

77

CETEM

Série Tecnologia Mineral

Comportamento Reológico de Polpas de Minério

**Mário Valente Possa
José Renato B. de Lima**

PRESIDENTE DA REPÚBLICA: Fernando Henrique Cardoso
VICE-PRESIDENTE DA REPÚBLICA: Marco Antonio Maciel
MINISTRO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA: Ronaldo Mota Sardenberg
SECRETÁRIO EXECUTIVO: Carlos Américo Pacheco
SECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DAS UNIDADES DE PESQUISA:
João Evangelista Steiner

CETEM - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

DIRETOR: Fernando A. Freitas Lins
COORD. DE PROJETOS ESPECIAIS (CPE): Juliano Peres Barbosa
COORD. DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS (CTM): Adão Benvindo da Luz
COORD. DE METALURGIA EXTRATIVA (CME): Ronaldo Luiz C. dos Santos
COORD. DE QUÍMICA ANALÍTICA (CQA): Maria Alice C. de Góes
COORD. DE ESTUDOS E DESENVOLVIMENTO (CES): Carlos César Peiter
COORD. DE ADMINISTRAÇÃO (CAD): Cosme Regly

Mario Valente Possa

*Engenheiro de Minas, D. Sc. em Engenharia Mineral pela
EPUSP, Tecnologista Sênior do CETEM.*

José Renato Baptista de Lima

*Engenheiro de Minas, D. Sc. em Engenharia Mineral pela
EPUSP, Professor Livre Docente da EPUSP, Departamento de
Engenharia de Minas.*

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL
CONSELHO EDITORIAL

Editor

Mario Valente Possa

Subeditor

Roberto de Barros Emery Trindade

Conselheiros Internos

Arnaldo Alcover Neto, Fernando Freitas Lins, João Alves Sampaio,
Reiner Neumann, Ronaldo Luiz Correia dos Santos

Conselheiros Externos

Achilles Junqueira Bourdot Dutra (UFRJ), Antonio E. Clark Peres (UFMG),
Cláudio Schneider (University of Utah), José Aury de Aquino (CDTN), José
Farias de Oliveira (UFRJ), Lino Rodrigues de Freitas (CVRD), Luciano Tadeu
da Silva Ramos (CVRD), Mário Rui Machado Leite (IGM - Portugal), Maurício
Leonardo Torem (PUC-Rio)

A **Série Tecnologia Mineral** publica trabalhos na área mineiro-metalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

O conteúdo deste trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Jackson de Figueiredo Neto COORDENAÇÃO EDITORIAL

Vera Lúcia Ribeiro EDITORAÇÃO ELETRÔNICA

Indexado no *Chemical Abstracts* e no *IMM Abstracts*.

Possa, Mario Valente

Comportamento Reológico de Polpas de Minério/Mário Valente
Possa, José Renato B. de Lima. Rio de Janeiro: CETEM/MCT,
2000.

37p. - (Série Tecnologia Mineral, 77)

1. Reologia. 2. Dinâmica do solo. I. Lima, José Renato Baptista.
II Centro de Tecnologia Mineral. III. Título. IV. Série.

ISBN 85-7227-136-8

ISSN 0103-7382

CDD 531.11

SUMÁRIO

RESUMO/ABSTRACT	1
1. INTRODUÇÃO	3
2. REOLOGIA	4
3. VISCOSIDADE	5
3.1 Modelos Empíricos	8
3.2 Modelo Ostwald de Waele	9
3.3 Tipos de Viscosímetros	13
4. EFEITOS DA REOLOGIA NO TRATAMENTO DE MINÉRIOS	18
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
ANEXO 1: REOLOGIA DAS POLPAS	32
ANEXO 2: LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES	36

RESUMO

No presente trabalho serão apresentados conceitos sobre reologia e viscosidade, os efeitos da reologia de polpas no tratamento de minérios, o modelo empírico Ostwald de Waele para a determinação da viscosidade em fluidos Newtonianos e não-Newtonianos e principais tipos de viscosímetros.

O estudo de reologia e as medidas das viscosidades das polpas foram realizados em um reômetro e o modelo empírico de Ostwald de Waele foi válido para descrever o comportamento reológico das polpas.

Palavras-chave: reologia, viscosidade, deslamagem, modelo Ostwald de Waele.

ABSTRACT

In this work, we are presenting the concepts of rheology and viscosity, the effects of the slurry rheologies in mineral processing, the Ostwald de Waele model for the viscosity determination in Newtonian and non-Newtonian slurries and the main types of viscometers.

The rheological study and the measurements of viscosities were carried out in a rheometer and the Ostwald de Waele model was valid to describe the slurry rheology behavior.

Keywords: rheology, viscosity, desliming process, Ostwald de Waele model.

1. INTRODUÇÃO

O beneficiamento de partículas finas vem se constituindo num grande desafio para os tratamentistas de minérios uma vez que, com o decréscimo do tamanho das partículas, começa a diminuir a ação das forças de caráter mecânico sobre as mesmas, passando a tornar significativas as forças referentes aos fenômenos eletrostáticos e aquelas devido à descontinuidade do meio (viscosidade). Neste momento, o estudo da reologia torna-se muito importante para o entendimento do comportamento das partículas numa polpa, razão pela qual tem-se verificado nos últimos anos um interesse cada vez maior em diagnosticar os efeitos da viscosidade na fluidodinâmica das polpas, passando-se da fase de observação e constatação para a de estudo, captando da engenharia química uma base teórico/prática mais desenvolvida. Os estudos têm-se aprofundado graças ao grande avanço tecnológico experimentado pelos instrumentos de medição e de análise para partículas até mesmo de tamanhos coloidais.

As polpas de minério podem apresentar um comportamento reológico Newtoniano, quando a viscosidade independe da taxa de cisalhamento, ou não-Newtoniano, quando ela for dependente. No primeiro caso, a viscosidade medida em qualquer ponto do circuito será a mesma, desde que não tenha sido adicionado algum agente modificador. Já no segundo caso, a viscosidade estará sendo modificada constantemente dependendo do grau de agitação da polpa: numa homogeneização, bombeamento ou no interior de um equipamento.

Na presente publicação serão apresentados conceitos sobre reologia e viscosidade, os efeitos da reologia de polpas no tratamento de minérios, o modelo empírico Ostwald de Waele para a determinação da viscosidade em fluidos Newtonianos e não-Newtonianos e principais tipos de viscosímetros.

2. REOLOGIA

A reologia da polpa é um assunto que vem despertando um interesse cada vez maior nos pesquisadores que atuam no tratamento de minérios face ao desafio imposto pelas empresas de mineração e pela sociedade em beneficiar minérios ou antigos rejeitos onde a presença de partículas finas e ultrafinas é cada vez mais significativa. Reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento de materiais sob a ação de uma força. O comportamento reológico dos materiais pode apresentar uma variação de resultados desde um fluido viscoso Newtoniano a de um sólido elástico, passando por estados intermediários denominados de viscoelásticos.

HUNTER (1992) e SHAW (1992) salientam que a análise teórica da reologia requer um extensivo arranjo de expressões matemáticas onde não são feitas maiores considerações sobre as causas, ficando restritas, em muitos casos, a apenas regiões de comportamento linear da teoria viscoelástica. Para que se possa ter um progresso na solução de problemas práticos, torna-se necessário adotar-se uma abordagem pragmática. Em alguns casos um enfoque teórico guiará a uma escolha de procedimentos adequados enquanto, em outros casos, querer dar um caráter fenomenológico pode ser tão complexo, que o melhor a se esperar é ser capaz de compreender o comportamento macroscópico e fazer inferências sobre o que pode estar ocorrendo num nível microscópico, envolvendo características individuais das partículas e da água na polpa, bem como as interações partícula-partícula.

Na caracterização microscópica da reologia de uma polpa PAWLIK; LASKOWSKI (1999) consideram importante o balanço de três forças agindo no sistema água-partícula: difusão Browniana; interação hidrodinâmica; e as forças entre partículas. A contribuição específica de cada uma dessas forças depende do tamanho e da forma das partículas, da percentagem de sólidos e das condições físico-químicas da polpa.

3. VISCOSIDADE

A viscosidade de um fluido pode ser definida como sendo a propriedade que o mesmo apresenta em oferecer uma maior ou menor resistência à deformação, quando sujeito a esforços de escorregamento. No tratamento de minérios o fluido é constituído pelo sistema água-partículas de minério, ou seja, a polpa.

Isaac Newton realizou um dos primeiros estudos de fluxo de um fluido. Ele considerou um modelo constituído por duas lâminas paralelas, de mesma área, A , próximas uma da outra, a uma distância, y , entre as quais existe um fluido. Ao se aplicar uma força tangencial F sobre a lâmina superior, mantendo fixa a inferior, cada partícula do fluido percorre uma trajetória paralela às lâminas e com velocidade constante. No entanto, a velocidade das diversas partículas varia de v , junto à lâmina superior, a zero, junto à lâmina inferior. Newton postulou que a força tangencial F é diretamente proporcional a área A da lâmina e ao gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento dv/dy . A relação F/A é denominada tensão de cisalhamento e a relação tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento é denominada viscosidade absoluta ou dinâmica μ .

Assim,

$$\mu = \frac{F/A}{dv/dy} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1)$$

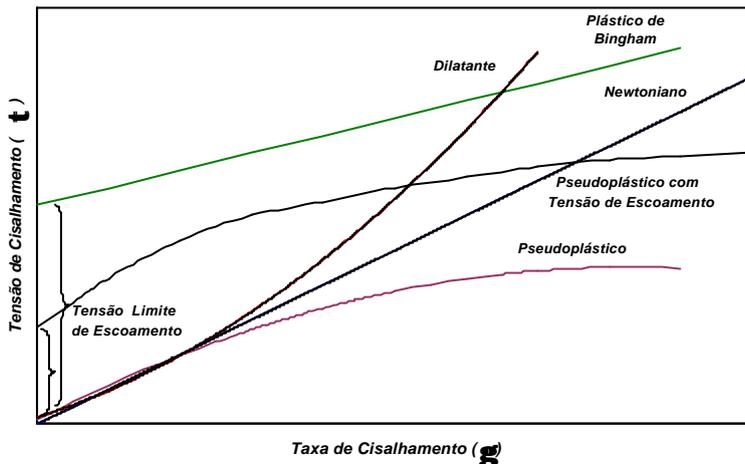
onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa); e

γ = taxa de cisalhamento (1/s).

Um fluido Newtoniano caracteriza-se por possuir um viscosidade constante, viscosidade absoluta (μ), independentemente

da variação da taxa de cisalhamento. É o coeficiente angular da reta, na Figura 1. Num regime laminar, um fluido Newtoniano escoar em um tubo como se o fluido fosse constituído por inúmeros cilindros concêntricos com diferentes velocidades, como um telescópio.



Fonte: BAKSHI, A.K.; KAWATRA, S.K. Rapid determination of non-Newtonian flow behaviour in mineral suspensions.

Figura 1 - Tipos de comportamento reológico de polpas

Outros fluidos podem apresentar uma viscosidade dependente da taxa de cisalhamento. Estes são denominados fluidos não-Newtonianos e podem ser classificados em: pseudoplástico com tensão de escoamento, plástico de Bingham, pseudo-plástico e dilatante.

Todos estes tipos de escoamento são independentes do tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante. Há casos, por outro lado, de escoamentos de fluido dependentes do tempo de aplicação de uma taxa de cisalhamento. Eles são classificados como tixotrópicos ou reopéticos.

Os tixotrópicos apresentam uma diminuição da viscosidade aparente com o tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante até alcançar um equilíbrio. É uma transformação isotermal reversível. Tem-se como exemplos as tintas e muitas argilas, particularmente a bentonita que se "liquefaz" por agitação e se "solidifica" quando em repouso.

Já os fluidos reopéticos são raros e apresentam um comportamento oposto ao dos tixotrópicos. Há um aumento da viscosidade aparente com o tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante.

Na Figura 1 são apresentados também os diferentes tipos de comportamento de polpas independentes do tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante.

Para os fluidos não-Newtonianos a resistência oferecida ao escoamento é medida pela viscosidade aparente (μ_{ap}) cujo valor é o coeficiente angular da reta que passa pela origem e pelo ponto de interesse na curva (tensão por taxa de cisalhamento). Ela corresponde a viscosidade de um fluido Newtoniano que exibe a mesma tensão de cisalhamento para uma dada taxa de cisalhamento (DARLEY; GRAY (1988)).

Os fluidos denominados plástico de Bingham e pseudoplástico com tensão de escoamento distinguem-se dos outros fluidos por requererem uma tensão inicial, denominada de tensão limite de escoamento (*yield stress*), para que o fluido comece a escoar.

Nos fluidos pseudoplásticos a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Este comportamento pode ser encontrado em sistemas coloidais onde as partículas assimétricas, com orientação ao acaso, ficam inicialmente emaranhadas, formando uma rede, dificultando o escoamento. Com o aumento da taxa de cisalhamento esta rede se rompe e o escoamento é facilitado, diminuindo a viscosidade.

Nos fluidos dilatantes tem-se um aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento. De acordo com SHAW (1992), este comportamento deve-se ao efeito da dilatação da polpa, com a água sendo suficiente apenas para preencher os vazios. Com o aumento da taxa de cisalhamento é gerada uma instabilidade na polpa fazendo com que as partículas se movam umas em relação às outras, expandindo a polpa. A água, sendo insuficiente para preencher os novos vazios gerados, dá lugar ao aparecimento de forças de tensão superficial. Pode ser observada também nos fluidos dilatantes uma tensão limite de escoamento (*yield stress*).

A unidade de viscosidade mais utilizada é o mPa.s cuja correspondência com outras unidades também empregadas é

$$1 \text{ mPa.s} = 1 \text{ cP} = 0,001 \text{ kg/ m.s} \quad (2)$$

onde:

mPa.s = miliPascal segundo;

cP = centiPoise; e

kg/ m.s = quilograma por metro segundo.

3.1 Modelos Empíricos

O principal modelo empírico empregado na caracterização do escoamento de um fluido, de acordo com DARLEY; GRAY (1988), é o de Ostwald de Waele, baseado na **Lei da Potência**, cuja equação é dada por

$$\hat{\sigma} = \hat{\sigma}_0 + \hat{\epsilon} \tilde{\alpha}^n \quad (3)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 = tensão limite de escoamento (Pa) sendo:

$\tau_0 = 0$ para fluidos Newtoniano, pseudoplástico e dilatante;

κ = índice de consistência do fluido sendo:

$\kappa = \mu$ para fluido Newtoniano; e

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

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

n = índice do comportamento do fluido sendo:

$n = 1$ para fluido Newtoniano e plástico de Bingham;

$n < 1$ para fluido pseudoplástico; e

$n > 1$ para fluido dilatante.

Um outro modelo também empregado é o de **Casson**, cuja equação é dada por:

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + \mu_{ap}^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} \quad (4)$$

3.2 Modelo Ostwald de Waele

Como exemplo de aplicação do modelo de Ostwald de Waele foram preparadas sete tipos de polpas e glicerina pura grau comercial. Na preparação das polpas foi utilizada uma amostra de rocha fosfática representativa da alimentação do circuito de deslamagem finos naturais da Fertilizantes SERRANA S.A. (1996) e que apresenta uma distribuição de tamanhos apresentada na Tabela 1. Três dessas polpas foram utilizadas em seu estado natural, somente modificadas a percentagem de sólidos em massa; duas com 35% sólidos foram modificadas com a adição de dispersante (Polysal A) para diminuir a viscosidade da polpa; e duas delas com 15% sólidos foram espessadas (glicerina comercial e carboximetilcelulose - CMC), conforme mostrado na Tabela 2. A viscosidade inicial de cada tipo de polpa foi medida com o viscosímetro Brookfield, modelo RV, com a velocidade do disco em 100 rpm.

Tabela 1 - Distribuição de tamanhos da amostra estudada

Tamanho (μm)	Massa Passante (%)	Massa Retida (%)
35,56	93,5	6,5
26,20	88,9	4,6
19,31	83,9	5,0
14,22	78,9	5,0
10,48	74,1	4,8
7,72	69,4	4,7
5,69	64,8	4,6
4,19	60,5	4,3
3,09	56,5	4,0
2,28	52,9	3,6
1,68	49,4	3,5
1,24	45,9	3,5
0,91	43,1	2,8
0,67	39,6	3,5
0,49	32,5	7,1
- 0,49		32,5

Tabela 2 - Características dos materiais utilizados

% Sólidos Média		Estado	Visc. Brookfield	Modificador Viscosidade
Massa	Vol.		mPa.S	(Massa/t Fosf. Seco)
15	5	natural	23-34	-
25	9	natural	108-140	-
35	15	natural	232-240	-
35	15	dispersa	112-130	Polysal A (946g/t)
35	15	dispersa	20-24	Polysal A (2,6kg/t)
15	5	espassada	114-120	CMC (27kg/t)
15	5	espassada	100-108	glicerina (4,9t/t)
glicerina comercial pura			640	

Com cada tipo de polpa e a glicerina comercial foi realizado um estudo para caracterizar o seu comportamento reológico. Este estudo foi desenvolvido em um reômetro HAAKE Rotovisco (modelo RS 100, sensor DG 41 (DIN 53018), tipo rotacional - cilindros concêntricos) com variação de taxa de cisalhamento de até 4.000 1/s. Com esses valores obtidos juntamente com àqueles de tensão de cisalhamento foi caracterizado o tipo de comportamento reológico e estabelecida a equação do modelo de Ostwald de Waele (Lei de Potência), com auxílio do programa de ajuste de curvas STATISTICA.

Os resultados obtidos no estudo de reologia estão apresentados na Figura 2 e Anexo 1.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados encontrados para o modelo de Ostwald de Waele ($\tau = \tau_0 + \kappa \dot{\gamma}^n$ - equação 3) com os respectivos valores de R^2 (coeficiente de determinação) obtidos nos ajustes, para os diferentes materiais estudados (Tabela 2). O valor encontrado para τ_0 foi zero.

Tabela 3 - Equação do modelo Ostwald de Waele para os materiais estudados

% Sólidos	Estado	Visc.	Modelo $\tau = \kappa \dot{\gamma}^n$	R^2
15	natural	baixa	$\tau = 0,0267 (\dot{\gamma})^{0,6733}$	0,9929
25	natural	média	$\tau = 0,1718 (\dot{\gamma})^{0,5306}$	0,9782
35	natural	alta	$\tau = 1,4949 (\dot{\gamma})^{0,3568}$	0,9534
35	dispersa	média	$\tau = 0,3288 (\dot{\gamma})^{0,4658}$	0,9547
35	dispersa	baixa	$\tau = 0,0087 (\dot{\gamma})^{0,8085}$	0,9989
15	espessada CMC	média	$\tau = 0,1497 (\dot{\gamma})^{0,7297}$	0,9977
15	espessada glicerina	média	$\tau = 0,0570 (\dot{\gamma})^{0,9184}$	0,9990
glicerina comercial			$\tau = 0,6418 (\dot{\gamma})^{1,0039}$	0,9999

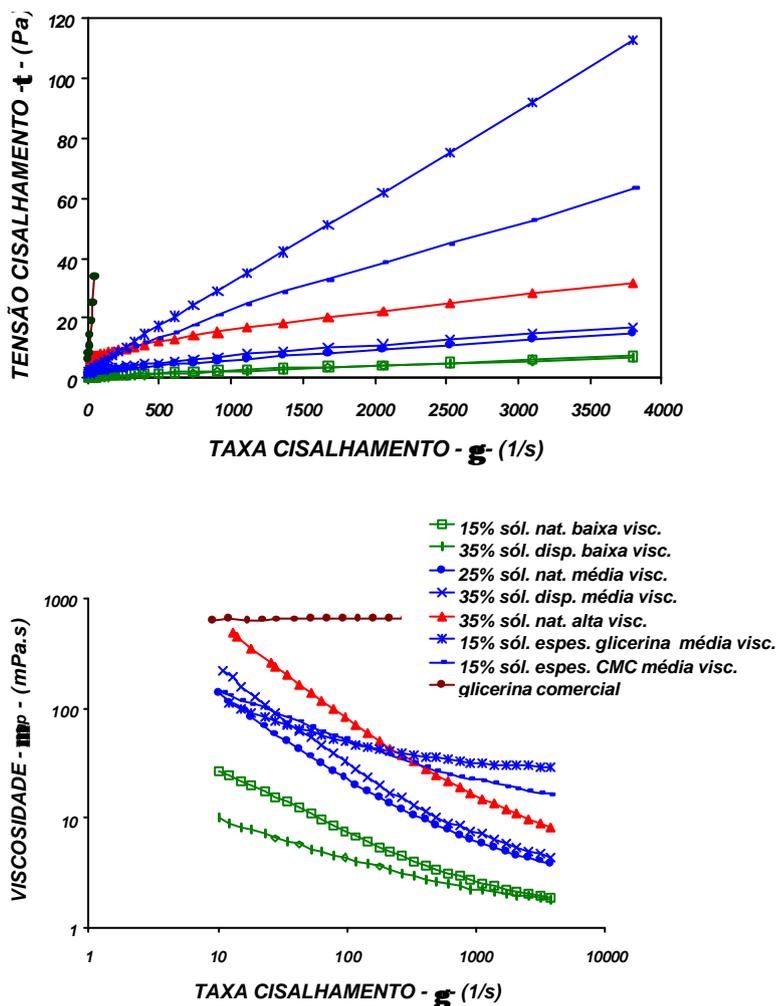


Figura 2 - Resultados do estudo de reologia

Pelos resultados mostrados na Figura 2 e Tabela 3 observa-se que todas as polpas apresentaram um comportamento reológico pseudoplástico, o mesmo não acontecendo com a glicerina pura grau comercial que apresentou um comportamento Newtoniano.

Os resultados foram muito bem ajustados pelo modelo de Ostwald de Waele, apresentando uma pequena dispersão entre os valores observados e aqueles previstos pelo modelo, conforme demonstrado pelos coeficientes de determinação R^2 , todos são maiores que 0,95.

3.3 Tipos de Viscosímetros

Há um grande número de viscosímetros comerciais para serem escolhidos de acordo com a sua geometria, as faixas de viscosidades e as taxas de cisalhamento necessárias para o trabalho ou estudo. Os critérios para a escolha devem envolver, principalmente: a natureza do material; se é de baixa ou alta viscosidade; se é elástico ou não; a dependência da temperatura na viscosidade etc. Outra importante consideração é a precisão e exatidão requeridas e se as medidas são para controle de qualidade ou para pesquisa.

A maioria dos viscosímetros disponíveis no mercado, que estão incorporados em ensaios padrão de muitas indústrias, em vez de descrever a viscosidade ou a tensão de cisalhamento, abrangendo uma ampla faixa de taxas de cisalhamento, somente produz um único ponto na curva de comportamento reológico da polpa, sendo os restantes desconhecidos. Tal procedimento não traz conseqüências para fluidos Newtonianos porque a viscosidade é independente da taxa de cisalhamento mas pode ser danoso para fluidos não-Newtonianos.

Um cuidado especial deve ser dado à temperatura da polpa. Um bom controle de temperatura pode ser obtido empregando-

se termostatos. Quando se deseja alterar a temperatura, pode-se envolver a caixa de alimentação da bomba com serpentinhas.

De acordo com KIRK; OTHMER (1982), há dois tipos principais de viscosímetros: capilares e rotacionais.

1) *Viscosímetros capilares*

Os viscosímetros de fluxo capilar são os mais antigos. A tensão de cisalhamento é fornecida em função da pressão a que o fluido é submetido ao fluir através de um tubo capilar. Eles são precisos nas medidas de viscosidades de fluidos Newtonianos até valores de 20.000 mPa.s. Uma desvantagem deste tipo de viscosímetro é que a velocidade de cisalhamento varia de zero, no centro do capilar, a um valor máximo nas paredes. O viscosímetro de fluxo capilar mais conhecido é o de Ostwald. Há diversas marcas com pequenas variações como os Cannon-Fenske, Ubbelohde, FritzSimons, SIL, Atlantic, Ford, entre outros.

A equação básica para o cálculo de viscosidade em viscosímetros capilares, estabelecida por Hagen-Poiseuille, é dada por (KIRK; OTHMER (1982))

$$\mu = \frac{\pi r_p^4 \Delta P t}{8 Q_v L_p} \quad (5)$$

onde:

μ = viscosidade;

r_p = raio do capilar;

ΔP = queda de pressão através do capilar;

t = tempo;

Q_v = vazão volumétrica; e

L_p = comprimento do capilar.

A taxa de cisalhamento (γ_w) e a tensão de cisalhamento (τ_w) nas paredes do capilar podem ser calculadas por

$$\gamma_w = \frac{4 Q_v \pi}{r_p^3} e \quad (6)$$

$$\tau_w = \frac{r_p \Delta P}{2 L_p} \quad (7)$$

onde:

γ_w = taxa de cisalhamento na parede do capilar; e

τ_w = tensão de cisalhamento na parede do capilar.

2) Viscosímetros rotacionais

Os viscosímetros rotacionais são constituídos de duas partes básicas separadas pelo fluido que está sendo analisado. As partes podem ser de cilindros concêntricos (copo e rotor), de placas, de cone e placa ou de discos. Uma das partes gira em relação à outra e produz cisalhamento no fluido. A viscosidade é medida em função do torque fornecido para produzir uma determinada velocidade angular ou, da velocidade angular necessária para produzir um determinado torque. Eles são mais versáteis que os de fluxo capilar e podem ser usados para fluidos não-Newtonianos. Um moderno viscosímetro constituído por copo e rotor foi desenvolvido pela Debex, da África do Sul, e permite medir viscosidades da polpa *on line* e está sendo testado no Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre - JKMRRC, na Austrália (SHI; NAPIER-MUNN (1996a)). As marcas de viscosímetros rotacionais mais conhecidas são: o Brookfield Synchro-Lectric, constituído por um copo e disco, sendo eficientes para baixas taxas de cisalhamento de até 74 1/s, segundo BAKSHI; KAWATRA (1996), o Fann, com cilindros concêntricos, para baixas e

médias taxas de cisalhamento e o Haake Rotovisco, com cilindros concêntricos ou cone e placa, para altas taxas de cisalhamento chegando até 30.000 1/s e podendo medir viscosidades de até 10^9 mPa.s.

Para fluidos Newtonianos, Margules (apud KIRK;OTHMER (1982)) apresentou uma equação relacionando viscosidade, medida em viscosímetros com cilindros concêntricos (copo e rotor), com a velocidade angular e o torque aplicado no rotor

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{M}{w_a 4 \delta h_r} \right) \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2} \right) = \frac{k M}{w_a} \quad (8)$$

onde:

M = torque aplicado no rotor;

h_r = altura do rotor mergulhada no fluido;

w_a = velocidade angular do rotor;

r_i = raio do rotor;

r_o = raio do copo; e

k = parâmetro do viscosímetro.

A taxa e a tensão de cisalhamento podem ser obtidas pelas equações

$$\tilde{\alpha} = \frac{2 w_a r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)} e \quad (9)$$

$$\tau = \frac{M}{2 \pi r_i^2 h_r} \quad (10)$$

Para viscosímetros de cone e placa tem-se para fluidos Newtonianos

$$\dot{\gamma} = \frac{3 \dot{\epsilon} M}{2 r_n^3} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{M}{\theta} \epsilon \quad (12)$$

$$\tau = \frac{3 M}{2 \pi r_n^3} \quad (13)$$

onde:

r_n = raio do cone; e

θ = ângulo entre o cone e a placa.

Existem viscosímetros especiais como os da Bendix Ultra-Viscoson, Automation Products Dynatrol e Nametre que utilizam a técnica de vibração ultrasônica de um corpo. Neste último, de acordo com BAKSHI; KAWATRA (1996) e KAWATRA; BAKSHI (1996), o que transmite a vibração é uma esfera e as medidas de viscosidade da polpa podem ser obtidas *on-line*.

4. EFEITOS DA REOLOGIA NO TRATAMENTO DE MINÉRIOS

A reologia da polpa desempenha um papel muito importante nos diversos processos de tratamento de minérios, destacando-se classificação, moagem, concentração, sedimentação e filtração, atuando significativamente na velocidade de sedimentação das partículas, sendo esta dependência mais fortemente verificada à medida que diminui o tamanho da partícula. A reologia tem participação também no transporte de polpas ao longo de dutos não só na usina de beneficiamento, como também em minerodutos.

A influência da reologia não é bem compreendida e, em vista disso, ela é raramente incorporada como uma variável em projetos, análises e otimização. Uma das principais razões é a dificuldade de estudar a reologia de suspensões instáveis, que ocorrem em grande parte dos processos de beneficiamento de minérios, aliada à falta de Normas para a medida da viscosidade (SHI; NAPIER-MUNN (1996a)).

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

Em um estudo muito interessante, HEALY et al. (1993) descreveram o comportamento de polpas de pigmento de dióxido de titânio com diferentes percentagens de sólidos em massa (45, 50 e 55%), a uma mesma taxa de cisalhamento (50 1/s), sob a ação de dispersante (silicato de sódio) em diferentes

pHs. A maior viscosidade, para as três diferentes percentagens de sólidos, foi alcançada em pH 8,5, sendo decrescentes para pHs mais ácidos e mais básicos. Quanto à influência da percentagem de sólidos, como era esperado, as maiores viscosidades foram observadas nas polpas com maiores percentagem de sólidos.

Segundo BAKSHI; KAWATRA (1996) somente polpas com baixa percentagem de sólidos (3-5% por volume) podem, normalmente, apresentar um comportamento de fluido Newtoniano, embora HEALY et al. (1993) tenham observado este comportamento com polpas de até 30% de sólidos por volume.

Num trabalho executado por PLITT (1991) foi apresentado um exemplo da influência do tamanho de partículas na viscosidade de uma polpa. Esta, contendo 100% de material abaixo de 10 μm e com 10% de sólidos por volume, equivale a uma polpa contendo 30% de sólidos por volume, mas com 100% do material acima de 10 μm . Tal constatação demonstra o risco de se relacionar exclusivamente viscosidade com percentagem de sólidos da polpa.

SHI; NAPIER-MUNN (1996b) descrevendo o comportamento de polpas (minério sulfetado de cobre-chumbo-zinco) com diferentes percentagens de sólidos por volume (15, 30 e 45%) e diferentes concentrações de partículas passantes em 38 μm (20, 50 e 95%) constataram que a reologia das mesmas apresentava três tipos de comportamento: dilatante, pseudo-plástico e plástico de Bingham.

Para uma baixa percentagem de sólidos por volume (15%), a polpa comportou-se como um material dilatante. Aumentando a quantidade de finos contidos de 20 para 95% passante em 38 μm , o comportamento de material dilatante tornou-se mais pronunciado.

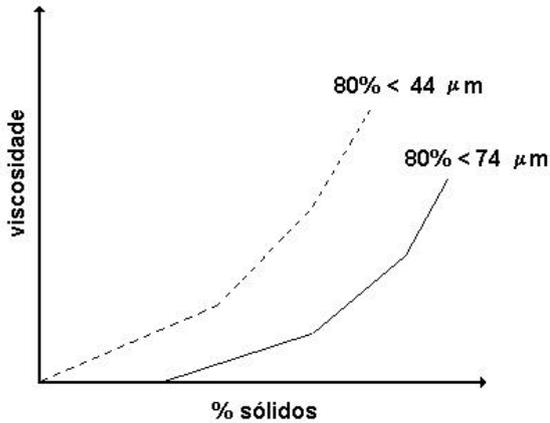
Para uma percentagem de sólidos por volume intermediária (30%) e uma pequena quantidade de finos (20% passante em

38 μm), a polpa apresentou características de um material plástico de Bingham. Para uma grande quantidade de finos, ainda permaneceu a tendência do comportamento de material dilatante.

Quando a percentagem de sólidos por volume aumentou para 45% e a quantidade de finos maior que 20%, as polpas apresentaram um comportamento pseudoplástico com tensão de escoamento.

Aumentando ou a percentagem de sólidos por volume ou a quantidade de finos resultou, geralmente, num aumento da tensão de cisalhamento, sendo que o aumento foi mais significativo com o aumento da percentagem de sólidos. A interação da quantidade de finos e percentagem de sólidos não pode ser desconsiderada. Ficou constatado que o efeito da quantidade de finos na tensão de cisalhamento é muito pequeno para pequenas percentagens de sólidos.

Num trabalho realizado por KAWATRA; EISELE (1988) eles constataram também o efeito marcante da relação entre a percentagem de sólidos e quantidade de finos com a viscosidade, conforme mostrado na Figura 3. Em ensaios de ciclonagem com minério de ferro foram coletadas amostras da alimentação (80% passante em 74 μm) e do *overflow* (80% passante em 44 μm) com diferentes percentagem de sólidos.



Fonte: KAWATRA, S.K.; EISELE, T.C. Rheological effects in grinding circuits.

Figura 3 - Relação entre percentagem de sólidos e quantidade de finos com a viscosidade

KAWATRA et al. (1996) realizando estudos com ciclones concluíram que nas polpas que variaram de 19 a 40% de sólidos em massa, a mudança da viscosidade não acarretou um efeito significativo na curva de partição reduzida, embora provocasse uma maior diferença entre os valores de d_{50} e d_{50c} .

Por outro lado, HSIEH; RAJAMANI (1991) constataram que o parâmetro α (nitidez da separação na partição reduzida) decrescia com o aumento da viscosidade da polpa. O parâmetro α da curva de partição reduzida, apresentado por LYNCH; RAO(1975) no modelamento matemático de ciclones, caracteriza a qualidade da separação. Quanto maior o seu valor, melhor a separação por ciclone.

Num trabalho de DYAKOWSKI et al. (1994), utilizando um ciclone de 44 mm de diâmetro com diferentes viscosidades de polpa, modificadas pela adição de CMC (carboximetilcelulose) em diferentes concentrações (0,3; 1,0 e 3,0%), eles observa-

ram que, em altas viscosidades, ocorria uma redução na rotação do fluido à medida que se aproximava do *apex*.

Em geral, a magnitude das velocidades no interior de um ciclone aumenta com o decréscimo da viscosidade, o que era esperado. Uma segunda observação é que as diferenças são maiores próximo ao *apex* que próximo ao teto. Isso mostra que o alcance da rotação do fluido no fundo do ciclone (longe do *inlet*) é influenciada pela viscosidade do fluido, ao contrário do que acontece no teto, onde a velocidade tangencial é função da velocidade no *inlet*.

Uma outra consideração que merece destaque diz respeito a viscosidade da polpa no modelamento matemático de processos. Em alguns casos os efeitos da viscosidade são considerados de forma indireta, através da percentagem de sólidos. Tal procedimento poderá levar a erros significativos uma vez que a viscosidade da polpa não depende somente da percentagem de sólidos. Este efeito da viscosidade em muitos casos poderá perder seu significado físico por estar oculto nos parâmetros k dos modelos, após terem sido estimados por procedimentos matemáticos. Num modelo matemático de Asomah para ciclones, citado em ASOMAH; NAPIER-MUNN (1997), a viscosidade é incorporada através do termo número de Reynolds que por sua vez é função da viscosidade. Este procedimento só é válido para polpas com comportamento Newtoniano, pois a viscosidade da polpa em qualquer ponto de seu percurso será constante. Por outro lado, se ela apresentar um comportamento não-Newtoniano, no interior do ciclone, por exemplo, onde são verificadas altas taxas de cisalhamento, a classificação ocorrerá numa condição em que a viscosidade será diferente daquela medida em um outro ponto circuito.

Para levar em conta esta característica, POSSA (2000) empregou uma metodologia em que a viscosidade de uma polpa de rocha fosfática com comportamento não-Newtoniano é estudada numa ampla faixa de taxas de cisalhamento. Para que seja incorporada a variável viscosidade aparente no estudo de beneficiamento de polpas não-Newtonianas por ciclones, tor-

nou-se necessário determiná-la no lugar geométrico do equipamento onde ocorre o processo, uma vez que a intensidade dos esforços de cisalhamento a que a polpa está sendo submetida é que irá determinar o valor da viscosidade aparente em questão. Esta viscosidade particular, foi denominada de viscosidade de separação μ_{50c} . De acordo com PEREIRA (1997), ela é o elo de ligação entre os fluidos com comportamentos Newtonianos e não-Newtonianos. Ainda de acordo com POSSA (2000), foi demonstrado que é possível obter-se com uma polpa de 35% sólidos, previamente dispersa com reagente químico até alcançar uma viscosidade mais baixa, d_{50c} tão finos quanto aqueles obtidos com uma mesma polpa, mas com 15% sólidos (viscosidades aparentes estão apresentadas no Anexo 1).

Otimizar o processo de moagem também tem sido um desafio para os tratamentistas uma vez que a energia consumida é cerca de 25% do total empregado na etapa de concentração e somente 5% dessa energia é efetivamente destinada à geração de novas superfícies (KAWATRA; EISELE (1988)). No início da década de 80, KLIMPEL (1982,1983) estudou, com detalhes, os efeitos da reologia da polpa na moagem. Ele propôs correlações empíricas para as taxas de moagem, tendo por base os resultados obtidos em ensaios realizados sob várias condições, em escalas de laboratório e industrial. A maioria das polpas de carvão e de minério que contém uma percentagem de sólidos por volume menor que 40-45%, uma distribuição normal de tamanhos e uma viscosidade baixa apresenta um comportamento reológico do tipo dilatante. Sob essas condições, a taxa de quebra é de 1ª ordem. Em muitos casos, aumentando a viscosidade da polpa pelo aumento da percentagem de sólidos ou da quantidade de finos ou, ainda, controlando a distribuição de tamanhos, a polpa pode passar a apresentar um comportamento pseudoplástico e, se não apresentar uma tensão limite de escoamento (*yield stress*), as taxas de quebra ainda mantêm-se como sendo de 1ª ordem, mas seus valores são maiores que aqueles obtidos com uma polpa com comportamento dilatante. Essa é uma das condições que proporciona uma maior eficiência de moagem.

Aumentando ainda mais a viscosidade da polpa (percentagem de sólidos, quantidade de finos ou controle da distribuição de tamanhos), ela pode passar a exibir valores mais significativos de tensões limite de escoamento e as taxas de quebra, devido a isso, deixam de ser de 1ª ordem e seus valores decrescem consideravelmente. Para contornar esse problema, KLIMPEL (1982,1983) sugeriu a adição de reagentes químicos para mudar o comportamento reológico da polpa. A adição de dispersantes, por exemplo, pode diminuir a tensão limite de escoamento e aumentar a sua fluidez. O dispersante adequado é função do tipo de minério ou material que está sendo moído. As dosagens de dispersantes normalmente são pequenas, menos que 0,1% em peso.

Num trabalho mais recente de SHI; NAPIER-MUNN (1996), tendo por base um grande número de dados industriais, foram confirmados os resultados e melhor compreendidas as observações de KLIMPEL (1982,1983), sobre os efeitos da reologia das polpas no processo de moagem. Foram considerados como parâmetros a variação da viscosidade (independentemente de outras variáveis), da densidade, da quantidade de partículas finas e da vazão de alimentação no moinho para polpas com comportamento reológico dilatante, pseudoplástico e Newtoniano. Constataram que o aumento da vazão de alimentação sempre reduz a taxa de moagem (relação entre a geração de novas superfícies produzidas para as condições consideradas); o aumento da viscosidade, geralmente, aumenta a taxa de moagem, exceto para polpas dilatantes com uma grande tensão limite de escoamento; o aumento da quantidade de finos, aumenta a taxa de moagem para polpas com comportamento pseudoplástico e diminui a taxa para polpas dilatantes e Newtonianas. SHI; NAPIER-MUNN (1996) concluíram que se o objetivo de um trabalho for o de otimizar o processo de moagem, primeiro torna-se necessário compreender a reologia da polpa. Também, parece que alguns fenômenos inesperados e intuitivos da prática industrial podem ser atribuídos à reologia da polpa.

FUERSTENAU et al. (1990) estudaram o efeito de dispersantes (tipo polímeros) na viscosidade de polpas densas na moagem a úmido com bolas. Eles concluíram que para polpas com percentagens de sólidos relativamente baixas (segundo os autores menos de 40% sólidos por volume) suas viscosidades aparentes são mais ou menos independentes da distribuição de tamanhos de partículas ou adição de qualquer dispersante. Para maiores percentagens de sólidos a reologia da polpa suporta uma mudança qualitativa, que é refletida no aumento significativo da viscosidade aparente. Além de uma certa percentagem de sólidos, a viscosidade aumenta repentinamente e as taxas de moagem decrescem. Esta entrada de sólidos é alcançada progressivamente com valores baixos, quando o tamanho médio de partícula torna-se mais fino, devido à presença de uma maior quantidade de finos gerados durante a moagem. A adição de dispersantes poliméricos pode desagregar os flocos e, como consequência, a polpa pode suportar mais 7% de sólidos antes de atingir um limite crítico.

HARTLEY et al. (1978) estudaram o ganho de rendimento na moagem a partir da adição de reagentes. Esse ganho foi expresso pelo fator de taxa de moagem (igual a relação entre as novas superfícies produzidas com a adição de reagente por novas superfícies produzidas sem a adição de reagente). Na Tabela 4, a seguir, são apresentados os ganhos de rendimento obtidos com alguns tipos de aditivos adicionados na moagem de minérios e materiais.

Um aditivo eficiente na moagem deve produzir ou uma mudança na função taxa de quebra (S) ou na função distribuição de quebra (B). Essas funções são parâmetros para o modelo de balanço populacional para o processo de moagem.

Na literatura técnica há uma grande quantidade de trabalhos realizados em escala de laboratório que demonstram um aumento nas taxas de moagem quando são usados aditivos. No entanto, quando são realizados em escala industrial, geralmente os resultados não se reproduzem.

Tabela 4 - Ganhos de rendimento com alguns aditivos usados no processo de moagem

Aditivo	Minério/Material	Fator Taxa de Moagem
Água	Mármore	1,6
Água	Clínquer	1,3
Isopentanol	Quartzo	1,29
Isopentanol	Pó de Ferro	20,0
Acetona	Clínquer	1,37
Amina (Flotigan)	Quartzito	2,2
Amina (Flotigan)	Calcáreo	1,7
Ácido Oleico	Calcáreo	1,1
Oleato de Sódio	Quartzo	2,0
Oleato de Sódio	Calcáreo	2,0
Estearato de Sódio	Clínquer	1,2
Ácido Naftênico	Clínquer	1,33
Naftenato de Sódio	Quartzito	1,40
Sulfonafenato de Sódio	Quartzito	1,80
Acetato de Anila	Quartzo	1,23
Carbonato de Sódio	Calcáreo	2,0
Dióxido de Carbono	Quartzito	1,55
Polimetafosfato de Sódio (Calgon)	Minério Chumbo e Zinco	1,65

Fonte: HARTLEY, J.N.; PRISBREY, K.A.; WICK, O.J. Chemical additives for ore grinding: how effective are they?

* Relação entre novas superfícies produzidas com aditivo/ novas superfícies produzidas sem aditivo.

As forças hidrodinâmicas na polpa podem ocultar os efeitos causados na moagem pela adição de reagentes. Incrementos de melhorias no desempenho da moagem produzidos pelos aditivos químicos podem ser absorvidos pelos efeitos das contínuas mudanças na alimentação do moinho. Até mesmo com alimentações constantes, as moagens em circuito fechado freqüentemente é dinamicamente instável. A percentagem de sólidos num moinho muda constantemente. Devido a tais flutuações, um aditivo de moagem que seja potencialmente eficiente pode dar a impressão de não produzir efeito esperado.

Um aditivo de moagem pode ter, basicamente, dois tipos de atuação: reduzindo o consumo de kWh por tonelada de minério

requerida ou mudando a forma de quebra das partículas e com isso aumentando sua liberação. Como resultado espera-se que um aditivo de moagem irá aumentar a produção sem aumentar a quantidade de finos ou gerar um produto mais fino para uma mesma produção. A meta de maximizar a recuperação de mineral útil a um menor custo é função do balanço entre essas duas situações.

Deve ser lembrado também que se por um lado a adição de reagentes químicos pode resultar em uma otimização do processo de moagem, em muitos casos esses mesmos reagentes podem ser prejudiciais aos processos subsequentes, constantes do circuito como, por exemplo, a flotação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como considerações finais pode-se destacar como observações importantes no estudo da reologia de polpas no tratamento de minérios:

- a viscosidade desempenha um papel muito importante em muitos processos de tratamento de polpas de minérios contendo partículas finas, ultrafinas e coloidais;
- as dificuldades de se caracterizar os efeitos da viscosidade aparente no beneficiamento de polpas com comportamento reológico não-Newtoniano têm início ao se tentar definir em que ponto, ao longo do percurso da polpa, a viscosidade deve ser medida;
- a incorporação da variável viscosidade no estudo de beneficiamento de polpas de minério com comportamento não-Newtoniano requer a sua determinação no lugar geométrico do equipamento onde ocorre o processo (a separação propriamente dita), uma vez que a intensidade dos esforços de cisalhamento que a polpa está sendo submetida é que irá determinar o valor da viscosidade responsável pelo processo em desenvolvimento;
- o modelo desenvolvido por Ostwald de Waele se adequa muito bem na caracterização do comportamento reológico de polpas com diferentes viscosidades aparentes para uma determinada taxa de cisalhamento; e
- a ação de agentes químicos modificadores da viscosidade aparente de polpas pode proporcionar um melhor desempenho de processos no tratamento de minérios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASOMAH, A.K.; NAPIER-MUNN, T.J. (1997) An empirical model of hydrocyclones, incorporating angle of cyclone inclination. **Minerals Engineering**, v. 10, nº 3, p. 339-43.
- BAKSHI, A.K.; KAWATRA, S.K. (1996) Rapid determination of non-Newtonian flow behaviour in mineral suspensions. **Minerals and Metallurgical Processing**, v. 13, nº 4, p. 165-9, November.
- DARLEY, H.C.H.; GRAY, G.R. (1988) Rheology of drilling fluids. In: **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**, fifth edition, Gulf Publishing Company, chapter 5, p. 184-281.
- DYAKOWSKI, T.; HORNUNG, G.; WILLIAMS, R.A. (1994) Simulation of non-newtonian flow in a hydrocyclone. **Transaction of the Institution of Chemical Engineers**, v. 72, part A, p. 513-20.
- Fertilizantes SERRANA S.A. - Complexo Industrial ARAFÉRTIL (1996) Dados obtidos em visita técnica à usina de beneficiamento, Araxá, Minas Gerais.
- FUERSTENAU, D.W.; KAPUR, P.C.; VELAMAKANNI, B. (1990) A multi-torque model for the effects of dispersants and slurry viscosity on ball milling. **International Journal of Mineral Processing**, v. 28, p. 81-98.
- HARTLEY, J.N.; PRISBREY, K.A.; WICK, O.J. (1978) Chemical additives for ore grinding: how effective are they? **Engineering and Mining Journal**, v. 179, nº 10, p. 105-11.
- HEALY, T.W.; BOGER, D.V.; WHITE, L.R.; SCALES, P.J. (1993) Particulate fluids - a key concept in advanced mineral processing. In: XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, Australia, p. 47-55, May.

- HSIEH, K.T.; RAJAMANI, K. (1991) Mathematical model of hydrocyclone based on physics of fluid flow. **American Institute of Chemical Engineers Journal**, v. 37, nº 5, p. 735-46.
- HUNTER, R.J. (1992) Rheology of colloidal dispersions. In: **Foundations of Colloid Science**, Clarendon Press-Oxford, v. II, chapter 18, p. 993-1057.
- KAWATRA, S.K.; BAKSHI, A.K. (1996) On-line measurement of viscosity and determination of flow types for mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, nº 3-4, p. 275-83.
- KAWATRA, S.K.; BAKSHI, A.K.; RUSESKEY, M.T. (1996) The effect of viscosity on the cut (d_{50}) size of hydrocyclone classifiers. **Minerals Engineering**, v. 9, nº 8, p. 881-91.
- KAWATRA, S.K.; EISELE, T.C. (1988) Rheological effects in grinding circuits. **International Journal of Mineral Processing**, v. 22, p. 251-9.
- KIRK, R. E.; OTHMER, D.F. (1982) Refractories to silk. In: **Encyclopedia of Chemical Technology**, v. 20, third edition, John Wiley & Sons, p. 259-319.
- KLIMPEL, R.R. (1982) Slurry rheology influence on the performance of mineral/coal grinding circuits. **Mining Engineering**, December, p. 1665-8.
- KLIMPEL, R.R. (1983) Slurry rheology influence on the performance of mineral/coal grinding circuits - part 2. **Mining Engineering**, January, p. 21-6.
- LYNCH, A..J.; RAO, T.C. (1975) Modelling and scale-up of hydrocyclone classifiers. In: XI International Mineral Processing Congress, paper 9, Cagliari, Italy.
- PAWLIK, M.; LASKOWSKI, J.S. (1999) Evaluation of flocculants and dispersants through rheological tests. In: Polymers in Mineral Processing. 38 th Annual Conference of Metallurgists of CIM, Quebec, Canada, p. 541-55, August.

- PLITT, L.R. (1991) A mathematical model of the gravity classifier. In: XVII th International Mineral Processing Congress, Dresden, v. 1, p. 123-35.
- POSSA, MV. (2000) **Efeitos da viscosidade no processo de deslamagem com microciclones em polpa não-Newtoniana de rocha fosfática**, Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo, 154 p.
- SHAW, D.J. (1992) Rheology. In: **Introduction to Colloid and Surface Chemistry**, Butterworths-Heinemann Ltd, fourth edition, chapter 9, p. 244-61.
- SHI, F.N.; NAPIER-MUNN, T.J. (1996a) Measuring the rheology of slurries using an on-line viscometer. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, nº 3-4, p. 153-76.
- SHI, F. N.; NAPIER-MUNN, T.J. (1996b) A model for slurry rheology. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, nº 1-2, p. 103-23.

ANEXO 1

Reômetro HAAKE RS100

REOLOGIA DAS POLPAS

15% SÓL. NAT. BAIXA VISC.			25% SÓL. NAT. MÉDIA VISC.		
TAXA	TENSÃO	VISC.	TAXA	TENSÃO	VISC.
3805	7.22	1.90	3805	14.83	3.90
3101	6.10	1.97	3101	12.71	4.10
2526	5.15	2.04	2526	10.86	4.30
2057	4.38	2.13	2058	9.46	4.60
1677	3.79	2.26	1677	8.38	5.00
1366	3.26	2.39	1366	7.37	5.40
1114	2.84	2.56	1113	6.56	5.90
907	2.46	2.72	907	5.80	6.40
739	2.18	2.95	739	5.17	7.00
602	1.91	3.18	602	4.69	7.80
490	1.67	3.41	490	4.21	8.60
400	1.49	3.73	400	3.84	9.60
326	1.32	4.07	326	3.52	10.80
266	1.19	4.49	266	3.21	12.10
216	1.06	4.94	216	2.95	13.70
176	0.96	5.50	176	2.74	15.60
144	0.87	6.10	144	2.54	17.70
117	0.79	6.82	117	2.37	20.30
95	0.72	7.64	95	2.23	23.50
78	0.67	8.61	78	2.10	27.00
63	0.60	9.67	63	1.98	31.50
52	0.56	10.84	52	1.90	36.70
42	0.52	12.44	42	1.80	43.00
34	0.48	14.13	34	1.71	50.40
28	0.44	15.78	28	1.63	58.30
23	0.40	17.79	23	1.58	69.10
18	0.36	20.03	18	1.49	83.00
15	0.35	21.91	16	1.54	96.70
12	0.29	24.59	12	1.37	114.70
10	0.27	27.18	10	1.37	137.50

$$\text{Tensão} = a (\text{Taxa})^n$$

$$\begin{aligned} a &= 0,026739 \\ n &= 0,673256 \\ R2 &= 0,99293 \end{aligned}$$

$$\text{Tensão} = a (\text{Taxa})^n$$

$$\begin{aligned} a &= 0,171769 \\ n &= 0,530622 \\ R2 &= 0,97825 \end{aligned}$$

Reômetro HAAKE RS100
REOLOGIA DAS POLPAS

35% SÓL. NAT. ALTA VISC.			35% SÓL. DISP. MÉDIA VISC.		
TAXA	TENSÃO	VISC.	TAXA	TENSÃO	VISC.
3805	31.69	8.33	3805	16.93	4.45
3101	28.09	9.06	3101	14.67	4.73
2526	25.05	9.92	2526	12.78	5.06
2058	22.49	10.93	2058	11.24	5.46
1677	20.32	12.12	1677	9.94	5.93
1366	18.40	13.47	1366	8.88	6.50
1113	16.75	15.05	1113	7.98	7.17
907	15.34	16.92	907	6.97	7.68
739	14.10	19.08	739	6.24	8.44
602	13.02	21.63	602	5.47	9.08
490	12.07	24.64	490	4.95	10.11
400	11.26	28.17	400	4.67	11.67
326	10.55	32.37	326	4.20	12.87
266	9.94	37.40	266	4.07	15.31
216	9.37	43.42	216	3.70	17.11
176	8.93	50.77	176	3.52	20.02
144	8.60	59.75	144	3.44	23.87
117	8.14	69.63	117	3.25	27.79
95	7.83	82.50	95	3.09	32.48
78	7.63	97.87	78	3.05	39.08
63	7.40	117.60	63	2.88	45.74
52	7.21	138.70	52	2.80	53.91
42	6.97	165.90	42	2.65	63.07
34	6.76	198.70	34	2.51	73.94
28	6.62	236.30	28	2.50	89.19
26	6.70	257.70	23	2.47	107.47
18	6.24	346.50	19	2.44	128.45
14	6.39	456.70	15	2.40	159.67
13	6.28	483.00	13	2.49	191.89
			11	2.44	221.53

Tensão = $a(Taxa)^n$

a= 1,49486
 n= 0,3568216
 R2= 0,95341

Tensão = $a(Taxa)^n$

a= 0,328849
 n= 0,46579
 R2= 0,95468

Reômetro HAAKE RS100

REOLOGIA DAS POLPAS

35% SÓL. DISP. BAIXA VISC.			15% SÓL. ESP. MÉDIA VISC.		
			ESPESADA CMC		
TAXA	TENSÃO	VISC.	TAXA	TENSÃO	VISC.
3805	6,89	1,81	3805	63,29	16,63
3101	5,80	1,87	3101	52,75	17,01
2526	4,88	1,93	2526	44,74	17,71
2058	4,05	1,97	2058	38,63	18,77
1677	3,42	2,04	1677	32,89	19,61
1366	2,87	2,10	1366	28,69	21,00
1113	2,45	2,20	1113	24,68	22,17
907	2,06	2,27	907	20,90	23,04
739	1,77	2,39	739	17,64	23,87
602	1,52	2,53	602	15,15	25,17
490	1,31	2,67	490	13,30	27,15
400	1,12	2,80	400	11,80	29,50
326	0,96	2,96	326	10,44	32,03
266	0,83	3,12	266	9,24	34,72
216	0,73	3,40	216	8,13	37,65
176	0,64	3,62	176	7,18	40,77
144	0,56	3,88	144	6,35	44,12
117	0,48	4,08	117	5,57	47,57
95	0,41	4,30	95	5,06	53,26
78	0,36	4,60	78	4,48	57,40
63	0,31	4,97	63	3,89	61,82
52	0,27	5,25	52	3,57	68,69
42	0,24	5,77	42	3,21	76,42
34	0,21	6,20	34	2,86	83,99
28	0,18	6,53	28	2,52	90,02
23	0,17	7,18	23	2,32	100,91
18	0,14	7,95	18	1,98	110,16
15	0,12	8,30	15	1,78	118,53
12	0,11	9,12	12	1,59	132,87
10	0,10	10,00	11	1,54	140,00

$$\text{Tensão} = a (\text{Taxa})^n$$

$$a = 0,008655$$

$$n = 0,80851$$

$$R2 = 0,99889$$

$$\text{Tensão} = a (\text{Taxa})^n$$

$$a = 0,149723$$

$$n = 0,72971$$

$$R2 = 0,99774$$

Reômetro HAAKE RS100

REOLOGIA DAS POLPAS

15% SÓL. ESP. MÉDIA VISC.			GLICERINA COMERCIAL		
ESPESSADA GLICERINA			GLICERINA COMERCIAL		
TAXA	TENSÃO	VISC.	TAXA	TENSÃO	VISC
3805	112,63	29,60	1200	789	658
3101	91,88	29,63	902	593	657
2526	75,27	29,80	677	448	662
2058	61,86	30,06	509	337	662
1677	51,03	30,43	382	252	660
1366	42,11	30,83	287	190	661
1113	34,89	31,35	216	142	656
907	29,17	32,16	162	107	657
739	24,52	33,18	122	79,5	652
602	20,59	34,20	92	59,8	652
490	17,31	35,33	69	44,5	647
400	14,58	36,44	52	33,6	649
326	12,26	37,62	39	25	644
266	10,44	39,25	29	18,9	644
216	8,84	40,93	22	14,2	642
176	7,50	42,61	17	10,6	637
144	6,41	44,50	12	8	651
117	5,46	46,67	9	6	634
95	4,74	49,85			
78	4,10	52,62			
63	3,55	56,30			
52	3,18	61,16			
42	2,74	65,16			
34	2,41	71,02			
28	2,18	77,68			
23	1,93	83,85			
18	1,65	91,66			
15	1,51	100,60			
12	1,34	112,00			

$$\text{Tensão} = a(\text{Taxa})^n$$

$$\begin{aligned} a &= 0,057056 \\ n &= 0,91838 \\ R2 &= 0,99902 \end{aligned}$$

$$\text{Tensão} = a(\text{Taxa})^n$$

$$\begin{aligned} a &= 0,6418 \\ n &= 1,0039 \\ R2 &= 0,9999 \end{aligned}$$

ANEXO 2
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

SÍMBOLOS E UNIDADES

As unidades podem ser apresentadas como múltiplo ou submúltiplo

A - área projetada da partícula (m^2)

F - força tangencial (kgm/s^2)

d_{50} - tamanho ou diâmetro mediano da partição real (μm)

d_{50c} - tamanho ou diâmetro mediano da partição corrigida (μm)

h_r - altura do rotor mergulhada no fluido

k - parâmetro

L_p - comprimento do capilar

M - torque aplicado ao rotor

n - expoente de equações. Para a lei de Potência é o índice de comportamento do fluido

ΔP - diferença de pressão (psi ou kPa)

Q_v - vazão volumétrica de polpa (L/min)

r_i - raio do rotor do viscosímetro

r_o - raio do copo do viscosímetro

r_n - raio do cone

r_p - raio do capilar

R^2 - coeficiente de determinação

v - velocidade (m/s)

w_a - velocidade angular (rad/s)

y - distância (m)

Letras Gregas

α - parâmetro de nitidez da separação

γ - taxa de cisalhamento (1/s)

γ_w - taxa de cisalhamento nas paredes do capilar

κ - índice de consistência do fluido

μ - viscosidade absoluta (kg/m.s ou mPa.s)

μ_{ap} - viscosidade aparente (kg/m.s ou mPa.s)

μ_{50c} - viscosidade de separação (kg/m.s ou mPa.s)

θ - ângulo entre o cone e a placa do viscosímetro

τ - tensão de cisalhamento (Pa)

τ_0 - tensão limite de escoamento (Pa)

τ_w - tensão de cisalhamento nas paredes do capilar (Pa)
