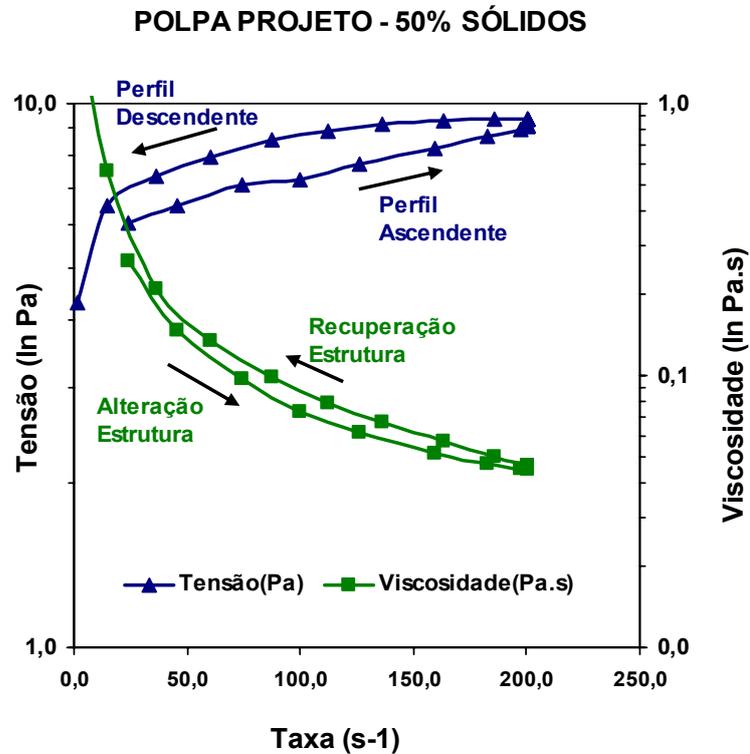
Verificou-se que mesmo adicionando mais finos (fração 10 micros) e mais grossos ($> 0,297$ mm) a amostra da proposta (P2), sua viscosidade, a partir da concentração de 50% de sólidos, ficou menor em relação a outras duas (projeto e operação atual), a partir deste mesmo ponto. O que foi observado é que a participação de grossos colaborou fazendo com que a mesma funcione como meio filtrante para a fração fina fluidificante (10 microns) no outro extremo da curva.

Constatou-se que a amostra do projeto (P0) possui o maior d_{50} que a amostra (P2) mas por outro lado apresenta os menores diâmetros médios de Sauter e de massa, o que corrobora para uma maior interação de massa superficial, justificando deste modo a sua maior viscosidade aparente (ZHONGWU *et al.*, 1998).

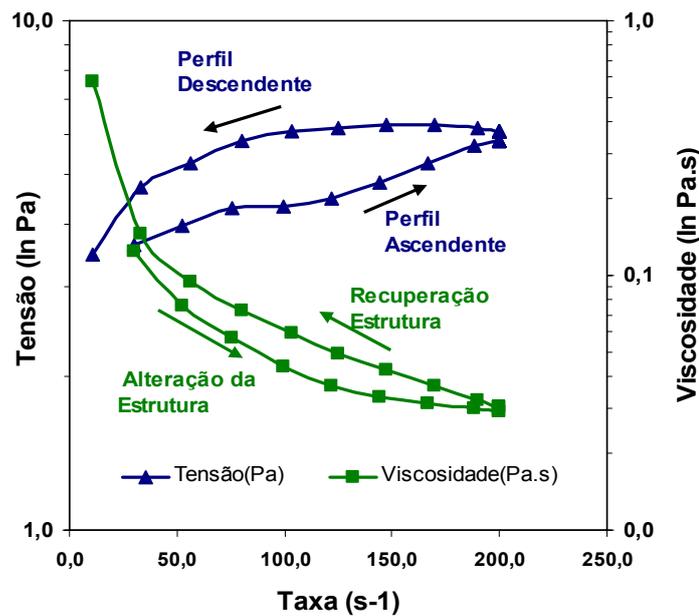
O fator determinante para a redução da viscosidade na amostra da proposta (P2), a partir da concentração de 50% de sólidos, deve-se a maior participação de finos na fração 10 microns; fato este, observado por Sampaio (2007). Este autor mostrou que o enriquecimento da polpa em estudo com uma fração mais fina de bauxita acarretou na redução da viscosidade e da tensão limite de escoamento.

4.4.2 Ensaios de Tixotropia e Reopexia

Na Figura 4.4 é apresentado o estudo para a histerese formada a partir de ensaios variando-se a taxa de cisalhamento para as três polpas do estudo, a uma concentração de sólidos de 50%.



POLPA OPERAÇÃO ATUAL - 50% SÓLIDOS



(c)

Figura 4.4 – Curvas de Histerese das Polpas Estudadas (a), (b) e (c)

As medidas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento mostraram uma diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, comportamento típico de fluidos pseudoplásticos (*shear-thinning*), segundo Barnes, 1977 e Rocha, 2010.

Com o aumento da taxa de cisalhamento, partículas orientam-se, possíveis entrelaçamentos entre partículas são desfeitos, além da quebra de aglomerados que liberam o líquido existente em seu interior, diminuindo a viscosidade da suspensão.

A partir dos dados da Tabela 4.4 verificou-se que as três polpas apresentaram comportamentos semelhantes a taxa constante de 200 s^{-1} , onde houve um ligeiro aumento da viscosidade e da tensão de cisalhamento, evidenciando tendência a reopexia, de acordo com o conceito introduzido por Barnes (1977).

Tabela 4.4 – Resultados dos Ensaios da Histerese

	POLPA PROPOSTA				POLPA PROJETO				POLPA OPER. ATUAL			
	t [s]	τ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	η_{ap} [Pa.s]	t [s]	τ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	η_{ap} [Pa.s]	t [s]	τ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	η_{ap} [Pa.s]
Rampa Ascendente	16,0	4,206	11,8	0,444	14,3	5,503	10,2	0,581	16,0	2,846	10,0	0,341
	27,2	4,934	32,0	0,160	21,8	6,021	23,7	0,265	27,2	3,618	30,2	0,124
	40,7	5,288	57,9	0,093	35,1	6,477	45,5	0,147	38,6	3,947	52,7	0,076
	53,9	5,617	84,5	0,067	50,1	7,084	74,1	0,097	50,6	4,276	75,8	0,057
	66,1	6,021	109,0	0,050	61,6	7,261	99,6	0,073	61,9	4,326	99,8	0,044
	77,1	6,603	132,1	0,050	78,7	7,717	125,9	0,062	73,0	4,478	122,0	0,037
	88,1	7,059	154,2	0,046	91,8	8,248	159,7	0,052	84,0	4,807	144,1	0,033
	99,3	7,666	176,2	0,044	103,7	8,678	182,5	0,048	95,3	5,237	166,3	0,032
105,9	8,096	194,1	0,042	105,9	8,982	197,2	0,046	106,3	5,667	188,7	0,030	
Patamar Taxa Constante	107,0	8,349	200,1	0,042	107,0	9,108	200,1	0,046	107,4	5,819	200,1	0,029
	108,2	8,349	200,1	0,042	108,2	9,108	200,1	0,046	108,7	5,819	200,1	0,029
	109,4	8,349	200,1	0,042	109,3	9,108	200,1	0,046	109,8	5,819	200,1	0,029
	110,5	8,349	200,1	0,042	110,4	9,108	200,1	0,046	111,0	5,819	200,1	0,029
	111,6	8,349	200,1	0,042	111,5	9,108	200,1	0,046	112,1	5,819	200,1	0,029
	112,7	8,349	200,1	0,042	112,6	9,108	200,1	0,046	113,2	6,072	200,1	0,030
	113,8	8,602	200,1	0,043	113,7	9,361	200,1	0,047	114,3	5,819	200,1	0,029
	114,9	8,602	200,1	0,043	114,8	9,361	200,1	0,047	115,4	6,072	200,1	0,030
	116,0	8,602	200,1	0,043	115,9	9,361	200,1	0,047	116,5	6,072	200,1	0,030
	117,2	8,602	200,1	0,043	117,0	9,108	200,1	0,046	117,6	6,072	200,1	0,030
	118,2	8,855	200,1	0,044	118,2	9,361	200,1	0,047	118,7	6,072	200,1	0,030
120,6	8,855	200,1	0,044	132,4	9,361	186,1	0,050	121,0	6,072	200,1	0,030	
Rampa Descendente	122,8	8,855	196,6	0,045	144,5	9,285	163,0	0,057	130,0	6,135	189,8	0,032
	133,9	8,754	183,3	0,048	157,5	9,133	136,4	0,067	141,1	6,224	169,7	0,037
	145,0	8,830	161,0	0,055	169,7	8,880	112,1	0,080	152,2	6,224	147,6	0,042
	156,1	8,653	138,9	0,062	182,5	8,577	87,7	0,098	163,3	6,173	125,3	0,049
	168,2	8,450	114,7	0,074	196,1	7,944	60,6	0,133	174,5	6,072	103,0	0,059
	180,2	8,147	92,1	0,089	207,2	7,362	36,5	0,207	186,6	5,794	79,9	0,073
	192,0	7,615	67,7	0,113	218,2	6,477	14,5	0,564	198,3	5,237	56,0	0,095
	205,2	6,958	41,8	0,171	220,4	4,301	1,3	2,104	209,4	4,706	33,2	0,146
	217,4	5,819	16,7	0,418					220,6	3,466	10,9	0,576
	219,6	4,175	2,9	1,598								

Na rampa ascendente as polpas demonstraram comportamentos sensíveis ao cisalhamento, *shear-thinning* (diminuição da viscosidade), que algumas vezes é confundido com tixotropia (ROCHA, 2010; BARNES, 1977).

Esta diminuição da viscosidade pode ser decorrente de fatores (alinhamento das partículas na direção do fluxo; reordenação das partículas em suspensão e quebra dos flocos) que uma vez em ação tendem a superar o movimento Browniano das moléculas (ROCHA, 2010).

A curva descendente da viscosidade situa-se acima da curva ascendente, evidenciando a tendência ao rearranjo da estrutura a medida que a taxa de cisalhamento diminui, onde novos aglomerados vão sendo formados. No entanto, eles não se formam com a mesma rapidez com a qual foram destruídos, levando a histerese, apresentada no estudo, mostrar o comportamento típico de fluidos reopéticos, demonstrando que a interação entre as partículas é dependente do tempo e assim descarta-se a evidência do comportamento tixotrópico nestas polpas analisadas.

Numa comparação entre as áreas da histerese da viscosidade das polpas verificou-se uma menor histerese para a polpa projeto, seguida pela polpa proposta e polpa operação atual. Esta constatação está de acordo com comportamento demonstrado na Figura 4.3, onde a polpa projeto apresenta a maior viscosidade, seguida pelas polpas da operação atual e proposta. O acréscimo da viscosidade na polpa projeto é devido ao seu menor diâmetro de Sauter, estando diretamente relacionado com uma maior área superficial por unidade de volume das partículas, o que provoca um maior empacotamento. Os anexos F, G e H mostram detalhes dos ensaios de histerese das polpas estudadas.

4.5 COMPARAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA MINA E O OS RESULTADOS OBTIDOS NO TRABALHO EXPERIMENTAL

A Tabela 4.5 apresenta o resumo dos parâmetros sugeridos a Empresa CVRD no desenvolvimento do projeto para atender as especificações desejadas pelo cliente (Polpa Projeto). A operação atual está sendo comercializada e os dados referentes a polpa proposta foram objeto do estudo, onde o teor de sólidos em 50% foi mantido e a granulometria da fração < 10 microns foi modificada para 26,5% passante acumulada.

Tabela 4.5 – Resumo das propriedades físicas e reológicas das polpas

PARÂMETROS ANALISADOS	ESPECIFICAÇÃO COMERCIALIZAÇÃO	PROJETO *	OPER. ATUAL *	PROPOSTA *
Viscosidade (mPa.s)	7,0 - 15,0	13,70	14,24	13,66
Tensão Limite de Escoamento (Pa)	1,0 - 9,0	5,36	4,26	4,03
pH	6,8 - 7,9	6,30	6,80	6,67
Sólido Seco (%)	47 - 52	50	50	50
Massa específica (g/cm ³)	1,41 - 1,44	1,44	1,44	1,44
Veloc. Sedimentação (cm/h)	6,54 - 22,02			
Granulometria (% passante acum.)	100% em 48 #	99,15	94,25	96,95
	87,11% em 65 #	93,37	82,18	85,27
	40 - 47% em 325 #	34,97	38,1	41,09
	19 - 25% em 10 microns	16,38	24,22	26,47
	12 - 17% em 5 microns	12,54	17,09	18,63

* Dados obtidos no Laboratório de Reologia da FEQ-UFPA

Os parâmetros reológicos obtidos para a polpa proposta atenderam a especificação de comercialização para um transporte seguro da polpa por mineroduto. Observa-se isto tanto para a viscosidade quanto para o *yield stress* (tensão limite de escoamento).

Pode-se verificar que interação do percentual de finos (<10 microns) adicionados a polpa proposta com o percentual de sólidos de bombeio em 50% contribuiu para a manutenção da viscosidade e da tensão limite de escoamento abaixo dos valores obtidos para as polpas do projeto e da operação atual.

Os componentes de resistência ao escoamento são a viscosidade plástica, que é o atrito entre as partículas dispersas e entre as próprias moléculas da água e a tensão limite de escoamento, também conhecida por componente eletroviscosa, o qual é causado pelas forças de interação entre as próprias partículas dispersas (MACHADO, 2002).

4.6 AJUSTE DO EQUIPAMENTO

Com os dados da Tabela 4.6 foi obtido o gráfico da Figura 4.5 que apresenta os ajustes aos modelos propostos e os respectivos desvios dos dados experimentais para a polpa operação atual na concentração de 50%.

Tabela 4.6 - Incertezas do experimento

TAXA (s^{-1})	TENSÃO (Pa)	TORQUE (N.m)	INCERTEZA (%)	I+	I-
4,453	3,289	0,03289	1,056506943	3,323748513	3,2542515
25,63	4,301	0,04301	1,014811234	4,344647031	4,257353
51,98	4,807	0,04807	1,002787646	4,855204002	4,758796
95,15	5,313	0,05313	0,993941246	5,365808098	5,2601919
131,1	5,819	0,05819	0,987248508	5,876447991	5,761552
154,8	6,325	0,06325	0,982065737	6,387115658	6,2628843
169,9	6,831	0,06831	0,977972162	6,897805278	6,7641947
189,2	7,337	0,07337	0,974683568	7,408512533	7,2654875
200,1	7,843	0,07843	0,972002502	7,919234156	7,7667658

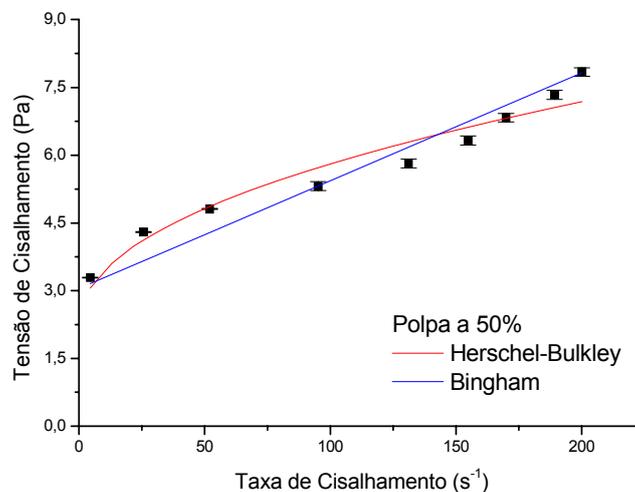


Figura 4.5 – Ajuste para os modelos propostos

4.7 MODELAGEM REOLÓGICA

A Tabela 4.7 apresenta uma comparação entre as polpas estudadas, modelando-se para Bingham e Herschel-Bulkley, constatando-se que a modelagem para Herschel-Bulkley apresentou um melhor ajuste do coeficiente de correlação (R^2) em todas as concentrações.

Observou-se que o maior desvio padrão deste coeficiente ocorreu nas amostras com 46% de sólidos, que pode ser devido a deposição das micro-partículas na base do copo do viscosímetro durante os experimentos.

Quanto ao pH natural destas amostras o mesmo situou-se entre 6,33 e 6,80, não sendo objeto deste estudo a verificação da influência deste indicador nas propriedades reológicas das amostras.

Verificou-se comportamentos semelhantes destas amostras para o limite de escoamento (τ_0) e o índice de consistência (k), os quais acompanham a evolução da viscosidade em função dos acréscimos das respectivas concentrações de sólidos.

Tabela 4.7 – Comparação dos parâmetros da modelagem

POLPA	C_w (%)	d_p (t/m^3)		pH	Bingham			Herschel-Bulkley			
					τ_0	η	R^2	τ_0	K	n	R^2
COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS	46	1,395	Projeto	6,52	3,471	0,011	0,641	0,943	0,978	0,325	0,701
			Atual	6,46	1,855	0,008	0,534	0,663	0,323	0,440	0,550
			Proposta	6,83	3,591	0,011	0,742	0,937	1,013	0,342	0,805
			Média	6,60	2,972	0,010	0,639	0,848	0,771	0,369	0,685
			D. Padrão	0,20	0,970	0,002	0,104	0,131	0,317	0,051	0,104
	48	1,419	Projeto	6,33	5,202	0,014	0,665	0,954	1,988	0,266	0,769
			Atual	6,62	1,732	0,013	0,666	1,215	0,166	0,859	0,672
			Proposta	6,70	4,020	0,012	0,636	1,256	1,268	0,304	0,680
			Média	6,55	3,651	0,013	0,655	1,142	1,140	0,476	0,707
			D. Padrão	0,19	1,764	0,001	0,017	0,164	0,917	0,332	0,054
	50	1,444	Projeto	6,75	5,362	0,014	0,635	1,359	1,542	0,263	0,734
			Atual	6,80	4,263	0,014	0,714	1,339	0,982	0,374	0,764
			Proposta	6,67	4,028	0,014	0,682	1,323	1,092	0,371	0,727
			Média	6,74	4,551	0,014	0,677	1,340	1,205	0,336	0,741
			D. Padrão	0,07	0,712	0,000	0,040	0,018	0,297	0,063	0,020
	52	1,471	Projeto	6,35	8,105	0,018	0,670	1,680	3,458	0,211	0,822
			Atual	6,94	5,942	0,017	0,735	1,388	1,991	0,306	0,862
Proposta			6,92	5,527	0,015	0,647	1,402	1,933	0,273	0,791	
Média			6,74	6,524	0,017	0,684	1,490	2,461	0,263	0,825	
D. Padrão			0,34	1,384	0,001	0,046	0,165	0,864	0,048	0,036	
54	1,498	Projeto	6,47	8,697	0,021	0,637	2,009	3,465	0,252	0,735	
		Atual	6,78	8,383	0,021	0,768	1,431	3,427	0,252	0,929	
		Proposta	6,75	7,894	0,018	0,695	1,592	3,493	0,227	0,847	
		Média	6,67	8,324	0,020	0,700	1,677	3,462	0,244	0,837	
		D. Padrão	0,17	0,404	0,002	0,065	0,298	0,033	0,015	0,097	

Comprova-se a seguir, através das Figuras 4.6 a 4.15, o comportamento das curvas de fluxo e da viscosidade onde a medida que ocorre o aumento da concentração de sólidos (variando de 46% a 54%) as amostras tendem a ter as suas respectivas tensões e viscosidades em valores mais próximos, devido ao empacotamento dos sólidos e o preenchimento dos vazios com as frações

micrométricas (< 10 microns). Os anexos B, C, D, E e F mostram os resultados dos ensaios de modelagem reológica das polpas estudadas.

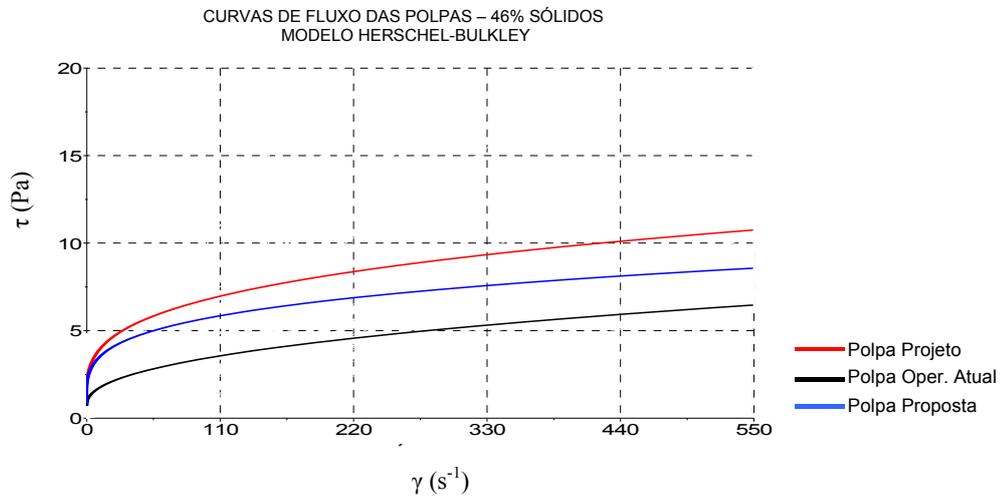


Figura 4.6 – Curvas de fluxo das polpas a 46% sólidos

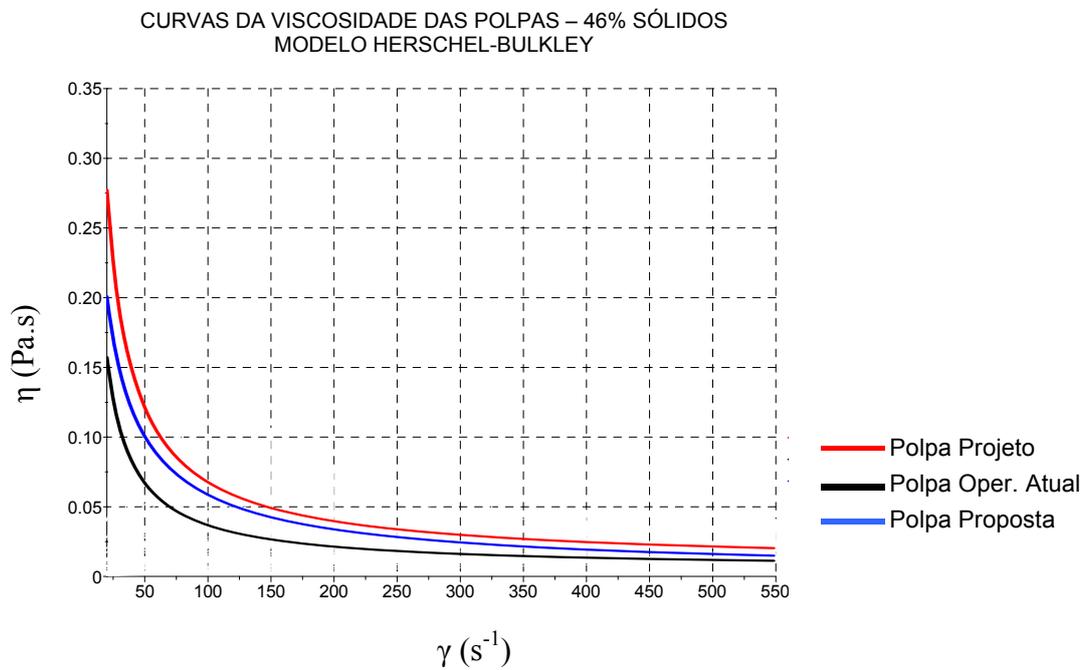


Figura 4.7 - Curvas da viscosidade aparente das polpas a 46% sólidos

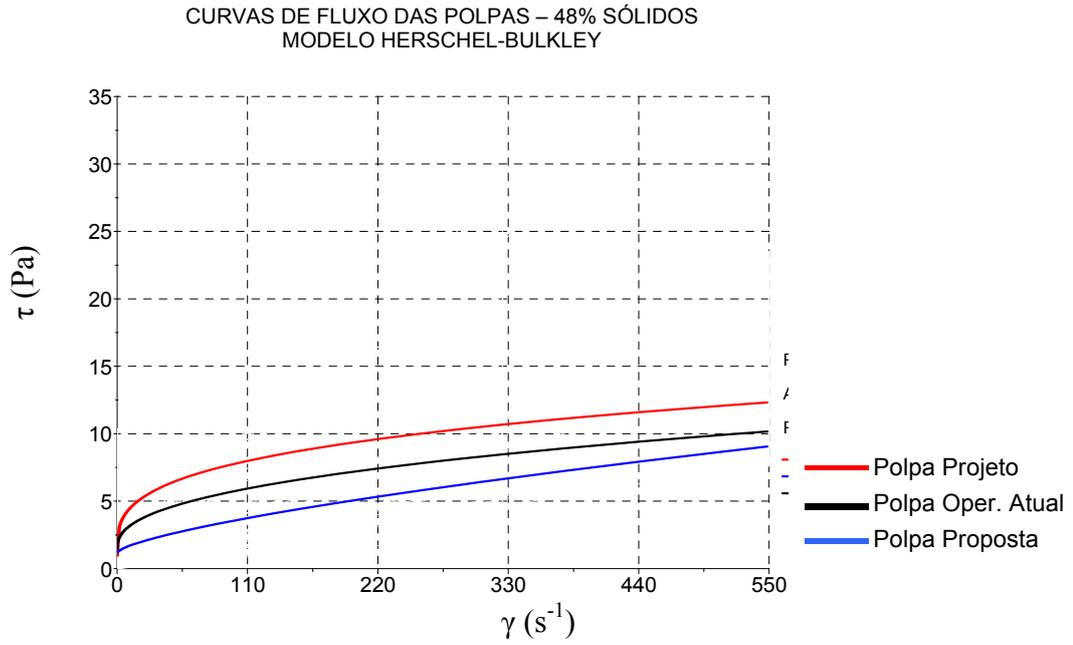


Figura 4.8 - Curvas de fluxo das polpas a 48% sólidos

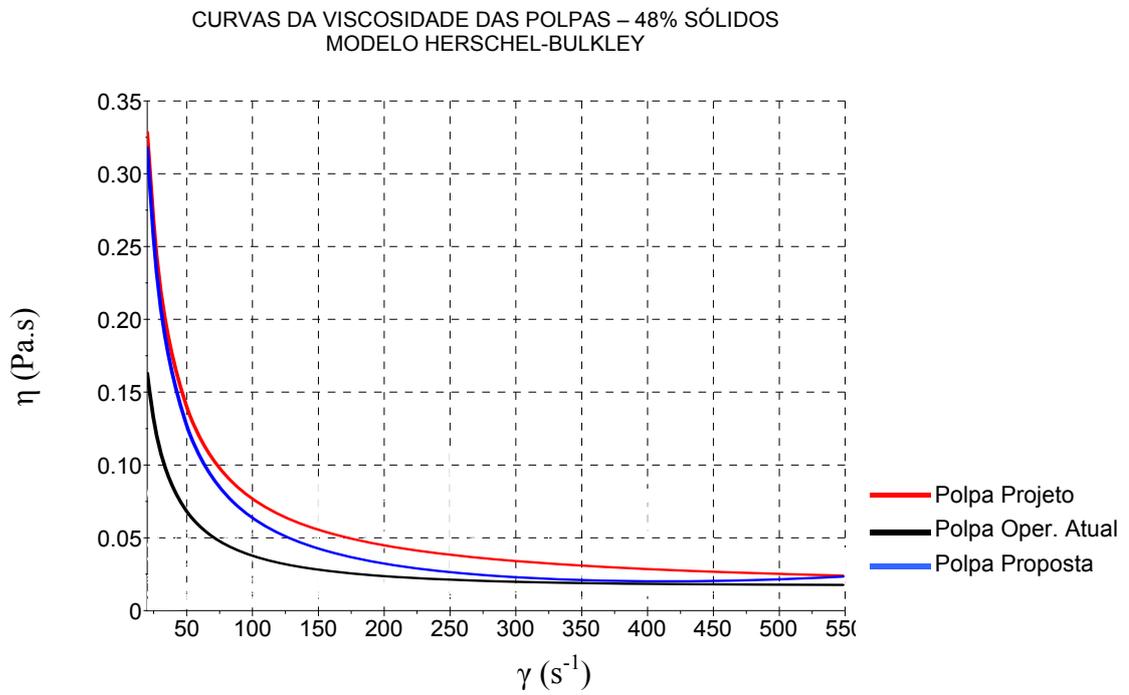


Figura 4.9 - Curvas da viscosidade aparente das polpas a 48% sólidos

CURVAS DE FLUXO DAS POLPAS – 50% SÓLIDOS
 MODELO HERSCHEL-BULKLEY

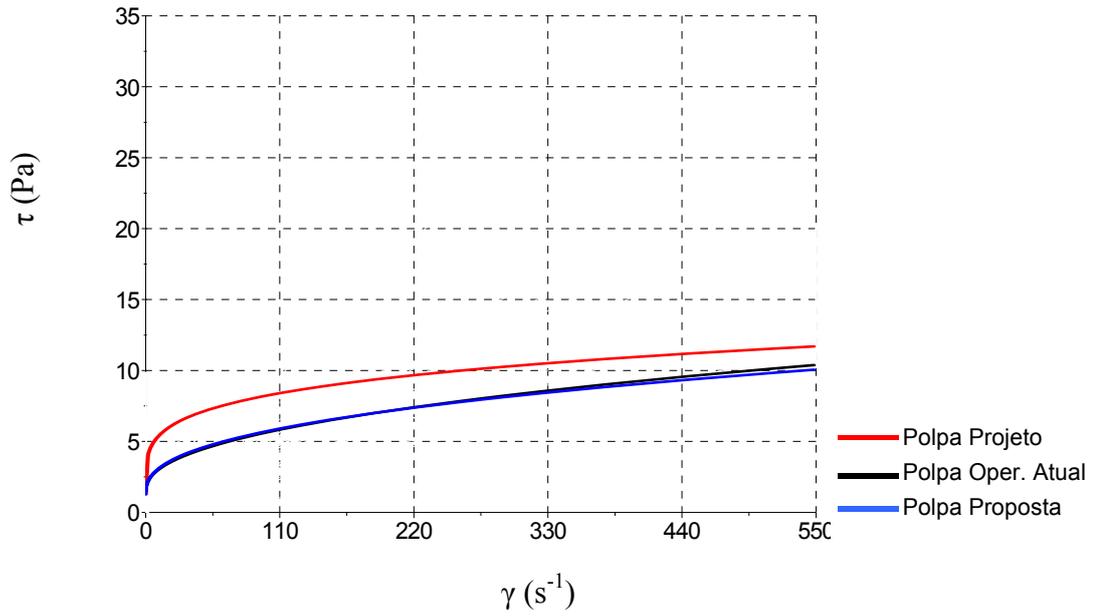


Figura 4.10 - Curvas de fluxo das polpas a 50% sólidos

CURVAS DA VISCOSIDADE DAS POLPAS – 50% SÓLIDOS
 MODELO HERSCHEL-BULKLEY

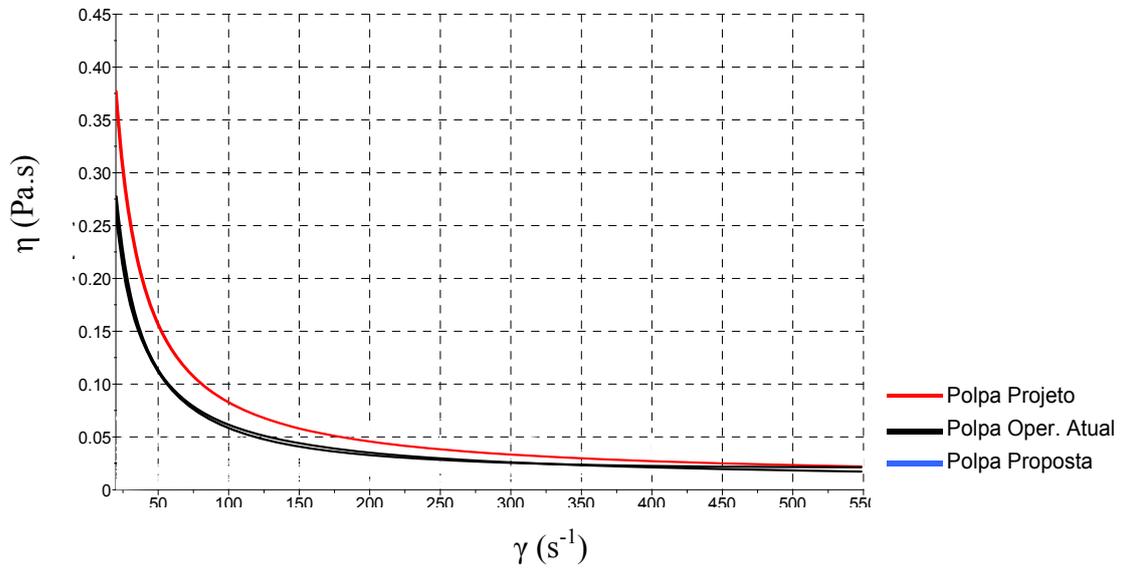


Figura 4.11 - Curvas da viscosidade aparente das polpas a 50% sólidos

CURVAS DE FLUXO DAS POLPAS – 52% SÓLIDOS
MODELO HERSCHEL-BULKLEY

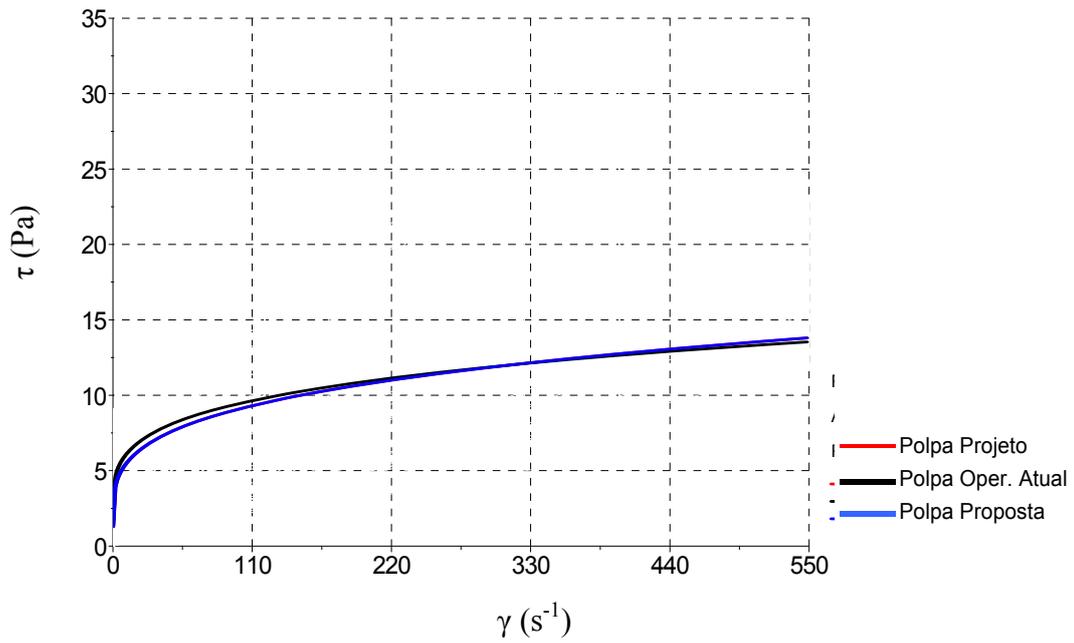


Figura 4.12 - Curvas de fluxo das polpas a 52% sólidos

CURVAS DA VISCOSIDADE DAS POLPAS – 52% SÓLIDOS
MODELO HERSCHEL-BULKLEY

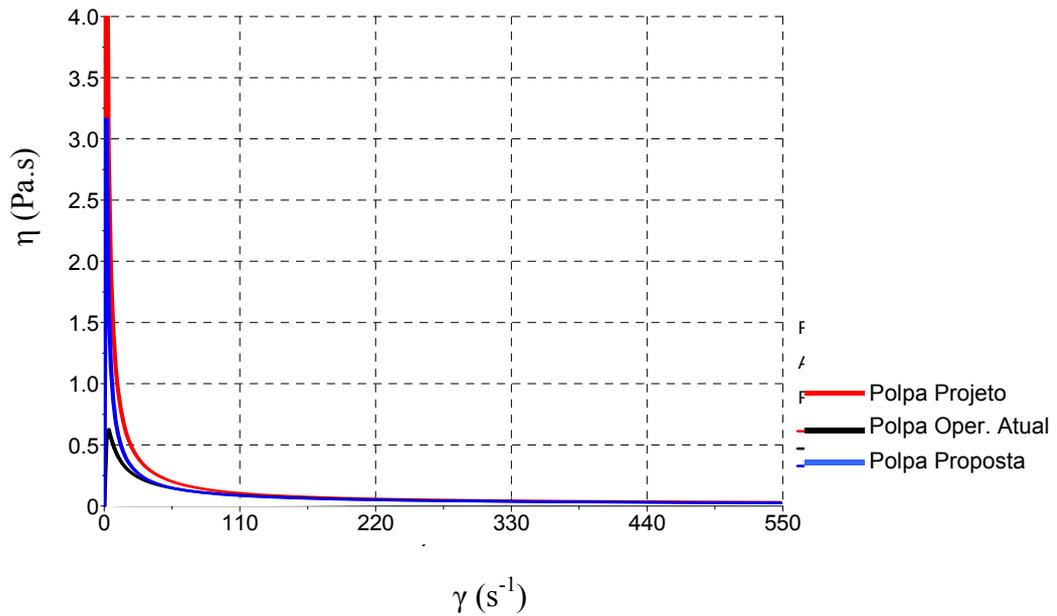


Figura 4.13 - Curvas da viscosidade aparente das polpas a 52% sólidos

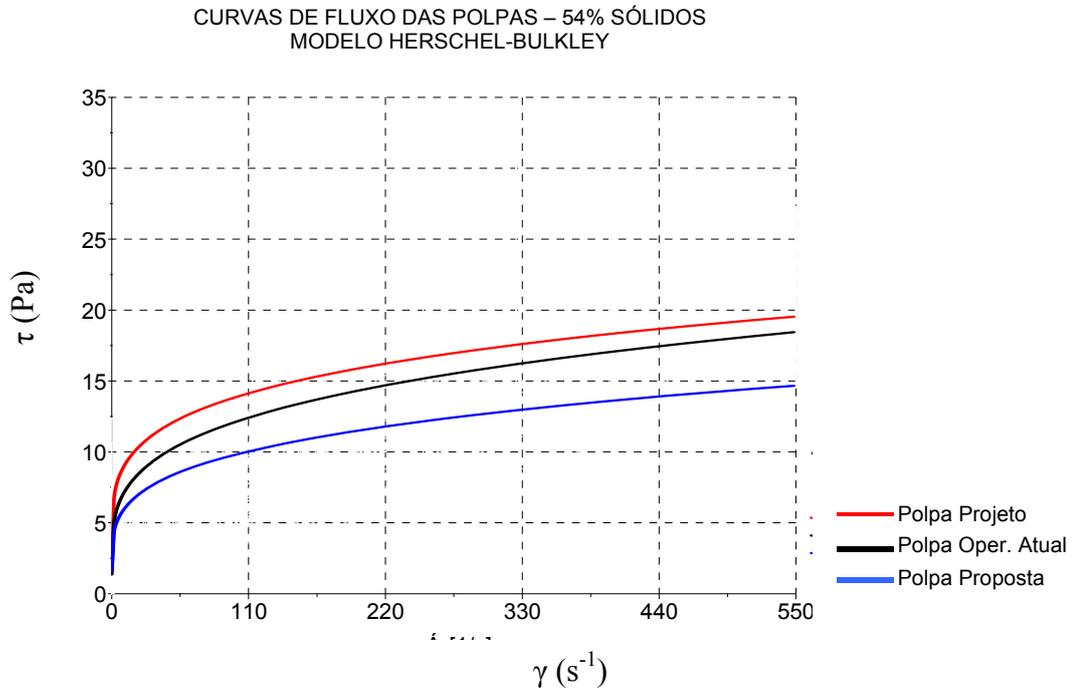


Figura 4.14 - Curvas de fluxo das polpas a 54% sólidos

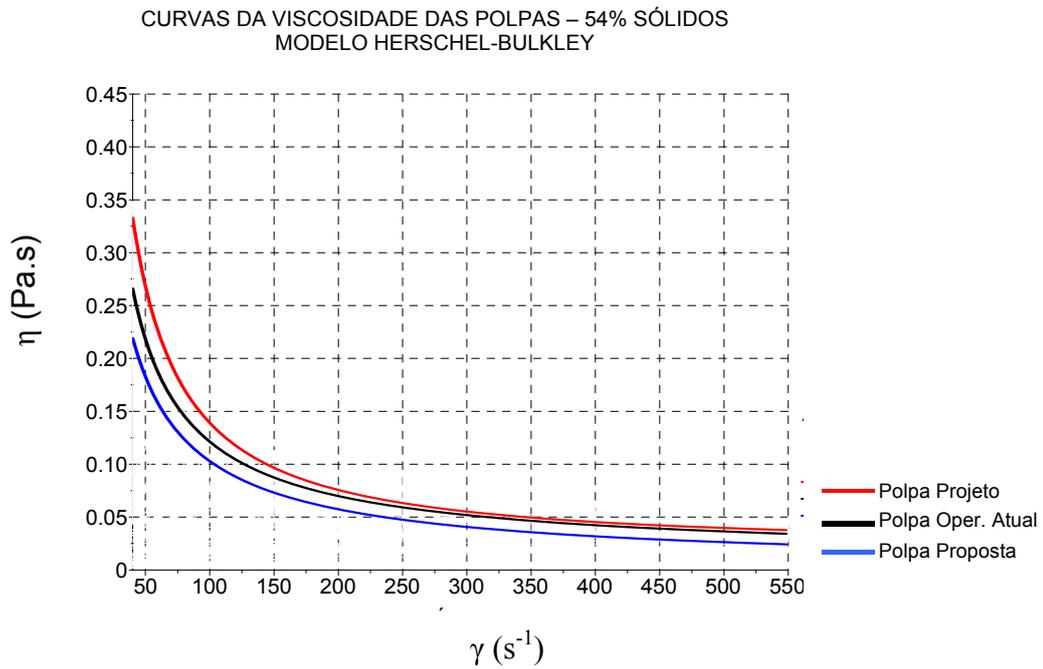


Figura 4.15 - Curvas da viscosidade aparente das polpas a 54% sólidos

Verifica-se na Tabela 4.8 que os melhores ajustes, segundo o modelo de Herschel-Bulkley, ocorreram para a polpa proposta e a polpa operação atual na concentração de sólidos em 54%. Nesta concentração a polpa do projeto apresenta uma menor correlação (R^2) e uma maior tensão inicial de escoamento (τ_0), em relação as demais polpas, podendo ser evidenciado pela distribuição granulométrica desta polpa, estando de acordo com as discussões dos resultados dos diâmetros médios, onde o seu maior diâmetro de Sauter contribui para um efeito maior interação inter-partículas, e desta maneira contribuindo para a elevação da sua viscosidade.

Tabela 4.8 – Resultados da Modelagem a 54% de sólidos

POLPA	C_w (%)	Bingham			Herschel-Bulkley			
		τ_0	η	R^2	τ_0	K	n	R^2
Projeto	54	8,697	0,021	0,637	2,009	3,465	0,252	0,735
Operação Atual	54	8,383	0,021	0,768	1,431	3,427	0,252	0,929
Proposta	54	7,894	0,018	0,695	1,592	3,493	0,227	0,847

As Figuras 4.16 a 4.19 mostram as rampas de ensaio da polpa projeto segundo a metodologia PSI, de modo a minimizar a deposição da amostra no fundo do copo. As rampas variam de 550 s^{-1} a 40 s^{-1} , em intervalos de 10 s por rampa, capturando 100 pontos em cada intervalo. Entre cada rampa há uma interrupção de 20 s, tempo suficiente para a retirada do copo, homogeneização da amostra e recolocação do copo.

Observou-se na rampa de 200 s^{-1} uma ligeira distorção dos valores de tensão e viscosidade, devido a tendência a decantação das partículas. Não comprometeu a modelagem pelo *RheoWin Data Manager*, conforme observado na Figura 4.19, resultando em um melhor ajuste dos pontos segundo o modelo de Herschel-Bulkley.

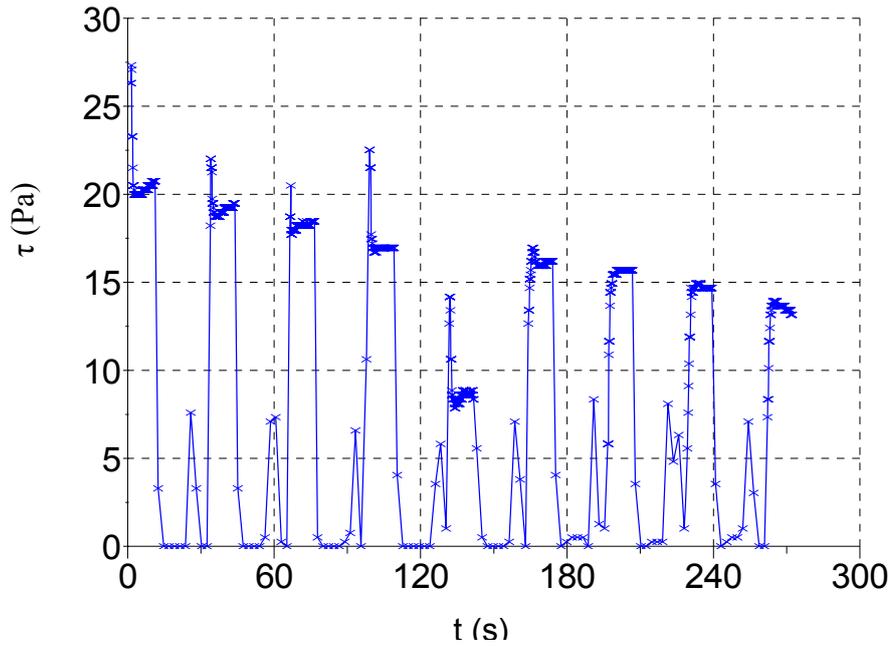


Figura 4.16 – Rampas tensão x tempo para a polpa projeto a 54% sólidos

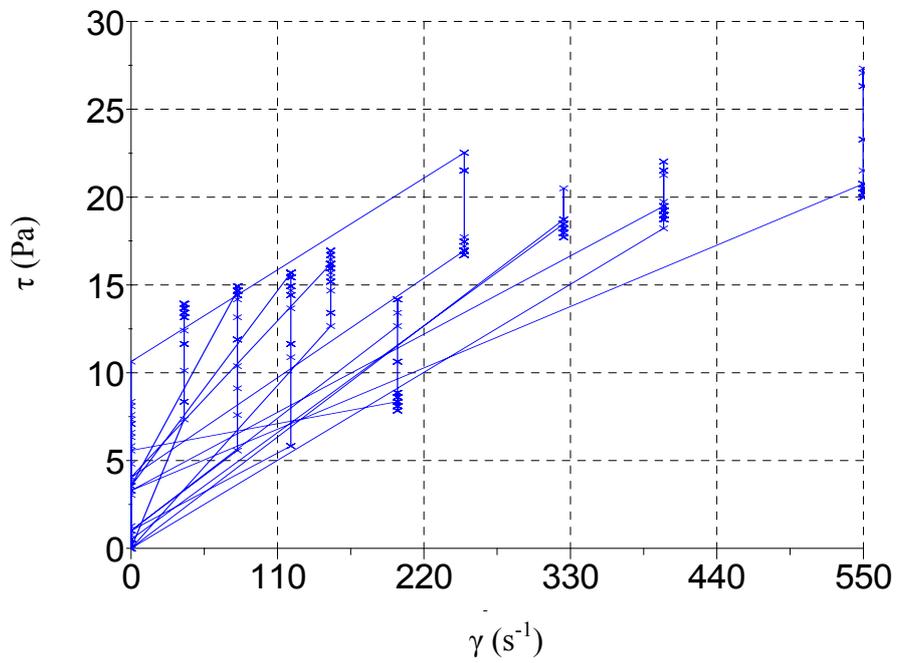


Figura 4.17 – Rampas tensão x taxa para a polpa projeto a 54% sólidos

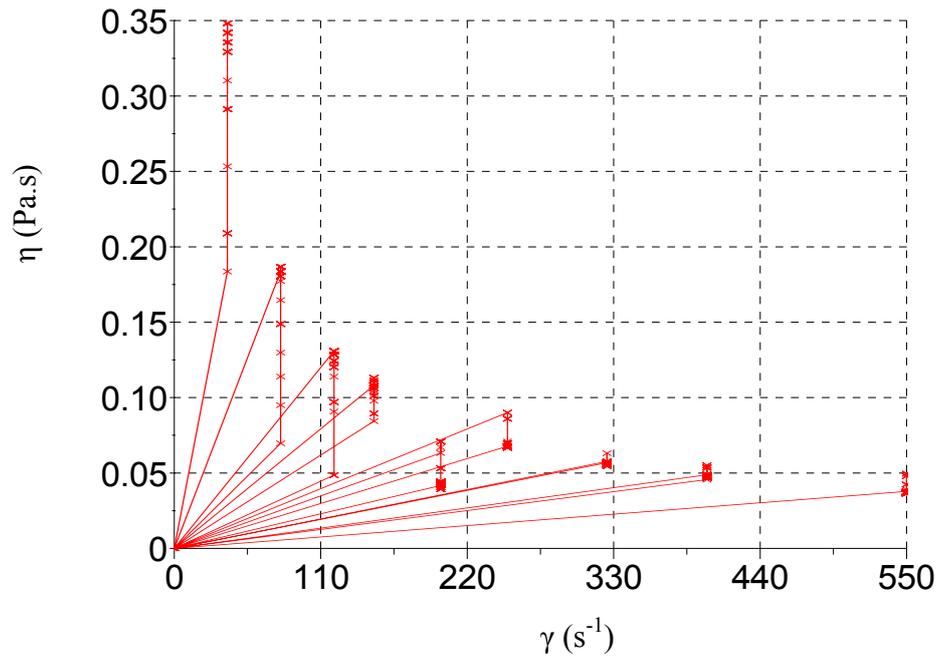


Figura 4.18 – Rampas viscosidade x taxa para a polpa projeto a 54% sólidos

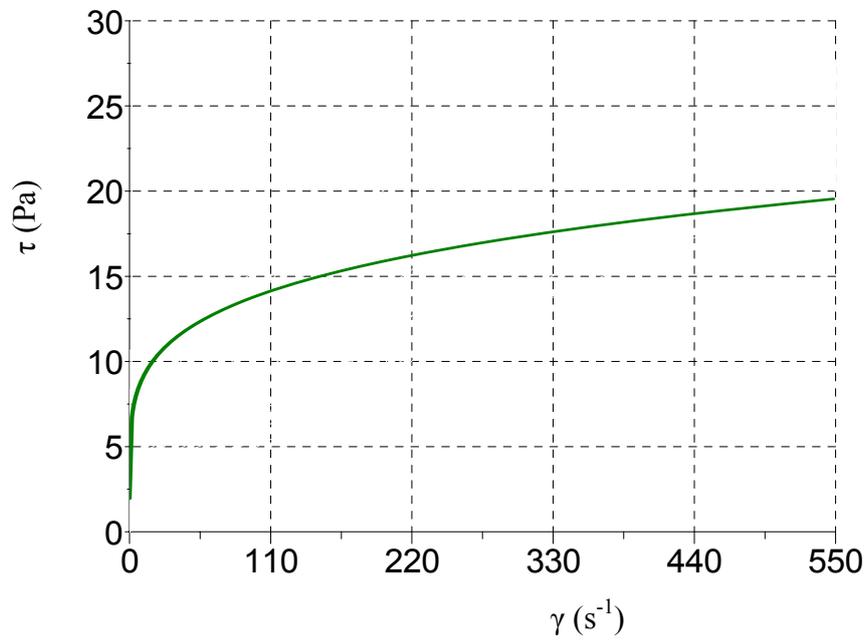


Figura 4.19 – Ajuste por Herschel-Bulkley para a polpa projeto a 54% sólidos

4.8 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS FATORES DE ATRITO

4.8.1 Considerações

Após a caracterização reológica das amostras, o passo seguinte foi a determinação de um modelo matemático para obtenção do fator de atrito para estas amostras, nas concentrações de sólidos em 46%, 48%, 50%, 52% e 54%, seguindo o modelo reológico de melhor ajuste encontrado (Herschel-Bulkley), na totalidade das amostras e seus percentuais de sólidos.

Utilizando-se então da lei da parede para a obtenção das expressões, o que foi necessário recorrer a uma velocidade característica, a qual engloba a clássica velocidade de fricção como um caso particular (QUARESMA, 2007).

A expressão resultante para a obtenção da expressão recorreu-se a clássica equação logarítmica desenvolvida por Prandtl (1925). Em seguida há o emprego da resolução numérica, via programação Fortran, utilizando-se da subrotina ZREAL do IMSL (1991), aplicada a equações não-lineares.

A consistência da correlação desenvolvida é validada através da análise do comportamento dos parâmetros adimensionais das polpas, Y (limite de escoamento adimensional) e n (índice de comportamento).

Procurou-se, também, comparar os resultados, utilizando-se dos estudos teórico-experimentais relativos a escoamentos turbulentos de fluidos não-Newtonianos desenvolvidos por Metzner (1950). Esta correlação relaciona o fator de atrito (f) com o número de Reynolds generalizado (Re_{gen}) para um fluido que segue a lei da potência.

4.8.2 Polpas ensaiadas e modeladas segundo Herschel-Bulkley

A resolução numérica via programação Fortran, procura mostrar o comportamento do fator de atrito de Fanning, com relação ao número de Reynolds generalizado, em escoamento turbulento em tubo circular, no caso do estudo o diâmetro do duto adotado é 0,60 m.

A Tabela 4.9, a seguir, apresenta os parâmetros de modelagem para resolução da expressão do fator de atrito, via Fortran, onde:

% sólidos: concentração em peso das amostras ensaiadas

D (m): diâmetro da tubulação, no caso estudado é 0,60 m

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

τ_0 : tensão limite de escoamento das amostras ensaiadas, unidade (**Pa.sⁿ**).

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

ρ_P : densidade das amostras ensaiadas, unidade (**kg/m³**).

Y: tensão limite de escoamento adimensional.

Tabela 4.9 – Parâmetros para o cálculo dos fatores de atrito

Polpa Projeto					
% Sólidos	46	48	50	52	54
D (m)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
n	0,325	0,266	0,263	0,211	0,259
τ_0 (Pa)	0,943	0,954	1,359	1,680	1,500
K (Pa.sⁿ)	0,978	1,988	1,542	3,458	2,600
ρ_P (kg/m³)	1395	1419	1444	1471	1498
Y	425,57	2,14	146,36	0,34	5,49

Polpa Operação Atual					
% Sólidos	46	48	50	52	54
D (m)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
n	0,440	0,859	0,374	0,306	0,252
τ_0 (Pa)	0,663	1,215	1,339	1,388	1,431
K (Pa.sⁿ)	0,323	0,166	0,982	1,991	3,427
ρ_P (kg/m³)	1395	1419	1444	1471	1498
Y	19904,839	43295,23	2038,19	36,10	0,37

Polpa Proposta					
% Sólidos	46	48	50	52	54
D (m)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
n	0,342	0,304	0,371	0,273	0,277
τ_0 (Pa)	0,937	1,256	1,323	1,402	1,592
K (Pa.sⁿ)	1,013	1,268	1,092	1,933	3,493
ρ_P (kg/m³)	1395	1419	1444	1471	1498
Y	339,68	382,06	1105,52	35,92	0,33

Observa-se que o limite de escoamento adimensional (**Y**) é fortemente influenciado por **K** (índice de consistência) e em menor grau pelo índice de comportamento (**n**) e em médio grau pela tensão limite de escoamento (τ_0).

De uma maneira sistemática, a partir da concentração de 50% de sólidos, o limite de escoamento adimensional (**Y**) confirma as experiências, com o acréscimo significativo da viscosidade, tornando a polpa mais viscosa e com maior resistência estrutural (molecular) ao escoamento.

4.8.3 Resultados dos fatores de atrito

A Tabela 4.10 apresenta os intervalos do número de Reynolds generalizado (**Reg**) onde os fatores do modelo (**f**) se aproximaram dos fatores da literatura teórico-experimental de Dodge e Metzner (**fdm**), com desvios insignificantes (< 1,00 %).

Tabela 4.10 – Intervalos de Reg com melhores ajustes dos fatores $f \times f_{dm}$

% Sólidos	Polpa Projeto	Polpa Operação Atual	Polpa Proposta
46	3,80E+04 - 4,90E+04	5,60E+04 - 8,20E+04	3,80E+04 - 5,10E+10
48	3,00E+04 - 3,80E+04	3,61E+05 - 1,00E+06	3,60E+04 - 4,70E+04
50	3,40E+04 - 4,10E+04	4,40E+04 - 6,00E+04	4,20E+04 - 5,80E+04
52	2,80E+04 - 3,30E+04	3,40E+04 - 4,40E+04	3,30E+04 - 4,10E+04
54	3,10E+04 - 3,80E+04	2,90E+04 - 3,60E+04	2,80E+04 - 3,40E+04

Destacado na Tabela 4.11, a seguir, a comparação destes fatores, para 50% de sólidos, que é a concentração de bombeio por mineroduto, a qual mostra que de uma maneira geral o comportamento destas polpas é semelhante, onde os melhores ajustes compreendem a faixa de 10.000 a 100.000 Reynolds (faixa média de trabalho para o escoamento turbulento de polpas de minério, homogêneas e heterogêneas).

Verificou-se também que, de uma maneira geral, as demais concentrações de sólidos (46%, 48%, 52% e 54%), para estas mesmas polpas, os desvios entre (**f**) e (**fdm**) situam-se nos intervalos de 10 a 30% , o que não inviabiliza um ou outro modelo, pois situam-se dentro dos fatores de projetos usualmente adotados (20 a 40%).

A simulação evidencia a concordância entre os modelos estudados em todas as três polpas, modelando o fator de atrito de Fanning (**f**), em escoamento turbulento, em uma correlação desenvolvida para um fluido de Herschel-Bulkley e em seguida fazendo-se a comparação do fator de atrito (**fdm**) com a correlação proposta por Dodge e Metzner (1959).

Tabela 4.11 - Intervalos de Reg, para 50% sólidos, com melhores ajustes dos fatores f x fdn

Polpa Projeto							
% Sólidos	Reg	f	fdm	Reg*f	Reg*fdm	% Dif.	Reg (%Dif. < 1,00%)
50	3.000	4,0263E-03	2,9218E-03	12,0789	8,7653	27,43	3,40E+04 - 4,10E+04
	5.000	3,0961E-03	2,4517E-03	15,4806	12,2586	20,81	
	10.000	2,2498E-03	1,9642E-03	22,4984	19,6416	12,70	
	50.000	1,2180E-03	1,2476E-03	60,9001	62,3775	-2,43	
	100.000	9,7440E-04	1,0488E-03	97,4398	104,8830	-7,64	
	300.000	7,0995E-04	8,1463E-04	212,9840	244,3880	-14,74	
	500.000	6,2067E-04	7,3031E-04	310,3370	365,1540	-17,66	
	1.000.000	5,2294E-04	6,3436E-04	522,9380	634,3560	-21,31	
Polpa Operação Atual							
% Sólidos	Reg	f	fdm	Reg*f	Reg*fdm	% Dif.	Reg (%Dif. < 1,00%)
50	3.000	5,4045E-03	4,0309E-03	16,2136	12,0926	25,42	4,40E+04 - 6,00E+04
	5.000	4,2217E-03	3,4137E-03	21,1086	17,0684	19,14	
	10.000	3,1435E-03	2,7665E-03	31,4351	27,6646	11,99	
	50.000	1,7992E-03	1,7977E-03	89,9616	89,8834	0,09	
	100.000	1,4696E-03	1,5240E-03	146,9570	152,4020	-3,71	
	300.000	1,1016E-03	1,1977E-03	330,4850	359,3220	-8,73	
	500.000	9,7429E-04	1,0791E-03	487,1430	539,5360	-10,76	
	1.000.000	8,3264E-04	9,4313E-04	832,6380	943,1300	-13,27	
Polpa Proposta							
% Sólidos	Reg	f	fdm	Reg*f	Reg*fdm	% Dif.	Reg (%Dif. < 1,00%)
50	3.000	4,0263E-03	2,9218E-03	12,0789	8,7653	27,43	3,40E+04 - 4,10E+04
	5.000	3,0961E-03	2,4517E-03	15,4806	12,2586	20,81	
	10.000	2,2498E-03	1,9642E-03	22,4984	19,6416	12,70	
	50.000	1,2180E-03	1,2476E-03	60,9001	62,3775	-2,43	
	100.000	9,7440E-04	1,0488E-03	97,4398	104,8830	-7,64	
	300.000	7,0995E-04	8,1463E-04	212,9840	244,3880	-14,74	
	500.000	6,2067E-04	7,3031E-04	310,3370	365,1540	-17,66	
	1.000.000	5,2294E-04	6,3436E-04	522,9380	634,3560	-21,31	

4.8.4 Tabelas e curvas ilustrativas dos fatores (f) e (fdm)

As Tabelas 4.12 a 4.14 e as respectivas Figuras 4.20 a 4.25 mostram os fatores de atrito de Fanning (f) e os produtos ($f \cdot \text{Reg}$), segundo modelo de Herschel-Bulkley, em função dos índices de comportamento (n) das polpas ensaiadas. Observa-se nestas tabelas, de maneira semelhante nas três polpas, que o fator de atrito possui o comportamento esperado, ou seja, diminui segundo o acréscimo do número de Reynolds generalizado em todas as suas concentrações. Destaca-se, porém, desvios mais significativos na polpa projeto, para Reg entre 100.000 e 1.000.000 nas concentrações de 50, 52 e 54% sólidos, onde o fator de atrito teve um decréscimo mais sensível em comparação com as outras polpas (proposta e operação atual).

Tabela 4.12 – Fator de atrito (f) x n ; Produto f.Re x n para polpa projeto

Fatores de Fanning (f) x n					
Reg	n				
	0,440	0,859	0,374	0,306	0,252
3.000	4,7279E-03	3,8560E-03	4,0263E-03	3,2675E-03	3,8219E-03
5.000	3,6881E-03	3,0115E-03	3,0961E-03	2,5051E-03	2,9696E-03
10.000	2,7319E-03	2,2221E-03	2,2498E-03	1,8059E-03	2,1791E-03
50.000	1,5368E-03	1,2252E-03	1,2180E-03	9,5230E-04	1,1915E-03
100.000	1,2460E-03	9,8370E-04	9,7440E-04	7,5294E-04	9,5445E-04
300.000	9,2423E-04	7,1903E-04	7,0995E-04	5,3920E-04	6,9574E-04
500.000	8,1382E-04	6,2919E-04	6,2067E-04	4,6797E-04	6,0818E-04
1.000.000	6,9172E-04	5,3059E-04	5,2294E-04	3,9069E-04	5,1225E-04

Produto f.Reg x n					
Reg	n				
	0,440	0,859	0,374	0,306	0,252
3.000	14,1838	11,5681	12,0789	9,8026	11,4657
5.000	18,4405	15,0574	15,4806	12,5254	14,8477
10.000	27,3188	22,2214	22,4984	18,0586	21,7905
50.000	76,8406	61,2613	60,9001	47,6149	59,5765
100.000	124,6000	98,3696	97,4398	75,2942	95,4450
300.000	277,2680	215,7090	212,9840	161,7610	208,7220
500.000	406,9120	314,5920	310,3370	233,9840	304,0900
1.000.000	691,7220	530,5850	522,9380	390,6870	512,2520

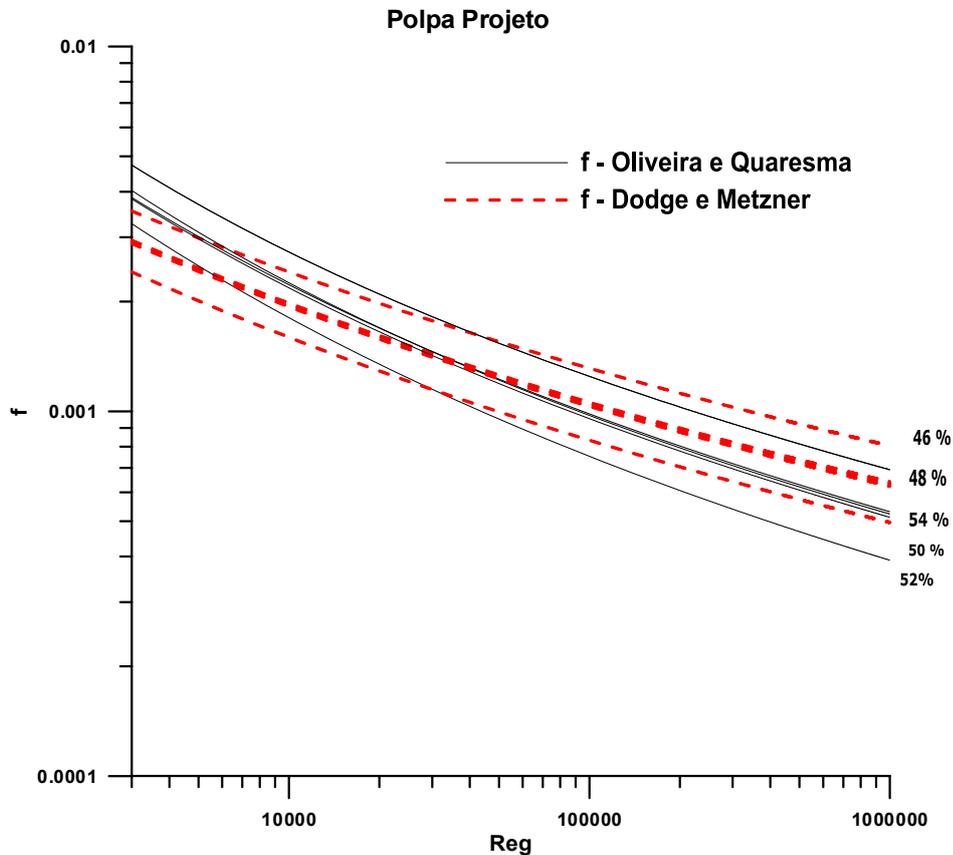


Figura 4.20 – Curvas dos fatores de atrito f x Reg para a polpa projeto

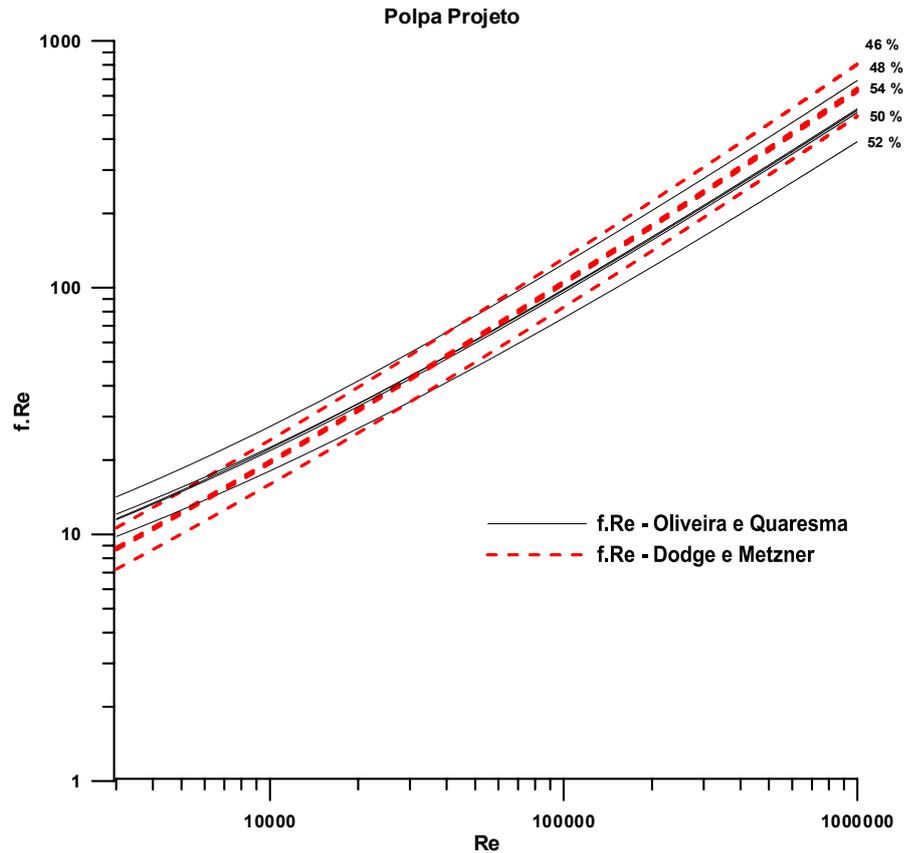


Figura 4.21 - Curvas dos produtos $f.Re \times Reg$ para a polpa projeto

Tabela 4.13 - Fator de atrito (f) \times n ; Produto $f.Re \times n$ para polpa operação atual

Fatores de Fanning (f) \times n					
Reg	n				
	0,440	0,859	0,374	0,306	0,252
3.000	6,6310E-03	1,4784E-02	5,4045E-03	4,3676E-03	3,6671E-03
5.000	5,0999E-03	1,0358E-02	4,2217E-03	3,4271E-03	2,8605E-03
10.000	3,7637E-03	7,4062E-03	3,1435E-03	2,5486E-03	2,1057E-03
50.000	2,1674E-03	4,5491E-03	1,7992E-03	1,4328E-03	1,1532E-03
100.000	1,7819E-03	3,8697E-03	1,4696E-03	1,1593E-03	9,2321E-04
300.000	1,3501E-03	3,0736E-03	1,1016E-03	8,5670E-04	6,7201E-04
500.000	1,1997E-03	2,7840E-03	9,7429E-04	7,5307E-04	5,8700E-04
1.000.000	1,0314E-03	2,4508E-03	8,3264E-04	6,3866E-04	4,9393E-04

Produto $f.Reg \times n$					
Reg	n				
	0,440	0,859	0,374	0,306	0,252
3.000	19,8931	44,3512	16,2136	13,1029	11,0012
5.000	25,4993	51,7919	21,1086	17,1354	14,3025
10.000	37,6368	74,0621	31,4351	25,4860	21,0572
50.000	108,3690	227,4550	89,9616	71,6393	57,6603
100.000	178,1880	386,9670	146,9570	115,9270	92,3211
300.000	405,0220	922,0760	330,4850	257,0100	201,6020
500.000	599,8240	1391,9900	487,1430	376,5340	293,5010
1.000.000	1031,3700	2450,8100	832,6380	638,6550	493,9260

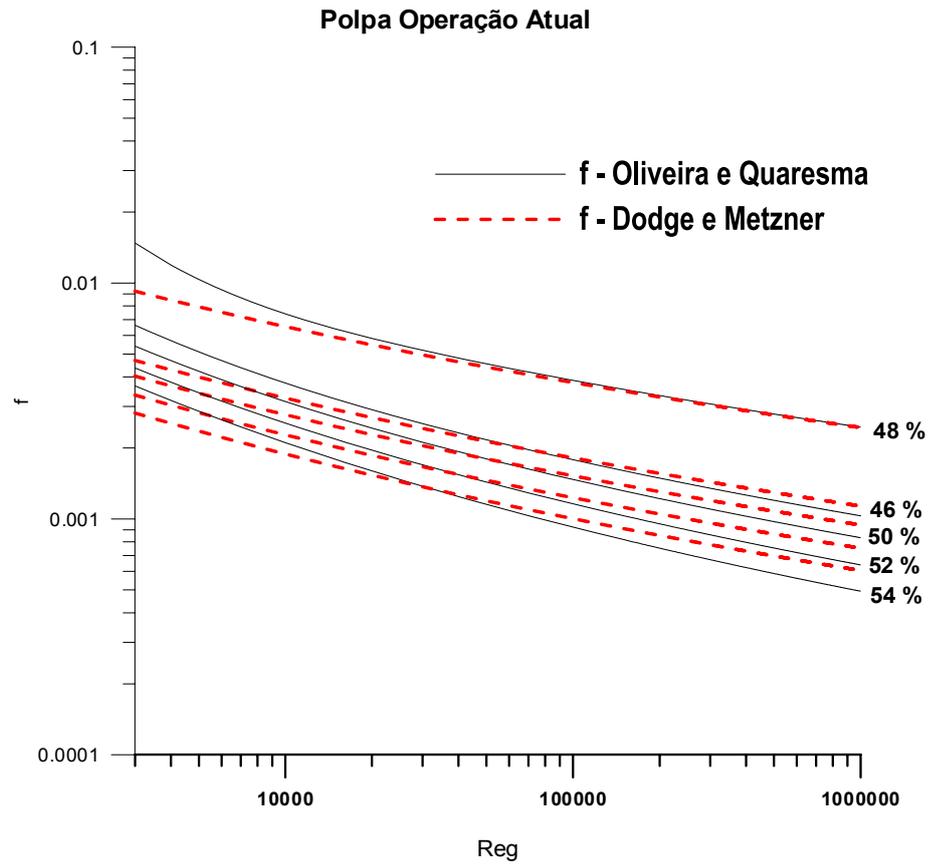


Figura 4.22 - Curvas dos fatores de atrito $f \times \text{Reg}$ para a polpa operação atual

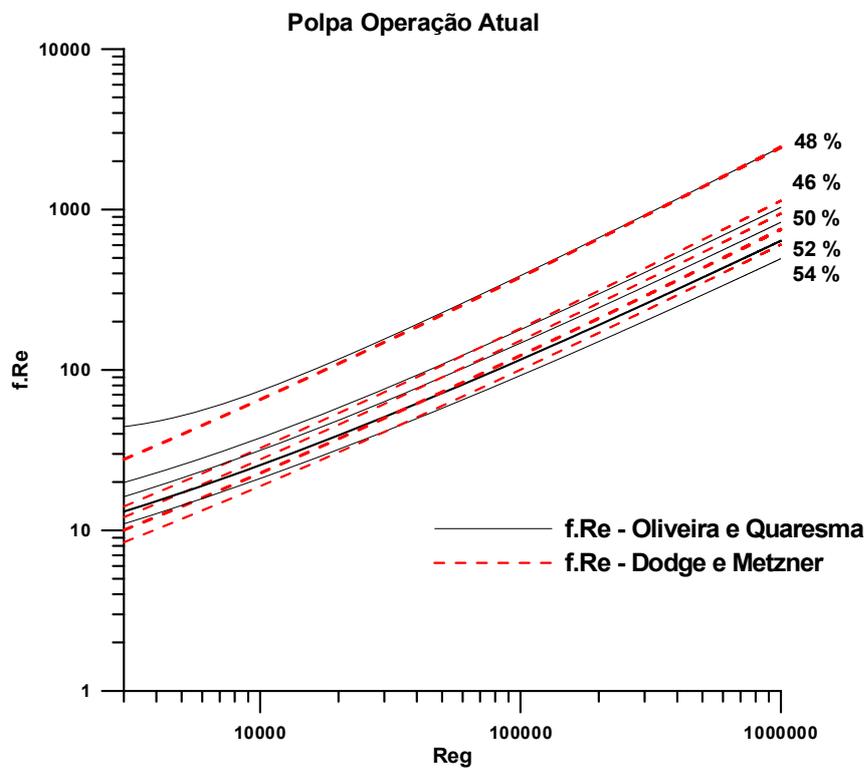


Figura 4.23 - Curvas dos produtos $f.\text{Reg} \times \text{Reg}$ para a polpa operação atual

Tabela 4.14 - Fator de atrito (f) x n ; Produto f.Re x n para polpa proposta

Fatores de Fanning (f) x n					
Re	n				
	0,440	0,859	0,374	0,306	0,252
3.000	4,8787E-03	4,5071E-03	5,2937E-03	4,0435E-03	3,4216E-03
5.000	3,8282E-03	3,4966E-03	4,1521E-03	3,1384E-03	2,6424E-03
10.000	2,8551E-03	2,5721E-03	3,1025E-03	2,3035E-03	1,9219E-03
50.000	1,6245E-03	1,4283E-03	1,7809E-03	1,2650E-03	1,0299E-03
100.000	1,3217E-03	1,1530E-03	1,4548E-03	1,0158E-03	8,1857E-04
300.000	9,8476E-04	8,5043E-04	1,0903E-03	7,4324E-04	5,9024E-04
500.000	8,6863E-04	7,4716E-04	9,6416E-04	6,5077E-04	5,1366E-04
1.000.000	7,3985E-04	6,3331E-04	8,2379E-04	5,4926E-04	4,3024E-04

Produto f.Reg x n					
Re	n				
	0,440	0,859	0,374	0,306	0,252
3.000	14,6361	13,5211	15,8810	12,1304	10,2647
5.000	19,1408	17,4830	20,7602	15,6920	13,2122
10.000	28,5510	25,7211	31,0251	23,0345	19,2188
50.000	81,2268	71,4144	89,0425	63,2506	51,4934
100.000	132,1730	115,3020	145,4800	101,5770	81,8573
300.000	295,4290	255,1280	327,1030	222,9710	177,0730
500.000	434,3150	373,5770	482,0810	325,3830	256,8280
1.000.000	739,8530	633,3140	823,7870	549,2630	430,2430

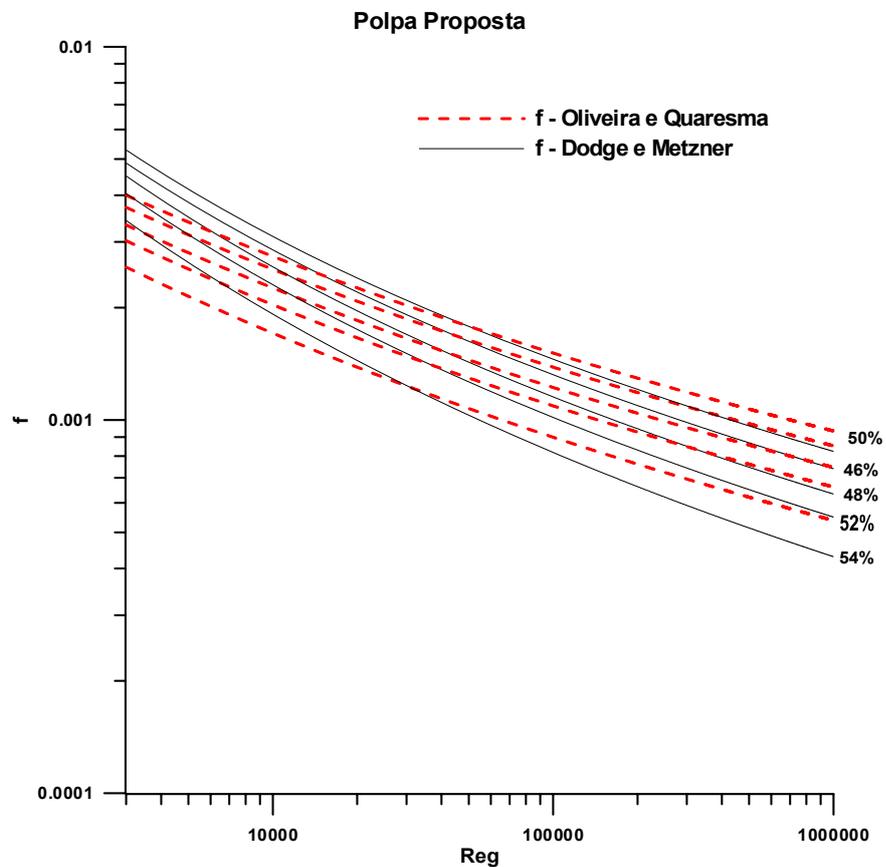


Figura 4.24 - Curvas dos fatores de atrito f x Reg para a polpa proposta

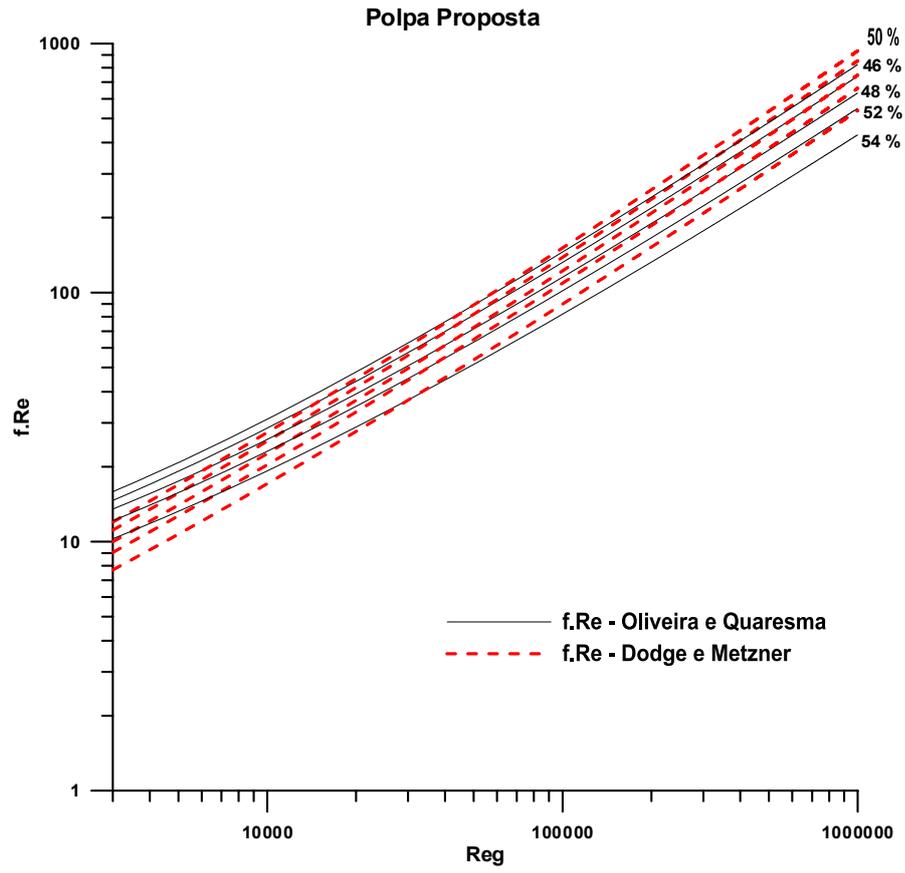


Figura 4.25 - Curvas dos produtos $f.Re \times Reg$ para a polpa proposta

CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A análise instrumental (MEV e EDS) complementada pelos ensaios físico-químicos comprova a variabilidade das amostras, em função dos seus depósitos de origem e também evidenciam a heterogeneidade morfológica das amostras, demonstrando a presença de agregados de partículas de menor tamanho e de formato característico da caulinita.

Estas constatações reforçam a importância dos ensaios de reologia como fortes aliados a caracterização dos minérios nas diversas etapas do beneficiamento e manuseios, tais como moagem, ciclonação, espessamento e bombeamento das polpas a longa distância através de minerodutos.

Os resultados experimentais mostraram que as polpas são fluidos viscoplásticos, de modelo Herschel-Bulkley, e que a granulometria e a concentração de sólidos são parâmetros relevantes na determinação da viscosidade.

Verificou-se a estabilidade reológica das polpas, mesmo com a grande sensibilidade ao cisalhamento, ocorrendo a diminuição da viscosidade e tensão de cisalhamento (*shear thinning*), face ao acréscimo gradual da taxa de cisalhamento, evidenciado nas curvas de histerese estudadas. Não foi detectada a propriedade da tixotropia, muito comum em argilominerais.

Pequenos traços de reopexia, a taxa constante de 200 s^{-1} , são insignificantes aos processos de bombeamento e demais operações de manuseio das polpas nas instalações de beneficiamento e mineroduto.

A reopexia, evidenciada pela histerese apresentada confirma a maior sensibilidade a concentração de sólidos as polpas com maior participação de finos, na seguinte ordem: Proposta, Operação Atual e Projeto.

Verificou-se que de uma maneira geral há a concordância entre os modelos estudados nas três polpas, modelando o fator de atrito de Fanning (f), em escoamento turbulento, em uma correlação desenvolvida para o modelo de Herschel-Bulkley e em seguida fazendo-se a comparação do fator de atrito com a correlação proposta por Dodge e Metzner (1959).

Muito importante a comparação destes fatores, para 50% de sólidos, que é a concentração de bombeio por mineroduto, a qual mostra que o comportamento das polpas estudadas é semelhante, sendo os melhores ajustes para a faixa de 10.000 a 100.000 Reynolds (faixa média de trabalho para o escoamento turbulento de polpas de minério, homogêneas e heterogêneas).

Sugestões de Trabalhos Futuros

- ✓ Análise da influência do pH no comportamento reológico das polpas de bauxita;
- ✓ Análise de velocidades críticas de escoamento de polpas de bauxita com e sem adição de dispersantes;
- ✓ Estudos de química de superfície das polpas de bauxita, com observação dos fenômenos de adsorção e a formação da dupla camada elétrica na interface sólido-líquido, permitindo deste modo a determinação de forças repulsivas entre as partículas visando a superação das forças atrativas de van der Waals, resultando em polpas mais estáveis e defloculadas;
- ✓ Avaliação em polpas de bauxita, através da Teoria DLVO Clássica, a Energia de Interação total em função das distâncias de separação entre as partículas com a adição e sem a adição de dispersantes e variação de pH;
- ✓ Estudo de velocidades de sedimentação das polpas com diferentes granulometrias e percentuais de sólidos;
- ✓ Estudo da influência da composição mineralógica na viscosidade da polpa.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, D. G.; NASCIMENTO, C. R. Propriedades Reológicas da Polpa de Bauxita – II – Avaliação do Rotor Tipo Vane . Jornada de Iniciação Científica, 15, Rio de Janeiro, 2009. **Anais...**Rio de Janeiro: CETEM/MCT,. p. 1-7, 2009.
- BAILEY, W.; WEIR, I. S. Investigation of Methods for direct Rheological Model Parameter Estimation, **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 21, n. 1-2, pp. 1-33, 1998.
- BARBATO, C. N. **Estudo Reológico da Polpa de Bauxita**, 2009. Exame de Qualificação (Doutorado) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2009.
- BARNES, H. A. Thixotropy: A Review. **Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 70, n. 1-2, p.1-33, 1977.
- BARNES, H. A.; HUTTON, J.F.; WALTERS, K. **An Introduction to rheology**. 1ed. New York: Elsevier, 1989. p. 199 (Rheology Series 3)
- BENNETT, C. O.; MYERS, J. E. **Fenômenos de Transporte, Quantidade de Calor e Massa, McGraw-Hill**, 1978.
- BENNETT, H.; REED, R. A. **Chemical Methods of Silica Analysis: A Handbook**. Academic Press Inc: London, 1971, p. 272.
- BHATTACHARYA, I. N.; PANDA, D. & BANDOPADHYAY, P. Rheological behaviour of nickel laterite suspension. **International Journal Mineral Processing**, vol. 53, p. 251- 263, 1998.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. New York :John Wiley & Sons, , 1960, 280p.
- DANA-HURLBUT. **Manual de Mineralogia**. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., v. 1, p. 341-342. Reimpressão, 1976.
- DODGE, D. W.; METZNER, A. B. Turbulent Flow of Non-Newtonian Fluids. **AIChE Journal**. v. 5, n. 2, p. 189-204. June, 1959.
- FURMAN, N. H. **Standard Methods o f Chemical Analysis**. Robert Krieger Publishing Co. New York, 1975.
- GANDHI, R.; WESTON, M.; TALAVERA, M.; BRITTES, G. P.; BARBOSA, E. Design and Operation of the World`s First Long Distance Bauxite Slurry Pipeline. **Light Metals**, 2008, p. 95-100.
- GARCIA, F.; LE BOLAY, N.; FRANCES, C. Rheological behaviour and related granulometric properties of dense aggregated suspensions during an ultrafine comminution process. **Powder Tecnology**, v. 130, p. 407-414, 2003.
- HE, M.; WANG, Y. & FORSSBERG, E. Slurry rheology inwet ultrafine grinding of industrial minerals: a review – **Powder Technology**, 2004, vol. 147, p. 94 – 112.

HOLLITT; M. J.; CRISP; A. J. ; STAKER; W. S. ; ROE; G. M.; RODDA; D. P. **Process for removing reactive silica from a bayer process feedstock.** United States Patent Number 6,309,615 (2001).

IMSL Library, 1991, Math/Lib, Houston, TX.

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

LEIGHTON, E. S.; PITTS, D. R. **Fenômenos de Transporte.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.

MACÊDO, E. N. Métodos Numéricos. Mestrado Profissionalizante UFPA – ALBRÁS S/A, p. 1, 2002.

MACHADO, J. C. V. Reologia e Escoamento de Fluidos. Rio de Janeiro, Interciência, 2002

MALIN, M. R. Turbulent Pipe Flow of Power-Law Fluids, **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, Vol. 24, No. 7, pp. 977-988, 1977.

MAXEY, J.; **Baker Hughes Drilling Fluids.** Thixotropy and Yield Stress Behavior in Drilling Fluids . USA: AADE – American Association of Drilling Engineers – 2007.

MINA DE BAUXITA PARAGOMINAS. **Memorial Descritivo do Processo de Beneficiamento.** Minerconsult, 2005.

MINA DE BAUXITA PARAGOMINAS. **Metodologia Haake - PSI**, 2007. PSI do Brasil

MINA DE BAUXITA PARAGOMINAS. **Relatório de Reavaliação de Reservas ...** Belo Horizonte, MG.: Departamento de Planejamento, 2009.

METZNER, A. B. ; REED, J. C. Flow of Non-Newtonian Fluids – Correlation of Laminar, Transition and Turbulent Flow Regions. **AIChE J.** , v.1, n. 4, p. 434-440, 1955

NASCIMENTO, C. R. **Caracterização e determinação do comportamento de consolidação da polpa de bauxita.** REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, p. 325-329, abr. jun. 2010.

NASCIMENTO, C. R. **Reologia e Reometria Aplicadas ao Estudo de Polpas Mineraias.** Rio de Janeiro, Brasil: CETEM/MCT, 2008. 53 pp. (Séries Rochas e Mineraias Industriais, v. 11).

NASCIMENTO, C. R. **Ensaio em Reômetro Rotacional Tipo Cilindros Coaxiais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

NGUYEN, Q. D. ; BOGER, D. V. Application of rheology to solving tailings disposal problems. **International Journal of Mineral Processing.** v. 54. N. 3-4, p. 217-233, 1998.

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

OLIVEIRA, R. P. **Lei do Atrito para Escoamento Turbulento de Fluidos Não-Newtonianos utilizando os Modelos Reológicos de Herschel-Bulkley e Mizrari-**

Berk. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará. Belém, 2007

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Chemical Engineer's Handbook.** 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1974.

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

ROCHA, L. L. V. **Modelagem do Reinício do Escoamento de um Fluido de Perfuração Tixotrópico,** Exame de Qualificação ao Mestrado – Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C. ; DUTRA, A. J. B.; Bauxita. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (Ed.). **Rochas e Minerais Industriais.** 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005, pp. 279-305.

SAMPAIO, L. C.; NASCIMENTO, C. R. Propriedades Reológicas da Polpa de Bauxita - I. Estudo da Influência da Concentração e da Distribuição Granulométrica. In.: JORNADA DA INICIAÇÃO CIENTÍFICA , 14. – Rio de Janeiro. **Anais.** CETEM/MCT, 2007.

SKELLAND, A. H. P. **Non-Newtonian Flow and Heat Transfer.** New York: John Wiley & Sons , 1967.

SOFRÁ, F.; BOGER, D. V. Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. **Chemical Engineering Journal**, v. 86, n. 3, p. 319 – 330, 2002.

SCHRAMM, G., **Reologia e Reometria: Fundamentos Teóricos e Práticos.** São Paulo: Artliber Editora, 2006.

WHITE, F. M.; **Viscous Fluid flow.** 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

ZHONGWU, Z.; SCALES, P. J. & BOGER, D. V. Chemical and physical control of the rheology of concentrated metal oxide suspensions. **Chemical Engineering Science**, vol. 56, p. 2901-2920, 2001.

ZHONGWU, Z.; SOLOMON, M. J.; SCALES, P. J.; BOGER, D. V. **The yield stress of concentrated flocculated suspensions of size distributed particles.** Australian. Research Centre, Department of Chemical Engineering Advanced Mineral Products, University of Melbourne, 1998.

ANEXO A - Metodologia PSI

A PSI treinou os técnicos da CVRD para que fosse executado o teste com polpa de bauxita no sistema MV1. Após a instalação do Programa do Haake, os seguintes passos devem ser adotados:

- a) Clique com o mouse no ícone “Rheowin 3 Job Manager” na área de trabalho do computador para abrir o programa. O ícone se encontra na figura 1:

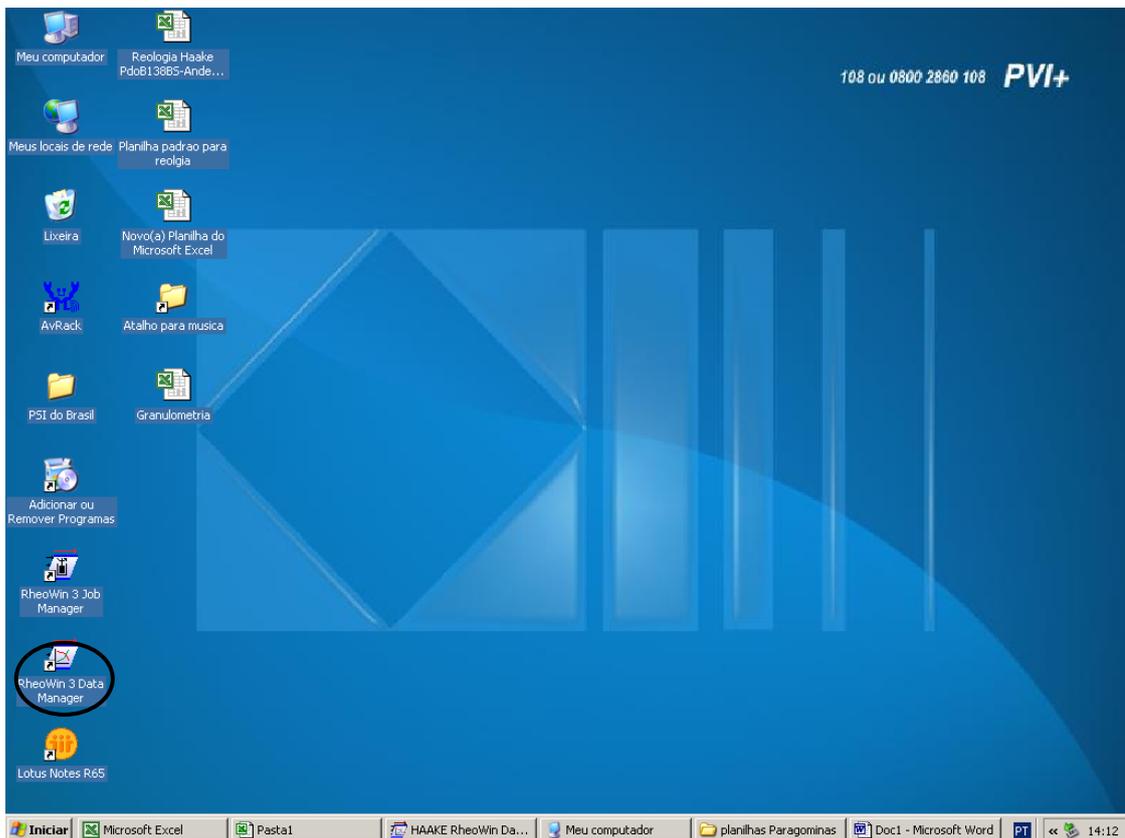


Figura 1.

O programa do Haake será aberto conforme figura 2:

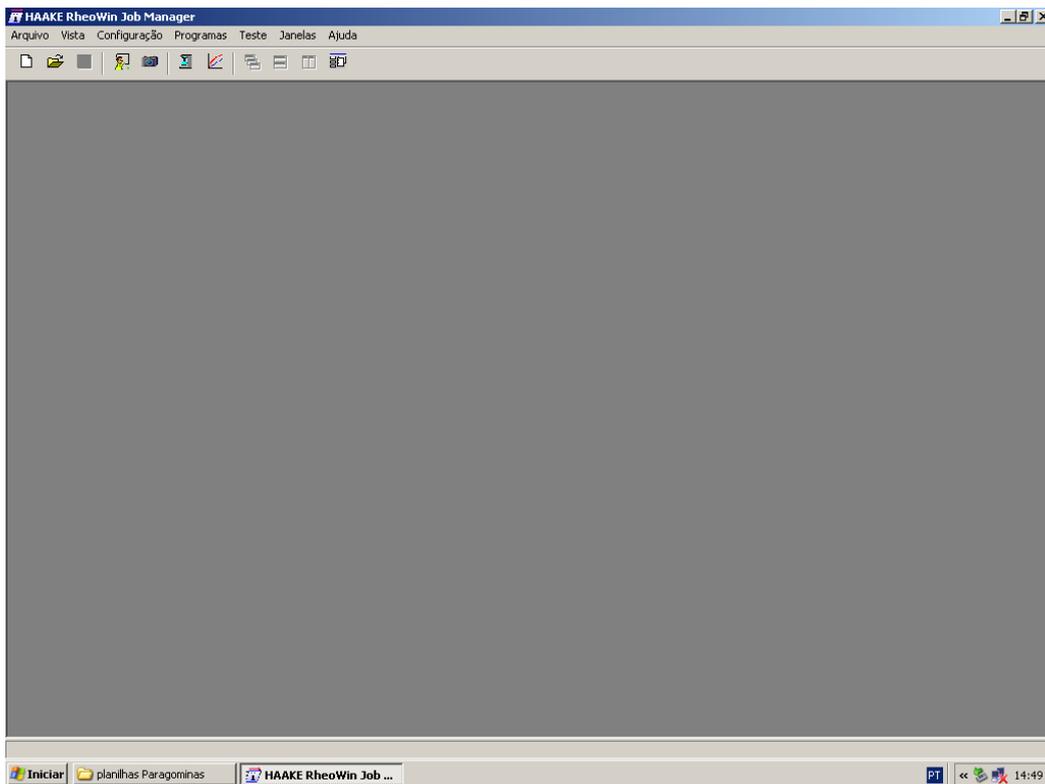


Figura 2.

b) Programe a seqüência de teste da seguinte forma:

b1) Clique com o mouse em “Vista”. Selecione “Elemento”, como mostra a figura 3:

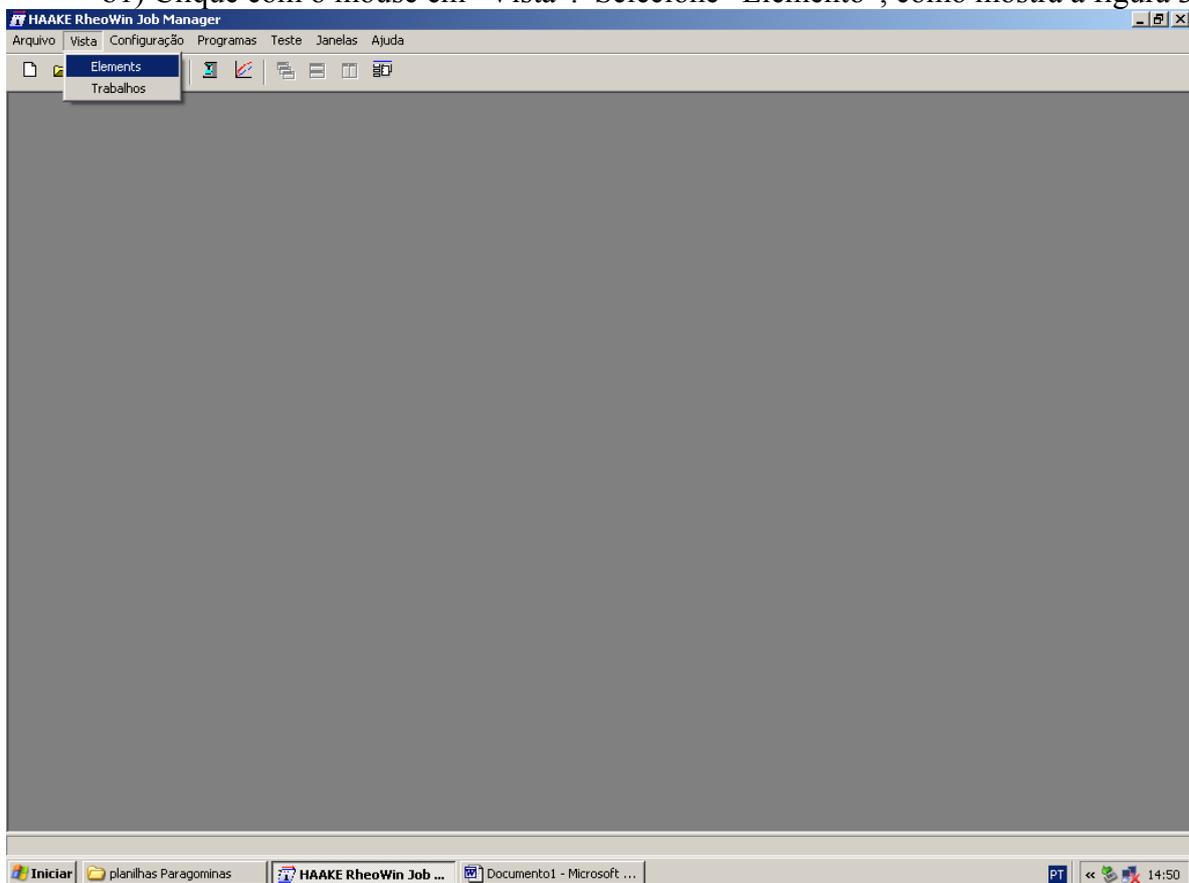


Figura 3.

b2) Clique com o mouse em “Vista”. Selecione “Trabalhos”, como mostra a figura 4:

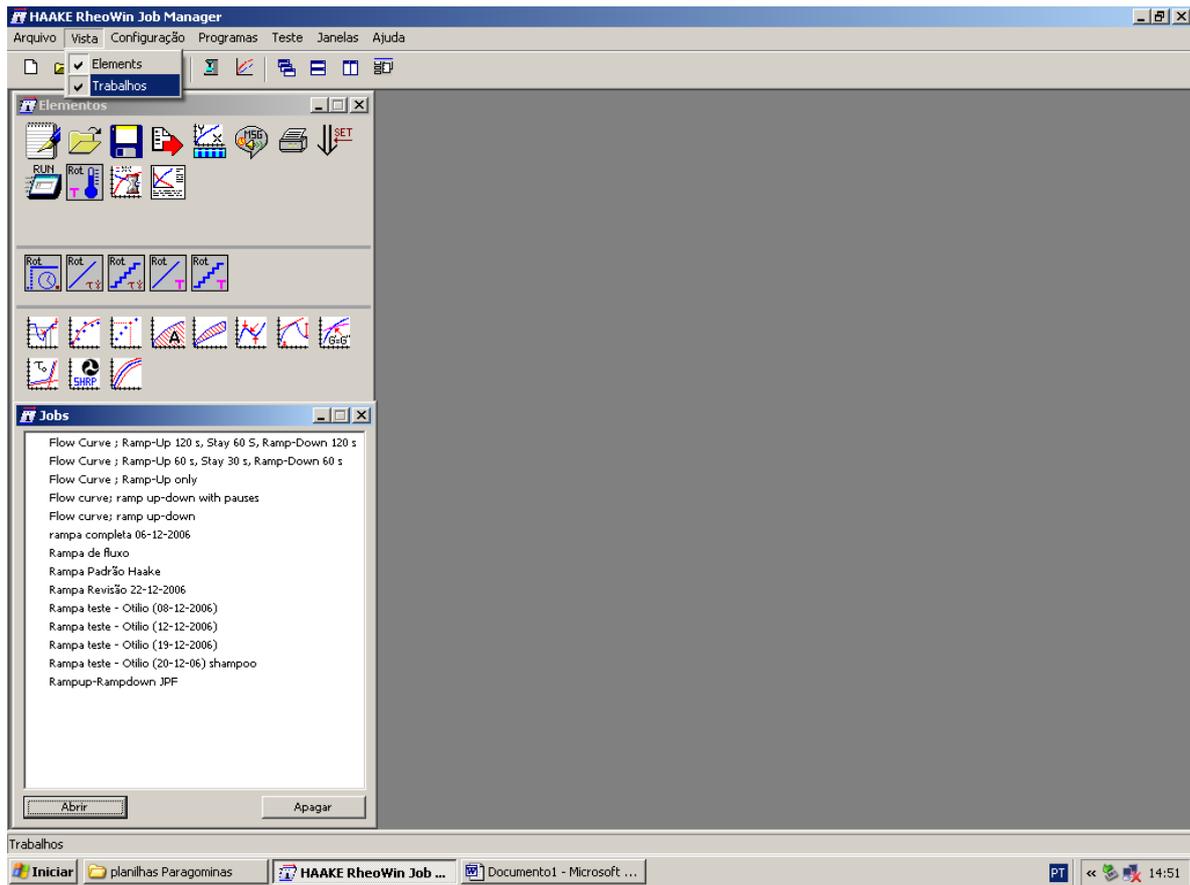


Figura 4

b3) A tela contendo elementos e trabalho estará aberta como a figura anterior.

b4) Clique em “Arquivo” e selecione “Novo”. O editor de trabalho aparecerá na tela conforme figura 5.

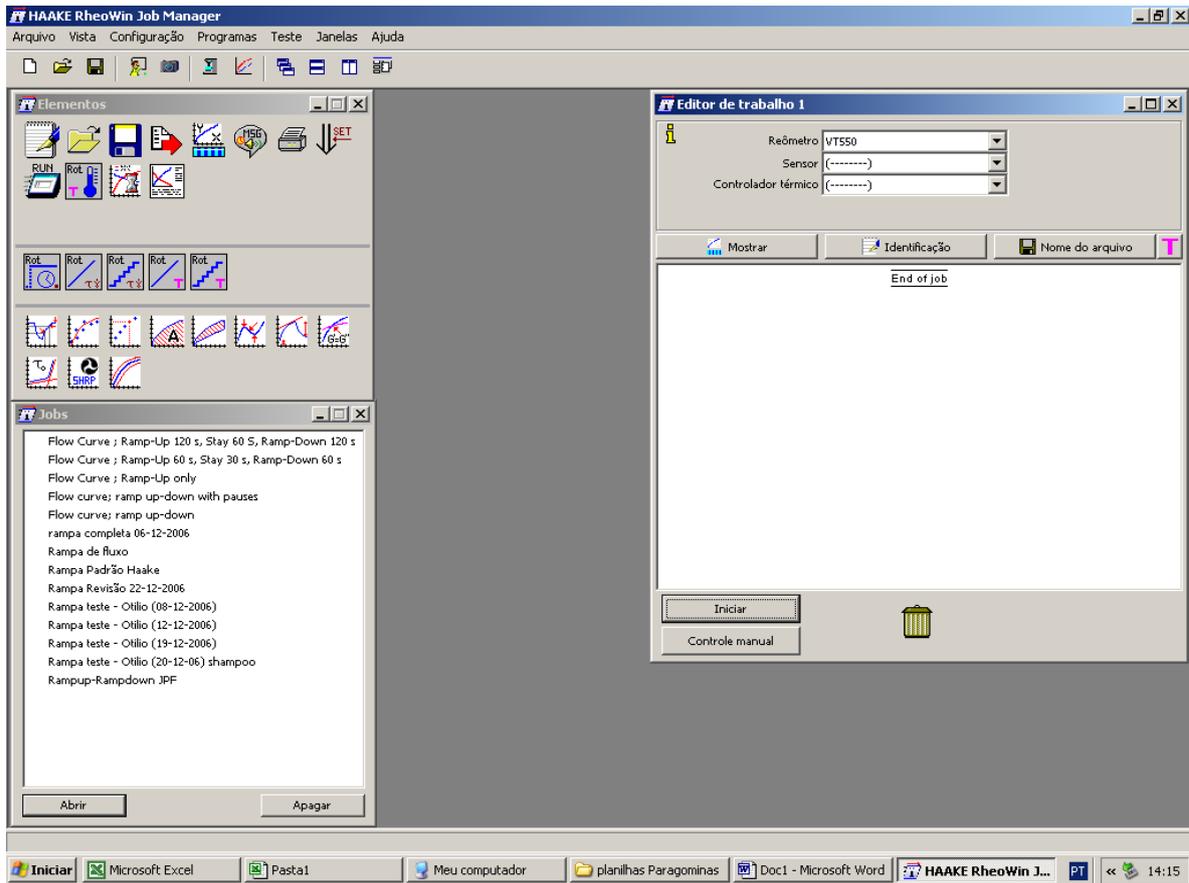


Figura 5.

- b5) Na tela do Editor de trabalho, selecione o sensor MV1.
- b6) Clique no ícone “Curva de tempo” da tela “Elementos” que está ao lado esquerdo da tela, como mostra a figura 6 e o arraste até a área de trabalho do “Editor de Trabalho”. Repita este procedimento, arrastando 17 vezes (que corresponderão às taxas de cisalhamento e os intervalos de leitura).

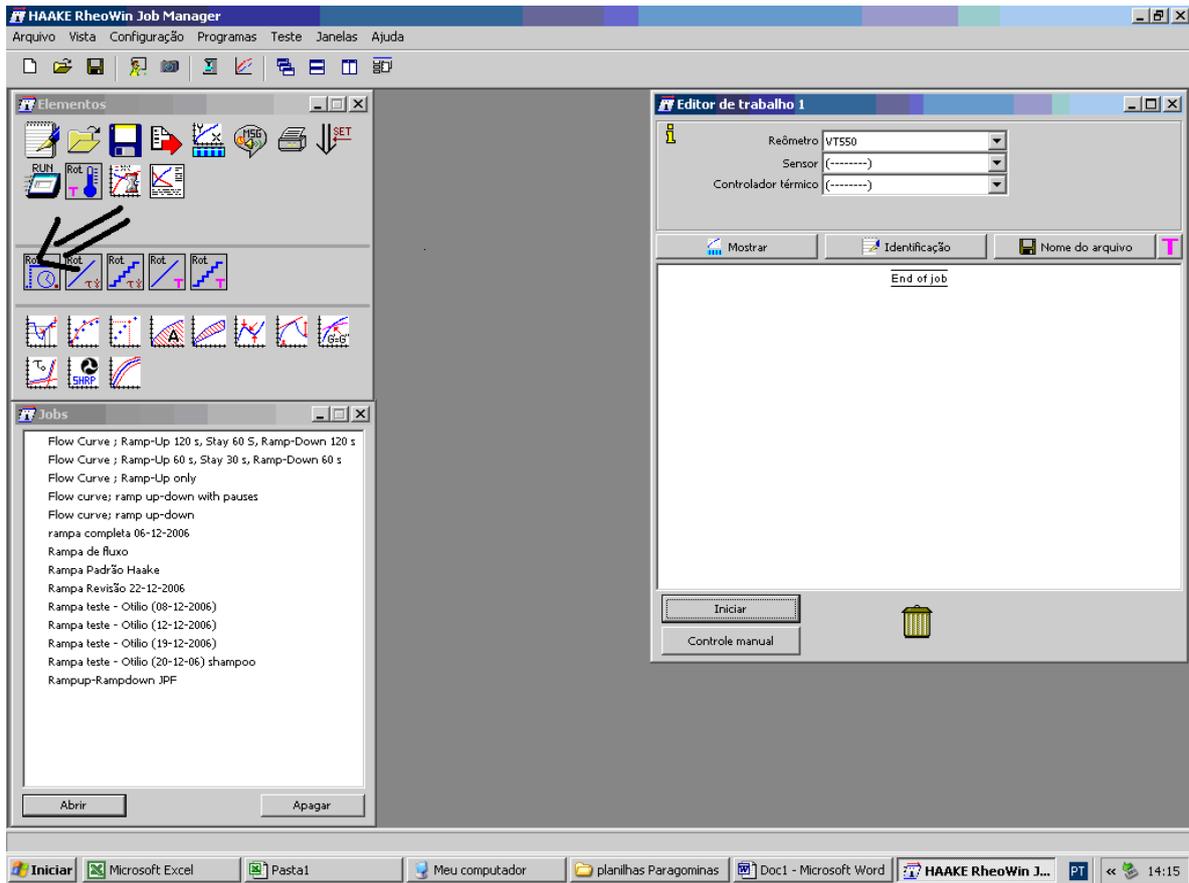


Figura 6.

- b7) Clique então duas vezes no ícone indicado pela seta na figura 7 da tela “Editor de trabalho” e aparecerá uma nova tela denominada “Rotação CS / CRCD Curva de tempo” como a figura 8.

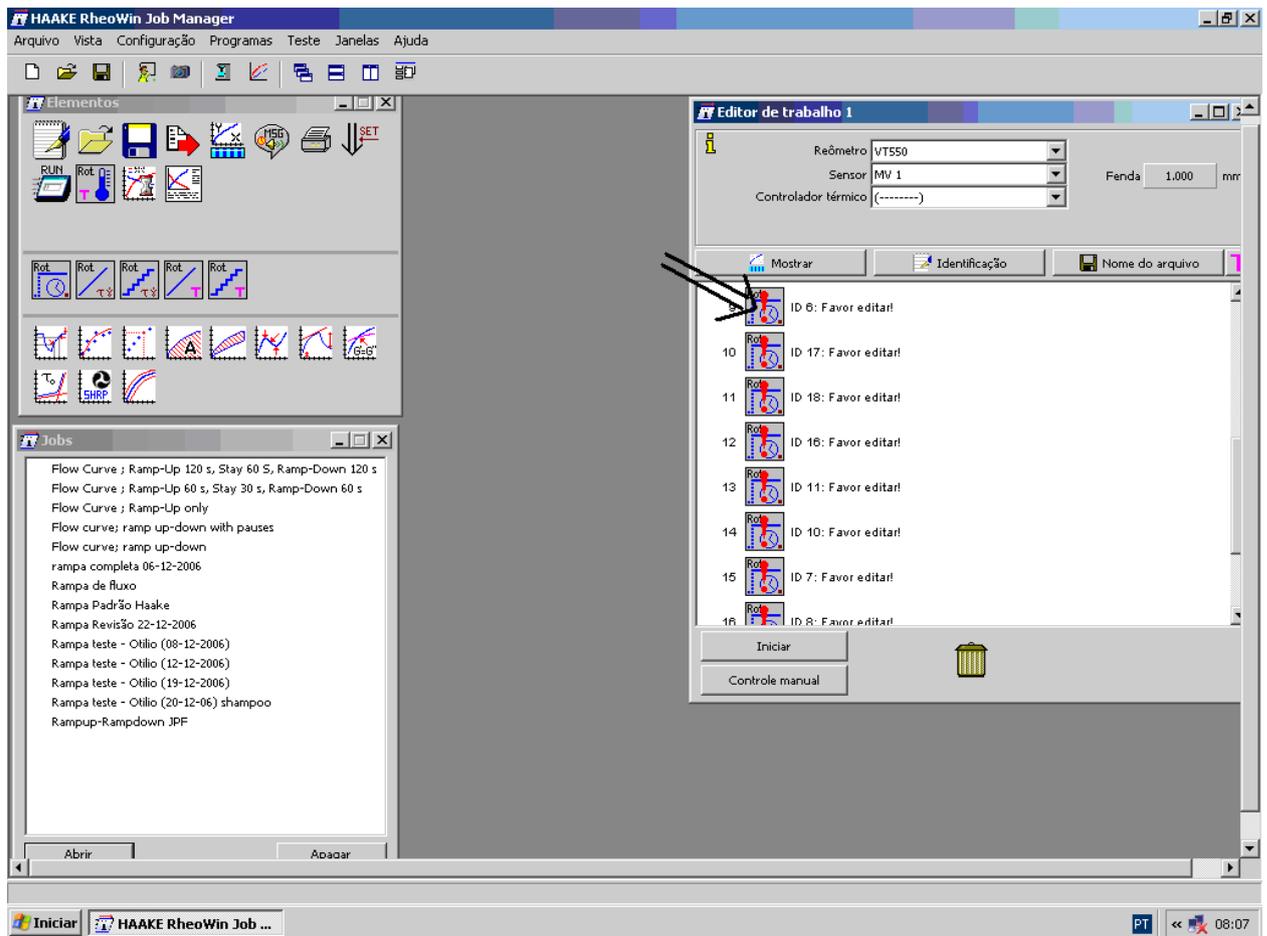


Figura 7.

- b8) Clicar na opção “Rotação” – Selecione a opção “Parâmetros”. Preencha o espaço $\dot{\gamma}$ com 550 1/s e no espaço “duração” 10 s. Clique na opção “Aquisição” e a marque a opção “Lin” e complete o espaço “Dados” com o valor 100 (o que significa 100 leituras),em seguida, clique em “Ok”, como mostra a figura 8

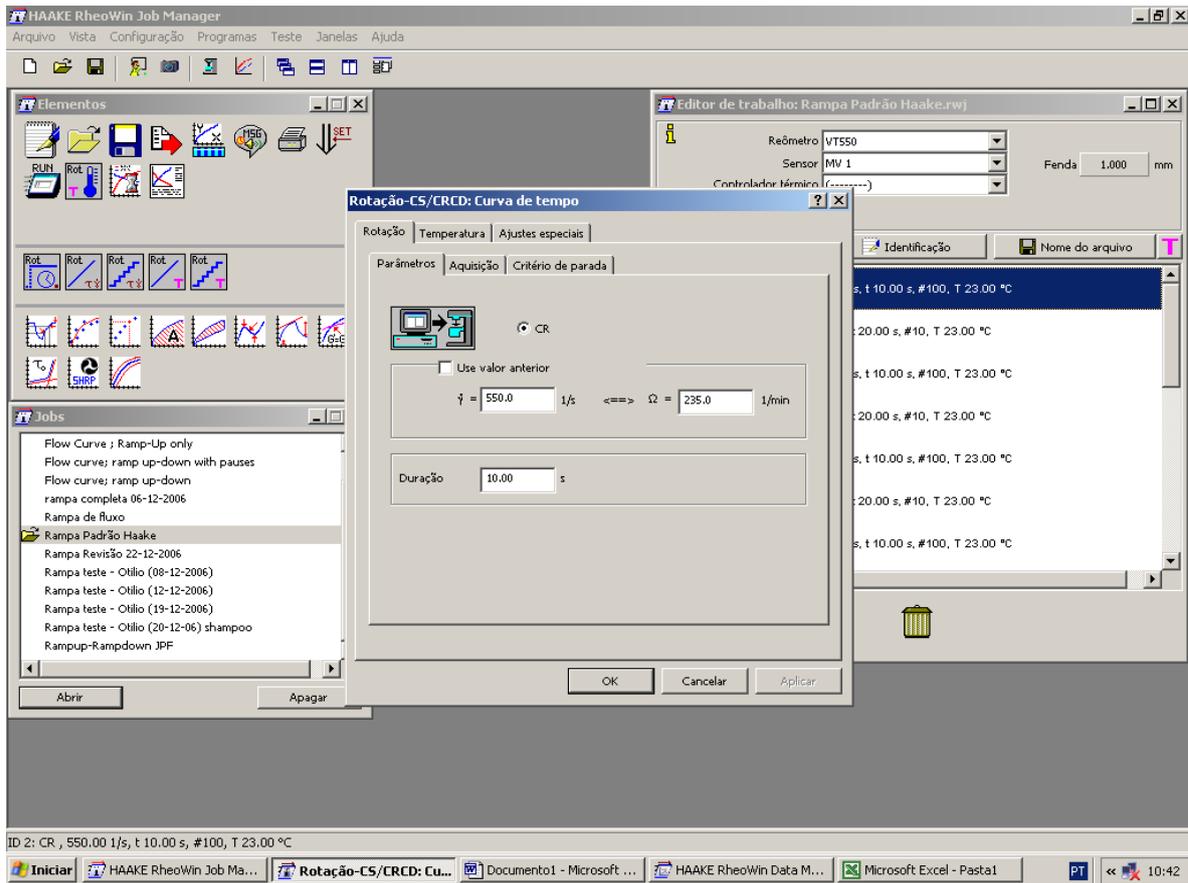


Figura 8.

- b9) Clique no segundo ícone da figura 7 e repita o procedimento b7 e b8, mas desta vez preencha o espaço “ γ ” com o valor 0 (zero) e “Duração” 20 s. Na opção “Dados” selecione 10.
- b10) Clique no terceiro ícone da figura 7 e repita o procedimento b7 e b8, mas desta vez preencha o espaço “ γ ” com o valor 400 e “Duração” 10 s. Na opção “Dados” selecione 100. (o que significa que serão coletados 100 dados em 10 segundos)
- b11) Repita a operação b9), agora para o próximo ícone
- b12) Repita a operação b10), inserindo o valor de “ γ ” de 325.
- b13) Repita a operação b9)
- b14) Repita a operação b10), inserindo o valor de “ γ ” de 250.
- b15) Repita a operação b9
- b16) Repita a operação b10), inserindo o valor de “ γ ” de 200.
- b17) Repita a operação b9
- b18) Repita a operação b10), inserindo o valor de “ γ ” de 150.
- b19) Repita a operação b9
- b20) Repita a operação b10), inserindo o valor de “ γ ” de 120.
- b21) Repita a operação b9
- b22) Repita a operação b10), inserindo o valor de “ γ ” de 80.
- b23) Repita a operação b9
- b24) Repita a operação b10), inserindo o valor de “ γ ” de 40.
- b25) Clique na opção “Arquivo” e salve a programação padrão
- c) Abrir a programação
- A programação padrão (do item b) esta salva e a cada vez que for realizado o teste, deve-se abrir o programa padrão. Abra o software do Haake (Job Manager), selecione “Vista” e opção “Elementos”. Clicar duas vezes no Programa padrão. A janela “Editor

de Trabalho” se abrirá. Clicar em “Iniciar” e a janela “Identificação” vai se abrir, como mostra a figura 9;

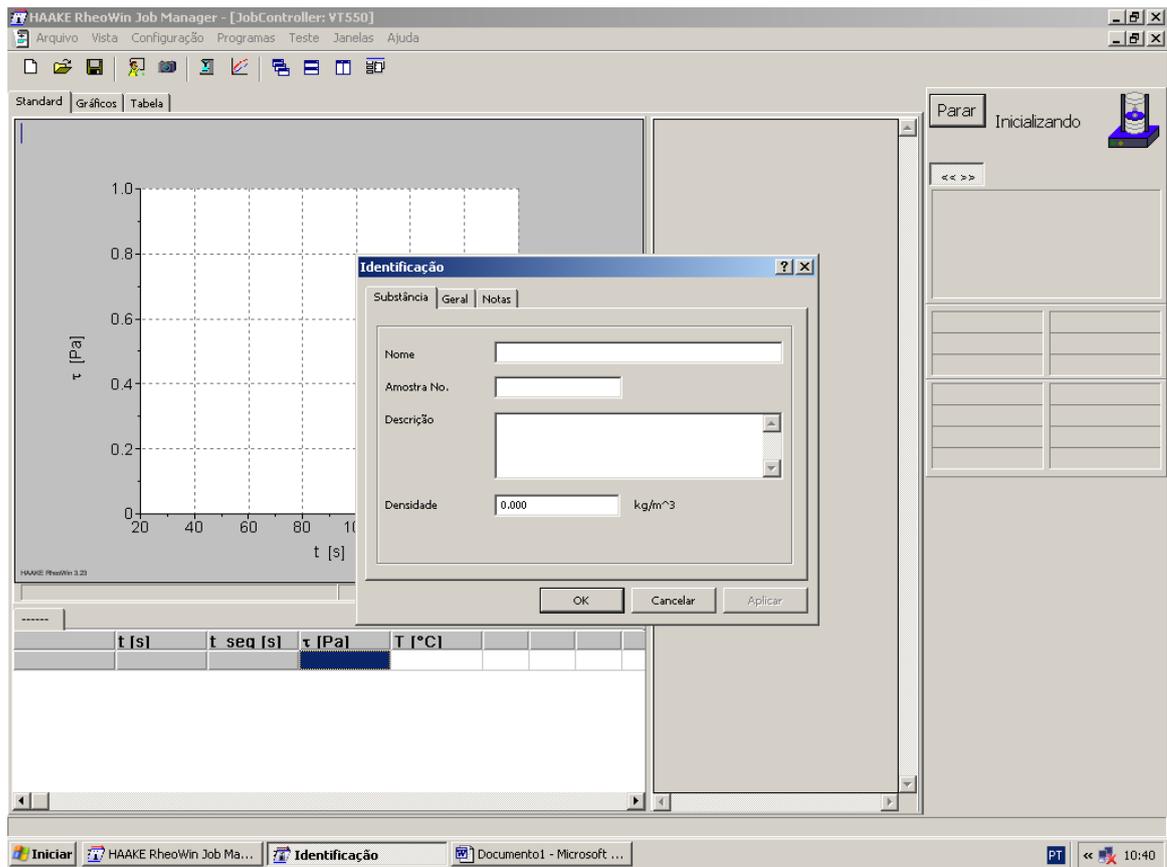


Figura 9.

Complete a identificação da amostra que será testada e NÃO clique em “Ok” pois ao executar esta operação o Haake iniciará a operação.

d) Execução do teste

- d1) Depois de coletada a amostra, meça e registre o pH da polpa, realize uma boa homogeneização e transfira a amostra para o copo do Haake até a marca do meio (veja por dentro do copo).
- d2) Acople o sensor MV1 e o enrosque de modo que fique bem fixo. Misture com uma pequena espátula a amostra dentro do copo e insira o copo no sensor lentamente.
- d3) Segure o copo em sua base, minimizando a transferência de calor da mão para o copo.
- d4) Clique então na opção “Ok” e o programa iniciará a movimentação do sensor na rotação do programa (neste caso, 550 1/s).
- d5) Ao finalizar os 10s, o sensor vai parar de girar, conforme o programado. Retire o copo e homogenize com a espátula durante 10 s (observando a contagem de tempo na tela do computador) e insira novamente o copo no sensor (o operador terá ainda 10 s para inserir o copo)
- d6) O sensor iniciará então a nova rotação.
- d7) Repita a operação anteriormente descrita, até que se finalizem todas as rotações.
- d8) Desacople o sensor e retire o conjunto sensor + copo. Insira um termômetro de mercúrio e registre a temperatura da polpa.
- d9) Confira a concentração de sólidos (porcentagem de sólidos) do teste, ou seja, após a execução do teste, pesar o conjunto sensor + copo que está com a polpa. Anote o peso.

Pegue uma bandeja e a pese separadamente. Anote o peso da bandeja. Despeje o conteúdo do conjunto dentro da bandeja, lavando com água até remover todo o sólido do sensor e do copo.

Leve a bandeja com a polpa que estava dentro do copo para secar na estufa a 105 oC.

Após seca a amostra, espere esfriar e pese novamente a bandeja.

Calcule então a concentração dos sólidos (em peso):

M1 = Massa da bandeja contendo o sólido seco;

M2 = Massa da bandeja vazia;

M3 = Massa do conjunto (copo + sensor) contendo polpa;

M4 = Massa do conjunto (copo + sensor) (média feita com o sistema seco e limpo, que será constante)

$$\% \text{sólidos} = (M1 - M2) \times 100 / (M3 - M4)$$

d10) Volte à tela do programa “Job Manager” do Haake e salve o teste realizado, como mostra a figura 10, procure ser organizado com a nomenclatura de cada arquivo, pois o técnico terá de ser capaz de o encontrar no computador.

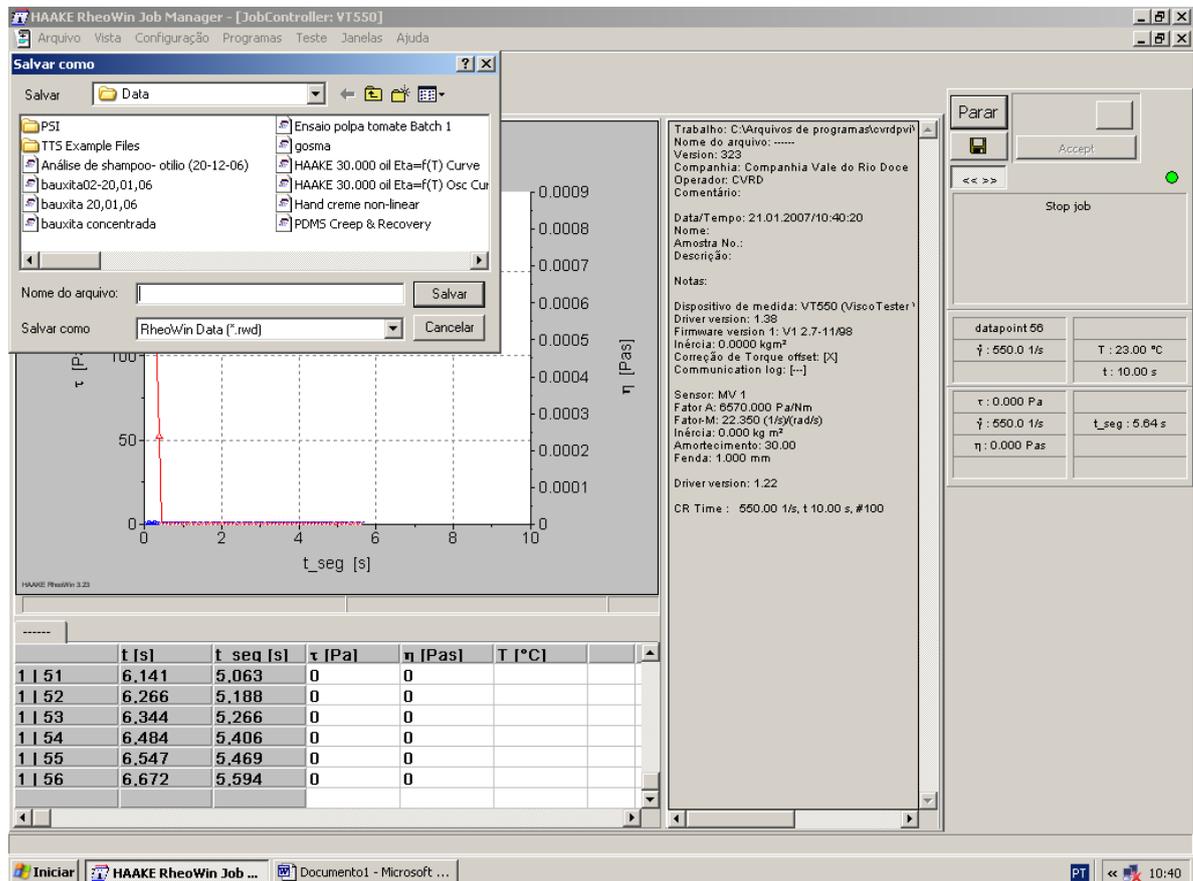


Figura 10.

e2) Clicar no ícone abrir da barra de ferramentas, escolher o arquivo do teste anteriormente executado e nele clicar duas vezes. Figura 12.

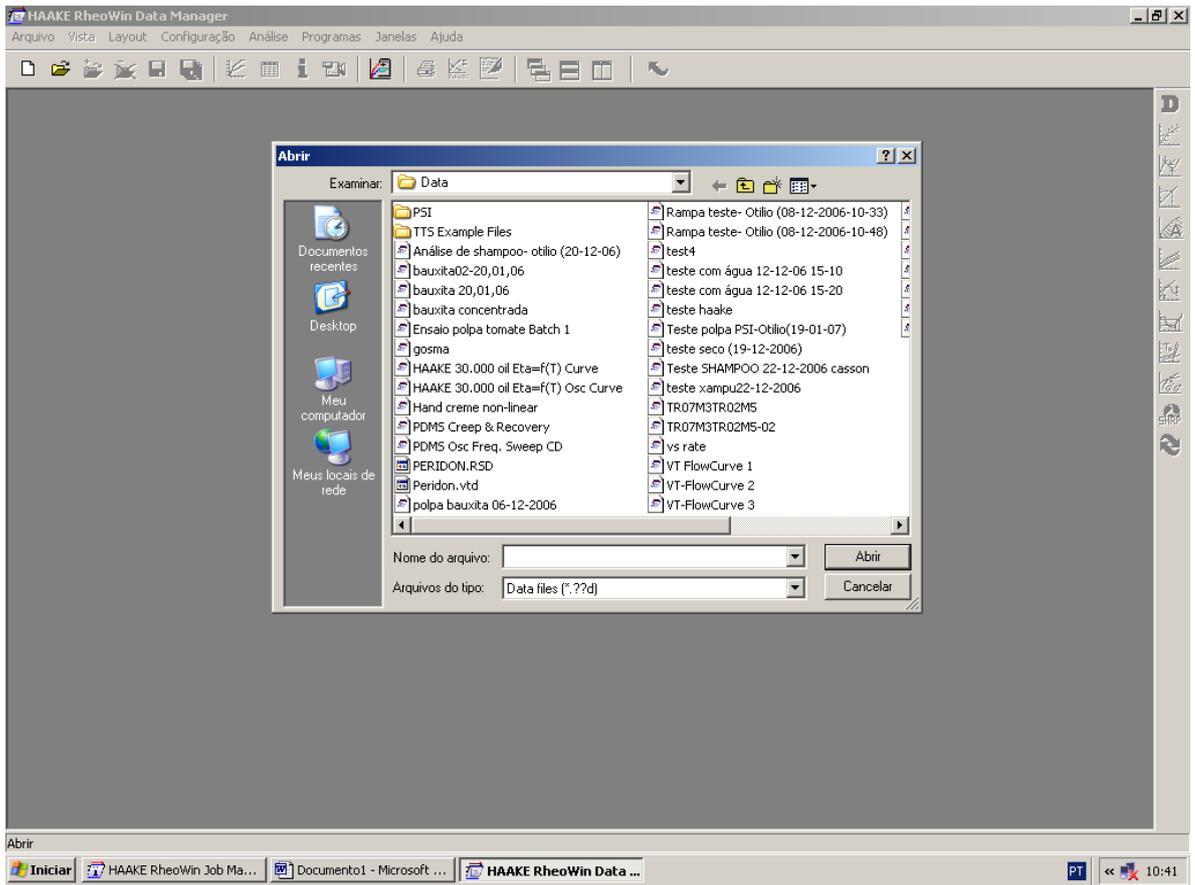


Figura 12.

RESULTADOS DA MODELAGEM REOLÓGICA - POLPA PROJETO

POLPA	C _w (%)	d _p (t/m ³)	pH	Pré-Testes		Bingham			Herschel-Bulkley				Gráficos HB (<diferença da média)	
				τ ₀ (taxa 100 1/s)	η (taxa 100 1/s)	τ ₀	η	R ²	τ ₀	K	n	R ²		
PROJETO	46	1,395			4,048	0,041	2,595	0,010	0,611	0,754	0,573	0,381	0,636	-0,189
					4,301	0,042	4,612	0,014	0,789	1,032	1,409	0,306	0,897	0,089
					4,301	0,039	3,206	0,009	0,521	1,043	0,952	0,288	0,569	0,100
			Média	6,52	4,217	0,041	3,471	0,011	0,641	0,943	0,978	0,325	0,701	
			D. Padrão		0,146	0,001	1,034	0,003	0,137	0,164	0,418	0,049	0,174	
	48	1,419			4,554	0,046	5,235	0,016	0,705	0,943	1,733	0,298	0,809	-0,011
					4,501	0,046	5,390	0,014	0,627	1,052	2,249	0,239	0,739	0,098
					4,732	0,047	4,980	0,014	0,662	0,867	1,981	0,260	0,758	-0,087
			Média	6,33	4,596	0,046	5,202	0,014	0,665	0,954	1,988	0,266	0,769	
			D. Padrão		0,121	0,001	0,207	0,001	0,039	0,093	0,258	0,030	0,036	
	50	1,444			6,325	0,063	5,810	0,014	0,614	1,359	2,291	0,239	0,732	0,000
					6,831	0,068	5,558	0,014	0,608	1,405	1,036	0,233	0,714	0,046
					7,084	0,071	4,717	0,014	0,684	1,312	1,300	0,318	0,756	-0,047
			Média	6,30	6,747	0,067	5,362	0,014	0,635	1,359	1,542	0,263	0,734	
			D. Padrão		0,386	0,004	0,467	0,000	0,034	0,047	0,662	0,048	0,021	
	52	1,471			8,096	0,081	6,965	0,018	0,664	1,597	2,830	0,240	0,761	-0,083
					6,831	0,068	8,987	0,019	0,688	1,769	4,489	0,192	0,862	0,089
					7,084	0,080	8,362	0,017	0,658	1,673	3,054	0,200	0,843	-0,007
			Média	6,35	7,337	0,076	8,105	0,018	0,670	1,680	3,458	0,211	0,822	
			D. Padrão		0,669	0,007	1,035	0,001	0,016	0,086	0,900	0,025	0,053	
54	1,498			11,640	0,120	9,625	0,023	0,711	1,946	4,165	0,228	0,846	-0,063	
				11,640	0,120	9,928	0,024	0,681	1,408	4,647	0,215	0,816	-0,601	
				12,400	0,099	6,537	0,017	0,519	2,672	1,584	0,313	0,545	0,663	
		Média	6,47	11,893	0,113	8,697	0,021	0,637	2,009	3,465	0,252	0,735		
		D. Padrão		0,439	0,012	1,876	0,004	0,103	0,634	1,647	0,053	0,166		

ANEXO B

RESULTADOS DA MODELAGEM REOLÓGICA - POLPA OPERAÇÃO ATUAL

POLPA	C _w (%)	d _p (t/m ³)	pH	Pré-Testes		Bingham			Herschel-Bulkley				Gráficos HB (< diferença da média)	
				τ ₀ (taxa 100 1/s)	η (taxa 100 1/s)	τ ₀	η	R ²	τ ₀	K	n	R ²		
ATUAL	46	1,395			2,783	0,028	1,739	0,006	0,516	0,483	0,450	0,347	0,537	-0,180
					1,771	0,030	1,651	0,008	0,438	0,775	0,159	0,534	0,443	0,112
					1,774	0,031	2,174	0,009	0,649	0,732	0,360	0,439	0,671	0,069
			Média	6,46	2,109	0,030	1,855	0,008	0,534	0,663	0,323	0,440	0,550	
			D. Padrão		0,583	0,002	0,280	0,001	0,107	0,158	0,149	0,094	0,115	
	48	1,419			4,036	0,041	1,337	0,013	0,763	1,768	0,250	1,259	0,765	0,553
					4,042	0,042	1,797	0,013	0,669	0,670	0,155	0,615	0,681	-0,545
					3,795	0,039	2,061	0,014	0,565	1,208	0,093	0,703	0,570	-0,007
			Média	6,62	3,958	0,040	1,732	0,013	0,666	1,215	0,166	0,859	0,672	
			D. Padrão		0,141	0,001	0,366	0,000	0,099	0,549	0,079	0,349	0,098	
	50	1,444			5,819	0,056	4,992	0,016	0,751	0,935	1,571	0,310	0,850	-0,404
					6,325	0,057	4,086	0,013	0,685	1,572	0,851	0,363	0,706	0,233
					7,084	0,056	3,711	0,014	0,707	1,510	0,524	0,449	0,735	0,171
			Média	6,80	6,409	0,056	4,263	0,014	0,714	1,339	0,982	0,374	0,764	
			D. Padrão		0,637	0,001	0,659	0,001	0,034	0,351	0,536	0,070	0,076	
	52	1,471			6,831	0,071	5,145	0,021	0,799	1,797	0,851	0,433	0,828	0,409
					7,084	0,068	6,680	0,015	0,653	1,419	2,639	0,242	0,824	0,031
					7,337	0,071	6,000	0,015	0,754	0,947	2,482	0,244	0,933	-0,441
			Média	6,94	7,084	0,070	5,942	0,017	0,735	1,388	1,991	0,306	0,862	
			D. Padrão		0,253	0,002	0,769	0,003	0,074	0,426	0,990	0,110	0,062	
54	1,498			8,602	0,091	7,673	0,023	0,802	1,274	2,614	0,293	0,931	-0,157	
				9,108	0,089	8,229	0,023	0,812	1,352	3,098	0,271	0,951	-0,079	
				9,614	0,088	9,246	0,018	0,689	1,668	4,569	0,194	0,905	0,237	
		Média	6,78	9,108	0,089	8,383	0,021	0,768	1,431	3,427	0,252	0,929		
		D. Padrão		0,506	0,002	0,798	0,002	0,068	0,209	1,018	0,052	0,023		

ANEXO C

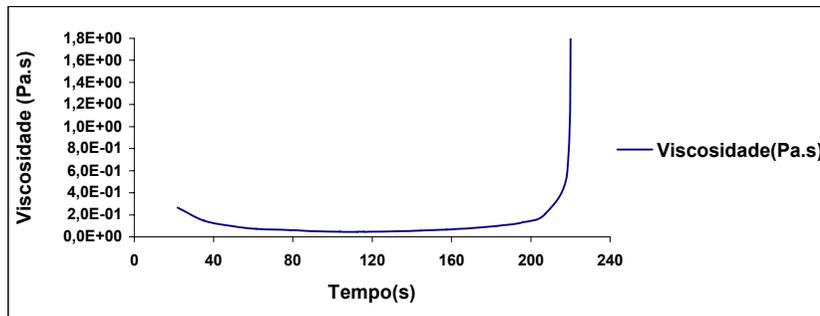
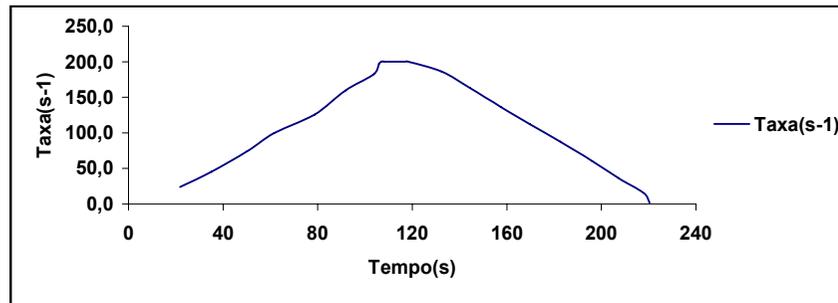
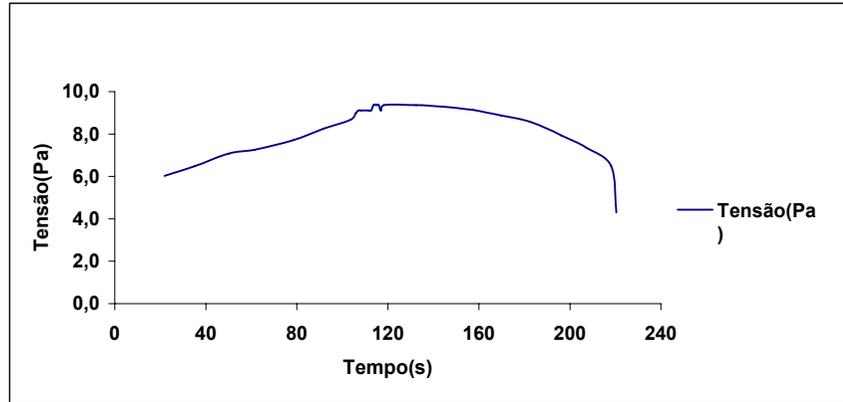
RESULTADOS DA MODELAGEM REOLÓGICA - POLPA PROPOSTA

POLPA	C _w (%)	d _p (t/m ³)	pH	Pré-Testes		Bingham			Herschel-Bulkley				Gráficos HB (<diferença da média)	
				τ ₀ (taxa 100 1/s)	η (taxa 100 1/s)	τ ₀	η	R ²	τ ₀	K	n	R ²		
PROPOSTA	46	1,395			3,542	0,035	3,040	0,012	0,765	1,171	0,431	0,456	0,798	0,234
					4,508	0,046	3,786	0,011	0,765	0,789	1,204	0,301	0,792	-0,149
					4,559	0,045	3,948	0,010	0,695	0,852	1,404	0,270	0,824	-0,085
			Média	6,83	4,203	0,042	3,591	0,011	0,742	0,937	1,013	0,342	0,805	
			D. Padrão		0,573	0,006	0,484	0,001	0,041	0,167	0,419	0,081	0,014	
	48	1,419			4,807	0,048	4,358	0,010	0,578	1,510	1,705	0,225	0,611	0,254
					4,917	0,048	3,972	0,011	0,660	0,772	1,469	0,271	0,753	-0,483
					5,313	0,047	3,729	0,013	0,668	1,485	0,629	0,416	0,676	0,229
			Média	6,70	5,012	0,047	4,020	0,012	0,636	1,256	1,268	0,304	0,680	
			D. Padrão		0,266	0,000	0,317	0,002	0,050	0,419	0,565	0,100	0,071	
	50	1,444			5,819	0,056	3,665	0,014	0,661	1,263	0,717	0,397	0,687	-0,060
					5,566	0,058	3,347	0,016	0,813	1,242	0,414	0,502	0,837	-0,081
					5,566	0,056	5,072	0,011	0,571	1,464	2,144	0,214	0,656	0,141
			Média	6,67	5,650	0,057	4,028	0,014	0,682	1,323	1,092	0,371	0,727	
			D. Padrão		0,146	0,001	0,918	0,002	0,122	0,123	0,924	0,146	0,097	
	52	1,471			6,072	0,061	6,210	0,017	0,791	1,289	2,179	0,277	0,930	-0,113
					6,325	0,064	5,073	0,016	0,587	1,266	1,623	0,300	0,836	-0,136
					6,520	0,061	5,298	0,013	0,564	1,651	1,998	0,243	0,606	0,249
			Média	6,92	6,306	0,062	5,527	0,015	0,647	1,402	1,933	0,273	0,791	
			D. Padrão		0,225	0,001	0,602	0,002	0,124	0,216	0,284	0,029	0,166	
54	1,498			8,096	0,080	8,547	0,019	0,736	1,694	3,600	0,228	0,924	0,102	
				7,901	0,080	6,725	0,018	0,688	1,569	2,360	0,272	0,788	-0,023	
				8,030	0,079	8,410	0,018	0,660	1,512	4,518	0,182	0,828	-0,080	
		Média	6,75	8,009	0,080	7,894	0,018	0,695	1,592	3,493	0,227	0,847		
		D. Padrão		0,099	0,001	1,015	0,001	0,039	0,093	1,083	0,045	0,070		

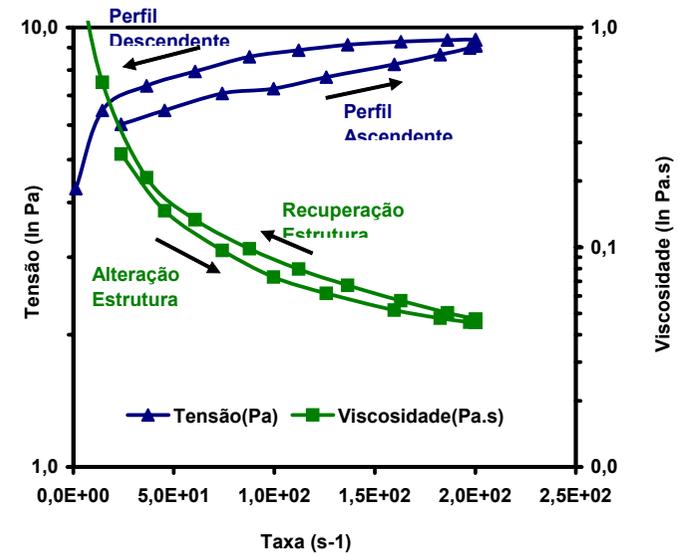
COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA MODELAGEM REOLÓGICA DAS AMOSTRAS

POLPA	C _w (%)	d _p (t/m ³)			pH	Pré-Testes		Bingham			Herschel-Bulkley			
						τ ₀ (taxa 100 1/s)	η (taxa 100 1/s)	τ ₀	η	R ²	τ ₀	K	n	R ²
COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS	46	1,395	Projeto		6,52	4,217	0,041	3,471	0,011	0,641	0,943	0,978	0,325	0,701
			Atual		6,46	2,109	0,030	1,855	0,008	0,534	0,663	0,323	0,440	0,550
			Proposta		6,83	4,203	0,042	3,591	0,011	0,742	0,937	1,013	0,342	0,805
				Média	6,60	3,510	0,037	2,972	0,010	0,639	0,848	0,771	0,369	0,685
				D. Padrão	0,20	1,213	0,007	0,970	0,002	0,104	0,131	0,317	0,051	0,104
	48	1,419	Projeto		6,33	4,596	0,046	5,202	0,014	0,665	0,954	1,988	0,266	0,769
			Atual		6,62	3,958	0,040	1,732	0,013	0,666	1,215	0,166	0,859	0,672
			Proposta		6,70	5,012	0,047	4,020	0,012	0,636	1,256	1,268	0,304	0,680
				Média	6,55	4,522	0,045	3,651	0,013	0,655	1,142	1,140	0,476	0,707
				D. Padrão	0,19	0,531	0,004	1,764	0,001	0,017	0,164	0,917	0,332	0,054
	50	1,444	Projeto		6,75	6,747	0,067	5,362	0,014	0,635	1,359	1,542	0,263	0,734
			Atual		6,80	3,958	0,056	4,263	0,014	0,714	1,339	0,982	0,374	0,764
			Proposta		6,67	5,012	0,057	4,028	0,014	0,682	1,323	1,092	0,371	0,727
				Média	6,74	5,239	0,060	4,551	0,014	0,677	1,340	1,205	0,336	0,741
				D. Padrão	0,07	1,408	0,006	0,712	0,000	0,040	0,018	0,297	0,063	0,020
	52	1,471	Projeto		6,35	7,337	0,076	8,105	0,018	0,670	1,680	3,458	0,211	0,822
			Atual		6,94	7,084	0,070	5,942	0,017	0,735	1,388	1,991	0,306	0,862
			Proposta		6,92	6,306	0,062	5,527	0,015	0,647	1,402	1,933	0,273	0,791
				Média	6,74	6,909	0,070	6,524	0,017	0,684	1,490	2,461	0,263	0,825
				D. Padrão	0,34	0,538	0,007	1,384	0,001	0,046	0,165	0,864	0,048	0,036
54	1,498	Projeto		6,47	11,893	0,113	8,697	0,021	0,637	2,009	3,465	0,252	0,735	
		Atual		6,78	9,108	0,089	8,383	0,021	0,768	1,431	3,427	0,252	0,929	
		Proposta		6,75	8,009	0,080	7,894	0,018	0,695	1,592	3,493	0,227	0,847	
			Média	6,67	9,670	0,094	8,324	0,020	0,700	1,677	3,462	0,244	0,837	
			D. Padrão	0,17	2,002	0,017	0,404	0,002	0,065	0,298	0,033	0,015	0,097	

TENDÊNCIA A REOPEXIA - POLPA PROJETO - 50% SÓLIDOS



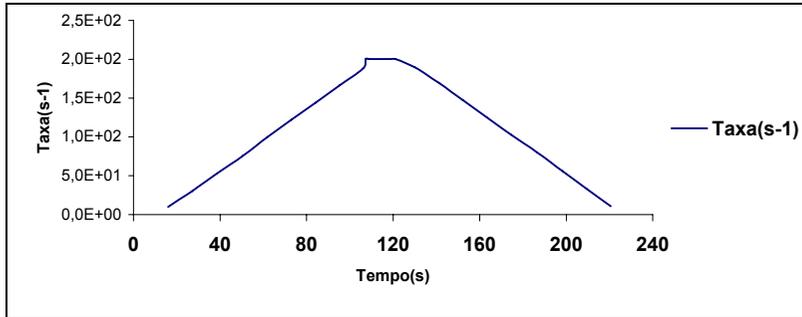
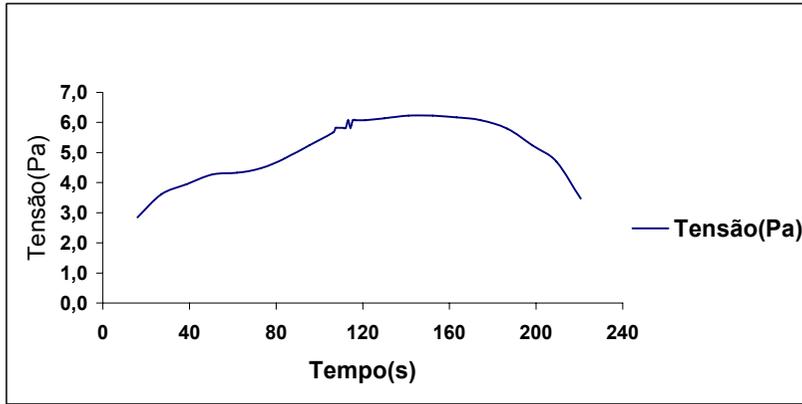
POLPA PROJETO - 50% SÓLIDOS



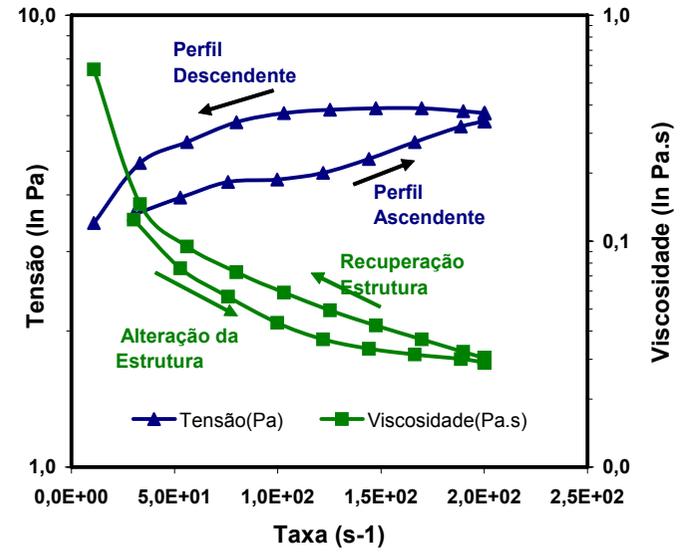
METODOLOGIA

Com o rotor cilíndrico coaxial - HAAKE VT 550, Sensor SV1, a 28 °C , software Rheowin 4
 Rampa de aumento da taxa de cisalhamento de 0 a 200 s-1 em 100 s, adquirindo-se 100 pontos
 Permanência a 200 s-1 por 10 s, adquirindo-se 10 pontos
 Rampa de diminuição da taxa de cisalhamento de 200 a 0 s-1, adquirindo-se 100 pontos.

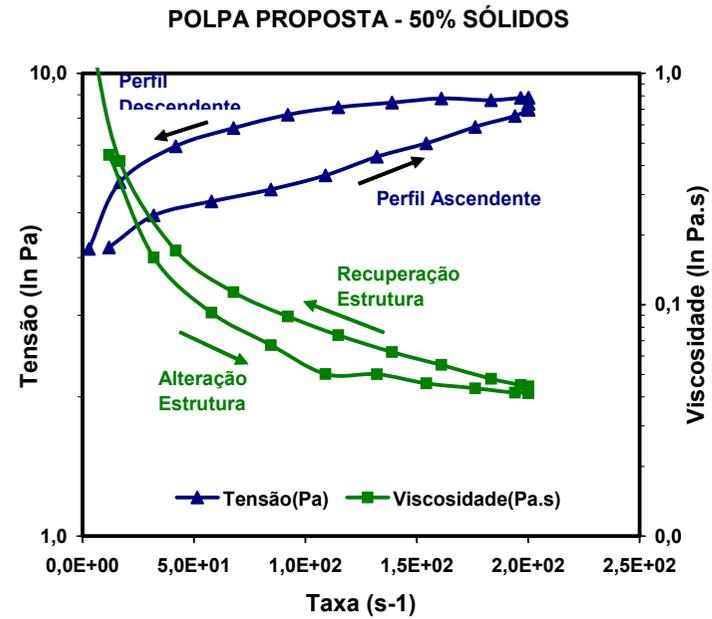
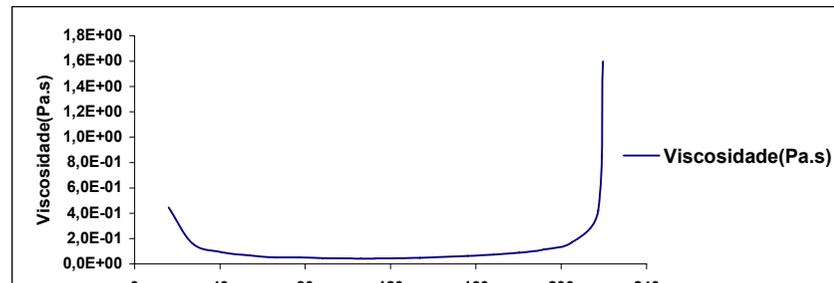
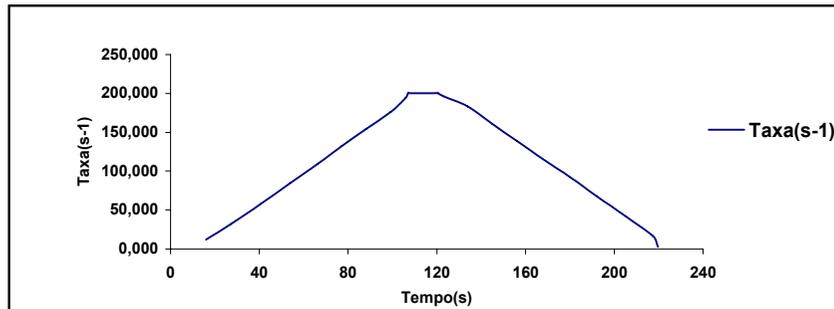
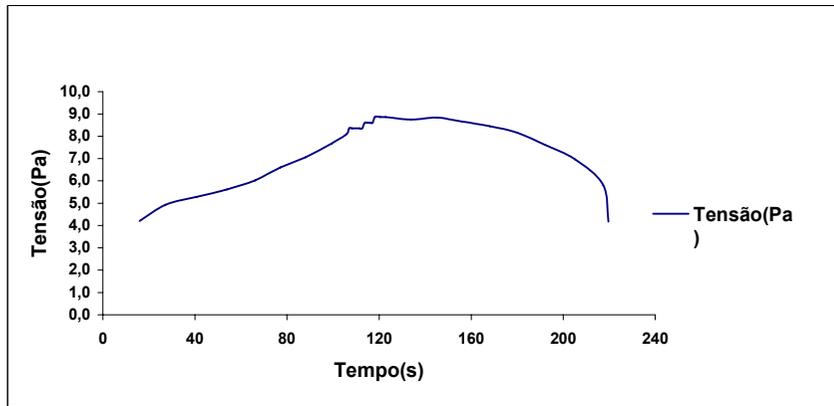
TENDÊNCIA A REOPEXIA - POLPA OPER. ATUAL - 50% SÓLIDOS



POLPA OPERAÇÃO ATUAL - 50% SÓLIDOS



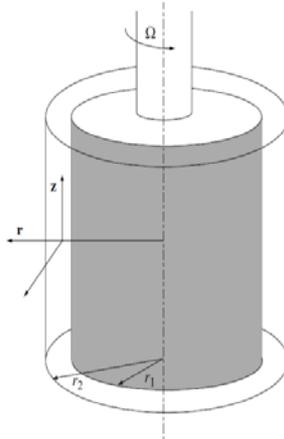
TENDÊNCIA A REOPEXIA - POLPA PROPOSTA - 50% SÓLIDOS



METODOLOGIA

Com o rotor cilíndrico coaxial - HAAKE VT 550, Sensor SV1, a 28 °C , software Rheov Rampas de aumento da taxa de cisalhamento de 0 a 200 s-1 em 100 s, adquirindo-se 100 p; Permanência a 200 s-1 por 10 s, adquirindo-se 10 pontos; Rampas de diminuição da taxa de cisalhamento de 200 a 0 s-1, adquirindo-se 100 pontos.

APÊNDICE A – Cilindro Coaxial e Suas Definições



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:

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

Torque para SV1

A partir de (1) e (2):

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

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

Desvio para as medidas do SV1

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

(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. $T_{\text{máx}}=0,5\%$. 3) → manual HAAKE

A tensão e suas variáveis influentes:

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

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

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

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

Equação para propagação da incerteza:

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

