



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROMULO LIMA RUFINO

**ANÁLISE DA VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO E
ESTUDO REOLÓGICO DE POLPAS DE CAULIM DA BACIA
DO RIO CAPIM EM DUTOS CIRCULARES.**

Belém
2009

ROMULO LIMA RUFINO

**ANÁLISE DA VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO E
ESTUDO REOLÓGICO DE POLPAS DE CAULIM DA BACIA
DO RIO CAPIM EM DUTOS CIRCULARES.**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Pará.

Área de concentração: Térmicas e Fluidos.
Orientador: Prof. Dr. Daniel Onofre Cruz.

Belém
2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP),
Biblioteca do Mestrado em Engenharia Mecânica/ UFPA, Belém, PA

R926a Rufino, Rômulo Lima
 Análise da velocidade crítica de escoamento e estudo reológico de
 polpas de caulim da bacia do rio capim em dutos circulares/ Rômulo
 Lima Rufino; orientador Daniel Onofre Cruz.—2009.

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto
 de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
 Belém, 2009.

 1. INDUSTRIA MINERAL – caulim. 2. Caulim – Beneficiamento. 3.
 Caulim – Reologia. I. Cruz, Daniel Onofre, Orientador. II. Título.

Cdd 19 ed. 553

ROMULO LIMA RUFINO

ANÁLISE DA VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO E ESTUDO REOLÓGICO DE POLPAS DE CAULIM DA BACIA DO RIO CAPIM EM DUTOS CIRCULARES.

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Pará.

Área de concentração: Térmicas e Fluidos.

Orientador: Prof. DSc. Daniel Onofre Cruz.

Data da aprovação:

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. DSc. Daniel Onofre Cruz
Titulação: Doutor
Instituição: Universidade Federal do Pará – UFPA

Membro: Prof. DSc. Fernando Pereira Duda
Titulação: Doutor
Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Membro: Prof. DSc. Erbe Ferreira Lins
Titulação: Doutor
Instituição: Universidade Federal do Pará – UFPA.

Membro: Prof. DSc. Emanuel Macedo Negrão
Titulação: Doutor
Instituição: Universidade Federal do Pará – UFPA.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus pela vida,
aos meus pais (Raimundo e Arlene Rufino) e minha esposa Elana Rufino,
em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa, em especial ao professor Dr. Daniel Onofre.

Agradeço a Empresa CADAM PPSA (VALE) pela oportunidade da utilização dos recursos de ordem experimental que tornaram possível a referida análise, revertida em conhecimento específico aos profissionais que desejarem dimensionar de maneira racional sistemas de bombeamento de polpa de caulim conforme as premissas do processo de beneficiamento.

Aos colegas do PPGEM pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho, especialmente ao meu amigo e conselheiro Eng^o Químico, MSc. Sil Franciley.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	15
1.INTRODUÇÃO	18
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1.O CAULIM	19
2.2.NATUREZA DOS DEPÓSITOS DE CAULIM	20
2.3.PRODUTORES DE CAULIM.....	23
2.4.PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO CAULIM.....	25
2.5.APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DO CAULIM	26
2.6.O CAULIM E A INDÚSTRIA DE PAPEL.....	26
2.7.PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO CAULIM	28
2.8.ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA REOLOGIA	33
2.9.ESCOAMENTO TURBULENTO EM FLUÍDOS NÃO-NEWTONIANOS	39
2.10.FLUÍDO-DINÂMICA EM SISTEMAS PARTICULADOS	42
2.11. A LEI DE STOKES	46
3. MATERIAL E MÉTODO	49
3. 1.COLETA DE AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM.....	49
3. 2. DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DA POLPA DE CAULIM.....	51

3. 3. DETERMINAÇÃO DO PERCENTUAL DE SÓLIDOS (%) DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM.....	52
3. 4. DETERMINAÇÃO DE GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM.....	53
3. 5. DETERMINAÇÃO DE pH.....	54
3.6. DETERMINAÇÃO DA REOLOGIA DAS POLPAS DE CAULIM COLETADAS NO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO.....	55
3.7. METODOLOGIA DE ANÁLISE DA VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO PARA AS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM.....	56
3.8. LEVANTAMENTO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ESCOAMENTO DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM.....	62
3.9. ESTIMATIVA DA CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO ATRAVÉS DOS DADOS EXPERIMENTAIS DE ESCOAMENTO DE POLPA DE CAULIM.....	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
4.1. MASSA ESPECÍFICA, pH E PERCENTUAL DE SÓLIDOS DAS AMOSTRAS DE CAULIM.....	68
4. 2. GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM.....	68
4. 3. REOLOGIA DAS POLPAS DE CAULIM COLETADAS NO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO.....	70
4. 4. VELOCIDADE EXPERIMENTAL DAS POLPAS DE CAULIM.....	74
4. 5. VELOCIDADE DE SUSTENTAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE CAULINITA.....	76
4. 6. CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO.....	77
4. 7. FATOR DE ATRITO.....	78
4. 8. VELOCIDADE A PARTIR DE C0.....	80
4. 9. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO DAS POLPAS DE CAULIM E FATOR DE ATRITO A PARTIR DO VALOR CARACTERÍSTICOS E ANALISADO DE C0.....	83
5. CONCLUSÕES.....	85
6. TRABALHOS FUTUROS.....	88
REFERÊNCIAS.....	89

APÊNDICE 1	.....	93
APÊNDICE 2	.....	94
APÊNDICE 3	.....	95
APÊNDICE 4	.....	96
APÊNDICE 5	.....	97
APÊNDICE 6	.....	98
APÊNDICE 7	.....	99
APÊNDICE 8	.....	100
APÊNDICE 9	.....	101

RESUMO

A indústria mineral representa um grande estimulador da economia do estado, e como destaque nessa indústria podemos mencionar o setor do beneficiamento de Caulim. As soluções dos problemas relacionados a essa atividade mostram-se como uma oportunidade rara de interação universidade-indústria, além de ser um campo fértil para o desenvolvimento científico. Um ponto importante a ser estudado trata do escoamento da suspensão de caulim em dutos e equipamentos relacionados; problemas como incrustação e cálculo da perda de carga não foram ainda resolvidos de forma definitiva pela indústria. Nesse contexto o presente trabalho se dispõe a desenvolver uma metodologia para o cálculo dos parâmetros de escoamento principalmente da velocidade mínima necessária para que as partículas em suspensão não depositem no interior dos dutos. Assim o objetivo macro desta dissertação reside em analisar através da implementação de metodologia, o cálculo da velocidade de deposição durante o escoamento de polpas de caulim com diferentes frações mássicas (% em peso de sólidos) no interior de dutos circulares; a partir do estudo reológico de amostras obtidas no seu processo de beneficiamento; propiciando assim, subsídio teórico aos técnicos e Engenheiros que desejam dimensionar um sistema de bombeamento aplicado a polpas de caulim; minimizando seus problemas de sub e superdimensionamento, que acarreta a deposição do material, causando danos à produção e meio ambiente, visto que se fará necessário à abertura da tubulação para remoção dos depósitos oriundos da baixa velocidade.

Palavras-chaves: Beneficiamento de Caulim. Reologia do Caulim. Perda de Carga em Dutos. Velocidade Crítica de Deposição.

ABSTRACT

The mineral industry represents a great economy state stimulator, and we can have as that industry highlights the kaolin beneficiation sector. The problem solutions related to that activity is a great opportunity to interact university and industry, besides that it's a very fertile area to scientific development. A important point to be studied is the kaolin slurry flow inside pipelines and related equipments; problems as incrustation and pipeline pressure drop calculations weren't still definitely resolved by the industry. In this context the present work consists in develop a methodology to calculate the flow parameters principally the necessary minimum velocity for the suspended particles do not deposit into the pipe. So the main purpose of this dissertation is to analyze, through the methodology implementation, the deposition velocity calculation during the slurry kaolin flow with different mass fraction (% in solid weight) into circular pipelines; from rheological studies done with samples taken from the beneficiation process; there by providing knowledge to the technicians and engineers that desire to design a slurry kaolin pump system; minimizing their problems with sub or super dimensioning, causing material deposition what represents production and environment hazardous whereas it will be necessary to open the pipeline to remove the material deposited due to the low flow velocity.

Keywords: Processing of Kaolin. Rheology of Kaolin. Loss of load in Pipelines. Critical velocity of deposition.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA DA CAULINITA	19
FIGURA 2: CAULIM DA BACIA DO RIO CAPIM.....	21
FIGURA 3: ILUSTRAÇÃO DO PERFIL GEOLÓGICO- TIPOLOGIA DE CAULIM DA REGIÃO DO RIO CAPIM	21
FIGURA 4: CRISTAIS DE CAULINITA DO RIO CAPIM.....	28
FIGURA 5: ESCOAMENTO DE UM FLUÍDO ENTRE DUAS PLACAS PARALELAS	32
FIGURA 6: REOGRAMA DE DIVERSOS TIPOS DE FLUÍDOS	34
FIGURA 7: CLASSIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS FLUÍDOS	34
FIGURA 8: AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM COM DIFERENTES FRAÇÕES MÁSSICAS OBTIDAS DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DA PARÁ PIGMENTOS S.A – CADAM PPSA (VALE).....	47
FIGURA 9: DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE AMOSTRA DE CAULIM AO LONGO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO.....	48
FIGURA 10: ANALISADOR DE % DE SÓLIDO	50
FIGURA 11: ANALISADOR DE TAMANHO DE PARTÍCULAS	51
FIGURA 12: ANALISADOR DE PH.....	52
FIGURA 13: VISCOSÍMETRO HERCULES HI-SHEAR, MODELO DV-10	53
FIGURA 14: ILUSTRAÇÃO DE UMA PARTÍCULA EM FLUÍDO E DECOMPONDO AS FORÇAS EXISTENTES ATRAVÉS DA CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO.	56
FIGURA 15: ILUSTRAÇÃO DAS FORÇAS ENVOLVIDAS NA PARTÍCULA PARA SUA CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO	57
FIGURA 16: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA O LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE MÉDIA DE ESCOAMENTO DE POLPAS DE CAULIM.....	61
FIGURA 17: FLUXOGRAMA DE DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO DE POLPA DE CAULIM.....	63
FIGURA 18: CURVA DE FRAÇÃO ACUMULADA-SEDIGRAF.....	65

FIGURA 19: REOGRAMA DAS DISPERSÕES DE CAULIM	66
FIGURA 20: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA DO CRISTAL DE CAULINITA.....	67
FIGURA 21: REOGRAMA DAS DISPERSÕES DE CAULINITA A 68% E 71% SÓLIDOS	68
FIGURA 22: REOGRAMA DAS DISPERSÕES ANALISADAS COM DIFERENTES FRAÇÕES MÁSSICAS	69
FIGURA 23: GRÁFICO DA VELOCIDADE MÉDIA EXPERIMENTAL VERSUS FREQUÊNCIA.....	70
FIGURA 24: GRÁFICO DA VELOCIDADE MÉDIA EXPERIMENTAL MÍNIMA VERSUS % SÓLIDOS	71
FIGURA 25: GRÁFICO DA VELOCIDADE DE SUSTENTAÇÃO DAS PARTÍCULAS VERSUS % DE SÓLIDOS.....	72
FIGURA 26: GRÁFICO DA CONSTANTE DA CALIBRAÇÃO.....	74
FIGURA 27: GRÁFICO DO FATOR DE ATRITO	74
FIGURA 28: GRÁFICO DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO	76
FIGURA 29: GRÁFICO DA ANÁLISE DO FATOR DA POLPA DE CAULIM.....	78
FIGURA 30: GRÁFICO DA ANÁLISE DA VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO.....	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: RESERVAS BRASILEIRAS DE CAULIM-2006	22
TABELA 2: PRODUÇÃO E RESERVAS MUNDIAIS DE CAULIM	23
TABELA 3: PRINCIPAIS USOS DO CAULIM	25
TABELA 4: ESPECIFICAÇÕES DO CAULIM PARA A INDÚSTRIA DE PAPEL.....	31
TABELA 5: CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ARRASTO, VELOCIDADE E DO DIÂMETRO DA PARTÍCULA ISOMÉTRICA ISOLADA	43
TABELA 6: DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM	47
TABELA 7: DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA LEVANTAMENTO DA VELOCIDADE MÉDIA EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO DAS POLPAS DE CAULIM	60
TABELA 8: RESULTADO DE PESO ESPECÍFICO, PH E PERCENTUAL DE SÓLIDOS DAS AMOSTRAS DE POUPA E CAULIM	64
TABELA 9: RESULTADO DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DAS AMOSTRAS DE POUPA DE CAULIM	64
TABELA 10 A: RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO REOGRAMA DAS DISPERSÕES DE CAULIM	69
TABELA 10 B: QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO REOGRAMA DAS DISPERSÕES DE CAULIM	69
TABELA 11: RESUMO DOS RESULTADOS ADOTADOS DE VELOCIDADE EXPERIMENTAL MÍNIMA DA 24HZ	71
TABELA 12: RESUMO DA ESTIMATIVA DA VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO DAS POLPAS DE CAULIM.....	

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL	17
CADAM - CAULIM DA AMAZÔNIA S.A	23
PPSA - PARÁ PIGMENTOS S.A.....	23
DLVO - METODOLOGIA DE ANÁLISE DA ENERGIA DE INTERAÇÃO DOS COLÓIDES.....	37
CETEM - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL	28
TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION FOR THE WORDWIDE PULP, PAPER AND CONVERTING INDUSTRY	73

LISTA DE SÍMBOLOS

$2KAlSi_3O_8$	FELDSPATO DE POTÁSSIO.
$3H_2O$	ÁGUA
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	CAULINITA
$4SiO_2$	SÍLICA
$2KOH$	HIDRÓXIDO DE POTÁSSIO
τ	TENSÃO DE CISALHAMENTO
μ	VISCOSIDADE
$\frac{du}{dy}$	GRADIENTE DE VELOCIDADE OU TAXA DE CISALHAMENTO
γ	GRADIENTE DE VELOCIDADE OU TAXA DE CISALHAMENTO
K	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DO FLUIDO
n	ÍNDICE DE COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO DO FLUIDO
μ_{ap}	VISCOSIDADE APARENTE
τ_{Bo}	TENSÃO INICIAL DE CISALHAMENTO DE BINGHAM
μ_p	COEFICIENTE DE RIGIDEZ OU VISCOSIDADE PLÁSTICA
a	RAIO DE SEPARAÇÃO ENTRE DUAS PARTÍCULAS
H	DISTÂNCIA DE SEPARAÇÃO ENTRE DUAS PARTÍCULAS
F_{VDW}	FORÇA DE VAN DER WAALS
A_H	CONSTANTE DE HAMAKER EFETIVA
A_p	CONSTANTE DE HAMAKER DA PARTÍCULA

A_m	CONSTANTE DE HAMAKER DO MEIO
τ_w	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA PAREDE
C_D	COEFICIENTE DE ARRASTO
u	VELOCIDADE DO FLUIDO NÃO PERTURBADO
v'	VELOCIDADE DE TRANSLAÇÃO DA PARTÍCULA
$F_R = F_a$	FORÇA RESISTIVA IGUAL À FORÇA DE ARRASTO
D_p	DIÂMETRO DA PARTÍCULA
ϕ	FATOR DE FORMA DA PARTÍCULA
D_{EEP}	DIÂMETRO ESFÉRICO EQUIVALENTE
m_{EP}	MASSA EQUIVALENTE DA PARTÍCULA
V'	VELOCIDADE DE SUSTENTAÇÃO DA PARTÍCULA
K_1 e K_2	EQUAÇÕES DOS FATORES DE FORMA DAS PARTÍCULAS
m_0	MASSA DE VOLUME DE LÍQUIDO
m	MASSA DA PARTÍCULA
g	ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE
F_a	FORÇA DE ARRASTO DA PARTÍCULA
v	VELOCIDADE DA PARTÍCULA
t	TEMPO
ρ_{polpa}	MASSA ESPECÍFICA DA POLPA DE CAULIM
Na_2CO_3	CARBONATO DE SÓDIO (SODA CÁUSTICA)
KCl	CLORETO DE POTÁSSIO
u' e v'	COMPONENTES FLUTUANTES DA VELOCIDADE NA DIREÇÃO x E y
$\overline{u'v'}$	MÉDIA TEMPORAL DO PRODUTO ENTRE u' E v'
$-\rho \overline{u'v'}$	TENSÃO DE REYNOLDS
$\left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{1/2}$	TERMO REFERENTE À VELOCIDADE FRICÇÃO PARA ESCOAMENTO TURBULENTO

u_*	VELOCIDADE DE FRICÇÃO PARA ESCOAMENTOS TURBULENTOS
C_0	CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO DA EQUAÇÃO PARA O CAULIM
F_p	TENSÃO DE CISALHAMENTO NA PAREDE
E	EMPUXO DA PARTÍCULA
Vol_p	VOLUME DA PARTÍCULA
n_w	VISCOSIDADE DO FLUIDO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO NA PAREDE
ρ_s	MASSA ESPECÍFICA DO SÓLIDO
ρ_f	MASSA ESPECÍFICA DO FLUIDO
\bar{u}	VELOCIDADE MÉDIA DO FLUIDO
\bar{U}	VELOCIDADE EXPERIMENTAL MÉDIA DE ESCOAMENTO DE POLPAS DE CAULIM
$(v_s)_c$	VELOCIDADE A PARTIR DO CENTRO DE MASSA DA PARTÍCULA
$(a_s)_c$	ACELERAÇÃO A PARTIR DO CENTRO DE MASSA DA PARTÍCULA
ω	VELOCIDADE ANGULAR DA PARTÍCULA
r_{QC}	VETOR DE POSIÇÃO
T_F	TENSOR TENSÃO
v_F	CAMPO DE VELOCIDADES

1. INTRODUÇÃO

Caulim é o nome comercial dado a um argilo-mineral, com baixo teor de ferro, de cor branca ou quase branca, constituído essencialmente de caulinita cuja composição química genérica é de um silicato de alumínio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), contendo outros elementos como impurezas. Sua estrutura química lhe oferece, entre outras, as seguintes características: inércia química, alvura, capacidade para cobertura ou reforço, baixa condutividade térmica e elétrica, é pouco abrasivo e de baixo custo. Tantas características tecnológicas fazem do caulim um bem mineral com vasto campo de aplicação industrial. A indústria de papel é a principal consumidora, contribuindo com 45% do mercado mundial.

Na indústria papeleira, o caulim possui duas finalidades principais: carga e cobertura. No caso de ser utilizado como cobertura, a aplicação do caulim é efetuada sobre o papel na forma de polpas concentradas (70% em peso de sólidos).

Segundo o DNPM – Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, o Brasil possui a segunda maior reserva mundial de caulim, correspondendo a 28,2%; ranking este liderado pelos Estados Unidos com 58,4%. Neste mesmo cenário o estado do Pará destaca-se com cerca de 833 milhões de toneladas, sendo também o maior produtor brasileiro do minério.

O beneficiamento do minério de caulim é realizado através de via úmida, ou seja, sob a forma de polpas, com diferentes frações mássicas (% em peso de sólidos), que necessita ser transportada (bombeada) ao longo do processo.

Durante o bombeamento da polpa de caulim; dependendo da concentração de sólidos envolvida no processo, surgem problemas de sedimentação do minério em dutos e equipamentos relacionados.

Comumente, neste segmento da indústria, os sistemas de bombeamento não são dimensionados a partir da reologia do fluido; ou seja, do seu comportamento quando deformados. Tal equívoco resulta em sub ou superdimensionamento, gerando entupimento de tubulações e consumo desnecessário de energia respectivamente.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O CAULIM

Os caulins são constituídos por argilo-minerais do grupo da caulinita, são eles a própria caulinita, a haloisita e metahaloisita, a nacrita e a diquita. Embora esses minerais tenham composição química similar, cada um deles possui importantes diferenças estruturais (Bertolino, 2000).

A caulinita é o mais importante desses minerais, sendo a sua composição química teórica de 39,5% de Al_2O_3 (óxido de alumínio), 46,54% de SiO_2 (dióxido de silício ou sílica) e 13,96% de H_2O (água). Sua estrutura é formada pelo empilhamento regular (1:1) de lâminas de tetraedros de SiO_4 (óxido de silício) intercaladas com lâminas de octaedros de $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ (hidróxido de alumínio), ligadas entre si através de um oxigênio comum, resultando em uma estrutura fortemente polar (Murray & Keller, 1993; Luz & Chaves, 2000; Bertolino, 2000). A forma do cristal de caulinita perfeitamente ordenado é pseudo-hexagonal. A Figura 1 ilustra desde as estruturas simples, tanto a tetraédrica quanto octaédrica, até a representação esquemática de caulinita (Murray & Keller, 1993; Luz & Chaves, 2000; Bertolino, 2000).

A haloisita possui estrutura cristalina semelhante à da caulinita, porém com as camadas sucessivas deslocadas por pequenas frações das dimensões da célula unitária. Quantitativamente, a distância interplanar basal da caulinita está compreendida em torno de 7 \AA^0 , enquanto a da haloisita encontra-se por volta de 10 \AA^0 . Tal diferença confere a caulinita formato lamelar, enquanto a haloisita possui formato tubular ou cilíndrico (Murray & Keller, 1993; apud Bertolino, 2000).

Os minerais diquita e nacrita são quimicamente idênticos a caulinita, mas, tem seus estratos (lâminas) empilhados em seqüências regulares diferentes (apud Bertolino, 2000).

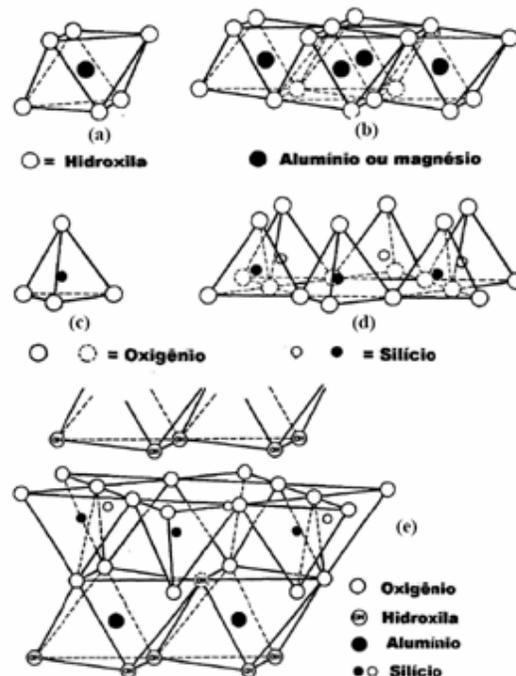


Figura 1 – Representação esquemática da estrutura da caulinita. (a) Uma unidade octaédrica simples de $Al_2(OH)_6$; (b) octaedros de $Al_2(OH)_6$ arranjados em rede; (c) uma unidade tetraédrica simples de SiO_4 ; (d) tetraedros de SiO_4 arranjados em uma rede hexagonal; (e) estrutura da caulinita (apud Bertolino, 2000).

2.2 NATUREZA DOS DEPÓSITOS DE CAULIM

Caulins são produtos da alteração de silicatos de alumínio, principalmente dos feldspatos. Podem ocorrer em dois tipos de depósitos: primário ou residual (eluvial) e secundário (Luz & Chaves, 2000).

2.2.1 Caulins Primários

Caulins primários são aqueles formados “in situ” como resultado da alteração de rochas cristalinas. Dependendo de sua origem, são classificados como intemperizados, hidrotermais e sulfataras (Murray & Keller, 1993; Luz & Chaves, 2000).

Os depósitos intemperizados ocorrem em regiões de clima tropical (quente e úmido), onde as condições físico-químicas favorecem a decomposição de feldspatos e de outros alumino-silicatos (presentes em granitos e em pegmatitos, por exemplo). A transformação do feldspato em caulinita resulta do intemperismo, como o próprio

nome já diz, que lixívia o potássio e a sílica de acordo com a seguinte reação (Murray & Keller, 1993; Luz & Chaves, 2000).



Feldspato Potássio + Água = Caulinita + Sílica + Hidróxido de Potássio

Os depósitos hidrotermais são provenientes da alteração da rocha quando há circulação de fluidos quentes originados no interior da crosta. É necessário que a rocha possua porosidade e permeabilidade adequadas para que haja uma circulação suficiente de fluidos para a obtenção de caulinita (Murray & Keller, 1993; Luz & Chaves, 2000).

Os depósitos sulfatados são obtidos a partir da alteração das rochas pela ação de emanções vulcânicas ácidas, constituídas de vapores d'água ricos em enxofre (Luz & Chaves, 2000).

2.2.2 Caulins Secundários

Caulins secundários, sedimentares por natureza, são aqueles resultantes da erosão dos depósitos primários, onde os materiais são transportados por correntes de água doce. Normalmente, o caulim secundário apresenta granulometria mais fina, menor teor de quartzo e micas e maior contaminação de óxidos de ferro e titânio, que podem alterar a sua cor branca original (Murray & Keller, 1993; Luz & Chaves, 2000; Prasad *et al*, 1991).

Os caulins secundários são classificados em três grupos: caulins sedimentares, areias caulíníticas e argilas plásticas, refratárias e silicosas (Bristow, 1987a).

Uma das principais características dos caulins secundários é o seu alto rendimento em caulinita, normalmente acima de 60%. Segundo SILVA (1997b), o caulim do Rio Capim é de origem sedimentar e faz parte da formação Ipixuna do Terciário. O principal nível de minério (caulim macio) está localizado, em média a 20 metros de profundidade, recoberto por um nível de caulim duro e sedimentos argilosos arenosos (Figuras 2 e 3). As áreas estão situadas no domínio da formação Barreiras, localmente cobertas por sedimentos quaternários ao longo do Rio Capim e seus afluentes, localizados no nordeste do estado do Pará, entre a rodovia Belém-Brasília (trecho entre Ipixuna do Pará e Mãe do Rio) e o médio Rio Capim

(APÊNDICE 1A). Ainda segundo SILVA (1997b) a massa específica do caulim do Rio Capim é de 2,61 ton/m³.

O tipo de areia caulínica caracteriza-se pelo seu baixo rendimento em caulinita (abaixo de 20%), sendo a areia rejeitada no processo de beneficiamento, normalmente utilizada na construção civil, desde que a mina esteja próxima de um centro urbano (Silva, 1997b).

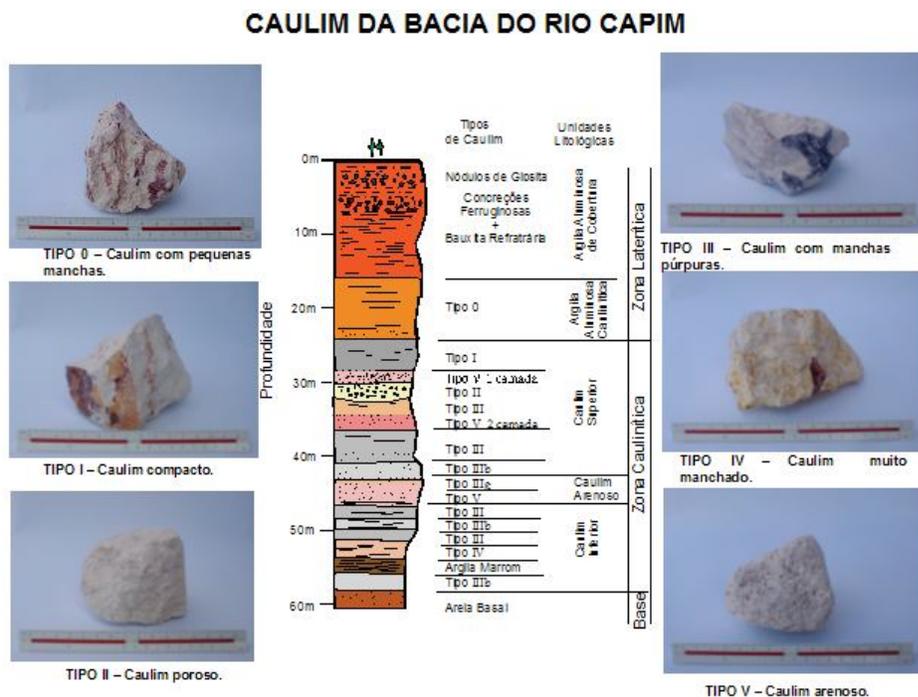


Figura 2: Caulim da bacia do rio Capim

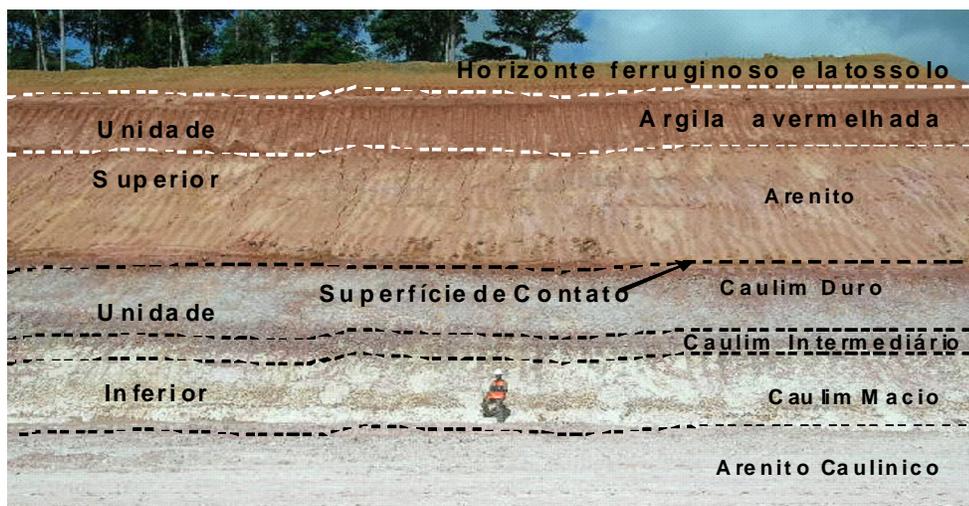


Figura 3: Ilustração do Perfil Geológico - tipologia de caulim da região do Rio Capim

2.3 PRODUTORES DE CAULIM

2.3.1 Reservas e Produção Nacionais

O Brasil possui grandes reservas de caulim e parte significativa destas é de boa qualidade para a indústria de papel. Os Estados do Amazonas, Pará e Amapá detêm cerca de 94% das reservas nacionais, conforme Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Reservas^(*) Brasileiras de Caulim - 2006

Estado	(10 ⁶ t)	(%)
Amazonas	3405	68,58
Amapá	402	8,09
Bahia	8	0,16
Goiás	60	1,20
Minas Gerais	28	0,57
Pará	833	16,78
Paraná	52	1,05
Rio Grande do Sul	47	0,95
Santa Catarina	75	1,52
São Paulo	53	1,06
Outros	2	0,04
Total	4965	100,0

Fonte: Anuário Mineral Brasileiro/DNPM (2006)

(*) medida + indicada + inferida

2.3.2 Reservas e Produção Mundial

A produção mundial de caulim beneficiado é dominada pelos Estados Unidos e Reino Unido, vindo a seguir o Brasil em terceiro lugar. Quanto às reservas mundiais, os Estados Unidos ocupam o primeiro lugar com 58%, vindo a seguir o Brasil com 28%, conforme Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Produção e reservas mundiais de caulim

Países	⁽¹⁾ Reservas (2003)		⁽²⁾ Produção (10 ³ t)		
	(10 ³ t)	(%)	2001 ^(R)	(2002)	2003 (%)
Brasil	4.000000	28,2	1.374	1.517	6,7
Estados Unidos	8.300.000	58,4	9.450	9.710	43
Reino Unido	260.000	1,8	2.600	2.500	11
Ucrânia	980.000	6,9	1.000	1.000	4,4
China	180.000	1,3	950	950	4,2
Outros Países	480.000	3,4	4.162	6.923	30,7
Total	14.200.000	100	19.536	22.600	100,0

Fonte: Sumário Mineral Brasileiro-DNPM (2003)

Reservas totais (no mundo, estimadas em 2003), no Brasil, 2003.

(R) Revisado (apenas Brasil e Estados Unidos; o restante, estimado).

(2) Caulim beneficiado

No cenário mundial de produtores as empresas CADAM PPSA, ambas controladas pela VALE S.A, são juntamente com a empresa Rio Capim Caulim do grupo IMERYS, as maiores exportadoras de caulim para revestimento de papéis do Brasil, além de estarem também entre as maiores beneficiadoras do minério no cenário mundial.

Simplificadamente, o beneficiamento de caulim da PPSA – Pará Pigmentos S.A se inicia com a lavra e estoque prévio em pilhas de espera para conseqüente desagregação primária do minério em um equipamento chamado de *Blunger* com percentual de sólido nesta etapa girando em torno de 40% com ajuste de pH para 6,5 através da adição de carbonato de sódio (Na_2CO_3) – 0,6 kg/ton de ROM e poliacrilato de sódio como dispersante. Em seguida, a polpa é bombeada para a etapa de desareamento através de hidrociclones onde se dá a remoção da areia (partículas grossas com diâmetro maior que 44 μm . O overflow (aproximadamente 30% de sólidos) do hidrociclone é estocado em tanque de passagem e bombeado da mina para a planta de beneficiamento distante cerca de 3 km. (RUFINO, 2005)

Inicia-se a etapa de fracionamento através de centrifugas BIRD, WESTFÁLIA e ALFA LAVAL, onde a distribuição granulométrica está ajustada para que mais de 80% das partículas sejam menores que 2 μm . Após a centrifugação a polpa de caulim com 30% de sólidos é transportada para a etapa de separação magnética criogênica para remoção das impurezas magnéticas coloridas (anatásio, rutilo, hematita, mica etc.) prejudiciais à alvura do caulim. O produto não magnético segue para a etapa de branqueamento (alvejamento), onde ocorre preliminarmente a adição de sulfato de alumínio para a promoção da redução do pH (pH=4,2) que favorece o processo de lixiviação redutora com utilização de hidrossulfito de sódio para redução do Fe^{3+} para Fe^{2+} solúvel em água no processo de desaguamento posterior através de filtros de tambor a vácuo. À torta do filtro é adicionado um defloculante “poliacrilato de sódio” onde o caulim é repulpado (58% de sólidos) e estocado em tanques. Em seguida a polpa de caulim é transportada através de mineroduto de 180 km (APÊNDICE 1B), partindo da instalação de beneficiamento no município de Ipixuna do Pará até a planta de secagem e embarque no município de Barcarena estado do Pará (RUFINO, 2005).

2.4 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO CAULIM

O caulim é um bem mineral extremamente versátil em função de suas características tecnológicas. As principais características que fazem com que o caulim tenha um vasto campo de aplicação industrial são as seguintes (Luz & Chaves, 2000; Carvalho & Almeida, 1997; Prasad et al, 1991): é inerte quimicamente em uma grande faixa de pH (de 3 a 9); é de coloração branca ou quase branca; possui alvura elevada; apresenta baixas condutividades térmica e elétrica; é macio e pouco abrasivo; é facilmente disperso em água; é de granulometria fina; apresenta capacidade de cobertura quando utilizado como pigmento, e pode substituir as fibras de celulose quando aplicado como carga, são compatíveis com praticamente todos os adesivos (proteína e caseína) devido à sua insolubilidade e inércia química e apresenta menor custo quando comparado aos minerais com os quais compete (Bundy, 1993).

2.5 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DO CAULIM

As características acima mencionadas são adequadas a um grande número de importantes aplicações industriais que fazem do caulim um bem mineral bastante versátil e uma matéria-prima amplamente utilizada.

Essas aplicações podem ser classificadas em seis categorias de acordo com suas funções primárias (Bundy, 1993). São elas:

1. Caulim usado para a formação de filmes;
2. Caulim usado como carga ou matéria-prima;
3. Caulim usado para extensão e reforço de polímeros;
4. Caulim usado pela composição química;
5. Caulim usado como veículo, adsorvente, diluente, etc.
6. Caulim usado como agente polidor.

Como pode ser observado, há uma extensa variedade de aplicações para o caulim. Os principais usos encontram-se na Tabela 3, onde a indústria papelreira ocupa o primeiro lugar (Luz & Chaves, 2000).

Tabela 3 – Principais usos do caulim (Luz & Chaves, 2000).

Aplicações Industriais	Porcentagem
Papel	45%
Refratários	17%
Fibra de Vidro	6%
Cimento	6%
Cerâmica	5%
Borracha	4%
Tinta	3%
Outros	14%

2.6. O CAULIM E A INDÚSTRIA DE PAPEL.

O papel é constituído, essencialmente, por uma folha muito fina e uniforme de pequenas fibras de celulose, organizadas em um reticulado muito fino (Bundy, 1993). As folhas possuem vários poros e defeitos capazes de prejudicar a impressão e a reprodução no papel. O preenchimento dos poros e defeitos é realizado mediante a adição de resinas especiais e também pela incorporação mecânica de

várias cargas com finalidades específicas, tais como o aumento de massa específica, do brilho e da superfície lisa da folha de papel (Pettendorfer, 1999).

As fibras celulósicas apresentam-se translúcidas, sendo necessário tornar a folha mais branca e opaca possível, para que a dispersão da luz seja a máxima possível. A opacidade é importante pois, durante a aplicação da tinta, é esta qualidade que impede que a impressão seja vista no verso da folha (Pettendorfer, 1999).

Na produção do papel o caulim apresenta duas funções básicas: carga e revestimento ou cobertura.

2.6.1 O Caulim como Carga

A principal função do caulim como carga é substituir parcialmente as fibras celulósicas, principalmente em papéis oriundos de pasta química (Pettendorfer, 1999), diminuindo os custos de produção (Bundy, 2000).

Além da substituição da fibra celulósica, o caulim também é capaz de provocar uma melhoria na qualidade do papel, já que sendo a fibra porosa, ocorre a passagem da tinta de impressão de um lado para o outro da folha, o que já não ocorre quando a mesma é substituída pelo caulim, já que a opacidade e a rugosidade da mesma tornam-se mais adequadas. Entretanto, a rugosidade excessiva no papel é capaz de provocar reproduções com baixa qualidade de imagens (Pettendorfer, 1999).

A carga também aumenta a gramatura do papel e melhora a sua lisura, flexibilidade e alvura (Pettendorfer, 1999).

2.6.2 O Caulim como Cobertura

Para que se obtenha um papel de elevada qualidade é necessário que haja o recobrimento do papel com uma tinta contendo pigmentos minerais. A tinta deve ser aplicada por duas razões (Pettendorfer, 1999):

1. A carga não se distribui uniformemente por toda a superfície havendo um menor controle no comportamento da tinta de impressão;

2. As superfícies de máquinas utilizadas na produção de papel, em escala microscópica, são irregulares, e mesmo que haja uma calandragem não se consegue produzir papel com qualidade superior;

O papel ao ser revestido apresenta uma superfície menos absorvente, menos rugosa, mais branca, mais brilhante, mais opaca e com melhor receptividade de tinta (Luz & Chaves, 2000).

A indústria papelreira exige especificações rígidas com relação às características do caulim. Antes da sua aquisição enquanto matéria-prima é necessário um estudo prévio das propriedades físicas e químicas de um determinado caulim em prol de se verificar a sua aplicabilidade no mercado desejado. A próxima seção destina-se a citar e descrever algumas importantes propriedades, tanto físicas como químicas, que devem ser determinadas a fim de se avaliar e verificar a possível utilização do caulim na indústria papelreira.

2.7 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO CAULIM PARA O USO NA INDÚSTRIA PAPELEIRA

Quando o caulim destina-se ao uso como carga ou cobertura na indústria de papel, segundo Prasad *et al*, (1991), as principais propriedades a serem avaliadas são: mineralogia; forma, tamanho e distribuição de tamanho de partículas; alvura; pH; reologia e estabilidade da suspensão.

2.7.1 Mineralogia

A análise mineralógica visa detectar a presença dos minerais que formam o caulim. A presença de minerais do tipo quartzo, cristobalita, alunita, esmectita, ilita, moscovita, biotita, clorita, gibbsita, feldspato, anatósio, pirita e halosita poderão afetar o beneficiamento do caulim. A esmectita, a alunita e a halosita contribuem para aumentar a viscosidade da suspensão água-caulim, enquanto o quartzo acarreta o aumento da abrasividade desse mineral (Luz & Chaves, 2000).

2.7.2 Forma, Tamanho e Distribuição de Tamanho de Partícula.

A forma, o tamanho e a distribuição de tamanho das partículas do caulim são fatores a serem determinados. Eles são importantes porque funcionam como parâmetros primários no controle de outras propriedades. São elas: alvura, brilho, opacidade e viscosidade (Luz & Chaves, 2000; Prasad *et al*, 1991). As características mecânicas, óticas e de impressão de uma folha de papel acabada, são afetadas por esses parâmetros. Os caulins mais adequados para a cobertura de papel são aqueles constituídos de caulinita de placas hexagonais e contorno regular, conforme Figura 4 (Luz & Chaves, 2000).

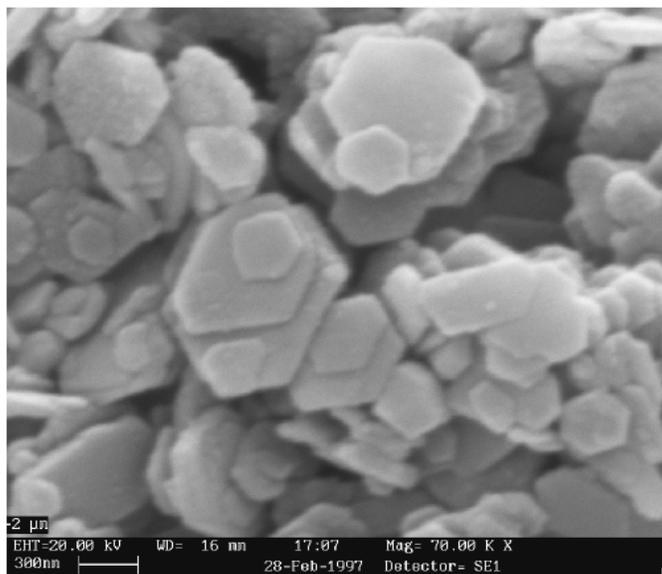


Figura 4- Cristais de caulinita do Rio Capim. Imagem de elétrons secundários obtidos no Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM.

Analisando a Figura 4 acima; fotomicrografia obtida no MEV, podemos observar cristais de formato lamelar com bordas irregulares assemelhando-se a hexágonos, além de aglomerações face-face. A espessura e diâmetro dos cristais analisados são da ordem de 16nm e 300nm respectivamente.

A análise granulométrica de partículas sólidas compreende a determinação do tamanho das mesmas, bem como da frequência com que ocorrem em uma determinada classe ou faixa de tamanho. Em tratamento de minérios, é empregada para a determinação do grau de liberação dos minerais valiosos em relação aos minerais de ganga nas várias faixas de tamanho (o que determina a granulometria

em que o minério deverá ser moído), para a determinação de eficiência de peneiramento industrial e curvas de partição de classificadores, o que, em outras palavras, significa a determinação da eficiência das etapas de cominuição (britagem e moagem) e de classificação, bem como o controle das especificações de tamanho de produto final. (Wills, 1992).

Para partículas que possuem uma forma geométrica canônica como esfera, cilindro ou cubo, a determinação do tamanho das mesmas se dá (convencionalmente) pela medida do seu raio ou diâmetro, do diâmetro da base e altura e do comprimento da aresta, respectivamente. Nas plantas de beneficiamento de minérios, as partículas na grande maioria das vezes possuem forma irregular, daí o uso do conceito de tamanho equivalente, que é determinado pela medida de uma propriedade dependente do tamanho da partícula, relacionando-a com uma dimensão linear. (Wills, 1992).

Existem diversas técnicas de análise granulométrica, que se aplicam a faixas granulométricas bem definidas. A escolha da técnica adequada para se efetuar a análise granulométrica de um determinado material vai depender do tamanho das partículas ali presentes.

As partículas podem ter várias formas, que influenciam determinadas propriedades, tais como fluidez, empacotamento, interação com fluidos e poder de cobertura de pigmentos. Logo, a medição de tamanho de uma mesma partícula por diferentes técnicas pode dar valores diferentes, na medida em que a forma dessa partícula se distancia de uma esfera, daí a razão de se aplicarem fatores de correção para transformar as medidas obtidas de uma técnica para outra e vice-versa. (Wills, 1992).

2.7.3 Alvura e Brilho

As propriedades óticas do caulim são importantes fatores para a maioria das aplicações industriais, principalmente com relação à alvura, pois quanto maior for a sua alvura maior será o seu valor agregado (Luz & Chaves, 2000).

A alvura é determinada em termos do coeficiente de absorção. Esse coeficiente pode ser modificado por tratamento químico ou beneficiamento para a remoção de impurezas coloridas (Prasad *et al*, 1991). A presença de minerais contaminantes do tipo mica, turmalina e óxidos de titânio contribuem para a

diminuição da alvura. Óxidos e hidróxidos de ferro associados ao caulim ou recobrando as partículas de caulinita provocam o mesmo efeito (Luz & Chaves, 2000; Prasad *et al*, 1991).

O brilho é medido por reflectância difusa de luz em determinadas condições e comparadas a um valor padrão (Prasad *et al*, 1991). A reflexão da luz é afetada pelo tamanho e forma das partículas, pela distribuição granulométrica do mineral e pelo grau de impurezas coloridas (*apud* Luz & Chaves, 2000).

2.7.4 pH da Polpa

Antes de serem beneficiados, os caulins apresentam pH entre 4,5 e 6,5 na forma de suspensão água-caulim. Quando os valores de pH encontram-se acima de 7, há presença de sais solúveis que devem ser removidos, pois poderão causar limitações às diferentes aplicações industriais (*apud* Luz & Chaves, 2000).

2.7.5 Reologia

As indústrias de papel, principalmente aquelas que utilizam o caulim como cobertura, utilizam máquinas modernas que trabalham com velocidades de rotação elevadíssimas, da ordem de 1500rpm (Pettendorfer, 1999). A tinta de revestimento, contendo caulim, é normalmente espalhada no papel através de uma lâmina estacionária, onde o papel movimenta-se com velocidades em torno de 100 km/h, atingindo taxas de cisalhamento superiores a 10^6 s^{-1} (*apud* Pettendorfer, 1999). Viscosidades elevadas fazem com que a lâmina tenha dificuldade de se mover causando riscos, bolhas ou até mesmo rasgando o papel. Além disso, os fabricantes de papel tentam utilizar tintas com teores de sólidos mais elevados, visando diminuir o tempo de secagem e, conseqüentemente, o dispêndio energético para tal (Bundy, 1993).

Por essas razões, nos últimos anos, há uma crescente demanda por polpas de caulim com baixas viscosidades e altas concentrações de sólidos, sendo essas concentrações da ordem de 70% em peso.

A alta viscosidade de uma polpa de caulim concentrada pode ser atribuída a uma ou mais das seguintes razões (Bundy, 1993; Macosko, 1994; Callazzo, 1986):

1. Presença de minerais que se dilatam na presença de água;

2. Distribuição de tamanho muito uniforme. Os caulins que apresentam baixa viscosidade apresentam normalmente uma distribuição bimodal, com pelo menos um espalhamento de cristais finos entre cristais grossos. Quando um caulim carece de uma distribuição bimodal, isto é, apresenta pouca quantidade de partículas com tamanho inferior a $2\mu\text{m}$, pode-se reduzir a viscosidade de sua polpa adicionando pequenas porcentagens de caulim com grandes quantidades de partículas de tamanho inferior $2\mu\text{m}$.
3. Presença de sais que inibem a carga elétrica da caulinita gerando a diminuição da repulsão das partículas e, conseqüentemente, aumentando a formação de aglomerados. A lavagem com água pura durante a filtração pode remediar esse tipo de problema;
4. Presença de partículas finas que apresentam pouca ordenação de cristalinidade, retendo água, impedindo que esta funcione como superfície separadora das partículas de caulinita.

O fato de um caulim apresentar baixa viscosidade dinâmica para baixas taxas de cisalhamento (menor que $300\text{mPa}\cdot\text{s}$ a 20 rpm) não significa que o mesmo apresentará baixa viscosidade dinâmica a altas taxas de cisalhamento (menor que $30\text{mPa}\cdot\text{s}$ a 1100rpm) (Pettendorfer, 1999).

A viscosidade a baixas taxas de cisalhamento é controlada principalmente pela área superficial. Aumentando a granulometria ou o grau de anisometria, a viscosidade de baixo cisalhamento tende a ser maior. Já a viscosidade a altas taxas de cisalhamento é controlada pelo arranjo ou distribuição granulométrica do caulim. Neste caso, a viscosidade do sistema caulinita-água depende principalmente do volume efetivo da polpa, ou seja, o volume do líquido bloqueado pelo movimento hidrodinâmico da placa de caulinita. Um caulim que possui distribuição bimodal imobiliza menor volume de água do que um caulim que se apresenta com partículas de grande diâmetro, apresentando assim para um mesmo teor de sólidos, uma menor viscosidade a altas taxas de cisalhamento (Bundy, 1993; Bailey, 1993).

As suspensões aquosas de caulim, geralmente, são constituídas de partículas de ordem coloidal e com elevadas concentrações de sólidos. De um modo geral, as propriedades reológicas de sistemas coloidais dependem da viscosidade do líquido dispersante, da concentração da fase dispersa, do tamanho e forma das partículas dispersas e das forças de interação, ou seja, do estado de estabilidade da suspensão (*apud* Luz & Chaves, 2000). Essa estabilidade é regida pelas forças de

interação existentes entre as partículas, onde, as suspensões são ditas estáveis quando o balanço das forças de interação gera a repulsão entre as partículas.

As principais especificações do caulim para a indústria de papel estão apresentadas na Tabela 4 (Bertolino, 2000), onde se pode notar que o caulim utilizado para a cobertura necessita de níveis de qualidade superiores aos dc caulins utilizados como carga.

Tabela 4 – Especificações do caulim para a industria de papel (Bertolino, 2000).

Propriedade	Carga	Cobertura
Alvura – Norma ISO	80 – 82%	85 – 93%
Tamanho da Partícula	2 μ m – 10 μ m	< 2 μ m
Abrasão	Muito baixa	Mínima
Opacidade	Evitar Translucidez	-
Velocidade de Fluxo		15 – 20 m/s
Brilho		Aspecto final
Massa específica	\approx 2.700 kg/m ³	\approx 2.700 kg/m ³

2.8 ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA REOLOGIA

Reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria. Considere uma película delgada de fluido entre duas placas planas separadas por uma distância “ dy ”, tal qual ilustra a Figura 5. Suponha que a placa inferior esteja fixa e que uma força de intensidade constante seja aplicada à placa superior fazendo com que essa se movimente a uma velocidade “ du ”. A placa superior, por sua vez, transfere quantidade de movimento na direção y para camada ou lâmina de fluido imediatamente seguinte, e assim consecutivamente, fazendo com que, no estado estacionário, seja estabelecido um perfil de velocidades entre as duas placas (Bird, Stewart & Lighthfoot, 1960). Essa quantidade de movimento transferida de camada a camada de um fluido quando esse está em movimento é a viscosidade (Macosko, 1994; Bird, Stewart & Lighthfoot, 1960).

Em termos quantitativos, sob condições de escoamento laminar, a tensão de cisalhamento τ , é definida pela razão entre a força exercida e a área da placa, sendo portanto, proporcional a velocidade imposta à placa, “ du ”, e inversamente proporcional à distância entre as placas, “ dy ”. A constante de proporcionalidade,

nesse caso, é a viscosidade do fluido, μ . A Equação 1 descreve essa proporcionalidade (Macosko, 1994; Bird, Stewart & Lighthfoot, 1960).

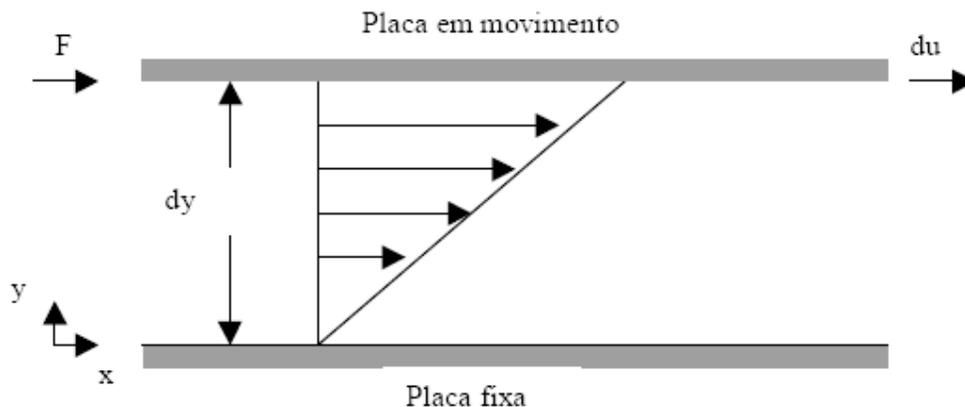


Figura 5 – Escoamento de um fluido entre duas placas paralelas.

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde $\frac{du}{dy} = \gamma$ é denominado gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento, ou seja, a variação da velocidade du na direção y .

A Equação 1 é conhecida como a “Lei de Newton do cisalhamento”. Todos os fluidos que, em escoamento laminar, apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento (τ) e o gradiente de velocidade (γ) são denominados fluidos Newtonianos. Para estes fluidos, a viscosidade depende somente da temperatura e pressão às quais o fluido é exposto, sendo independente do gradiente de velocidade (Macosko, 1994; Bird, Stewart & Lighthfoot, 1960).

No entanto, nem todos os fluidos apresentam comportamento semelhante a esse, quando expostos às mesmas condições de cisalhamento. De maneira geral, todos os fluidos que não seguem a Lei de Newton são denominados fluidos não-Newtonianos (Macosko, 1994; Bird, Stewart & Lighthfoot, 1960).

A relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade para fluidos não-Newtonianos não é linear, sendo a natureza dessa relação o critério utilizado para a classificação dos diversos tipos de fluidos (Macosko, 1994).

A Figura 6 ilustra os reogramas, isto é, curvas de tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade, de vários tipos de fluidos, incluindo os

Newtonianos. A Figura 7 mostra as diferentes classificações do comportamento dos fluidos.

O modelo da Lei de Potência que prediz o comportamento reológico da maioria dos fluidos, é dado pela Equação 2 (Macosko, 1994; Bird, Stewart & Lighthfoot, 1960).

$$\tau = K \cdot \gamma^n \quad (\text{Eq. 2})$$

onde K é o índice de consistência do fluido e n é o índice de comportamento reológico do fluido.

Para fluidos não-Newtonianos, a viscosidade, agora chamada de viscosidade aparente (μ_{ap}), é definida pela relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade. Para fluidos que seguem a “lei da potência” tem-se que (Macosko, 1994):

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\gamma} = K \gamma^{n-1} \quad (\text{Eq. 3})$$

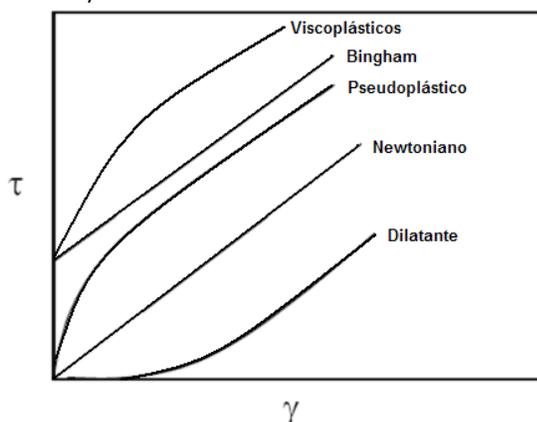


Figura 6 – Reograma de diversos tipos de fluidos (Macosko, 1994).

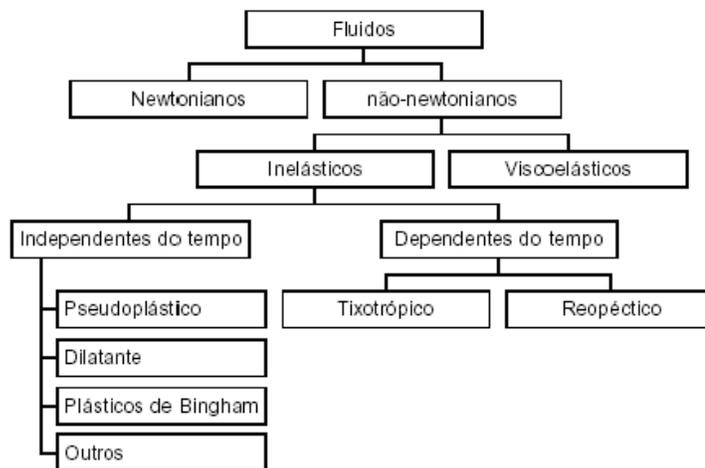


Figura 7 – Classificação do comportamento dos fluidos

Quando $n < 1$, o fluido é caracterizado como pseudoplástico, sendo que a maioria dos fluidos não-Newtonianos encontram-se nessa categoria. Quando $n > 1$, o fluido é denominado dilatante, e finalmente, quando $n = 1$ o fluido é caracterizado como Newtoniano e, nesse caso, o índice de consistência K é a própria viscosidade do fluido.

Outro tipo comum de fluido não-Newtoniano independente do tempo é o fluido de Bingham. O modelo reológico que caracteriza esse fluido é dado por (Macosko, 1994; Bird, Stewart & Lighthfoot, 1960):

$$\tau = \tau_{Bo} + \mu_p \dot{\gamma} ; \tau \geq \tau_{Bo} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde τ_{Bo} é a tensão inicial de cisalhamento de Bingham e μ_p é o coeficiente de rigidez ou viscosidade plástica.

Estes fluidos requerem uma tensão inicial mínima para escoarem, devido à estrutura tridimensional rígida que possuem. Sujeitos a tensões menores que τ_{Bo} , eles comportam-se como sólidos. Atingida a tensão mínima, os fluidos de Bingham escoam similarmente aos fluidos Newtonianos, apresentando uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade (Macosko, 1994; Bird, Stewart & Lighthfoot, 1960).

2.8.1 Fluidos Não-Newtonianos dependentes do tempo

Existem ainda fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo, são eles os fluidos tixotrópicos e os reopéticos. Fluidos tixotrópicos são aqueles cuja viscosidade aparente diminui com o tempo de exposição a um dado gradiente de velocidade fixo. Já os fluidos reopéticos, quando sujeitos a um gradiente de velocidade constante, apresentam um aumento na sua viscosidade aparente conforme o tempo (Macosko, 1994; Bird, Stewart & Lighthfoot, 1960).

2.8.2 Fluidos Não-Newtonianos Independentes no Tempo

Os fluidos não-newtonianos independentes do tempo, sob condições de temperatura e composição constantes, apresentam viscosidade aparente

dependente somente da taxa de deformação ou da tensão de cisalhamento (Rao, 1977 e Rao, 1986). Sendo Classificados da seguinte maneira:

Fluidos Pseudoplásticos

São fluidos que, em repouso, apresentam suas moléculas em um estado desordenado, quando submetidos a uma tensão de cisalhamento suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. E quanto maior esta força, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente. Estes fluidos compõem a maioria dos fluidos não-Newtonianos.

Fluidos Dilatantes

Estes apresentam um aumento de viscosidade aparente com a tensão de cisalhamento. No caso de suspensões, à medida que se aumenta a tensão de cisalhamento, o líquido intersticial que lubrifica a fricção entre as partículas é incapaz de preencher os espaços devido a um aumento de volume que freqüentemente acompanha o fenômeno. Ocorre, então, o contato direto entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, um aumento da viscosidade aparente.

Fluidos Viscoplasticos

Os fluidos viscoplasticos são uma importante classe de materiais não-newtonianos, que exibem deformação acima de um certo nível de tensão, conhecido como tensão limite de escoamento. Alguns exemplos de fluidos viscoplasticos são as soluções poliméricas, fibras em suspensão, produtos alimentícios, tintas, argilas, ceras, sangue, creme dental e fluidos de perfuração. A tensão limite de escoamento é vista como uma adequação de um conceito de engenharia que descreve o comportamento do fluido como um sólido rígido quando a tensão cisalhante é menor que a tensão de escoamento. Sob o campo de tensões o fluido escoar com uma relação não-linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento. A consequência direta dessa propriedade é que o campo de escoamento é dividido em duas regiões: a região de escoamento e a região de não escoamento. (Huigol e You, 2005). Os fluidos viscoplasticos podem convenientemente ser subdividido em: plásticos de Bingham, pseudoplásticos ou fluidos shear-thinning, fluidos dilatantes ou shear-thickening.

2.8.3. Aplicação da Teoria DLVO Clássica – Enunciado Sucinto

Acerca dos fundamentos da química coloidal, uma característica comum a todos os colóides é a elevada relação área/volume. Devido ao pequeno tamanho de partícula, uma fração significativa de suas moléculas situa-se na superfície, ou seja, próximo à interface sólido-líquido, onde se manifestam fenômenos como a adsorção e a formação da dupla camada elétrica. Isso explica porque a ciência dos colóides está tão intimamente relacionada à química de superfície (Shaw, 1975).

Em pequenas concentrações somente interações binárias ocorrem. Com o aumento da concentração, mais de duas partículas podem interagir simultaneamente. Estas interações causam o aumento da viscosidade com o aumento da concentração (Macosko, 1994). Além do movimento Browniano existem forças de interação entre as partículas cuja magnitude torna-se notável em partículas de ordem coloidal.

A força de dispersão (forças de van der Waals) são oriundas das interações existentes entre dipolos elétricos atômicos e moleculares de partículas vizinhas. (Ortega *et al*, 1997a).

A integração das interações entre todos os dipolos resulta em uma expressão para a força de atração total. Para a interação de duas partículas esféricas idênticas de raio a separadas pela distância H (onde a é muito menor que H), a força de van der Waals (F_{VDW}) é dada pela Equação 5. Esta equação é caracterizada pela constante de Hamaker efetiva (A_H) que depende da composição material da partícula. A constante de Hamaker efetiva para um sistema partícula-meio, pode ser descrito como na Equação 6 (Macosko, 1994; Johnson *et al*, 2000).

$$F_{VDW} = -\frac{aA_H}{12H^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$A_H = (A_p^2 - A_m^2)^{1/2} \quad (\text{Eq. 6})$$

onde A_H é a constante de Hamaker efetiva;

A_p é a constante de Hamaker da partícula e

A_m é a constante de Hamaker do meio.

A estabilidade de uma suspensão coloidal, de acordo com a teoria DLVO Clássica, é determinada pelo balanço entre forças atrativas e repulsivas que as partículas sofrem ao se aproximarem. A energia de interação total pode ser alterada

modificando a magnitude da repulsão. A energia de repulsão pode ser manipulada pela variação da força iônica da solução (pela adição de eletrólitos) ou pela mudança do potencial de superfície das partículas (Hunter, 1981).

A título de informação, não se tratando de objetivo deste trabalho, na Equação 7 demonstra-se a formulação para estimativa da energia de interação total pela aplicação da teoria DLVO Clássica; onde:

Para partículas esféricas de mesmo tamanho, onde $R \gg H$:

$$\Delta G_{INT} = \left(\frac{64\pi kTR\rho(\infty)\gamma^2}{\kappa^2} \right) \exp(-\kappa H) - \frac{AR}{12H} \quad (\text{Eq. 7})$$

onde:

R raio médio da partícula sólida = $2,0 \times 10^{-7}$ m;

A = constante de Hamaker efetiva = $4,4 \times 10^{-20}$ J (James & Williams, 1982);

$$\kappa^{-1} = \frac{0,304}{\sqrt{\rho(\infty)}} \quad (\text{nm})$$

$\gamma = \tanh\left(\frac{\zeta}{103}\right)$, sendo que ζ é o potencial zeta em unidades de mV.

Com a formulação acima da Teoria DLVO Clássica efetuam-se cálculos para cada fração mássica, a fim de se construírem gráficos de energia de interação em função da distância de separação parametrizado no pH e na concentração de dispersante (Poliacrilato de sódio, por exemplo) com o objetivo de distinguir suspensões estáveis daquelas que favorecem a aglomeração.

2.9 ESCOAMENTO TURBULENTO EM FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS

Em 1959, Dodge e Metzner realizaram um primeiro estudo teórico e experimental bastante completo relativo ao comportamento do escoamento turbulento de fluidos não newtonianos em dutos de seção circular. O principal objetivo foi a dedução das leis de comportamento do escoamento médio para fluidos de viscosidade variável, mas que não possuíssem qualquer elasticidade, i.e., fluidos puramente viscosos. Deduziram expressões para o coeficiente de fricção e velocidade média local em função do número de Reynolds e dos parâmetros da lei de potência da viscosidade. As correlações foram então validadas por resultados experimentais obtidos com alguns fluidos, mas observaram-se discrepâncias com

outros fluidos que foram justificadas com base na sua viscoelasticidade (Silva, Ilha e Colaço, 2006).

Admitindo que se ajusta uma lei de potência à viscosidade, resulta desta análise que na camada limite a tensão de corte é praticamente constante e igual à tensão na parede τ_w , de que resulta o seguinte perfil de velocidade, semelhante à equação para fluidos newtonianos, desde que se definam os termos adimensionais u^+ e y^+ como na Equação 9 (Silva, Ilha e Colaço, 2006).

$$\bar{u} = \left(\frac{y^n}{K} \right)^n \tau_w^{1/n} = \left(\frac{y^n}{K} \right)^{1/n} (u_*)^{2/n} \rho^{1/n} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{\rho y^n u_*^{2/n}}{K} = (y^+)^{1/n} \quad (\text{Eq. 9})$$

No exterior da camada inercial, a lei de defeito de velocidade é dada pela Equação 10, onde u_m é a velocidade no eixo, enquanto que na zona inercial, também chamada de zona de lei logarítmica, o perfil de velocidade é dado pela relação da Equação 11 (Silva, Ilha e Colaço, 2006).

$$\frac{u_m - u}{u_*} = -5,66n^{0,25} \log \xi \quad (\text{Eq. 10})$$

$$u^+ = \frac{5,66}{n^{0,75}} \log y^+ - \frac{0,566}{n^{1,2}} + \frac{3,475}{n^{0,75}} \left[1,960 + 0,815n - 1,628n \log \left(3 + \frac{1}{n} \right) \right] \quad (\text{Eq. 11})$$

Para fluidos obedecendo uma lei genérica de viscosidade o raciocínio é idêntico, exceto que as forças viscosas são consideradas proporcionais à viscosidade de parede, i.e., a viscosidade do fluido à velocidade de deformação na parede, designada por n_w . Esta pode ser facilmente determinada a partir do reograma e do balanço entre gradiente de pressões e a tensão de corte na parede. Daqui resulta na subcamada viscosa é válida a Equação 12 (Silva, Ilha e Colaço, 2006).

$$u^+ = y^+ \quad (\text{Eq. 12})$$

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_*} \text{ e } y^+ = \frac{\rho u_* y}{n_w} \quad (\text{Eq. 13})$$

Relativo ao perfil de velocidade nas restantes zonas do escoamento teremos um comportamento bastante próximo do da lei newtoniana exceto que o comportamento refluidificante resulta numa ligeira redução de arrasto com

implicações na lei logarítmica de velocidade. A Equação 14 apresenta a lei logarítmica em função de n , o expoente da lei de potência, mas onde y^+ se define como na Equação 11(c.f. Pereira e Pinho, 2002).

$$u^+ = 2,457n^{0,25} \ln y^+ - \frac{0,566}{n^{1,2}} + \frac{2,475}{n^{0,75}} \left[1,96 + 0,816n - 1,628 \log_{10} \left(3 + \frac{1}{n} \right) \right] \quad (\text{Eq. 14})$$

Relativamente à perda de carga o coeficiente de atrito de Darcy, para fluidos inelásticos, obedece à lei de potência da viscosidade, representado abaixo pela Equação 15. Nesta equação $n' = n$ e o número de Reynolds generalizado é calculado pela Equação 16.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = \frac{2,0}{(n')^{0,75}} \log \left[\text{Re}_{gen} (f)^{1-n'/2} \right] - \frac{1,204}{(n')^{0,75}} + 0,602n'^{0,25} \frac{0,20}{(n')^{1,2}} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\text{Re}_{gen} = \frac{\rho D_D^{n'} \bar{U}^{2-n'}}{K' 8^{n'-1}} \quad (\text{Eq. 16})$$

onde $K' = K \left(\frac{3n'+1}{4n'} \right)$ com K e n' o índice de consistência e o expoente da lei de potência respectivamente.

2.10. FLUIDODINÂMICA EM SISTEMAS PARTICULADOS

A fluidodinâmica da partícula pode ser descrita através de um conjunto de equações que inclui a equação do movimento da partícula, as equações da continuidade e movimento para o fluido, a condição de aderência na interface fluido-partícula e mais as equações constitutivas para o fluido e as condições limites pertinentes ao problema específico. A análise limita-se à fluidodinâmica da partícula rígida, incluindo-se nesta categoria não apenas as partículas sólidas como também gotas e bolhas de dimensões diminutas. A partícula tem massa m_p , densidade uniforme ρ_s , volume V_p e a superfície em contato com o fluido é S_p (Massarani, 1990).

As equações que seguem são estabelecidas com base a um referencial inercial.

Equação do Movimento da Partícula

$$m_p (a_s)_C = \int_{S_p} T_F n dS + \rho_s V_p b \quad (\text{Eq. 17})$$

Equação da continuidade e movimento para o fluido

$$\frac{\partial \rho_F}{\partial t} + \text{div}(\rho_F v_F) = 0 \quad (\text{Eq. 18})$$

$$\rho_F \left[\frac{\partial v_F}{\partial t} + (\text{grad} v_F) v_F \right] = \text{div} T_F + \rho_F b \quad (\text{Eq. 19})$$

Condição de Aderência sobre a superfície da partícula

$$(v_F)_Q = (v_s)_C + \omega r_{QC} \quad (\text{Eq. 20})$$

Nestas equações, em relação à partícula, $(v_s)_C$ e $(a_s)_C$ são respectivamente a velocidade e a aceleração de seu centro de massa, ω a velocidade angular e r_{QC} o vetor posição do ponto Q sobre a superfície da partícula em relação ao centro de massa. Quanto ao fluido, ρ_F , v_F e T_F são respectivamente a densidade, o campo de velocidades e o tensor tensão que atua sobre esta fase, b é a intensidade do campo exterior.

A força de interação fluido-partícula pode ser decomposta na força resistiva F_R e no empuxo

$$\int_{S_p} T_F n dS = F_R - \rho_F V_p b \quad (\text{Eq. 21})$$

Sendo nula a força resistiva quando a velocidade relativa entre as faces for nula. A equação do movimento da partícula toma a forma de

$$m_p (a_S)_C = F_R + (\rho_S - \rho_F) V_p b \quad (\text{Eq. 22})$$

Na situação em que a partícula apresenta forma irregular e fora do regime de Stokes, não parece haver outra alternativa senão a de tratar a força resistiva de modo empírico, procurando generalizar os resultados clássicos (Bird *et al.*, 1960, p. 193);

$$F_R = F_a = A \cdot \frac{1}{2} \rho_F \|u - v\|^2 C_D \frac{u - v}{\|u - v\|} \quad (\text{Eq. 23})$$

onde A é uma área característica, C_D o coeficiente de arrasto cujo valor numérico depende da definição de A , u é a velocidade do fluido não perturbado pela presença da partícula na posição do centro de massa desta partícula, e v é a velocidade de translação da partícula. Considera-se na equação acima que a força resistiva $F_R = F_a$ (mesma força de arrasto) e a velocidade relativa tenham a mesma direção, o que implica em admitir que a forma da partícula apresenta um certo grau de regularidade. Nestas condições, a equação do movimento da partícula toma a forma de

$$U = u - v \quad (\text{Eq. 24})$$

$$m_p a_S = \frac{1}{2} A \rho_F C_D \|U\| U + (\rho_S - \rho_F) V_p b \quad (\text{Eq. 25})$$

O estudo da fluidodinâmica da partícula requer o conhecimento da reologia do fluido e das propriedades físicas da partícula expressas pela densidade, dimensão e forma. Entre as múltiplas possibilidades conhecidas na caracterização da partícula e para melhor usufruir um grande número de dados experimentais disponíveis na literatura, adotam-se neste texto o diâmetro volumétrico D_p como dimensão característica e a esfericidade ϕ na caracterização da forma da partícula (Massarani, 1990).

Na prática raramente são encontradas partículas verdadeiramente esféricas, considerando que formas irregulares não podem ser descritas em todo caso por uma única dimensão linear. Assim para partículas não-esféricas convencionou-se a determinação da esfericidade ou fator de forma da partícula ϕ , como sendo a

relação entre a superfície da esfera com o mesmo volume que a partícula e a superfície S_p ; especificamente expressa por:

$$\phi = \frac{\pi \cdot D_p^2}{S_p} \leq 1 \quad (\text{Eq. 26})$$

O diâmetro esférico equivalente D_{EEP} é definido como sendo o diâmetro da esfera com o mesmo volume que a partícula, resultando em:

$$D_{EEP} = \left(\frac{6}{\pi} V_p \right)^{1/3} \quad (\text{Eq. 27})$$

O valor desta propriedade para partículas de forma irregular pode ser determinado com o auxílio da picnometria clássica ou, na situação em que as partículas são diminutas, através da análise granulométrica (Massarani, 1990).

A massa equivalente da partícula pode ser determinada através da massa específica e do volume equivalente de uma esfera, onde teremos:

$$m_{EP} = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_S - \rho_F) \quad (\text{Eq. 28})$$

A esfericidade é um fator de forma empírico que pode ser determinado por permeamtria. É a partícula esférica que apresenta o maior valor de esfericidade, $\phi = 1$. As partículas que ocorrem usualmente, como aquelas resultantes dos processos de moagem, apresentam a esfericidade na faixa de 0,5 a 0,7.

O coeficiente de arrasto C_D , presente na equação que define a força resistiva fluido-partícula, Equação 23, pode ser calculado através da medida da velocidade mínima na qual a partícula é sustentada quando na condição de partícula em repouso V' , isto é, a velocidade constante atingida pela partícula quando lançada no fluido inicialmente em repouso. Definindo a área característica desta equação como sendo a área da seção transversal da esfera de diâmetro D_p , resulta no campo gravitacional, a partir das Equações 29 e 30.

$$A = \frac{\pi D_p^2}{4} \quad (\text{Eq. 29})$$

$$U = 0 - V' = -V' \quad (\text{Eq. 30})$$

$$C_D = \frac{4 (\rho_S - \rho_F) D_p g}{3 \rho_F V'^2} \quad (\text{Eq. 31})$$

Um grande número de experiências conduzidas com partículas isométricas, isto é, partículas esféricas ou na forma de poliedros regulares (tetraedro, cubo, octaedro, icosaedro e dodecaedro), parecem indicar que o valor do coeficiente de arrasto depende apenas do número de Reynolds e da esfericidade (Pettyjohn e Christiansen, 1948).

$$\text{Re} = \frac{D_p V' \rho_F}{\mu} \quad (\text{Eq. 32})$$

$$C_D = \frac{4(\rho_S - \rho_F) D_p b}{3 \rho_F V'^2} = f_1(\text{Re}, \phi) \quad (\text{Eq. 33})$$

Pettyjohn e Christiansen (1948), efetuaram o cálculo da velocidade e do diâmetro da partícula isométrica isolada para fatores de forma compreendidos entre $0,65 < \phi \leq 1$, conforme Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 – Cálculo do coeficiente de arrasto, Velocidade e do diâmetro da partícula isométrica isolada, segundo Pettyjohn e Cristiansen (1948).

Variável a ser estimada	Regime de Stokes ($\text{Re} < 0,5$)	Regime de Newton ($10^3 < \text{Re} < 5 \times 10^4$)
C_D	$\frac{24}{K_1 \text{Re}}$	K_2
V_{tp}	$\frac{(\rho_S - \rho_F) b K_1 D_p^2}{18 \mu}$	$\left[\frac{4(\rho_S - \rho_F) b D_p}{3 \rho_F K_2} \right]^{1/2}$
D_p	$\left[\frac{18 \mu V'}{(\rho_S - \rho_F) b K_1} \right]^{1/2}$	$\frac{3 \rho_F K_2 V'^2}{4(\rho_S - \rho_F) b}$

Onde, K_1 e K_2 são Equações dos fatores de forma das partículas para o respectivo intervalo de esfericidades.

$$K_1 = 0,843 \log_{10}(\phi / 0,065) \quad (\text{Eq. 34})$$

$$K_2 = 5,31 - 4,88 \phi \quad (\text{Eq. 35})$$

2.11 A LEI DE STOKES

Quando uma partícula cai livremente no vácuo, ela está sujeita a uma aceleração constante e sua velocidade aumenta indefinidamente, qualquer que seja seu tamanho ou densidade. Se, contudo, a partícula cai em outro meio que não o vácuo, este oferece uma resistência ao seu movimento, a qual aumenta em razão direta com a velocidade, até atingir um valor constante. Quando as duas forças que atuam na partícula (gravitacional e de resistência do fluido) se tornam iguais, a partícula atinge uma velocidade denominada terminal e passa a ter uma queda com velocidade constante.

$$mg - m_0g - F_D = m_0 \frac{dv}{dt} \quad (\text{Eq. 36})$$

$$F_D = \frac{\pi}{6}(\rho_S - \rho_F)gD^3 \quad (\text{Eq. 37})$$

onde m é a massa da partícula, m_0 é a massa de volume de líquido igual ao volume da partícula, g é a aceleração da gravidade, F_D é a força de arrasto, v é a velocidade da partícula, t o tempo, ρ_S e ρ_F é a massa específica do sólido e da polpa respectivamente e D é o diâmetro da partícula.

A natureza da resistência do fluido depende da velocidade de queda. Para baixas velocidades o movimento é suave, pois a camada de fluido em contato com a partícula move-se com ela, enquanto o fluido como um todo permanece estático. Para altas velocidades, a principal resistência é atribuída à perturbação do fluido, como um todo, pela partícula, caracterizando um regime turbulento.

Independentemente do regime que predomine, a aceleração da partícula tende a decrescer rapidamente com o tempo, sob a ação das forças atuantes, e a velocidade terminal é sempre atingida.

A análise dimensional da partícula é governada por dois grupos: o número de Reynolds (descrito na Equação 32) e o coeficiente de arrasto (descrito na Equação 33).

2.11.1 Técnicas de Análise Granulométrica que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes

A caracterização tecnológica de materiais engloba, principalmente, a determinação de propriedades físicas. Entre estas está a determinação do tamanho

das partículas e a distribuição e também a determinação das diferentes fases e dos constituintes químicos ali presentes. Como a grande maioria das partículas é de forma irregular, faz-se necessário utilizar técnicas de análise de tamanho que se baseiam em similaridades geométricas, como é o caso de diâmetro equivalente, determinadas pelos métodos que utilizam a lei de Stokes em regime laminar ($Re < 0,2$); tais como: béquer de sedimentação, pipeta de Andreasen e Sedigraph.

- **Béquer de Sedimentação**

Nessa técnica, as partículas sólidas são dispersadas em meio aquoso e deixadas sedimentar em um béquer, contendo um sifão imerso no líquido até a uma altura a cerca de 90% da altura "H" do líquido.

Primeiramente, determina-se a massa específica do material, usando-se um picnômetro. Em seguida, calcula-se a velocidade terminal de sedimentação para vários tamanhos de partículas. Finalmente, determina-se o tempo necessário para cada tamanho de partícula migrar-se da superfície do líquido (caso extremo) até o fundo do sifão.

Após uma leve agitação, a polpa é deixada sedimentar-se pelo tempo previamente calculado. Em seguida, sifona-se toda a suspensão acima da extremidade imersa do tubo. As partículas aí contidas são todas consideradas menores que o tamanho "d". No entanto, podem existir partículas menores que o tamanho "d" na parte não sifonada, devido ao posicionamento uniformemente distribuído das mesmas dentro do béquer no instante inicial. Por essa razão, o material sedimentado é novamente diluído. Em geral, repete-se a operação descrita anteriormente por cerca de cinco vezes (o que resulta um tempo de análise muito grande). (Wills, 1992):

- **Pipeta de Andreasen**

Com o auxílio de uma pipeta de Andreasen, a qual consiste de um cilindro graduado de 0 a 20 cm, cujo volume é igual a 0,5 L. Este é conectado a um reservatório de 10 ml por meio de uma torneira de duas saídas. O procedimento para levantamento da curva granulométrica consiste em medir-se a variação de

concentração em determinado nível dentro da dispersão, a intervalos predeterminados de tempo.

A amostra é dispersa em meio líquido (geralmente aquoso) e vertida no cilindro até o nível predeterminado. A pipeta é introduzida e a suspensão é agitada por inversão. Após essa agitação, a mesma é deixada sedimentar e em intervalos de tempo predeterminados as amostras são retiradas por sucção no topo do reservatório. E então a torneira é revertida, permitindo a drenagem da amostra para o coletor. Após a retirada da amostra, anota-se o novo nível do líquido na pipeta.

- **Sedigraph**

O sedigraph consiste de um béquer, agitador magnético, uma ou duas bombas peristálticas, uma cela onde as partículas se sedimentam e uma fonte de raios X. Neste equipamento, há um computador contendo um software, acoplado ao analisador, o que permite a coleta de dados automaticamente, efetuando os cálculos das velocidades terminais de sedimentação para partículas de diferentes diâmetros. Uma distância vertical e um tempo de queda são então selecionados para cada diâmetro a ser medido, de forma que uma partícula, caindo a uma certa velocidade, vai descer uma certa distância, num tempo pré-selecionado, fornecendo o tempo que será gasto para a análise. Dessa forma, para cada diâmetro desejado, o sedigraph fornece uma relação que, multiplicada por 100, dá a porcentagem de partículas com diâmetro desejado.

Cabe ressaltar aqui que o tempo de análise no sedigraph depende da faixa granulométrica que vai ser analisada, isto é, quanto menor a partícula maior será o tempo para a mesma sedimentar. Um outro fator que influencia o tempo de análise é a precisão requerida, ou seja, quanto maior a precisão maior o tempo gasto para a análise. No entanto, pelo fato do sedigraph conjugar a velocidade terminal de sedimentação de partículas com a absorção de raios X pela suspensão, o tempo de análise gasto por esse equipamento é muito menor que o tempo de análise gasto pelas técnicas com béquer de sedimentação e pipeta de Andreasen. Naturalmente, quando não se dispõe de equipamentos sofisticados, que são caros (como é o caso do sedígrafo), a análise granulométrica pode ser efetuada por uma das outras técnicas aqui descritas, uma vez que as mesmas utilizam a lei de Stokes para determinar o tamanho de partículas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. COLETAS DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM

Para o levantamento do comportamento reológico da polpa de caulim da bacia do Rio Capim, foram utilizadas amostras (Tabela 6 e Figura 8) com diferentes frações mássicas (% em peso de sólidos), coletadas em diferentes etapas do processo de beneficiamento via úmido do caulim, conforme pontos assinalados na Figura 9.

Tabela 6 – Descrição dos pontos de coleta das Amostras de polpa de caulim em diferentes etapas do processo de beneficiamento

Amostra	Ponto de Coleta no Processo	Comentário
Amostra A	Produto do Fracionamento	-
Amostra B	Produto da Separação Sólido/Líquido	Amostra diluída com água para obtenção de polpa a 50% sólidos
Amostra C	Produto da Separação Sólido/Líquido	-
Amostra D	Produto da Secagem	-
Amostra E	Produto da Secagem	Amostra enriquecida com caulim seco para obtenção de polpa 71% Sólidos



Figura 8 - Amostras de polpa de caulim com diferentes frações mássicas obtidas do processo de beneficiamento.

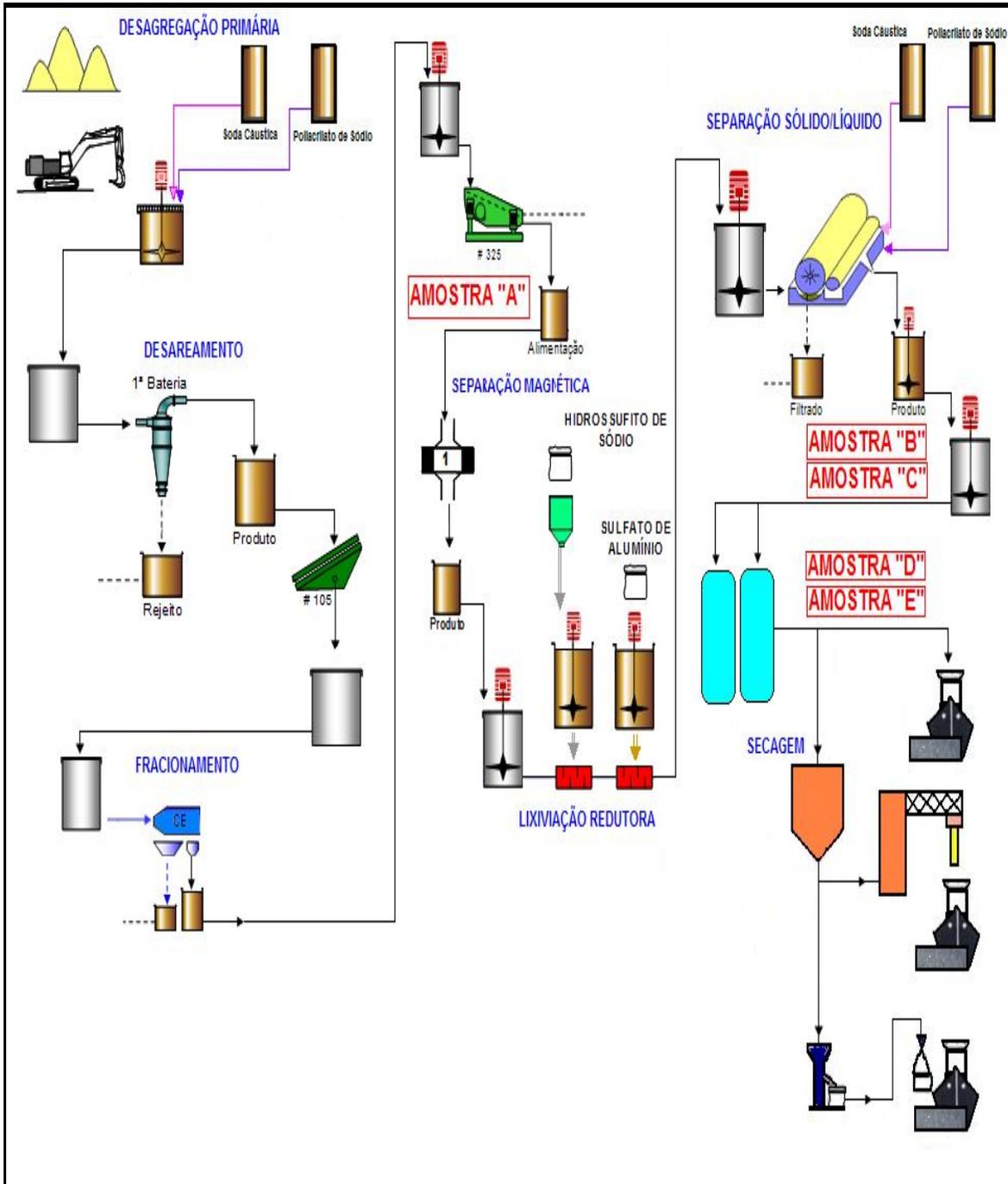


Figura 9 – Descrição dos pontos de coleta de amostras de polpa de caulim ao longo do processo de beneficiamento

As amostras foram caracterizadas tecnologicamente, com conseqüente determinação de parâmetros, tais como; massa específica, percentual de sólidos, distribuição granulométrica, pH e reologia da polpa, esta última essencial para a análise do comportamento do fluido e conseqüente desenvolvimento de uma metodologia para estimativa da velocidade crítica de escoamento, um dos objetivos deste trabalho.

Outro ponto de suma importância reside no fato de que todas as amostras foram aditivadas com agente liquefante “dispersante”, especificamente um composto polimérico chamado Poliacrilato de sódio; onde em escala industrial o ponto ótimo de concentração de 3 kg/tonelada de insumo, possuindo nesta condição para as polpas de caulim do rio Capim forte efeito estabilizante devido à forte repulsão eletrostática interparticular.

Pettendorfer (1999) estudou o efeito de dispersantes industriais na reologia de polpas de caulim. Ele verificou a existência de uma concentração ótima de dispersantes, a partir da qual há um novo aumento da viscosidade.

Quando da adição de Poliacrilato de sódio nas polpas de caulim ocorre a redução da viscosidade aparente da referida suspensão, tanto a baixas quanto a altas taxas de cisalhamento. Porém, esta redução acontece até determinada concentração de dispersante, a partir do qual o efeito contrário passa a acontecer (Pettendorfer, 1999).

3.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DA POLPA DE CAULIM

Após a coleta das amostras, estas foram homogeneizadas com auxílio de agitador tipo SEMCO por um minuto com velocidade de ± 1000 rpm, para completa suspensão do sólido. Cerca de 500 ml de polpa foi colocada em uma proveta, onde se inseriu o densímetro, com conseqüente visualização e anotação do valor de densidade obtido.

Para a determinação das massas específicas das amostras de polpa coletadas ao longo do processo, foram utilizados densímetros da marca INCOTERM, Modelos 5584, 5585, 5586 e 5588; com escala de (1,0 - 1,2), (1,2 - 1,4), (1,4 - 1,6), (1,6 - 1,8) respectivamente.

3.3 DETERMINAÇÃO DO PERCENTUAL DE SÓLIDOS (%) DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM

O percentual de sólidos das amostras analisadas foram determinados através de equipamento da Marca OHAUS – MB 45 (Figura 10), seguindo recomendação do fabricante no que se diz respeito ao ajuste de temperatura do ensaio. Para polpas com percentual de sólidos inferior a 50% a temperatura deve ser fixada em 150 °C, e tempo de exposição ao ensaio de 60 segundos. Para amostras acima de 50% de sólidos a temperatura deverá ser reajustada para 120 °C, permanecendo o tempo de exposição de 60 segundos.

Após o ajuste de temperatura do ensaio no equipamento, 12 gramas ($\pm 0,5$ gramas) de cada amostra de polpa de caulim coletadas, devidamente homogeneizadas; separadamente, foram colocadas em pratos de alumínio e submetidas ao experimento, que de maneira automatizada determina o valor de umidade e percentual de sólidos.

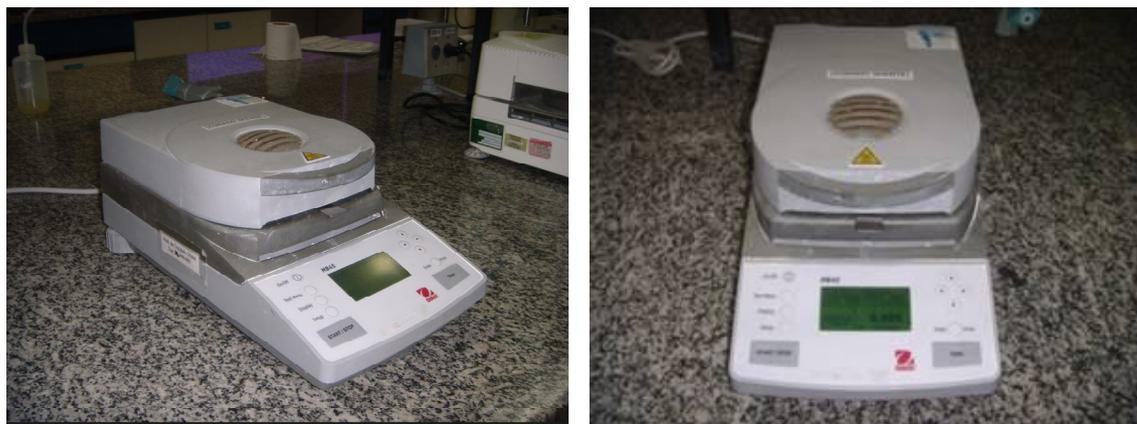


Figura 10: - Analisador de % de Sólidos (Fração mássica) – Marca OHAUS, Modelo MB-45

Uma outra metodologia empírica de determinação de sólidos pode ser calculada através de sua correlação com a densidade da polpa, expressa na Equação 31 abaixo:

$$\% \text{ Sólidos} = 1,606 \left(\frac{\rho_{polpa} - 1}{\rho_{polpa}} \right) 100 \quad (\text{Eq. 38})$$

onde: ρ_{polpa} = massa específica da polpa de caulim.

3.4 DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM

A distribuição granulométrica das amostras de polpa de caulim da bacia do Rio Capim foram realizadas em um analisador de tamanho de partículas (sedígrafo) SEDIGRAPH 5100 de marca MICROMERITICS (Figura 11), com faixa de medição de 300 a 0,1 micrômetros.

A sedigrafia baseia-se na sedimentação gravitacional e quantificação do material em decantação por absorção de raios-X, com cálculo da distribuição de tamanho de partículas (equivalentes esféricas) pela lei de Stokes.



Figura 11 - Analisador de tamanho de partículas (Sedígrafo) – Marca MICROMERITICS - SEDIGRAPH 5100

As amostras foram homogeneizadas com auxílio de agitador tipo SEMCO por um minuto com velocidade de ± 1000 rpm, para completa suspensão do sólido. Em seguida foi ajustado o pH das amostras para 7 com solução de carbonato de sódio (Na_2CO_3) 10% peso por volume.

A amostra então foi passada em uma peneira de 325 mesh (correspondente a $45 \mu m$), com posterior remoção de cerca de 20 gramas de polpa em um becker de 100 ml, submetendo-a em seguida a 60 segundos em uma sonda de ultra-som da marca SONICS. Finalmente a amostra foi despejada no porta-polpa do Sedígrafo para efetiva análise do tamanho das partículas.

De forma preliminar, fez-se necessário criar um arquivo das amostras de polpa de caulim, entrando com a massa específica de cada uma delas, faixa granulométrica, viscosidade da polpa, temperatura do ensaio, uma de cada vez.

Na primeira etapa da análise, o sedigraph mede a transmitância de raios X através da suspensão da amostra de caulim em movimento, de modo a não permitir nenhuma sedimentação. Essa transmitância é considerada como indicadora da mistura homogênea de todas as partículas, ou seja, ela está relacionada à concentração total de partículas presentes nas amostras. Em seguida, o equipamento interrompe o movimento da suspensão da amostra permite que a sedimentação comece a ocorrer. A transmitância de raios X é, então, medida novamente nas diferentes posições na cela (medidas em relação ao topo da mesma) e nos tempos pré-selecionados com base na lei de Stokes (medidos a partir do momento em que a circulação da suspensão de amostra foi interrompida). As transmitâncias assim obtidas se relacionam à concentração de partículas com o exato diâmetro correspondente à distância e ao tempo de queda em que foram medidas. Dessa forma, para cada diâmetro desejado, o sedigraph fornece uma relação que, multiplicada por 100, dá a porcentagem de partículas com diâmetro desejado.

3.5 DETERMINAÇÃO DE pH

Para a determinação do pH das amostras coletadas foi utilizado um PHMETRO DIGIMED Modelo DM-20 (Figura 12), com eletrodo e termocompensador imerso em solução de cloreto de potássio *KCl* 3M.



Figura 12 - Analisador de pH – Phmetro DIGIMED, Modelo DM-20

Após a homogeneização da polpa com auxílio de agitador tipo SEMCO, e conseqüente remoção e lavagem do eletrodo e termocompensador; o respectivo

conjunto foi introduzido na amostra em teste e automaticamente através do display do equipamento fornece o valor de pH resultante do ensaio.

Nesta etapa do trabalho torna-se importante enfatizar que os valores de pH devem ser padronizados, uma vez que maiores valores de pH associados à concentração de dispersante (Poliacrilato de sódio) fornecem maiores barreiras energéticas favorecendo a repulsão entre as partículas. Logo para este experimento adotou-se pH=7,0 como valor padrão que aliado a concentração padrão de 3 kg/tonelada, fornece uma repulsão equivalente para todas as frações mássicas ensaiadas.

3.6 DETERMINAÇÃO DA REOLOGIA DAS POLPAS DE CAULIM COLETADAS NO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO.

Antecedendo a determinação da reologia das polpas de caulim; fez-se necessário ajustar o pH das amostras para 7 a fim de padronizá-las com o mesmo valor, com solução de carbonato de sódio (Na_2CO_3) 10% peso por volume.

As medidas de viscosidade aparente das suspensões foram determinadas com auxílio de Viscosímetro HÉRCULES HI-SHEAR, Modelo DV-10 (Figura 13) em função da rotação máxima, tempo de rampa de aceleração e desaceleração, igual a 1100 rpm e 20 segundos respectivamente; bem como temperatura constante e igual a 26°C; estes parâmetros pré-programados no software do equipamento “Winshear”.



Figura 13 - Viscosímetro HÉRCULES HI-SHEAR, Modelo DV-10

Para cada amostra de polpa de caulim analisada se introduziu no software “Winshear” os valores correspondentes de densidade e percentual de sólidos, conforme Tabela 7, para efetiva determinação das respectivas viscosidades aparentes, taxa e tensão de cisalhamento; necessários para a obtenção de reogramas completos das dispersões, viabilizando a análise do comportamento do fluido.

Após a programação preliminar do software, as amostras de polpa foram devidamente preparadas e homogeneizadas com utilização de agitador SEMCO, durante 1 minuto com rotação de 1000 rpm, para completa suspensão do sólido; transferindo em seguida a respectiva polpa para um becker Berzelius de 600 ml, com conseqüente adição de 0,3 ml de solução de poliacrilato de sódio 20% peso por volume, para dispersão.

A polpa então preparada foi rehomogeneizada e direcionada ao copo coletor de amostra do viscosímetro, travando-o no equipamento e finalmente submetendo-o ao ensaio.

3.7 METODOLOGIA DE ANÁLISE DA VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO \bar{U} PARA AS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM

Segundo Fox e Mcdonalds (1998), no escoamento turbulento não há relação simples entre o campo de tensões de cisalhamento e o campo de velocidade média. Flutuações de velocidade no escoamento turbulento resultam no transporte de quantidade de movimento entre camadas adjacentes de fluido. Essa transferência de quantidade de movimento pode ser vista como uma força por unidade de área, uma tensão aparente, que deve ser adicionada à tensão causada pelos gradientes da velocidade média. Para escoamento turbulento completamente desenvolvido em canais abertos, a tensão de cisalhamento total é dada por:

$$\tau = \tau_{lam} + \tau_{turb} = K \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^n - \rho \overline{u'v'} \quad (\text{Eq. 39})$$

Na Equação 39, y é a distância da parede do tubo e \bar{u} é a velocidade média; u' e v' são componentes flutuantes da velocidade nas direções x e y , respectivamente, e $\overline{u'v'}$ é a média temporal do produto entre u' e v' . A noção de uma

tensão aparente foi introduzida pela primeira vez por Osborne Reynolds; o termo $-\rho\overline{u'v'}$ é referido como a tensão de Reynolds.

Segundo Fox & McDonald (1998), através de medições experimentais da tensão de Reynolds, o cisalhamento turbulento é dominante sobre a região central do tubo e nulo na parede porque a condição de não deslizamento exige que a velocidade, ali, seja zero. Na região muito próxima da parede do tubo, a camada da parede, o cisalhamento viscoso é dominante. Na região entre a camada da parede e a porção central do tubo tanto o cisalhamento viscoso quanto o turbulento são importantes.

$$\tau_w = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (\text{Eq. 40})$$

Dividindo a equação 40 por ρ resulta

$$\frac{\tau}{\rho} = K \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^n - \overline{u'v'} \quad (\text{Eq. 41})$$

O termo $\frac{\tau}{\rho}$ surge freqüentemente quando se considera escoamentos turbulentos; ele tem dimensões de velocidade ao quadrado. A quantidade $\left(\frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2}$ é chamada de velocidade de fricção e é denotada pelo símbolo u_* .

3.7.1 Hipóteses assumidas na Análise de Velocidade Crítica de Escoamento

Hipótese 01

Admitindo que o produto das componentes flutuantes das velocidades na direção x e y , respectivamente, $\overline{u'v'}$ é da ordem da velocidade de atrito u_*^2 teremos:

$$\overline{u'v'} \equiv u_*^2 = \frac{\tau_w}{\rho} \quad (\text{Eq. 42})$$

$$\tau_w = \frac{f}{2} \rho \bar{U}^2 \quad (\text{Eq. 43})$$

onde τ_w , ρ e \bar{U} são a tensão na parede, densidade do fluido e velocidade média do fluido respectivamente.

Sendo $\left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2}$ igual a u_* e, por conseguinte admitindo que u_* é da ordem de v' e respectivamente da velocidade mínima de sustentação da partícula na condição de repouso V' , teremos:

$$u_* \equiv v' \equiv V' \quad (\text{Eq. 44})$$

$$\left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2} = u_* \quad (\text{Eq. 45})$$

Substituindo o termo $\frac{f}{2} \rho \bar{U}^2$ em τ_w , resultará em:

$$\left(\frac{\frac{f}{2} \rho \bar{U}^2}{\rho}\right)^{1/2} = u_* \quad (\text{Eq. 46})$$

$$\left(\frac{f}{2} \bar{U}^2\right)^{1/2} = u_* \quad (\text{Eq. 47})$$

$$\sqrt{f} \equiv \frac{u_*}{\bar{U}} \quad (\text{Eq. 48})$$

como $u_* \equiv v' \equiv V'$, podemos reescrever a Equação 48, que resultará na seguinte expressão:

$$\sqrt{f} \equiv C_0 \frac{V'}{\bar{U}} \quad (\text{Eq. 49})$$

onde C_0 é a constante de calibração da expressão, obtida através de ensaios experimentais com a polpa de caulim.

Hipótese 02

Análise Fluidodinâmica de uma Partícula de Caulim Isolada

Considerações Iniciais:

Duto de seção circular;

A partícula de caulinita é uma esfera rígida.

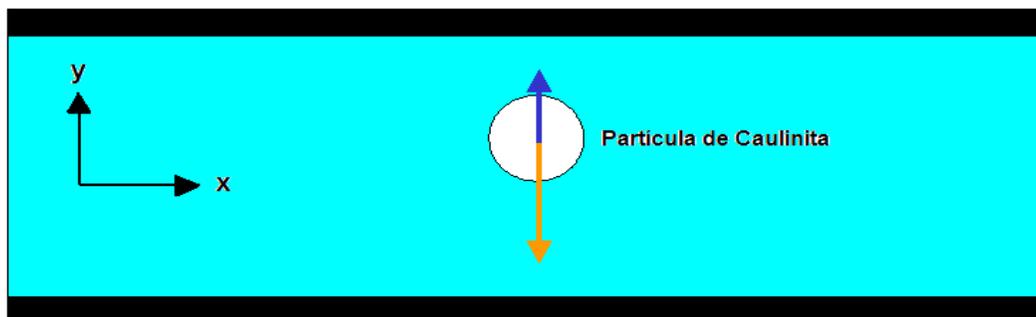


Figura 14 – Ilustração de uma partícula isolada de caulinita em um duto de seção circular.

Aplicando a Teoria do Movimento da partícula em um fluido e decompondo as forças existentes através da condição de equilíbrio teremos:

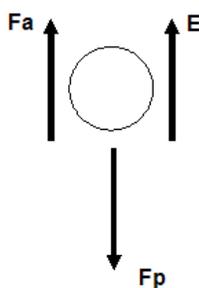


Figura 15 – Ilustração das forças envolvidas na partícula para sua condição de equilíbrio

Através da 2ª Lei de Newton

$$\sum Fy = Fp - E - Fa = m \frac{dv}{dt} \quad (\text{Eq. 50})$$

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{m\rho_F g}{\rho_S} - C_D \frac{\rho A V^2}{2} \quad (\text{Eq. 51})$$

Assumindo que a Velocidade mínima de sustentação da partícula na condição de repouso, V' é atingida; $dv/dt = 0$ teremos:

$$mg - \frac{m\rho_F g}{\rho_S} = C_D \frac{\rho_F A V'^2}{2} \quad (\text{Eq. 52})$$

Isolando V' teremos:

$$V'^2 = \frac{2gm(\rho_S - \rho_F)}{A\rho_S C_D \rho_F} \quad (\text{Eq. 53})$$

Assumindo que a partícula possui de maneira preliminar uma geometria esférica teremos:

$$\rho = \frac{m}{Vol} = \rho_p = \frac{m_p}{Vol_p} \quad (\text{Eq. 54})$$

$$Vol_{esfera} = \frac{4}{3}\pi r^3 = Vol_p = \frac{4}{3}\pi r_p^3 \quad (\text{Eq. 55})$$

$$m_p = \frac{4}{3}\pi r_p^3 \rho_S \quad (\text{Eq. 56})$$

$$A = \frac{\pi D_p^2}{4} \quad (\text{Eq. 57})$$

Substituindo as Equações 56 e 57 na Equação 53 teremos:

$$V' = \sqrt{\frac{4(\rho_S - \rho_F)D_p}{3C_D \rho_F}} \quad (\text{Eq. 58})$$

Relembrando que na Hipótese 1 admitiu-se que a velocidade mínima de sustentação da partícula na condição de repouso V' é da ordem da velocidade de fricção e por conseguinte da velocidade de flutuação na direção y (Equação 44), e substituindo a Equação 58 na Equação 49 teremos:

$$\sqrt{f} \equiv C_0 \sqrt{\frac{4(\rho_S - \rho_F)D_p}{3C_D \rho_F}} \equiv C_0 \frac{V'}{U} \quad (\text{Eq. 59})$$

Na expressão da velocidade mínima de sustentação da partícula (Equação 58), no que se refere ao coeficiente de arrasto C_D , este, segundo Pettyjohn e Christiansen (1948), após inúmeras experiências com partículas esféricas e poliedros regulares, identificaram aparentemente que o valor C_D depende apenas de Reynolds e do fator de forma da partícula (esfericidade).

$$C_D = f(\text{Re}, \phi) \quad (\text{Eq. 33})$$

No que tange a caulinita, obviamente não se trata de uma partícula esférica (Figura 3), fazendo-se necessário a partir do seu fator de forma (esfericidade) ϕ , calcular o coeficiente de arrasto C_D .

Para a estimativa do valor da esfericidade ou fator de forma ϕ utilizou-se dos dados obtidos no ensaio de fotomicrografia através de Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV, descrito na Figura 4; diâmetro e espessura dos cristais de caulinita (300nm e 16nm respectivamente), onde substituindo o valores reportados no ensaio realizado pelo Centro de Tecnologia Mineral – CETEM em 1997 nas equações abaixo, torna-se possível estimar o valor de esfericidade e por conseguinte o coeficiente de arrasto C_D que auxiliarão na análise da velocidade crítica das polpas de caulim da bacia do rio Capim.

$$\phi = \frac{\pi \cdot D_p^2}{S_p} \leq 1 \quad (\text{Eq. 26})$$

$$D_{EEP} = \left(\frac{6}{\pi} V_p \right)^{1/3} \quad (\text{Eq. 27})$$

$$m_{EP} = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_S - \rho_F) \quad (\text{Eq. 28})$$

Conforme estimativa reportada no Apêndice 3A e 3B a esfericidade ou fator de forma da partícula de caulinita hexagonal da bacia do rio capim é de $\phi = 0,77$. Quanto ao coeficiente de arrasto C_D , pode-se utilizar a metodologia aplicada por Pettyjohn e Christiansen (1948), enunciada na Tabela 5, considerando o Regime de Newton ($10^3 < Re < 5 \times 10^4$) e esfericidades ϕ , compreendidas entre $0,65 < \phi \leq 1$.

$$C_D = K_2 = 5,31 - 4,88\phi \quad (\text{Eq. 35})$$

Logo, reescrevendo a Equação 60 teremos:

$$\sqrt{f} \equiv C_0 \sqrt{\frac{4(\rho_S - \rho_F)D_p}{3K_2\rho_F}} \equiv C_0 \frac{V'}{\bar{U}} \quad (\text{Eq. 61})$$

Baseado nos experimentos de Dodge e Metzner (1959) relativo a perda de carga; coeficiente de fricção de Darcy para fluidos inelásticos obedecendo à Lei de Potência da viscosidade; inseriu-se a condicionante encontrada na Equação 61, bem como o número de Reynolds generalizado da Equação 16 na Equação 15; com a finalidade de isolar a velocidade média de escoamento do fluido \bar{U} para um dado

comportamento reológico, obtido através de resultados experimentais, realizado com as polpas de caulim de diferentes frações mássicas.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = \frac{2,0}{(n')^{0,75}} \log \left[\text{Re}_{gen} (f)^{1-n'/2} \right] - \frac{1,204}{(n')^{0,75}} + 0,602n'^{0,25} \frac{0,20}{(n')^{1,2}} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\text{Re}_{gen} = \frac{\rho_F D_D^{n'} \bar{U}^{2-n'}}{K' 8^{n'-1}} \quad (\text{Eq. 16})$$

onde $K' = K \left(\frac{3n'+1}{4n'} \right)$ com K e n' o índice de consistência e o expoente da lei de potência respectivamente.

Substituindo as respectivas Equações 16 e 61 em 15, teremos o seguinte equacionamento para o cálculo da velocidade média de escoamento \bar{U} , para um fluido com sólidos em suspensão:

$$\sqrt{\frac{1}{\left(C_0 \frac{V'}{\bar{U}} \right)^2}} = \frac{2,0}{(n')^{0,75}} \log \left\{ \frac{\rho_F D_D^{n'} \bar{U}^{2-n'}}{K' 8^{n'-1}} \left[\left(C_0 \frac{V'}{\bar{U}} \right)^2 \right]^{1-\frac{n'}{2}} \right\} - \frac{1,204}{n'^{0,75}} + 0,602n'^{0,25} \frac{0,20}{(n')^{1,2}} \quad (\text{Eq. 62})$$

3.8 LEVANTAMENTO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ESCOAMENTO DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM

As amostras com diferentes frações mássicas (Tabela 06) foram preparadas em escala de produção e armazenadas uma de cada vez em um tanque de 1230 m³; onde foram bombeadas de um tanque para outro com a mesma capacidade, através de uma bomba centrífuga interligada a uma tubulação em aço inox 304L de 0,264 m de diâmetro interno. A vazão foi registrada através de um tubo medidor magnético, instalado na respectiva tubulação, gerando o levantamento da velocidade média de escoamento \bar{U} , para o dado diâmetro.

Tabela 7 – Descrição dos Equipamentos utilizados para levantamento da velocidade média experimental de escoamento das polpas de caulim da bacia do Rio Capim.

Descrição do equipamento	Quantidade	Legenda
Medidor de vazão eletromagnético; corpo em aço carbono, eletrodo em aço inox AISI 316 escala de vazão 20 a 210 m ³ /h, Diâmetro interno do tubo medidor de 0,264 m.	01	1
Bomba centrífuga KSB – Modelo LCC-M 80-300; rotação nominal 1800 rpm; revestimento da carcaça em borracha; diâmetro do rotor 310mm; tipo de rotor fechado; material do rotor em aço cromo.	01	2
Motor WEG de 50HP; carcaça 200L; rotação nominal de 1800 rpm; corrente nominal de 61,5A.	01	3
Tubo em aço inox AISI 304L, sch 10S, diâmetro 0,273m, classe de pressão de 150 libras.	72 m	4
Tanque em aço carbono com volume útil de 1230 m ³ ; agitador SEMCO 30 rpm para homogeneização da polpa.	02	5

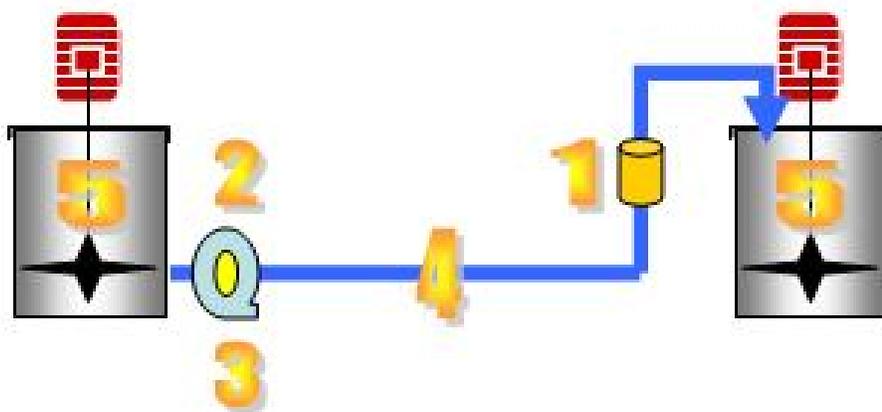


Figura 16 – Equipamentos utilizados para o levantamento experimental da velocidade média de escoamento de polpas de caulim com diferentes frações mássicas em duto de 0,264 m de diâmetro interno.

Para a simulação do escoamento de polpas de caulim; utilizando-se de inversor de frequência, modelo WEG CFW-80 instalado no acionamento da bomba de transferência entre os tanques envolvidos no experimento, executa-se a verificação da vazão mínima e máxima atrelada a condição do sistema, partindo de (24 Hz ou 720 rpm) até (60Hz ou 1800 rpm); onde através do diâmetro conhecido da tubulação de 0,264 m, calcula-se a velocidade média de escoamento \bar{U} da polpa de caulim com diferentes frações mássicas, possibilitando assim a estimativa da constante de calibração C_0 da Equação 62, que juntamente com os parâmetros reológicos, fomentarão a estimativa da velocidade crítica ou mínima para o bombeamento do respectivo fluido sem que ocorra sedimentação significativa que acarrete a obstrução da tubulação.

3.9 ESTIMATIVA DA CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO C_0 ATRAVÉS DOS DADOS EXPERIMENTAIS DE ESCOAMENTO DE POLPAS DE CAULIM.

Relativo a equação 62, tratando-se de equação não explícita, fez-se necessário o desenvolvimento de rotina através do Método de Newton-Raphson em linguagem FORTRAN 90 para calcular a velocidade de escoamento \bar{U} das polpas de caulim da bacia do Rio Capim com diferentes frações mássicas, levando em consideração os parâmetros de comportamento do fluido (peso específico, índice de comportamento do fluido oriundo da lei de potência, índice de consistência do fluido, viscosidade, tensão de cisalhamento, fator de forma da partícula, velocidade de ascensão da partícula, etc.)

Isolando \bar{U} da Equação 62 e assumindo que $\bar{U} = x$ teremos a seguinte função $f(x)$ da velocidade:

$$f(x) = -\sqrt{\frac{1}{\left(C_0 \frac{V'}{x}\right)^2}} + \frac{2}{n^{0,75}} * \log \left[10, \frac{\rho_F D_D^{n'} x^{-2-n'}}{K' 8^{n'-1}} * \left(C_0 \frac{V'}{x}\right)^{2-n'} \right] - \frac{1,204}{n^{0,75}} + 0,602 n^{0,25} * \frac{0,20}{(n')^{1,2}}$$

(Eq. 63)

De posse da função da velocidade da Equação 63, torna-se necessário a determinação da primeira derivada $f'(x)$ da respectiva função (Equação 64) para a utilização do Método de Newton Raphson e conseqüente formatação da rotina no software FORTRAN 90.

$$f'(x) = -\frac{2x}{C_0^2 * V' * \sqrt{\frac{x^2}{C_0^2 * V'}}} + \frac{2^{1-2 * n'} * D_D^{n'} * (2-n') * \rho_F * \left(\frac{C_0 * V'}{x}\right)^{2-n'} * x^{1-n'}}{n^{0,75} * \rho_F * \log(10)} * \frac{2^{1-2 * n'} * K * D_D^{-n'} * \left(\frac{C_0 * V'}{x}\right)^{-2+n'} * x^{-2+n'}}{K'}$$

(Eq. 64)

Utilizando-se dos dados experimentais de velocidade média das polpas de caulim, estima-se a constante de calibração C_0 através da inserção de dado valor (tentativa e erro) até o momento que a velocidade média de escoamento \bar{U} seja igual a velocidade experimental.

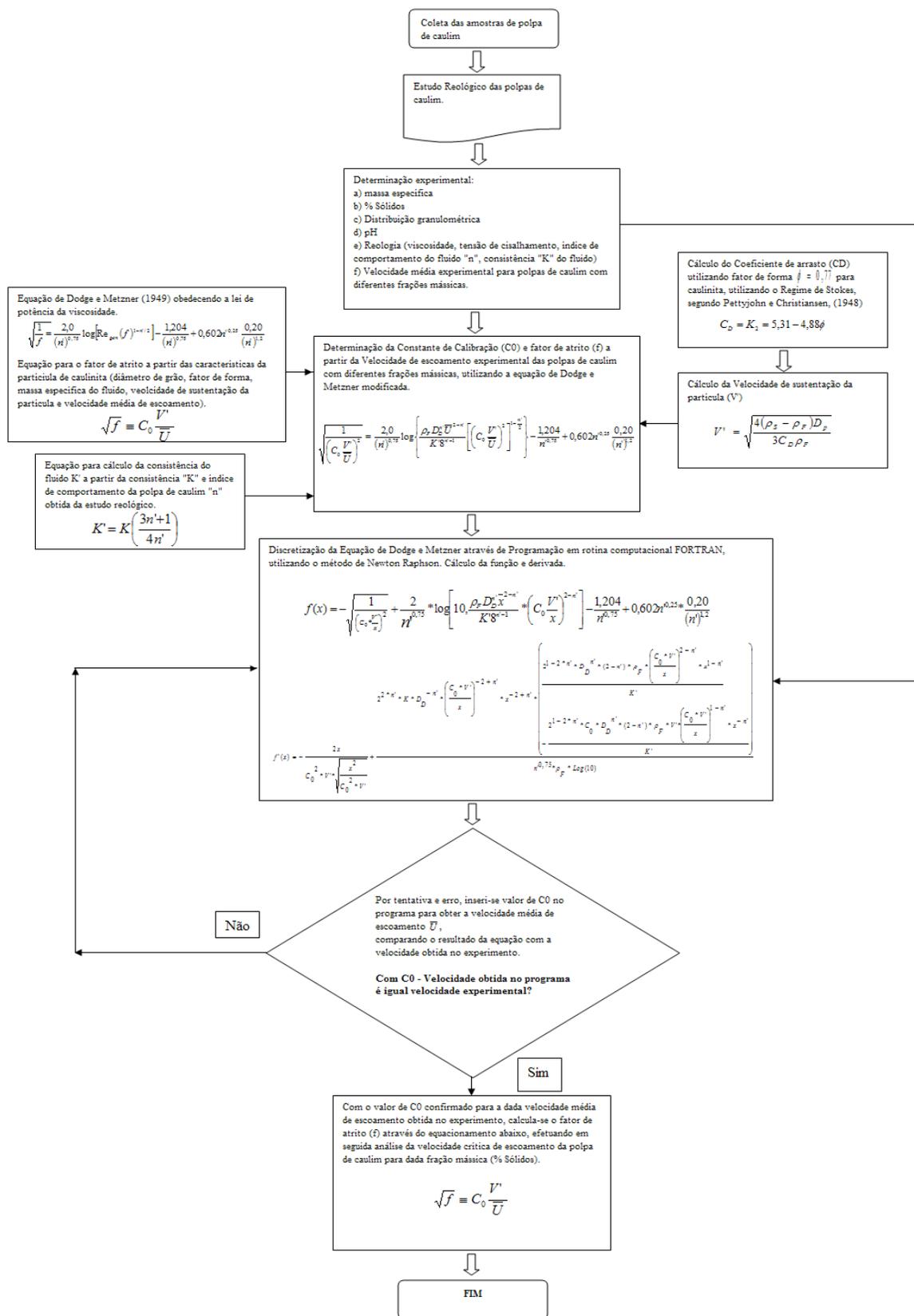


Figura 17 - Fluxograma de determinação da velocidade crítica de escoamento de polpas de caulim.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MASSA ESPECÍFICA, PH E PERCENTUAL DE SÓLIDOS DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM.

Tabela 8 – Resultados de massa específica, pH e Percentual de Sólidos das amostras de polpa de caulim

Amostra	Massa específica (kg/m ³)	pH	% Sólidos
Amostra A	1230	6,4	30%
Amostra B	1452	7,0	50%
Amostra C	1566	7,0	58%
Amostra D	1734	6,8	68%
Amostra E	1792	6,9	71%

4.2 GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS DE POLPA DE CAULIM

Tabela 9 – Resultado da Distribuição do tamanho das partículas das Amostras de polpa de caulim

Massa Passante Acumulado segundo SEDIGRAPH (%)						
Amostras coletadas	Diâmetro das Partículas (µm)					
	< 10 µm	< 5 µm	< 2 µm	< 1 µm	<0,5 µm	<0,2 µm
Amostra "A"	99,7	97,9	81,4	62,4	36,1	7,5
Amostra "B"	99,5	97,3	81,9	62,3	35,4	7,8
Amostra "C"	99,6	97,5	81,7	61,3	35,8	7,3
Amostra "D"	99,8	97,7	82,2	62,8	35,0	9,0
Amostra "E"	99,7	98,1	82,4	63,1	34,8	8,6

Os resultados obtidos através da análise das distribuições dos tamanhos das partículas das amostras demonstram distribuições granulométricas semelhantes, onde mais de 80% das partículas possuem tamanho inferior a 2µm ; bem como cerca de 8% das partículas são menores que 0,2 µm; evidenciando uma distribuição bimodal (Carvalho, 1998).

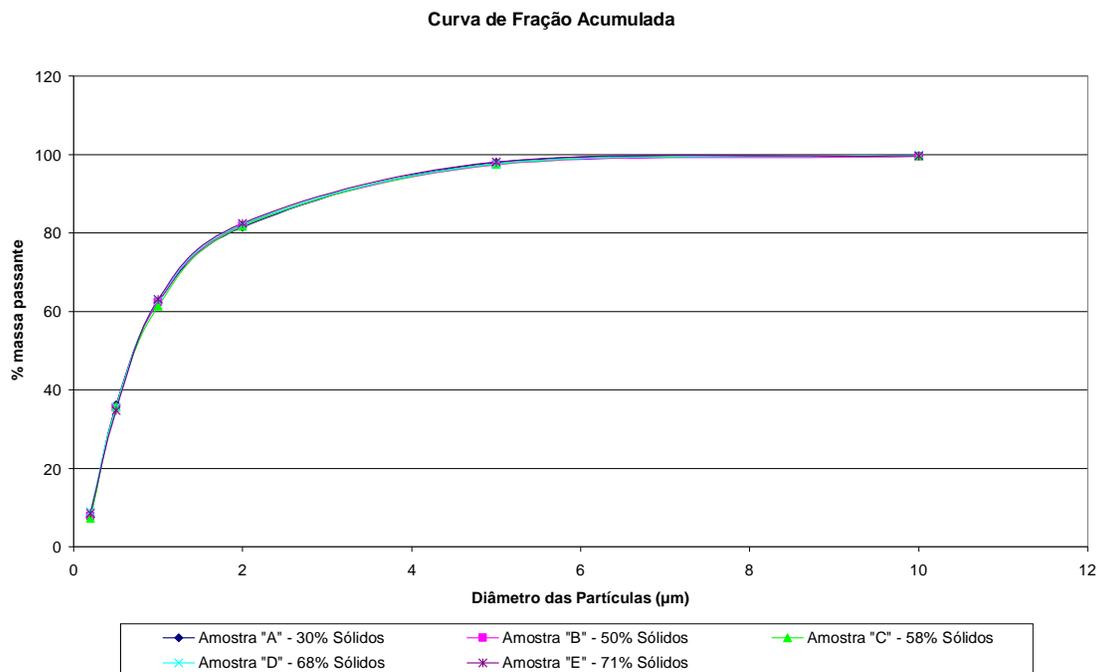


Figura 18 – Curva de Fração acumulada - SEDIGRAF

Carvalho (1998) descreve que menores diâmetros médios de partícula proporcionam maiores áreas superficiais, onde maiores áreas necessitam também de maiores quantidades de dispersantes para a estabilização da polpa; além de que distribuições de tamanho de partícula em faixas mais largas, por exemplo, bimodais, fornecem empacotamentos melhores das partículas, gerando polpas de viscosidade menor, pois, menores quantidades de água são imobilizadas nos interstícios (poros) existentes entre as partículas.

Como a dimensão das partículas não apresenta uniformidade, não seria pertinente adotar um diâmetro médio para fomentar o cálculo da velocidade mínima de sustentação V' ; uma vez que torna-se necessário uma análise da influência da distribuição granulométrica na sedimentação, bem como no comportamento da velocidade média de escoamento \bar{U} das polpas de caulim, além da constante de calibração C_0 estimada do levantamento da velocidade experimental inserida: rotina de programação em FORTRAN 90.

No que tange sua morfologia, analisando a fotomicrografia da Figura 4 no MEV, pode ser observado, além da forma pseudo-hexagonal, aglomerados apoiados face-face e a espessura e diâmetro com valores na ordem de 16 e 300 nm

respectivamente. Importante frisar que estes valores não representam a espessura e diâmetro médio das partículas de caulinita, no entanto os mesmos podem ser usados para determinar o fator de forma ϕ das partículas de caulim do rio Capim, conforme a Equação 26 descrita anteriormente.

4.3 REOLOGIA DAS POLPAS DE CAULIM COLETADAS NO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO

A Figura 19 mostra o estudo reológico e experimental das amostras de polpas de caulim da bacia do Capim, para diferentes frações mássicas. Nota-se que para polpas mais concentradas faz-se necessário uma maior tensão e taxa de cisalhamento crescente para quebra da interação entre as partículas submetidas ao cisalhamento por um longo período de tempo, ou seja, uma maior “tixotropia”. Quando aplicada a Equação de Oswald-de-Waele ou Lei de Potência (Equação 2), observou-se um aumento do índice de comportamento do fluido “n”; e da consistência do fluido “K” a medida que se aumenta o percentual em peso de sólidos das amostras de polpa de caulim (Tabela 8).

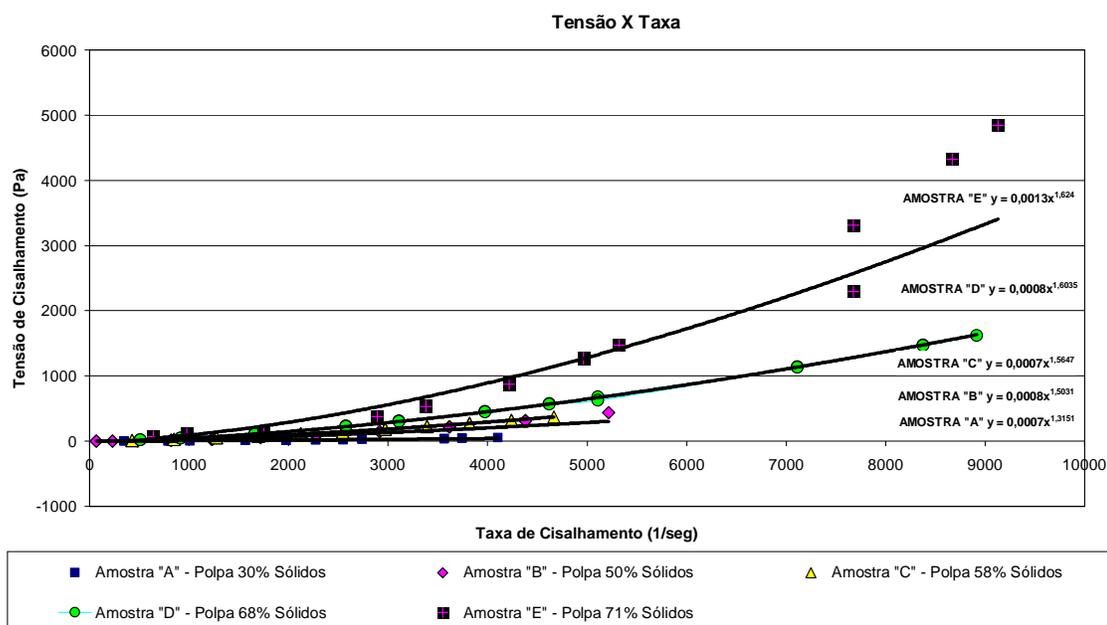


Figura 19 – Reograma das dispersões de caulim analisadas com diferentes frações mássicas – Curva de Fluxo Tensão de Cisalhamento X Taxa de Cisalhamento.

Polpas de caulins concentradas são fluidos não-newtonianos, mais precisamente, fluidos com comportamento tixotrópicos independentemente da adição de dispersantes. Neste tipo de fluido, quando a polpa encontra-se em repouso, são formadas estruturas tridimensionais provenientes da união das partículas por forças de van der Waals (Ortega *et al*, 1997).

O caulim pode possuir, dependendo do pH da polpa, diferentes cargas. Em condições fracamente ácidas, as faces possuem cargas negativas e as laterais cargas positivas. Como cargas opostas se atraem, nessas condições ocorre a adesão entre as faces e as laterais das partículas, dando origem a estruturas tridimensionais (Figura 20) chamadas de “castelos de cartas” que se estendem por toda a suspensão (Jonhson *et al*, 2000); esta interação é chamada heterocoagulação, isto é, a interação entre superfícies dotadas de cargas significativamente diferentes (Hunter, 1993).

Como o pH das polpas de caulim ensaiadas estão parametrizadas em 7,0 observa-se na Figura 19 uma tendência a diminuição da tixotropicidade, caracterizada pela menor área de histerese onde as partículas também sob a influência do dispersante (Poliacrilato de sódio) estão fracamente ligadas, isto é, a barreira de energia grande para evitar a aproximação das partículas.



Figura 20 – Representação esquemática da Estrutura do cristal de caulinita. (a) partícula isolada, (b) estrutura lamelar agregada face a face e (c) estrutura tridimensional, provenientes da interação das partículas por forças de van der Waals (Li & Eriksson, 1994).

A Tixotropia é a energia necessária para a ruptura da rede tridimensional (estrutura original) de um fluido e descreve o comportamento de substâncias que passam do estado gel de alta viscosidade para o estado sol de viscosidade muito baixa, como resultado de um alto cisalhamento por um período de tempo relativamente longo (Figura 21). Uma polpa só é considerada tixotrópica quando a transformação gel-sol e sol-gel é reversível (Schramm, 2006).

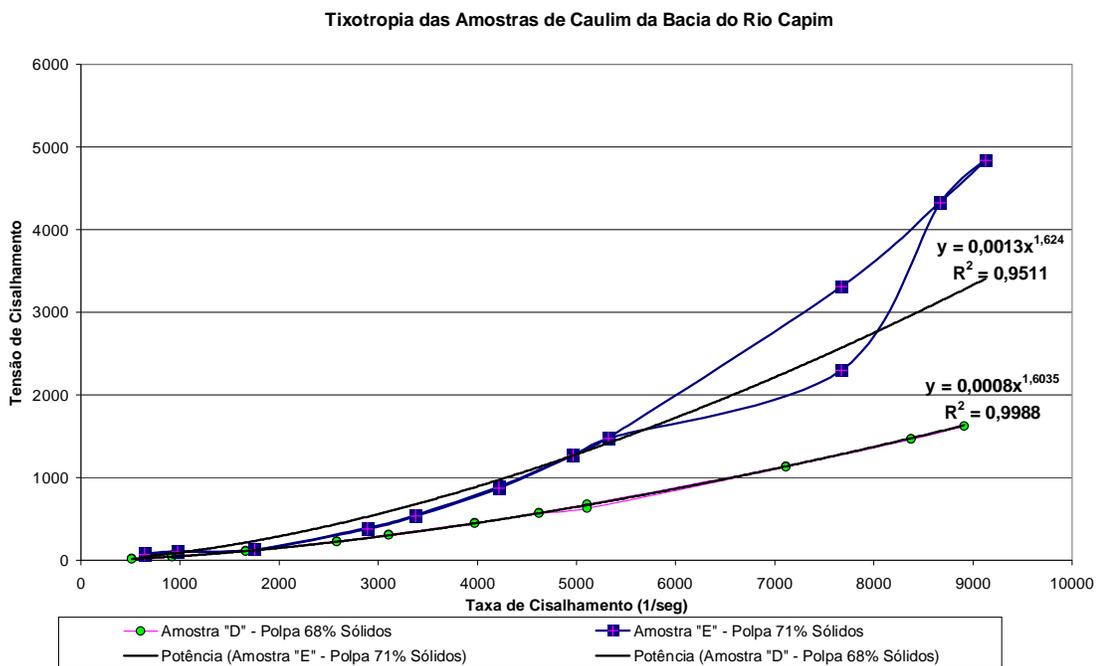


Figura 21 – Reograma das dispersões de caulim a 68% e 71% Sólidos respectivamente para visualização do fenômeno Tixotrópico do fluido.

Ainda na Figura 21 se observa um aumento da histerese provocada entre as curvas resultantes da transformação de gel para sol e de sol para gel; caracterizando assim, que para polpas mais concentradas, maior será a energia necessária para quebrar a estrutura tixotrópica.

A Figura 22 mostra os resultados obtidos experimentalmente, relacionando a viscosidade com a taxa para visualização da redução (reversível) da viscosidade em função do tempo sob cisalhamento. Este fato nos permite concluir que as polpas de caulim da bacia do Rio Capim são fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo de cisalhamento.

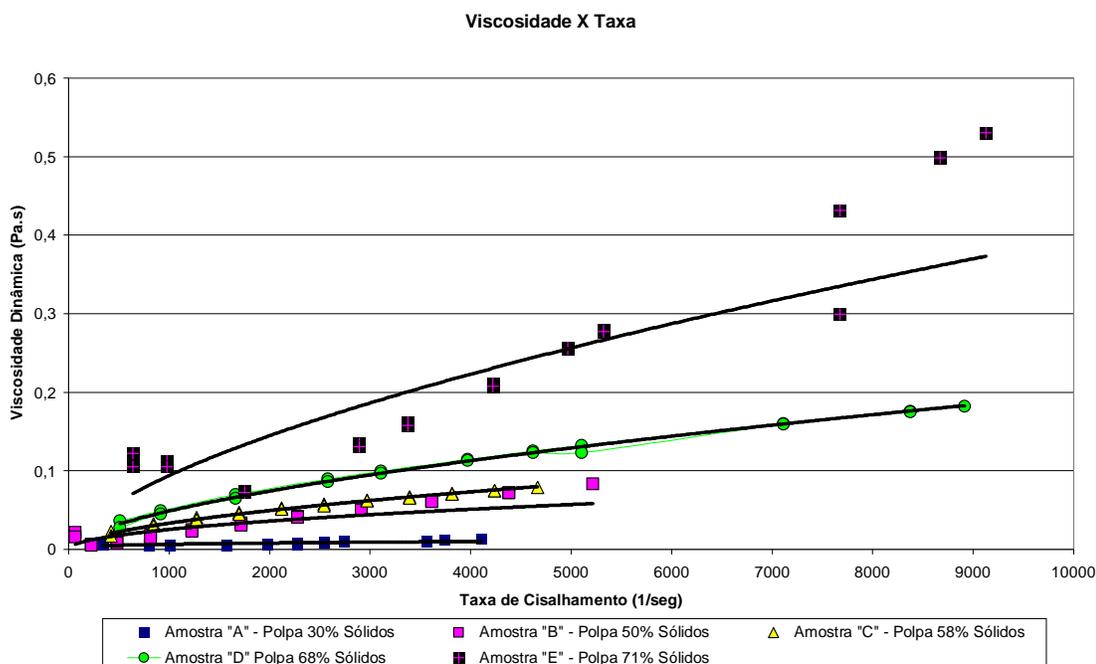


Figura 22 – Reograma das dispersões de caulim analisadas com diferentes frações mássicas – Curva de Fluxo Viscosidade Dinâmica X Taxa de Cisalhamento.

4.3.1 Quadro Resumo dos Resultados Obtidos no Estudo Reológico, com utilização da Lei de Potência

Tabela 10A – Quadro Resumo dos resultados obtidos através do Reograma das dispersões de caulim

AMOSTRA	% Sólidos em Peso	massa específica (kg/m ³)	Viscosidade Máxima (Pa.s)	Tensão (Pa)	Índice "n"	Índice "K"
Amostra A	30%	1230	0,013682	56	1,3151	0,0007
Amostra B	50%	1452	0,08322	434	1,5031	0,0008
Amostra C	58%	1566	0,0788	367	1,5647	0,0007
Amostra D	68%	1734	0,1817	1619	1,6035	0,0008
Amostra E	71%	1792	0,5304	4841	1,624	0,0013

Tabela 10B – Quadro Resumo dos resultados obtidos através do Reograma das dispersões de caulim

AMOSTRA	% Sólidos em Peso	Índice "n"	Índice "K"	Índice K' $K' = K \left(\frac{3n'+1}{4n'} \right)$
Amostra A	30%	1,3151	0,0007	0,001138
Amostra B	50%	1,5031	0,0008	0,001656
Amostra C	58%	1,5647	0,0007	0,001559
Amostra D	68%	1,6035	0,0008	0,001863
Amostra E	71%	1,624	0,0013	0,003099

4.4 VELOCIDADE EXPERIMENTAL DAS POLPAS DE CAULIM DA BACIA DO RIO CAPIM

Os resultados obtidos no ensaio experimental de velocidade das polpas de caulim da bacia do Rio Capim, reportados no Apêndice 3, evidenciam dois comportamentos distintos; o primeiro condicionado a formatação do ensaio residindo no fato do aumento da velocidade com a frequência, portanto já esperado; e o segundo do decréscimo da velocidade com o aumento da fração mássica das polpas ensaiadas. Este último chama a atenção e pode ser explicada em função do comportamento reológico das respectivas polpas, onde a queda de velocidade se deve ao aumento da viscosidade, tensão de cisalhamento e fator de atrito.

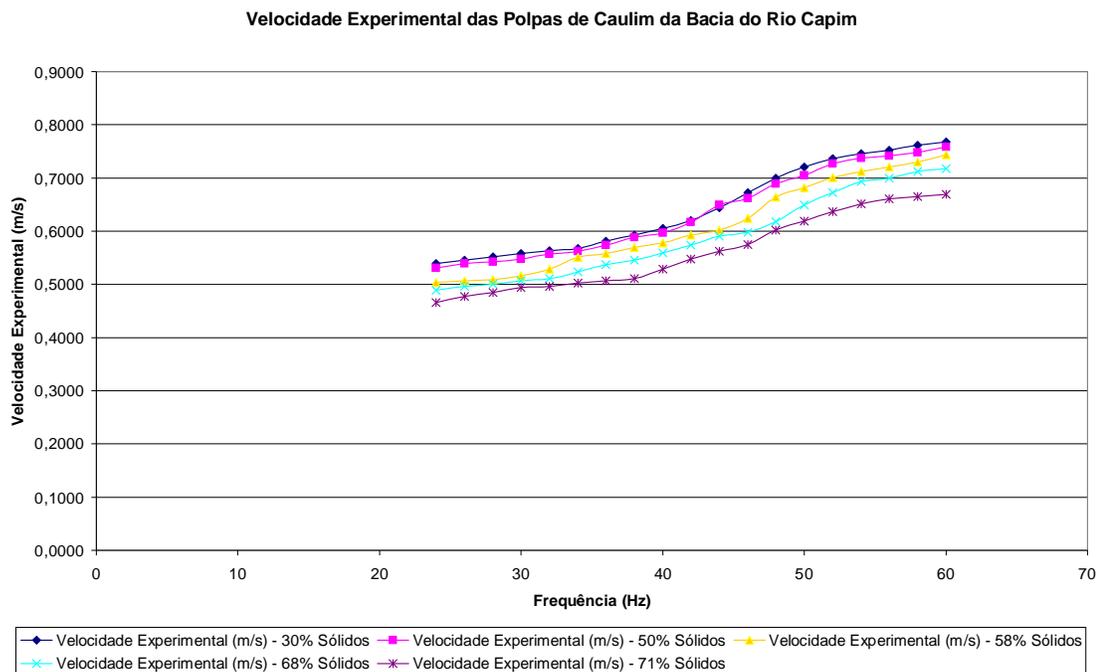


Figura 23 – Gráfico da Velocidade média experimental X Frequência

Em nenhum momento do experimento notou-se a sedimentação de produto na tubulação, fato este comprovado simplesmente pela concepção do sistema de transferência entre os tanques envolvidos no experimento (balanço de massa). Baseado nesta condição adotou-se para a análise da velocidade crítica de escoamento das polpas de caulim, alvo deste trabalho, a utilização da velocidade mínima (24 Hz ou 720 rpm) para cada fração mássica, conforme Tabela 11, subsidiando assim a determinação da constante de calibração C_0 .

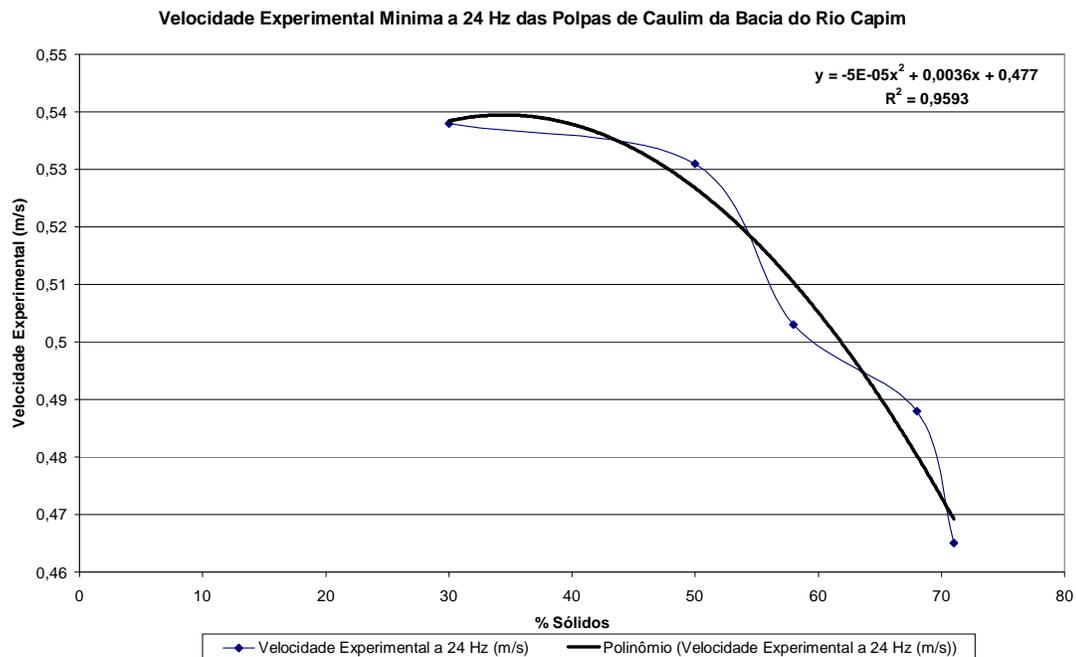


Figura 24 – Gráfico da Velocidade média experimental mínima a 24 Hz X % Sólidos (Fração mássica das polpas de caulim)

4.4.1 Quadro Resumo dos Resultados Adotados de velocidade experimental mínima a 24Hz.

Tabela 11 – Quadro Resumo dos resultados adotados de velocidade experimental mínima a 24 Hz.

AMOSTRA	% Sólidos em Peso	Velocidade Experimental mínima a 24 Hz. (m/s)
Amostra A	30%	0,538
Amostra B	50%	0,531
Amostra C	58%	0,503
Amostra D	68%	0,488
Amostra E	71%	0,465

Com os resultados de velocidade experimental mínima a 24 Hz obtidas no ensaio, inseriu-se por tentativa e erro em rotina de programação em FORTRAN, valores aleatórios representando a constante de calibração C_0 , (além dos parâmetros reológicos e granulométricos para cada fração mássica obtidos nos ensaios experimentais) até obter exatamente o valor correspondente de velocidade

média experimental, que subsidiando a análise da respectiva constante, e conseqüente utilização no equacionamento final para o caulim (Equação 62).

4.5. VELOCIDADE DE SUSTENTAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE CAULINITA

Baseado na equação 59 temos graficamente o comportamento da velocidade para sustentação das partículas constantes nas amostras, distribuídas granulometricamente. A força de resistência na sedimentação em queda de livre é determinada, baseada na lei de Stokes e Newton para os regimes laminar e turbulento respectivamente.

Sabe-se que a natureza da resistência do fluido depende da velocidade de queda. Para baixas velocidades o movimento é suave, pois a camada de fluido em contato com a partícula move-se com ela, enquanto o fluido como um todo permanece estático. Para altas velocidades a principal resistência é atribuída à perturbação do fluido, como um todo, pela partícula, caracterizando um regime turbulento (Massarani, 1990).

Independentemente do regime que predomine, a aceleração da partícula tende a decrescer rapidamente com o tempo, sob a ação das forças atuantes, e a velocidade terminal é sempre atingida.

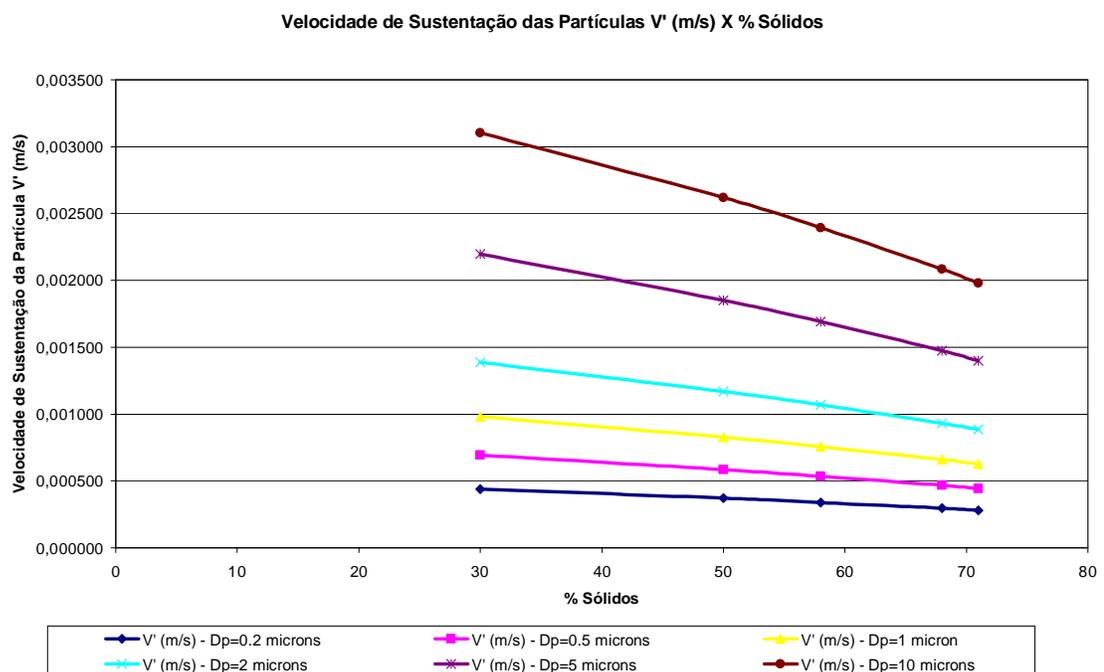


Figura 25 – Gráfico da Velocidade de sustentação das partículas V' (m/s) X % Sólidos (Fração mássica das polpas de caulim) com diferentes diâmetros de partículas.

Observa-se na Figura 25 que a velocidade vertical das partículas de caulinita é função apenas do tamanho e da densidade da partícula, onde conseqüentemente para partículas mais densas e com maior diâmetro de partícula maior será a velocidade vertical. Outra característica identificada graficamente reside no retardo da velocidade vertical para partículas de mesmo diâmetro, onde com o aumento do % de sólidos e, por conseguinte com o aumento da massa específica da polpa, o movimento vertical da partícula é influenciado pelo movimento das demais e pelo deslocamento da água através dos espaços entre as partículas, resultando para esta partícula uma velocidade vertical menor.

4.6 CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO C_0

A constante de calibração foi estimada baseada na Equação 62, o que inclui os parâmetros reológicos das amostras ensaiadas e principalmente a velocidade experimental. Esta constante é a identidade do fluido e se comporta semelhantemente ao fator de atrito, onde este valor chamado de C_0 aumenta com o aumento da fração mássica das amostras.

Na Figura 26 observamos o aumento de C_0 com a fração mássica; bem como seu decréscimo com o aumento do diâmetro das partículas distribuídas uniformemente nas amostras; o que não é o caso em se tratando do caulim utilizado na indústria do papel, que apresenta distribuição bimodal.

Como o parâmetro utilizado pela indústria papeleira segundo TAPPI – (Technical Association for the Worldwide pulp, paper and converting industry) requer polpas para a cobertura do papel com distribuição granulométrica semelhantes, onde mais de 80% das partículas devem possuir tamanho inferior a $2\mu\text{m}$ (Carvalho, 1998); adotou-se a utilização da constante de calibração C_0 a partir dos valores obtidos através da Equação 62 com diâmetro de partícula de $2\mu\text{m}$, além de fração mássica de 71% sólidos (condição crítica de escoamento); resultando especificamente no valor de $C_0=257$ (Apêndice 4A e 4B) como característico e particular para as polpas de caulim da bacia do Rio Capim, valor este que subsidia a estimativa da velocidade crítica de escoamento e fator de atrito das amostras ensaiadas.

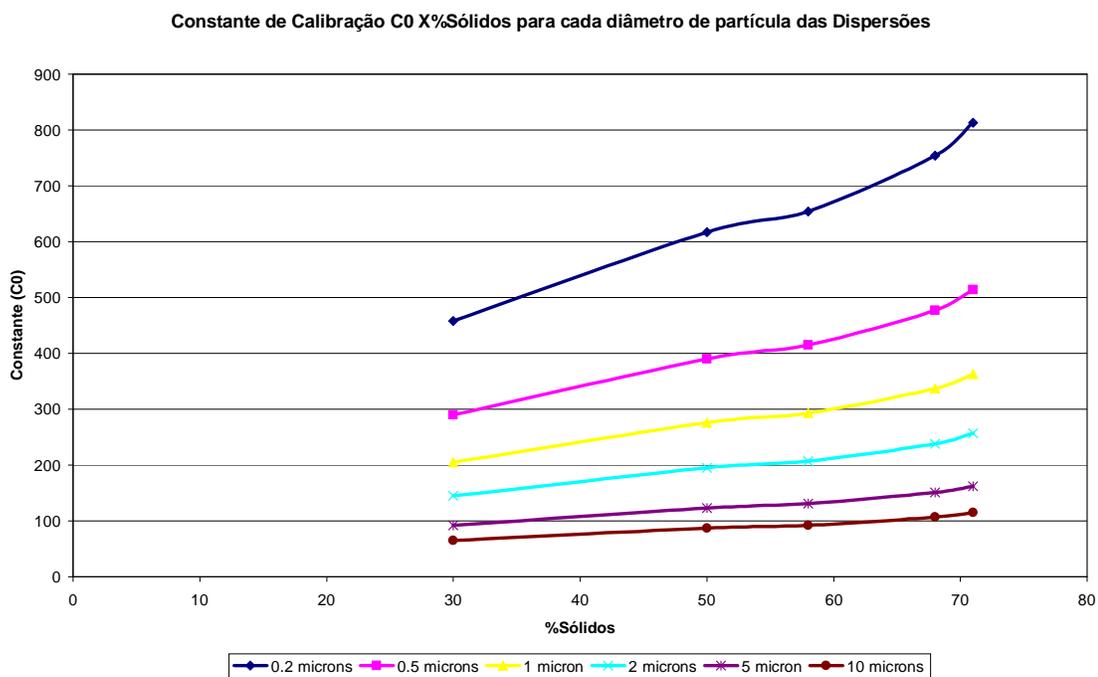


Figura 26 – Gráfico da Constante de Calibração para diferentes diâmetros de partículas X % Sólidos (Fração mássica das polpas de caulim da bacia do rio Capim).

4.7 FATOR DE ATRITO

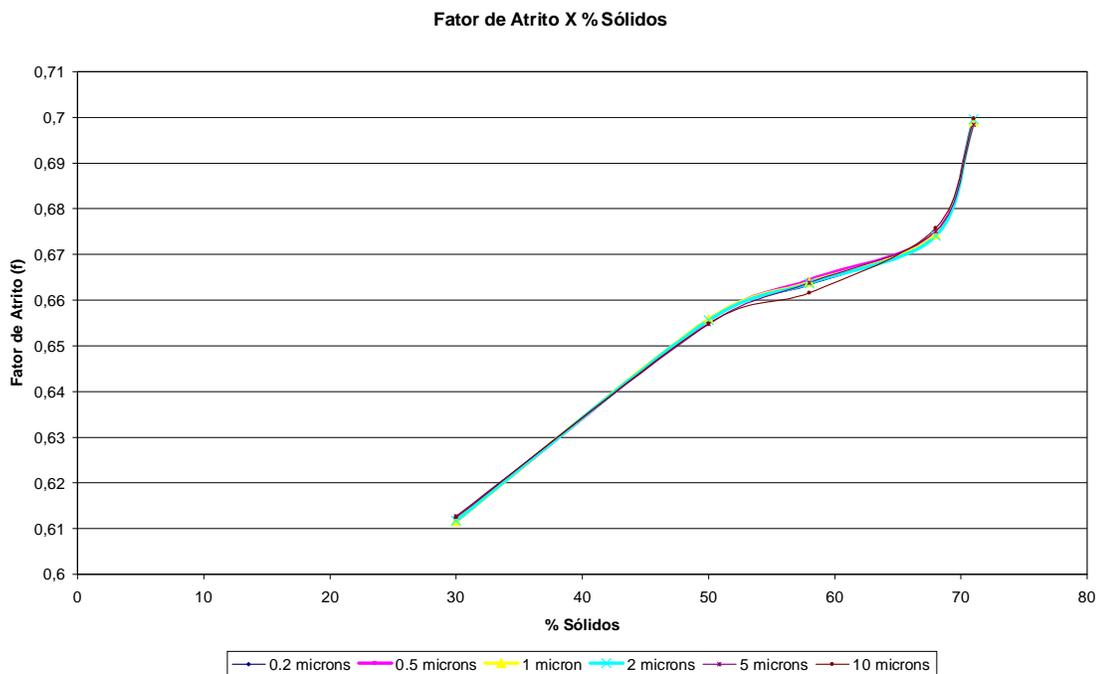


Figura 27 – Gráfico do fator de atrito para diferentes diâmetros de partículas X % Sólidos (Fração mássica das polpas de caulim da bacia do rio Capim).

Em função da distribuição granulométrica e morfologia das partículas de caulinita das amostras ensaiadas, o comportamento do fator de atrito mostra-se aumentar com o aumento do % sólidos. Neste mesmo gráfico podemos notar que para partículas de maior diâmetro ocorre um decréscimo no fator de atrito.

Esta condição pode ser explicada através do conceito de empacotamento de partículas; onde:

Partículas muito finas podem causar dificuldade adicional na obtenção de altas densidades de empacotamento por possuírem uma maior tendência à aglomeração, em virtude do aumento das forças coesivas devido ao aumento da área superficial. Em virtude disso, e um empacotamento que contenha partículas finas, na maioria das vezes é necessário adicionar à mistura dispersantes que inibam as forças atrativas entre as partículas. Uma vez que menores diâmetros de partículas proporcionam maiores áreas superficiais, onde maiores áreas necessitam também de maiores quantidades de dispersantes para a estabilização da polpa e, segundo, que distribuições bimodais fornecem empacotamentos melhores de partículas, gerando polpas de viscosidade menor, uma vez que menores quantidades de água são imobilizadas nos interstícios existentes entre as partículas.

Se considerarmos o sistema bimodal, com uma alta quantidade de partículas finas (0.2 microns) ocorrerá uma redução na quantidade de água, levando ao estabelecimento de uma quantidade mínima de “pasta” necessária para servir de veículo de escoamento às partículas de maior diâmetro; ocasionando assim um aumento do fator de atrito, tal como evidenciado no gráfico acima.

4.8 VELOCIDADE A PARTIR DE C_0

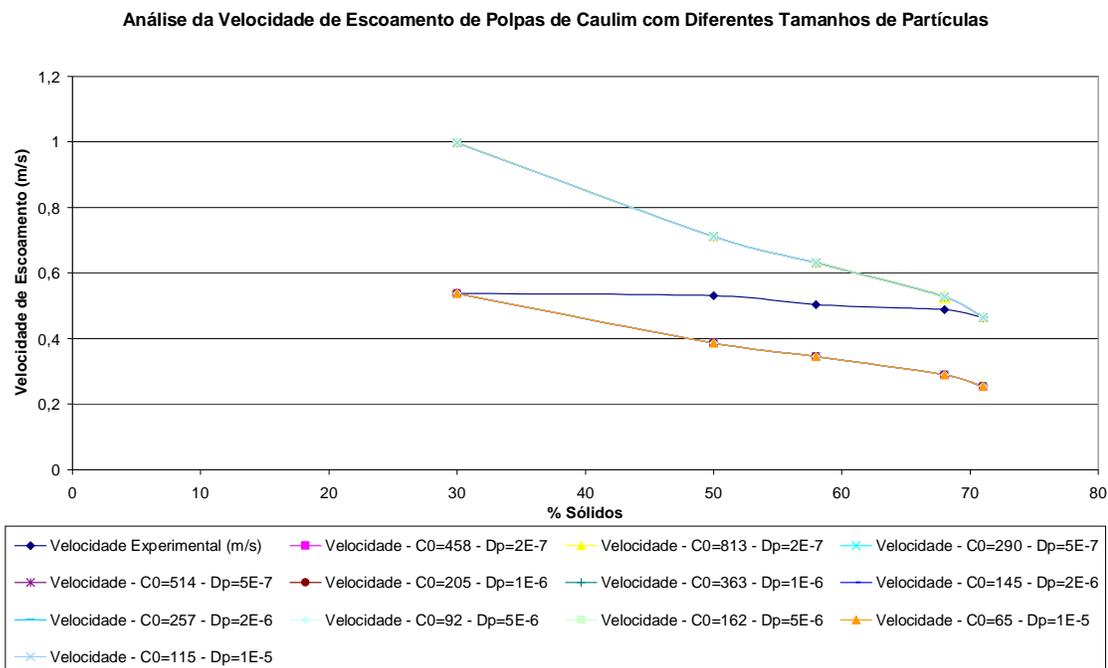


Figura 28 – Gráfico da Velocidade de escoamento de polpas de caulim com diferentes diâmetros de partículas a partir de C_0 X % Sólidos (Fração mássica das polpas de caulim da bacia do rio Capim).

A Figura 28 acima mostra o comportamento da velocidade experimental em função da fração mássica, onde especificamente observamos um decréscimo na velocidade experimental, partindo de 30% sólidos com 0,538 m/s para 0,465 m/s com fração mássica de 71% de sólidos. Esta condição pode ser explicada pelo aumento do fator de atrito, viscosidade e tensão de cisalhamento à medida que se aumenta a fração mássica das polpas ensaiadas.

A velocidade experimental foi obtida através de bombeamento real conforme reportado no item 3.8 – “Levantamento da velocidade média de escoamento das amostras de polpa de caulim”, utilizando polpas comerciais conforme TAPPI, com distribuições granulométricas bimodais, além de diferentes frações mássicas, resultando em valores característicos e considerados “pontos chaves” para a respectiva análise.

No mesmo gráfico (Figura 28) podemos notar a disposição de duas curvas, plotadas a partir da curva experimental; a primeira especificamente partindo do ponto de máxima velocidade a 30% de sólidos - 0,538 m/s que assume tendência abaixo da velocidade experimental com o aumento da fração mássica atingindo

velocidade a 71% sólidos de 0,255 m/s; e a segunda partindo do ponto de mínima velocidade a 71% de sólidos – 0,465 m/s que assume tendência acima da velocidade experimental com a redução da fração mássica atingindo velocidade a 30% de sólidos de 0,998 m/s.

A tendência destas curvas pode ser explicada em função dos valores obtidos através da estimativa da Constante de Calibração C_0 através dos dados experimentais de escoamento de polpas de caulim, reportado no item 4.4 e 4.4.1, onde de posse dos resultados de velocidade média experimental, inseridas na rotina computacional através do Método de Newton-Raphson em linguagem FORTRAN 90 apresentada no item 3.9; através de tentativa e erro, assumiu-se valores característicos de C_0 para cada polpa ensaiada, que resultam nas mesmas velocidades experimentais inseridas inicialmente. Assim, para cada velocidade experimental, para cada fração mássica, para cada diâmetro médio de partícula, obteve-se um valor característico de C_0 , conforme APÊNDICE 5A e 5B.

Notoriamente na análise dos dados obtidos através de C_0 observou-se as seguintes características:

- a) Separadamente para cada amostra adotando diâmetro médio uniforme, característica esta válida somente para análise; observou-se que para cada velocidade experimental existe um valor característico de C_0 obtido através da rotina de programação reportada no item 3.9;
- b) Adotando a condição de máxima e mínima velocidade experimental, obtêm-se valores máximos e mínimos para C_0 , que quando assumidos na análise e conseqüentemente inseridos na rotina de programação do item 3.9, fornecem valores também máximos e mínimos de velocidade média de escoamento, que podemos classificar como valores conservadores e econômicos respectivamente.
- c) Os valores de velocidade média de escoamento “conservadores” estão representados na curva com tendência acima da velocidade experimental; enquanto que os valores de velocidade média de escoamento “econômicos” estão representados na curva com tendência abaixo da velocidade experimental.
- d) Baseado nos dados de velocidade média de escoamento igual a 0,255 m/s, obtidos através da rotina de programação com utilização de valores de C_0 mínimos, para fração mássica de 71% de sólidos, e conseqüentemente abaixo da velocidade

média experimental, considerou-se que o respectivo valor é demasiadamente econômico, podendo acarretar sedimentação gradativa das partículas de caulinita em suspensão, principalmente para polpas altamente concentradas. Neste cenário optou-se pela utilização de valores de C_0 máximos ou “conservadores”, uma vez que estes valores fornecem valores de velocidade média de escoamento acima da velocidade média experimental, reduzindo a possibilidade de sedimentação das partículas em função de baixa velocidade.

Através dos valores de C_0 máximos ou “conservadores” estimou-se os valores de fator de atrito correspondentes as frações mássicas ensaiadas, bem como aos diferentes diâmetros de partículas; conforme Figura 29 abaixo.

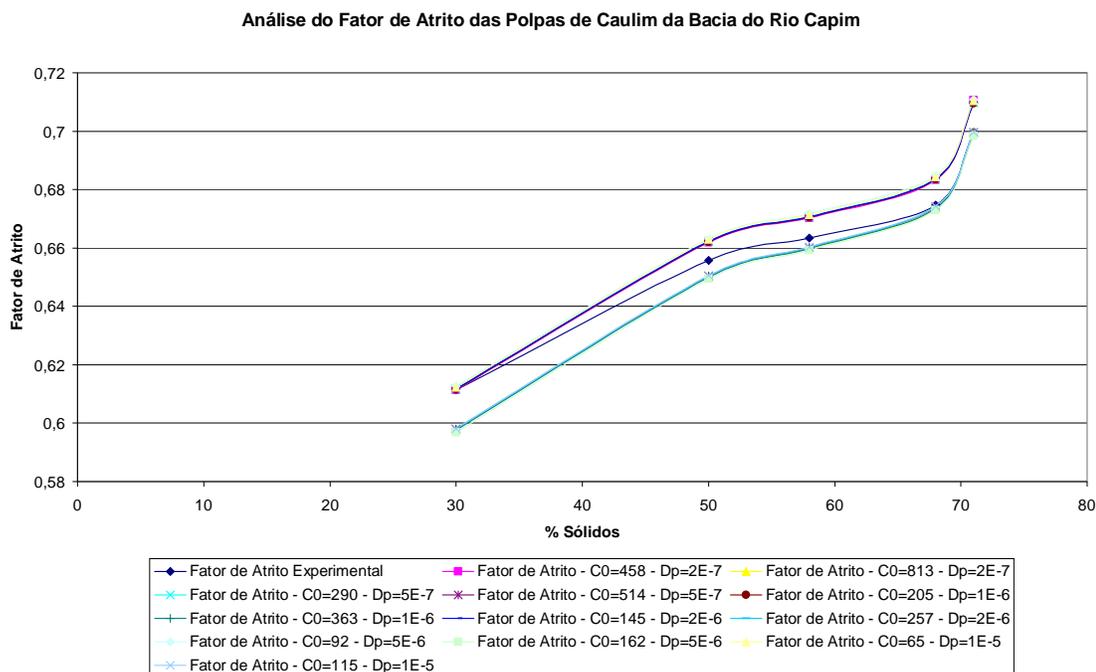


Figura 29 – Gráfico da análise do Fator de atrito das polpas de caulim com diferentes diâmetros de partículas X % Sólidos (Fração mássica das polpas de caulim da bacia do rio Capim).

Na Figura 29 acima podemos notar o comportamento do fator de atrito em função da fração mássica, correlacionado com a constante de calibração, determinada através da velocidade experimental utilizando o método de tentativa e erro. Observa-se que para constantes de calibração máximas há uma tendência de

decréscimo do fator de atrito, sendo que este último aumenta com o aumento da fração mássica das polpas ensaiadas.

Baseado nesta tendência de redução do fator de atrito com o aumento da constante de calibração, efetuou-se a escolha da constante de calibração partindo da condição de máximo valor ($C_0=257$) para partículas de diâmetro 2 μm que representam arranjo granulométrico de mais de 80% em massa conforme comentado no item 4.6 – “Constante de Calibração C_0 ”

4.9 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO DAS POLPAS DE CAULIM E FATOR DE ATRITO A PARTIR DO VALOR CARACTERÍSTICO E ANALISADO DE C_0 .

Baseado nos resultados experimentais do estudo reológico das polpas de caulim da bacia do rio Capim e fluidodinâmica dos diferentes diâmetros de partículas de caulinita, vinculadas a análise da constante de calibração C_0 , definida no item 4.6 como $C_0=257$, sob o ponto de vista “conservador” ou de máximo valor desta constante; a Figura 30 abaixo demonstra o comportamento da velocidade média de escoamento e fator de atrito em função da fração mássica.

Tabela 12 – Quadro Resumo da Estimativa da Velocidade Crítica de Escoamento das Polpas de caulim analisadas

Resultados Preliminares		Velocidade mínima de sustentação da partícula V' (m/s)	Velocidade de Escoamento do Fluido \bar{U} (m/s) com $C_0=257$	Fator de Atrito
AMOSTRA	% Sólidos	$V' = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho_f)D_p}{3C_0\rho_f}}$	$\sqrt{\left(\frac{C_0 V'}{\bar{U}}\right)^2} = \frac{2,0}{(n)^{0,75}} \log \left\{ \frac{\rho_f D_p^2 \bar{U}^{2-n'}}{K' 8^{n-1}} \left[\left(C_0 \frac{V'}{\bar{U}} \right)^2 \right]^{1-\frac{n'}{2}} \right\} - \frac{1,204}{n^{0,75}} + 0,602 n^{0,25} \frac{0,20}{(n)^{1,2}}$	$\sqrt{f} \equiv C_0 \frac{V'}{\bar{U}}$
Amostra A	30%	0,001388	0,998	0,5979
Amostra B	50%	0,001170	0,711	0,6504
Amostra C	58%	0,001070	0,631	0,6601
Amostra D	68%	0,000932	0,527	0,6740
Amostra E	71%	0,000886	0,465	0,6995

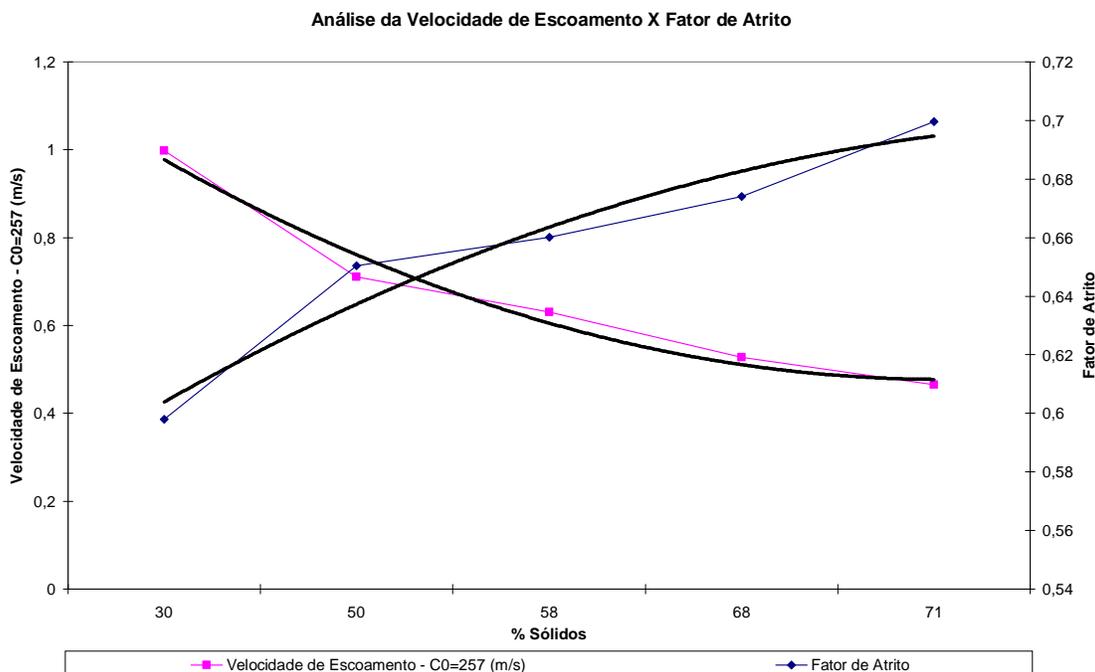


Figura 30 – Gráfico da análise da Velocidade Crítica de escoamento das polpas de caulim e Fator de atrito em função do % Sólidos (Fração mássica das polpas de caulim da bacia do Rio Capim).

No que tange o comportamento da velocidade, podemos notar o seu decréscimo com o aumento da fração mássica, baseado no fato do aumento da viscosidade e tensão de cisalhamento. Especificamente quanto a análise da velocidade crítica para as polpas de caulim, considerando o experimento realizado com utilização de tubulação com diâmetro 263 mm (10 pol.); na condição mais extrema de escoamento com polpa de caulim com fração mássica de 71% sólidos, a velocidade média igual a 0,465 m/s representa a velocidade mínima na qual a polpa de caulim altamente concentrada (71% sólidos) pode ser transportada sem que ocorra deposição das partículas de caulinita. Ainda nesta análise para fração mássica de 30% de sólidos, nota-se que a velocidade média é igual a 0,998 m/s, o que necessariamente significa que não há necessidade para uma polpa com fração mássica inferior a 71% sólidos de se utilizar uma velocidade superior a 0,465 m/s.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na análise da velocidade crítica de escoamento de polpas de caulim da bacia do rio Capim permitem as seguintes conclusões:

A massa específica do caulim sólido é de 2610 kg/m^3 , sendo que os resultados apresentados para as diferentes frações mássicas ensaiadas evidenciaram um aumento da massa específica com o aumento do percentual em peso de sólidos.

Para a máxima concentração em peso de sólidos dentre as amostras ensaiadas a “amostra E” com fração mássica de 71% de sólidos possui massa específica de 1792 kg/m^3 .

Os pH's das polpas ensaiadas apresentaram valores compreendidas entre 6,4 a 7,0, lembrando que no âmbito geral os caulins antes de serem beneficiados apresentam pH entre 4,5 e 6,5 na forma de suspensão. Como o aumento do pH fornece menores viscosidades as suspensões concentradas de caulim, as polpas ensaiadas foram padronizadas para $\text{pH} = 7,0$ com adição de carbonato de sódio (Na_2CO_3) 10% peso por volume.

Os resultados obtidos através da análise das distribuições granulométricas das diferentes frações mássicas, demonstraram tamanhos de partículas semelhantes, onde mais de 80% das mesmas possuem dimensão inferior a $2\mu\text{m}$ e 8% são menores que $0,2\mu\text{m}$ evidenciando uma distribuição bimodal.

A morfologia das partículas de caulinita da bacia do rio Capim evidenciaram uma forma pseudo-hexagonal, conforme fotomicrografia mostrada através da Figura 3.

O estudo reológico e experimental das polpas de caulim da bacia do rio Capim evidenciaram que para polpas mais concentradas maior a tensão de cisalhamento, bem como maior a viscosidade da polpa, nos remetendo a concluir no primeiro momento que se trata de um fluido de natureza dilatante. No entanto baseado na Lei de Potência de Oswald-de-Waele, observou-se que o aumento da consistência do fluido K e do índice de comportamento do fluido n com o aumento da fração mássica das amostras associado a formação de histerese apresentada na Figura 19, nos permite concluir que as polpas de caulim ensaiadas são fluidos não-newtonianos dependentes do tempo e de natureza tixotrópica, onde o fluido passa do estado de “gel” de alta viscosidade para o estado “sol” de viscosidade muito

baixa, como resultado de um alto cisalhamento; sendo esta transformação reversível. Quanto mais concentrada a polpa de caulim, maior será a energia necessária para a quebrar a estrutura tixotrópica.

A velocidade média de escoamento das amostras de polpa de caulim obtidas através dos experimentos, evidenciaram o seu decréscimo com o aumento da fração mássica em função do comportamento reológico das respectivas polpas, como o aumento da viscosidade e tensão de cisalhamento, além do aumento do fator de atrito. As velocidades experimentais adotadas foram baseadas na condição de conservadorismo, onde a velocidade média mínima (a 24 Hz.) oriunda da vazão e do diâmetro de tubulação conhecida (263 mm interno ou 10 pol.) para a máxima fração mássica ensaiada (71% sólidos) é de 0,465 m/s.

A velocidade de sustentação vertical das partículas de caulinita é função de sua dimensão, massa específica do sólido e do fluido, força peso e coeficiente de arrasto; onde para partículas mais densas e com maior diâmetro, maior será a sua velocidade vertical. O coeficiente de arrasto depende do fator de forma das partículas de caulinita que conforme resultados da fotomicrografia apresentam espessura e diâmetro médio da ordem de 16 e 300nm respectivamente. Relacionando estes valores o fator de forma (esfericidade) para as polpas de caulim ensaiadas é de 0,77.

Através do equacionamento de Dodge e Metzner (1959) relativo a perda de carga e coeficiente de fricção de Darcy obedecendo a lei de potência com a adição das características de fluidodinâmica da partícula, comportamento reológico e velocidade média experimental das amostras de polpa de caulim; tornou-se possível criar uma relação entre a velocidade vertical das partículas de caulinita e da velocidade média calibradas experimentalmente, que inseridas na rotina de programação em Fortran resultaram no valor de constante de calibração $C_0=257$ para o caulim da bacia do rio Capim, utilizando diâmetro de partícula $<2\mu\text{m}$ na condição crítica de escoamento (amostra com fração mássica de 71% de sólidos).

O fator de atrito estimado através do ensaio com as amostras de polpa de caulim evidenciaram aumentar com acréscimo da fração mássica. Porém os resultados obtidos com os diferentes diâmetros de partículas mostraram que partículas muito finas possuem uma maior tendência à aglomeração em virtude do aumento das forças coesivas devido ao aumento da área superficial, resultando em

maiores fatores de atrito quando comparados a partículas de maiores diâmetros. Em resumo, distribuições bimodais fornecem polpas com menores viscosidades e por conseguinte com menores fatores de atrito.

A análise da velocidade crítica de escoamento para polpas de caulim da bacia do rio Capim, considerando os parâmetros reológicos e de fluidodinâmica das partículas ensaiadas em tubulação com diâmetro interno de 263mm (10 pol.); na condição mais extrema de escoamento, conforme processo produtivo da unidade de beneficiamento da empresa Pará Pigmentos S.A (VALE), com fração mássica de 71% de sólidos; a velocidade média de 0,465 m/s representa a velocidade mínima na qual a polpa pode ser transportada sem que ocorra deposição das partículas de caulinita.

6. TRABALHOS FUTUROS

Estudo da química de superfície das polpas de caulim da bacia do rio Capim; observando os fenômenos de adsorção e a formação da dupla camada elétrica na interface sólido-líquido; especificamente avaliando a força repulsiva entre as partículas, capazes de superar a atração de van der Waals, resultando polpas mais estáveis e defloculadas.

Análise da influência do pH e temperatura no comportamento reológico de polpas de caulim da bacia do rio Capim;

Análise da velocidade crítica de escoamento de polpas de caulim sem o aditivo de dispersantes;

Avaliação através da Teoria DLVO Clássica para o caulim da bacia do rio Capim, da Energia de interação total em função das distâncias de separação entre as partículas com a presença e sem a presença de dispersante (Poliacrilato de sódio) e variação de pH.

REFERÊNCIAS

- ANUÁRIO E SUMÁRIO DE PRODUÇÃO BRASILEIRO, Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM; Parte II – **Levantamentos e Estatísticas**. São Paulo, 2006.
- BEHERE, H., HALIALIS, M. D. **Sampling and testing**. In: TAGGART, A. F., ed. Handbook of Mineral Dressing. New York, 1945. p. 19.1-19.208.
- BERTOLINO, L. C. **Caracterização Mineralógica e Tecnológica do caulim da Região do Prado – BA, Visando a sua Utilização na Indústria de Papel**. 2000. 137 f. Tese de Doutorado – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1960.
- BRISTOW, C. M. (1987a). World Kaolins: **Genesis, exploitation and application**. **Industrial Minerals**, p. 45-87, July.
- BUNDY, W. M. **The Diverse Industrial Applications of Kaolin**. In: Murray, H. H.; Bundy, W. M.; Harvey, C. C. Kaolin Genesis and Utilizations. Colorado: The Clay Minerals Society, 1993. p. 43-75.
- CALLAZZO, J. L. **Viscosity Improvement of an Argentina Kaolin by Ionic Treatment**. Applied Clay Science, n.1, p. 367-368, 1986.
- CARRISSO, R. C. C.; CORREIRA, J. C. G.; **Classificação e Peneiramento**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 2004.
- CARVALHO, E. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Caulim e Carbonato de Cálcio: Competição na Indústria de Papel: Série Estudos e Documentos**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, n. 41 1997.

DODGE, D. W.; METZNER, A. B. **Turbulent Flow of Non-Newtonian Fluids.** **AICHE Journal**, v. 5, p. 189-204, 1959.

FOX, R. W.; MCDONALD, A., T. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**, 4 ed., Rio de Janeiro: LTC, 1998.

HU, Y.; LIU, X. **Chemical Composition and Surface Properties of Kaolins.** **Minerals Engineering**, v.16, n.11, p. 1279-1282, novembro de 2003.

HUILGOL, R.R.; YOU, Z. J.; **Application of the Augmented Lagrangian Method to Steady Pipe Flows of Bingham, Casson and Herschel–Bulkley Fluids, Non-Newtonian Fluid Mech.**, v. 128, p. 126-143, 2005.

HUNTER, R. J. **Introduction to Modern Colloid Science.** New York: Oxford University Press, 1993.

JOHNSON, S. B. *et al.* **Surface Chemistry-rheology Relationships in Concentrated Mineral Suspensions.** **Internacional Journal of Mineral Processing**. V.58, p.267-304, 2000.

LI, E.; ERICKSSON, U. **Kaolin-Based Coating Layer Studied by ^2H e ^1H NMR Relaxation Method** **Langmuir**. v. 10, p. 4625-4626, 1994.

LUZ, A. B., CHAVES, A. P. (1998). **Processo de Beneficiamento de Caulim com Estabilização dos Íons Ferrosos, Pedido de Patente PI 9803302**, 2000.

LUZ, A. B., CHAVES, A. P. **Tecnologia do Caulim: Ênfase na Indústria de Papel. Série Rochas e Minerais Industriais, n.01.** Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 2000.

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

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas particulados**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

MASSARANI, G., VASCONCELOS DE ANDRADE, L.E. E SANTANA, C.C.(1990), **Fluidodinâmica de partículas sólidas em fluido não-newtoniano**. **Anais do XVIII ENEMP, N. Friburgo**, v. 1, p. 113-121.

MURRAY, H. H.; KELLER, W. D. **Kaolins, Kaolins and Kaolins**. In: Murray, H. H.; Bundy, W. M.; Harvey, C. C. *Kaolin Genesis and Utilizations*. Colorado: The Clay Minerals Society, 1993. p. 01-24.

ORTEGA, F. S. *et al.* **Aspectos da Reologia e da Estabilidade de Suspensões Cerâmicas. Parte I: Fundamentos**. **Cerâmica**, v. 43, p.05-10, janeiro/fevereiro, 1997 (a).

OZISIK, M., N. **Heat Transfer: A basic Approach. International Edition**. S. L.: McGraw Hill, 1985.

PETTENDORFER, E. P. **O Efeito de Dispersantes na Reologia de Polpas de Caulim para a Indústria de Papel**. 1999. 92 f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

PRASAD, M. S., REID, K. J., MURRAY, H. H. **Kaolin: Processing, Properties and Applications**. *Applied Clay Science*, v.6, p. 87-119, 1981.

RAO, M.A. **Measurement of flow properties of fluid foods: developments, limitations, and interpretation of phenomena**. **Journal of Texture Studies**. Trumbull. v.8, n.3, p.257-282, 1977.

RUFINO, R. L. **Sistema de Bombeamento de Caulim a Longa Distância**. Relatório Interno, Pará Pigmentos S.A, 2005.

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

SILVA, F. A.; ILHA, A.; COLAÇO, M. J.; **Turbulência**. V.5, Rio de Janeiro: ABCM, 2006.

SILVA, S. P. (1997b). **Depósitos de Caulim no Morro do Médio Rio Capim, Pará**, In: **Principais Depósitos Minerais do Brasil**, v. 4. [s. l.] : DNPM e CPRM, 1997.

WHITE, F.M. **Mecânica dos Fluidos**. 4 ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002.

WILLS, B. A. **Mineral processing technology**. 5. ed. Oxford: Pergamon, 1992.

8. APÊNDICES

APÊNDICE 1A - LOCALIZAÇÃO DA MINA DE CAULIM DA PARÁ PIGMENTOS S.A (PPSA)



APÊNDICE 1B -VISTA AÉREA DAS MINAS DE CAULIM DA EMPRESA CADAM PPSA - EMPRESAS DO GRUPO VALE S.A

Detalhe 1: Mina de Caulim da empresa Pará Pigmentos S. A (PPSA), localizada no município de Ipixuna do Pará - PA.

Detalhe 2: Mina de Caulim da empresa Caulim da Amazônia S.A (CADAM), localizada no município de Vitória do Jari - AP.



Detalhe 1 - Mina de Caulim da Pará Pigmentos S.A (PPSA)



Detalhe 2 - Mina de Caulim da Caulim da Amazônia S.A (CADAM)

APÊNDICE 1C - TIPOS DE CAULINS ENCONTRADOS NA JAZIDA DA PARÁ PIGMENTOS S.A (PPSA) - BACIA DO RIO CAPIM



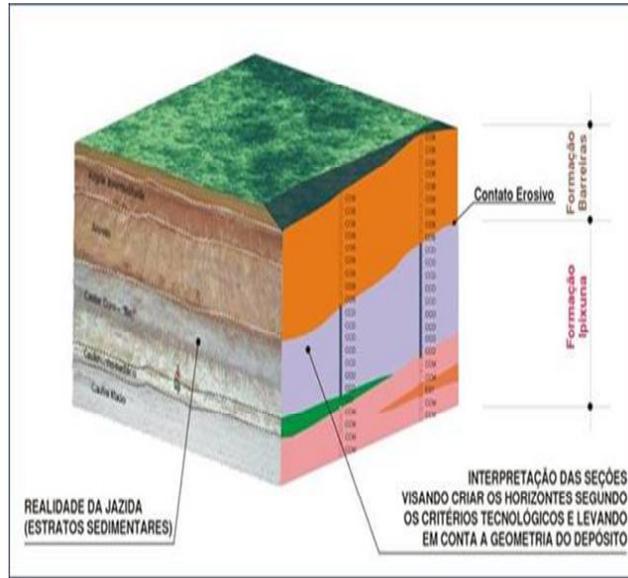
Hard Kaolin



Soft Kaolin



Sand Kaolin



APÊNDICE 2-RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS REOLÓGICOS DAS POLPAS DE CAULIM COM DIFERENTES FRAÇÕES MÁSSICAS

Resultados obtidos através de Viscosímetro HÉRCULES HI-SHEAR.

pH das amostras de polpa de caulim ajustadas em 7 com utilização de solução de carbonato de sódio 10% peso por volume.

Rampa de aceleração e desaceleração igual a 1100 rpm com tempo de 20 segundos e temperatura constante e igual a 26°C.

Fração Mássica: 30% Sólidos				Fração Mássica: 50% Sólidos				Fração Mássica: 58% Sólidos				Fração Mássica: 68% Sólidos				Fração Mássica: 71% Sólidos			
RPM	Viscosidade (Pa.s)	Taxa (1/sec)	Tensão (Pa)	RPM	Viscosidade (Pa.s)	Taxa (1/sec)	Tensão (Pa)	RPM	Viscosidade (Pa.s)	Taxa (1/sec)	Tensão (Pa)	RPM	Viscosidade (Pa.s)	Taxa (1/sec)	Tensão (Pa)	RPM	Viscosidade (Pa.s)	Taxa (1/sec)	Tensão (Pa)
100	0,007262	347	2,52	100	0,02151	64,6	1,39	100	0,0228	424	9,676	100	0,0362	512	18,54	100	0,1223	641	78,4
200	0,005395	794	4,28	200	0,006173	230	1,42	200	0,0326	848	27,693	200	0,0494	917	45,37	200	0,1125	977	110
300	0,00616	1009	6,22	300	0,01152	483,4	5,57	300	0,0402	1272	51,227	300	0,0695	1663	115,67	300	0,07411	1754	130
400	0,006107	1568	9,58	400	0,01784	818,6	14,61	400	0,0467	1696	79,257	400	0,0893	2579	230,56	400	0,1345	2892	389
500	0,006893	1974	13,61	500	0,02507	1231,7	30,88	500	0,0524	2120	111,186	500	0,0994	3108	309,15	500	0,1619	3378	547
600	0,00827	2275	18,82	600	0,03308	1719,8	56,9	600	0,0576	2544	146,612	600	0,1144	3973	454,79	600	0,2111	4219	891
700	0,009721	2549	24,78	700	0,04183	2280,7	95,41	700	0,0624	2968	185,237	700	0,1248	4621	576,71	700	0,2565	4966	1274
800	0,011461	2741	31,42	800	0,05126	2912,4	149,29	800	0,0668	3392	226,83	800	0,1321	5108	675,1	800	0,2785	5321	1482
900	0,01105387	3564	39,4	900	0,06132	3613,4	221,58	900	0,071	3816	271,206	900	0,1597	7114	1136,37	900	0,4312	7673	3309
1000	0,01272455	3743	47,63	1000	0,07198	4382,3	315,46	1000	0,075	4240	318,21	1000	0,1754	8378	1469,52	1000	0,499	8672	4328
1100	0,013682	4107	56,2	1100	0,08322	5217,9	434,24	1100	0,0788	4664	367,711	1100	0,1817	8914	1619,99	1100	0,5304	9127	4841
1000	0,011737	3743	43,93	1000	0,071528	4382,3	313,46	1000	0,0747	4240	316,73	1000	0,1746	8378	1462,87	1000	0,4982	8672	4321
900	0,00947475	3564	33,77	900	0,060696	3613,4	219,32	900	0,0701	3816	267,86	900	0,159	7114	1131,54	900	0,2993	7673	2297
800	0,0095921	2741	26,29	800	0,050072	2912,4	145,83	800	0,0653	3392	221,73	800	0,1232	5108	629,73	800	0,2773	5321	1476
700	0,0079089	2549	20,16	700	0,040847	2280,7	93,16	700	0,0616	2968	182,91	700	0,1227	4621	567,37	700	0,2551	4966	1267
600	0,00668308	2275	15,2	600	0,030468	1719,8	52,4	600	0,0555	2544	141,43	600	0,1128	3973	448,38	600	0,2073	4219	875
500	0,0057446	1974	11,34	500	0,022643	1231,7	27,89	500	0,0512	2120	108,73	500	0,097	3108	301,72	500	0,158	3378	534
400	0,00508929	1568	7,98	400	0,014964	818,6	12,25	400	0,0447	1696	75,89	400	0,0859	2579	221,54	400	0,131	2892	379
300	0,00532805	1009	5,38	300	0,007819	483,4	3,78	300	0,038	1272	48,34	300	0,0646	1663	107,46	300	0,0724	1754	127
200	0,00454912	794	3,61	200	0,004869	230	1,12	200	0,03	848	25,45	200	0,04484	917	41,12	200	0,1054	977	103
100	0,0062939	347	2,18	100	0,015479	64,6	1	100	0,017	424	7,34	100	0,0279	512	14,31	100	0,1049	641	67,3

APÊNDICE 3 - Resultados de vazão obtidos através de tubo medidor do tipo magnético (Flow Meter) - Rosemount Fisher, interligado a CLP

Valores de velocidade calculados através da vazão oriunda do experimento e da área da seção transversal da tubulação conhecida

Diâmetro interno do tubo: 0,264m - Área da seção Transversal: 0,0544906 m²

Fração Mássica: 30%				Fração Mássica: 50%				Fração Mássica: 58%				Fração Mássica: 68%				Fração Mássica: 71%			
rpm (%)	Vazão (m³/h)	Corrente (A)	U (m/s)	rpm (%)	Vazão (m³/h)	Corrente (A)	U (m/s)	rpm (%)	Vazão (m³/h)	Corrente (A)	U (m/s)	rpm (%)	Vazão (m³/h)	Corrente (A)	U (m/s)	rpm (%)	Vazão (m³/h)	Corrente (A)	U (m/s)
24	105,7	22,1	0,5388	24	104,2	22,3	0,5312	24	98,8	22,1	0,5037	24	95,9	22,2	0,4889	24	91,3	22,3	0,4654
26	106,9	22,3	0,5449	26	105,7	23,5	0,5388	26	99,3	24,5	0,5062	26	97,3	24,9	0,4960	26	93,7	27,4	0,4777
28	108,2	23,8	0,5516	28	106,3	24,9	0,5419	28	99,7	25,6	0,5082	28	98,1	26,9	0,5001	28	95,1	29,8	0,4848
30	109,4	24,7	0,5577	30	107,4	25,7	0,5475	30	101,2	26,2	0,5159	30	99,4	28,4	0,5067	30	96,9	30,6	0,4940
32	110,6	26,1	0,5638	32	109,2	27,1	0,5567	32	103,7	27,9	0,5286	32	100,3	29,7	0,5113	32	97,4	31,5	0,4965
34	111,4	26,9	0,5679	34	110,3	27,4	0,5623	34	108,1	28,6	0,5511	34	102,7	30,6	0,5235	34	98,6	32,9	0,5026
36	113,9	28,3	0,5806	36	112,6	29,3	0,5740	36	109,5	30,5	0,5582	36	105,3	31,7	0,5368	36	99,3	33,1	0,5062
38	116,3	29,2	0,5929	38	115,4	30,6	0,5883	38	111,8	31,3	0,5699	38	107,1	32,2	0,5460	38	100,2	34,2	0,5108
40	118,8	30,1	0,6056	40	117,1	30,5	0,5969	40	113,4	31,7	0,5781	40	109,7	33,6	0,5592	40	103,7	35,9	0,5286
42	121,6	30,8	0,6199	42	120,9	31,9	0,6163	42	116,2	32,5	0,5924	42	112,6	34,4	0,5740	42	107,4	36,7	0,5475
44	126,4	31,5	0,6444	44	127,3	32,7	0,6489	44	118,1	33,8	0,6020	44	115,8	35,2	0,5903	44	110,3	37,8	0,5623
46	131,9	32,4	0,6724	46	129,8	33,6	0,6617	46	122,4	35,2	0,6240	46	117,3	36,4	0,5980	46	112,7	39,1	0,5745
48	137,3	33,2	0,6999	48	135,1	34,1	0,6887	48	130,3	36,1	0,6642	48	121,2	37,4	0,6178	48	118,1	39,6	0,6020
50	141,4	34,4	0,7208	50	138,3	36,3	0,7050	50	133,8	37,5	0,6821	50	127,3	38,3	0,6489	50	121,5	40,9	0,6194
52	144,5	35,6	0,7366	52	142,7	37,2	0,7274	52	137,5	38,5	0,7009	52	131,8	39,7	0,6719	52	124,8	44,3	0,6362
54	146,2	38,3	0,7453	54	144,6	39,8	0,7371	54	139,8	41,4	0,7127	54	136,1	42,8	0,6938	54	127,7	45,8	0,6510
56	147,5	41,7	0,7519	56	145,4	43,2	0,7412	56	141,3	44,1	0,7203	56	137,3	44,6	0,6999	56	129,6	46,2	0,6607
58	149,3	44,2	0,7611	58	146,8	45,1	0,7483	58	143,2	45,7	0,7300	58	139,8	46,9	0,7127	58	130,4	47,1	0,6647
60	150,7	45,6	0,7682	60	148,7	45,9	0,7580	60	145,8	46,3	0,7432	60	140,7	47,2	0,7172	60	131,3	47,8	0,6693

APENDICE 4A - RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO E VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO DE POLPAS DE CAULIM COM DIFERENTES FRAÇÕES MÁSSICAS DA BACIA DO RIO CAPIM

AMOSTRA	% Sólidos	massa específica do caulim sólido (kg/m ³)	massa específica do caulim polpa (kg/m ³)	Viscosidade (Pa.s)	Tensão (Pa)	"n"	"K"	K'	Diâmetro Tubulação 10 pol. (m)	Nº de Re	Dimensões da partícula	Fator de Forma (φ)	Coefficiente de Arrasto CD	Diâmetro das partículas Dp	Velocidade de sustentação da partícula V' (m/s)	Velocidade experimental U (m/s)	Constante de Calibração (C0)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=458)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=813)
											Faces								
Amostra A	30	2610	1230	0,013682	56	1,3151	0,0007	0,001138	0,2634	63	300	0,77	1,5524	0,0000002	0,000439	0,538	458	0,538	0,999
Amostra B	50		1452	0,08322	434	1,5031	0,0008	0,001656		57	16				0,000370	0,531	617	0,387	0,712
Amostra C	58		1566	0,0788	368	1,5647	0,0007	0,001559		51	170				0,000338	0,503	654	0,345	0,632
Amostra D	68		1734	0,1817	1620	1,6035	0,0008	0,001863		50					0,000295	0,488	754	0,289	0,528
Amostra E	71		1792	0,5304	4841	1,624	0,0013	0,003099		46					0,000280	0,465	813	0,254	0,465

AMOSTRA	% Sólidos	massa específica do caulim sólido (kg/m ³)	massa específica do caulim polpa (kg/m ³)	Viscosidade (Pa.s)	Tensão (Pa)	"n"	"K"	K'	Diâmetro Tubulação 10 pol. (m)	Nº de Re	Dimensões da partícula	Fator de Forma (φ)	Coefficiente de Arrasto CD	Diâmetro das partículas Dp	Velocidade de sustentação da partícula V' (m/s)	Velocidade experimental U (m/s)	Constante de Calibração (C0)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=290)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=514)
											Faces								
Amostra A	30	2610	1230	0,013682	56	1,3151	0,0007	0,001138	0,2634	63	300	0,77	1,5524	0,0000005	0,000694	0,538	290	0,538	0,998
Amostra B	50		1452	0,08322	434	1,5031	0,0008	0,001656		57	16				0,000585	0,531	390	0,387	0,711
Amostra C	58		1566	0,0788	368	1,5647	0,0007	0,001559		51	170				0,000535	0,503	415	0,345	0,631
Amostra D	68		1734	0,1817	1620	1,6035	0,0008	0,001863		50					0,000466	0,488	477	0,289	0,527
Amostra E	71		1792	0,5304	4841	1,624	0,0013	0,003099		46					0,000443	0,465	514	0,255	0,465

AMOSTRA	% Sólidos	massa específica do caulim sólido (kg/m ³)	massa específica do caulim polpa (kg/m ³)	Viscosidade (Pa.s)	Tensão (Pa)	"n"	"K"	K'	Diâmetro Tubulação 10 pol. (m)	Nº de Re	Dimensões da partícula	Fator de Forma (φ)	Coefficiente de Arrasto CD	Diâmetro das partículas Dp	Velocidade de sustentação da partícula V' (m/s)	Velocidade experimental U (m/s)	Constante de Calibração (C0)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=205)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=363)
											Faces								
Amostra A	30	2610	1230	0,013682	56	1,3151	0,0007	0,001138	0,2634	63	300	0,77	1,5524	0,0000001	0,000982	0,538	205	0,538	0,998
Amostra B	50		1452	0,08322	434	1,5031	0,0008	0,001656		57	16				0,000828	0,531	276	0,387	0,711
Amostra C	58		1566	0,0788	368	1,5647	0,0007	0,001559		51	170				0,000757	0,503	293	0,345	0,631
Amostra D	68		1734	0,1817	1620	1,6035	0,0008	0,001863		50					0,000659	0,488	337	0,289	0,527
Amostra E	71		1792	0,5304	4841	1,624	0,0013	0,003099		46					0,000626	0,465	363	0,255	0,465

APÊNDICE 4B - RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO E VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO DE POLPAS DE CAULIM COM DIFERENTES FRAÇÕES MÁSSICAS DA BACIA DO RIO CAPIM

AMOSTRA	% Sólidos	massa específica do caulim sólido (kg/m ³)	massa específica do caulim polpa (kg/m ³)	Viscosidade (Pa.s)	Tensão (Pa)	"n"	"K"	K'	Diâmetro da tubulação 10 pol. (m)	Nº de Re	Dimensões da partícula	Fator de Forma (φ)	Coefficiente de Arrasto CD	Diâmetro das partículas Dp	Velocidade de sustentação da partícula V' (m/s)	Velocidade experimental U (m/s)	Constante de calibração (C0)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=145)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=257)
											Faces								
Amostra A	30	2610	1230	0,013682	56	1,3151	0,0007	0,001138	0,2634	63	300	0,77	1,5524	0,000002	0,001388	0,538	145	0,538	0,998
Amostra B	50		1452	0,08322	434	1,5031	0,0008	0,001656		57	16				0,001170	0,531	195	0,387	0,711
Amostra C	58		1566	0,0788	368	1,5647	0,0007	0,001559		51	170				0,001070	0,503	207	0,345	0,631
Amostra D	68		1734	0,1817	1620	1,6035	0,0008	0,001863		50					0,000932	0,488	238	0,289	0,527
Amostra E	71		1792	0,5304	4841	1,624	0,0013	0,003099		46					0,000886	0,465	257	0,255	0,465

AMOSTRA	% Sólidos	massa específica do caulim sólido (kg/m ³)	massa específica do caulim polpa (kg/m ³)	Viscosidade (Pa.s)	Tensão (Pa)	"n"	"K"	K'	Diâmetro da tubulação 10 pol. (m)	Nº de Re	Dimensões da partícula	Fator de Forma (φ)	Coefficiente de Arrasto CD	Diâmetro das partículas Dp	Velocidade de sustentação da partícula V' (m/s)	Velocidade experimental U (m/s)	Constante de calibração (C0)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=92)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=162)
											Faces								
Amostra A	30	2610	1230	0,013682	56	1,3151	0,0007	0,001138	0,2634	63	300	0,77	1,5524	0,000005	0,002195	0,538	92	0,538	0,998
Amostra B	50		1452	0,08322	434	1,5031	0,0008	0,001656		57	16				0,001851	0,531	123	0,387	0,711
Amostra C	58		1566	0,0788	368	1,5647	0,0007	0,001559		51	170				0,001692	0,503	131	0,345	0,631
Amostra D	68		1734	0,1817	1620	1,6035	0,0008	0,001863		50					0,001473	0,488	151	0,289	0,527
Amostra E	71		1792	0,5304	4841	1,624	0,0013	0,003099		46					0,001400	0,465	162	0,255	0,465

AMOSTRA	% Sólidos	massa específica do caulim sólido (kg/m ³)	massa específica do caulim polpa (kg/m ³)	Viscosidade (Pa.s)	Tensão (Pa)	"n"	"K"	K'	Diâmetro da tubulação 10 pol. (m)	Nº de Re	Dimensões da partícula	Fator de Forma (φ)	Coefficiente de Arrasto CD	Diâmetro das partículas Dp	Velocidade de sustentação da partícula V' (m/s)	Velocidade experimental U (m/s)	Constante de calibração (C0)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=65)	Velocidade crítica U (m/s) com (C0=115)
											Faces								
Amostra A	30	2610	1230	0,013682	56	1,3151	0,0007	0,001138	0,2634	63	300	0,77	1,5524	0,00001	0,003104	0,538	65	0,538	0,998
Amostra B	50		1452	0,08322	434	1,5031	0,0008	0,001656		57	16				0,002617	0,531	87	0,387	0,711
Amostra C	58		1566	0,0788	368	1,5647	0,0007	0,001559		51	170				0,002393	0,503	92	0,345	0,631
Amostra D	68		1734	0,1817	1620	1,6035	0,0008	0,001863		50					0,002083	0,488	107	0,289	0,527
Amostra E	71		1792	0,5304	4841	1,624	0,0013	0,003099		46					0,001980	0,465	115	0,255	0,465

APÊNDICE 5A - RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO, FATOR DE ATRITO E VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO DE POLPAS DE CAULIM COM DIFERENTES FRAÇÕES MÁSSICAS DA BACIA DO

AMOSTRA	% Sólidos	Diâmetro da Partícula (m)	Velocidade sustentação da partícula (V') (m/s)	Velocidade Média Experimental (m/s)	Constante de Calibração (C0)	fator de atrito	Velocidade crítica (m/s) (C0=458)	fator de atrito (C0=458)	Velocidade crítica (m/s) (C0=813)	fator de atrito (C0=813)
Amostra A	30	0,0000002	0,000439	0,538	458	0,6113274	0,538	0,611327	0,999	0,5977159
Amostra B	50		0,000370	0,531	617	0,6556864	0,387	0,661726	0,712	0,6499892
Amostra C	58		0,000338	0,503	654	0,6629232	0,345	0,669856	0,632	0,6593941
Amostra D	68		0,000295	0,488	754	0,675129	0,289	0,683746	0,528	0,6739681
Amostra E	71		0,000280	0,465	813	0,6996773	0,254	0,71055	0,465	0,6996773

AMOSTRA	% Sólidos	Diâmetro da Partícula (m)	Velocidade sustentação da partícula (V') (m/s)	Velocidade Média Experimental (m/s)	Constante de Calibração (C0)	fator de atrito	Velocidade crítica (m/s) (C0=290)	fator de atrito (C0=290)	Velocidade crítica (m/s) (C0=514)	fator de atrito (C0=514)
Amostra A	30	0,0000005	0,000694	0,538	290	0,6116283	0,538	0,611628	0,998	0,5978552
Amostra B	50		0,000585	0,531	390	0,6554853	0,387	0,662097	0,711	0,6503164
Amostra C	58		0,000535	0,503	415	0,6643806	0,345	0,670604	0,631	0,6601517
Amostra D	68		0,000466	0,488	477	0,6749044	0,289	0,683822	0,527	0,6741697
Amostra E	71		0,000443	0,465	514	0,6997726	0,255	0,709791	0,465	0,6997726

AMOSTRA	% Sólidos	Diâmetro da Partícula (m)	Velocidade sustentação da partícula (V') (m/s)	Velocidade Média Experimental (m/s)	Constante de Calibração (C0)	fator de atrito	Velocidade crítica (m/s) (C0=205)	fator de atrito (C0=205)	Velocidade crítica (m/s) (C0=363)	fator de atrito (C0=363)
Amostra A	30	0,00001	0,000982	0,538	205	0,6117043	0,538	0,611704	0,998	0,5976457
Amostra B	50		0,000828	0,531	276	0,6560281	0,387	0,662272	0,711	0,6501801
Amostra C	58		0,000757	0,503	293	0,6640454	0,345	0,67068	0,631	0,6599128
Amostra D	68		0,000659	0,488	337	0,6746022	0,289	0,683708	0,527	0,6737375
Amostra E	71		0,000626	0,465	363	0,6990593	0,255	0,709405	0,465	0,6990593

APÊNDICE 5B - RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO, FATOR DE ATRITO E VELOCIDADE CRÍTICA DE ESCOAMENTO DE POLPAS DE CAULIM COM DIFERENTES FRAÇÕES MÁSSICAS DA BACIA DO

AMOSTRA	% Sólidos	Diâmetro da Partícula (m)	Velocidade sustentação da partícula (V') (m/s)	Velocidade Média Experimental (m/s)	Constante de Calibração (C0)	fator de atrito	Velocidade crítica (m/s) (C0=145)	fator de atrito (C0=145)	Velocidade crítica (m/s) (C0=257)	fator de atrito (C0=257)
Amostra A	30	2E-06	0,001388	0,538	145	0,6116283	0,538	0,611628	0,998	0,5978552
Amostra B	50		0,001170	0,531	195	0,6554853	0,387	0,662097	0,711	0,6503164
Amostra C	58		0,001070	0,503	207	0,6635797	0,345	0,670604	0,631	0,6601517
Amostra D	68		0,000932	0,488	238	0,6741965	0,289	0,683822	0,527	0,6741697
Amostra E	71		0,000886	0,465	257	0,6997726	0,255	0,709791	0,465	0,6997726

AMOSTRA	% Sólidos	Diâmetro da Partícula (m)	Velocidade sustentação da partícula (V') (m/s)	Velocidade Média Experimental (m/s)	Constante de Calibração (C0)	fator de atrito	Velocidade crítica (m/s) (C0=92)	fator de atrito (C0=92)	Velocidade crítica (m/s) (C0=162)	fator de atrito (C0=162)
Amostra A	30	5E-06	0,002195	0,538	92	0,6126607	0,538	0,612661	0,998	0,5969109
Amostra B	50		0,001851	0,531	123	0,6547997	0,387	0,663348	0,711	0,6494204
Amostra C	58		0,001692	0,503	131	0,6638223	0,345	0,671714	0,631	0,6590874
Amostra D	68		0,001473	0,488	151	0,6751184	0,289	0,684773	0,527	0,6729047
Amostra E	71		0,001400	0,465	162	0,6983852	0,255	0,710702	0,465	0,6983852

AMOSTRA	% Sólidos	Diâmetro da Partícula (m)	Velocidade sustentação da partícula (V') (m/s)	Velocidade Média Experimental (m/s)	Constante de Calibração (C0)	fator de atrito	Velocidade crítica (m/s) (C0=65)	fator de atrito (C0=65)	Velocidade crítica (m/s) (C0=115)	fator de atrito (C0=115)
Amostra A	30	0,00001	0,003104	0,538	65	0,6123876	0,538	0,612388	0,998	0,5980597
Amostra B	50		0,002617	0,531	87	0,6548084	0,387	0,662984	0,711	0,6506029
Amostra C	58		0,002393	0,503	92	0,6615783	0,345	0,671457	0,631	0,6603978
Amostra D	68		0,002083	0,488	107	0,6758131	0,289	0,684467	0,527	0,6741992
Amostra E	71		0,001980	0,465	115	0,6997695	0,255	0,710427	0,465	0,6997695