

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

Reologia e Reometria Aplicadas ao Estudo de Polpas Minerais

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luiz Inácio Lula da Silva

José Alencar Gomes da Silva

Vice-Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Sergio Machado Rezende

Ministro da Ciência e Tecnologia

Luiz Antonio Rodrigues Elias

Secretário-Executivo

Luiz Fernando Schettino

Subsecretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Adão Benvindo da Luz

Diretor do CETEM

Ronaldo Luiz Correa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

Zuleica Carmen Castilhos

Coordenadora de Planejamento, Acompanhamento e Avaliação

João Alves Sampaio

Coordenador de Processos Minerais

Antônio Rodrigues Campos

Coordenador de Apoio à Micro e Pequena Empresa

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais

José da Silva Pessanha

Coordenador de Administração

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

ISSN 1518-9155

ISBN 978-85-61121-26-6

SRMI - 11

Reologia e Reometria Aplicadas ao Estudo de Polpas Minerai

Christine Rabello Nascimento

Engenheira Química, D.Sc. em Ciência e Tecnologia de Polímeros pelo Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano da UFRJ.

CETEM/MCT

2008

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

Sílvia Cristina Alves França

Editora

Luiz Carlos Bertolino

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Adriano Caranassios (CETEM), Antonio Rodrigues Campos (CETEM), Francisco Wilson Holanda Vidal (CETEM), Jurgen Schnellrath (CETEM), Artur Pinto Chaves (USP), Benjamin Calvo Pérez (Universidade Politécnica de Madri), Carlos Adolpho Magalhães Baltar (UFPE), Marsis Cabral Junior (IPT), Renato Ceminelli (Consultor).

A Série Rochas e Minerais Industriais publica trabalhos na área minero-metalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

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

Thatyana Pimentel Rodrigo de Freitas

Coordenação Editorial

Vera Lúcia Espírito Santo Souza

Programação Visual

Christine Rabello Nascimento

Editoração Eletrônica

Nascimento, Christine Rabello.

Reologia e reometria aplicadas ao estudo de polpas minerais / Christine Rabello Nascimento. __ Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

53p. (Série Rochas e Minerais Industriais, 12)

1. Reologia. 2. Dinâmica do solo. 3. Polpa. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Título. III. Série

CDD – 531.11

SUMÁRIO

RESUMO	07
ABSTRACT	08
1 INTRODUÇÃO	09
2 TIPOS DE FLUIDOS	11
3 PROPRIEDADES REOLÓGICAS	16
4 REOMETRIA	22
5 ESTUDO DE CASOS	29
5.1 Reologia aplicada ao estudo de polpas contendo caulim	29
5.2 Reologia aplicada ao estudo de polpas contendo minerais diversos	35
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
BIBLIOGRAFIA	50

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o intuito de apresentar de forma sucinta alguns conceitos básicos de reologia e reometria, consistindo em um texto introdutório para pesquisadores e técnicos interessados em realizar estudos reológicos de polpas ou lamas minerais. De um modo geral, as propriedades reológicas mais importantes no processamento de suspensões minerais são a viscosidade e a tensão limite de escoamento. Estas propriedades tem impacto direto no projeto de equipamentos, na eficiência e no consumo energético de diversas operações industriais, tais como a moagem a úmido de minérios e o transporte de polpas por minerodutos. Na seção de estudo de casos estão relatados exemplos práticos da utilização das propriedades reológicas como parâmetros que auxiliam na caracterização de materiais ou na avaliação do desempenho de processos que envolvam suspensões minerais, podendo servir como base para que o leitor possa aplicar a análise reológica em estudos que sejam de seu interesse.

Palavras-chave

Reologia, polpa de minério, reometria.

ABSTRACT

The aim of this work is to present, in a brief approach, some basic concepts on rheology and rheometry, consisting of an introductory text for researchers and technicians interested in accomplishing rheological studies of mineral pulps, mud or slurries. In general, viscosity and yield stress are the most important rheological properties in mineral processing. These properties have direct impact in the equipments design, efficiency and energy consumption of several industrial operations, such as the ores grinding and their transportation by pipeline. In the section of cases study, were showed some practical examples for application of rheological properties, as parameters that aid in the materials characterization or in the mineral processing evaluation. Therefore, this report can be used as a baseline to the readers apply it for rheological analysis in their studies.

Keywords

Rheology, ore pulps, rheometry.

1 | INTRODUÇÃO

A reologia pode ser definida como a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria (Bretas e D'Avila, 2000; Makosco, 1994). Dentro de uma abordagem ampla, os materiais analisados podem estar no estado sólido, líquido ou gasoso, entretanto, também pode ocorrer que um dado material possua, simultaneamente, as características de um sólido e um líquido, sendo esta propriedade conhecida como viscoelasticidade. Como ciência, a reologia tem importância para o entendimento da relação estrutura/propriedade dos materiais, tendo em vista que a variação das propriedades reológicas está intimamente relacionada às mudanças na estrutura, caso sejam mantidas as condições de teste. Já na indústria, o conhecimento do comportamento reológico de matérias-primas e produtos é importante para o projeto de equipamentos e controle dos processos. O acompanhamento das propriedades reológicas também serve como ferramenta de controle de qualidade e para o desenvolvimento de novos produtos. Como esta série visa, especificamente, abordar a reologia de polpas, lamas ou lodos minerais, o enfoque dado a este trabalho será sobre o estudo reológico de suspensões aquosas.

Grande parte dos estudos reológicos é realizada através da aplicação ou medição da tensão de cisalhamento (τ), que é definida como a componente de tensão que atua na direção paralela a uma dada face do elemento de fluido. A deformação por cisalhamento (γ) possui a mesma direção de τ e ocorre, por exemplo, quando o fluido está entre duas placas paralelas e uma delas se movimenta em relação à outra [Figura 1]. Duas considerações são importantes para a aplicação deste modelo:

(i) ocorre a aderência da camada de fluido que está em contato direto com a placa;

(ii) o fluxo é laminar (ausência de turbulências).

No modelo ilustrado na Figura 1 está definida a expressão matemática da viscosidade dinâmica (η). Observa-se que a viscosidade não é uma grandeza que se possa medir diretamente - é uma grandeza calculada com base na relação entre tensão e taxa de cisalhamento e que, fisicamente, corresponde à resistência ao fluxo ocasionada pelo atrito interno desenvolvido pelo material em movimento.

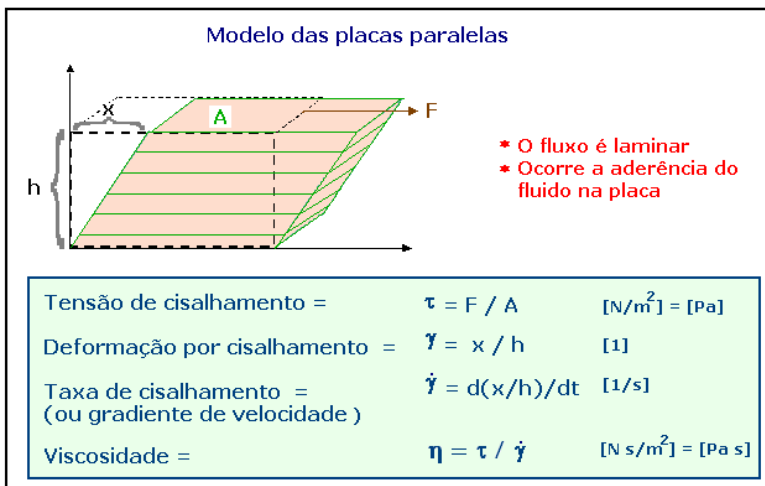


Figura 1. Modelo de escoamento laminar de um fluido interno a duas placas paralelas

2 | TIPOS DE FLUIDOS

Os fluidos podem ser caracterizados quanto ao seu comportamento reológico, sendo que os fluidos mais comuns são facilmente identificados pela análise do perfil das curvas de fluxo e/ou de viscosidade. Os principais tipos de fluidos estão relacionados na Figura 2.

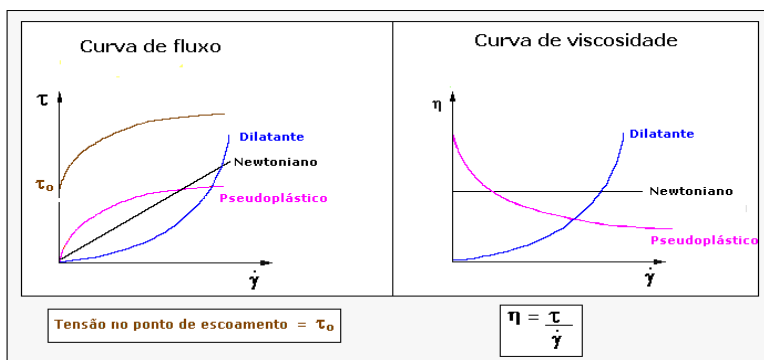


Figura 2. Curvas de fluxo e de viscosidade

O comportamento observado para cada tipo de fluido pode, muitas vezes, indicar mudanças estruturais ocasionadas pelo cisalhamento. Algumas definições e possíveis explicações para os comportamentos estão relacionadas a seguir:

(i) fluido Newtoniano - Neste tipo de fluido, a tensão de cisalhamento varia linearmente com a taxa de cisalhamento e, portanto, a viscosidade não varia com a taxa. Água e óleo mineral são exemplos de materiais com comportamento newtoniano.

(ii) fluido pseudoplástico - Observa-se a diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. Isto ocorre como consequência do estiramento de macromoléculas (no

caso de polímeros fundidos ou em solução), da deformação de gotículas (no caso de emulsões) ou, no caso de suspensões e dispersões, devido à orientação das partículas ou a destruição de agregados [Figura 3].

(iii) fluido dilatante - O comportamento dilatante consiste no aumento da viscosidade com a taxa de cisalhamento e é raramente encontrado. Este caso pode ocorrer em misturas de partículas em contato íntimo com uma quantidade de líquido suficiente somente para preencher os espaços entre as partículas. Em baixas velocidades de escoamento, a fricção interna na mistura é pequena, com o líquido agindo como lubrificante entre as partículas em movimento. Em velocidades mais elevadas, as partículas se separam e o líquido vai preenchendo o espaço entre elas, aumentando, desta maneira, a fricção interna, isto é, a viscosidade. A mistura de água e areia é um exemplo de fluido dilatante.

(iv) fluido com ponto de escoamento - É necessário que haja a aplicação de uma tensão inicial (τ_0) para que o material efetivamente escoe. Esta tensão indica a ocorrência de fortes interações entre os componentes do fluido. Um exemplo clássico deste tipo de fluido é o da pasta de dente.

Existem fluidos cuja relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento dependem do tempo – são os chamados “fluidos tempo-dependentes”. Esta dependência do tempo pode ser encontrada em materiais pseudoplásticos ou dilatantes, podendo ser visualizada quando a curva relativa ao aumento de $\dot{\gamma}$ não é coincidente com a curva de decréscimo de $\dot{\gamma}$ no gráfico de $\tau \times \dot{\gamma}$, formando a curva de histerese. Este comportamento é observado quando as mudanças estruturais não são tão rápidas – na realidade, todos os fluidos que apresentam fenômenos de formação ou destruição de estruturas

com a variação da taxa de cisalhamento são dependentes do tempo, pois o processo de mudança estrutural acontece num intervalo de tempo finito. Ocorre que a taxa de formação da estrutura durante o processo de desaceleração não é necessariamente igual à taxa com que a estrutura inicial é destruída durante o processo de aceleração. Contudo, se ambas as mudanças forem muito rápidas, as curvas referentes aos dois processos irão se sobrepor e a diferença entre elas não será observada.

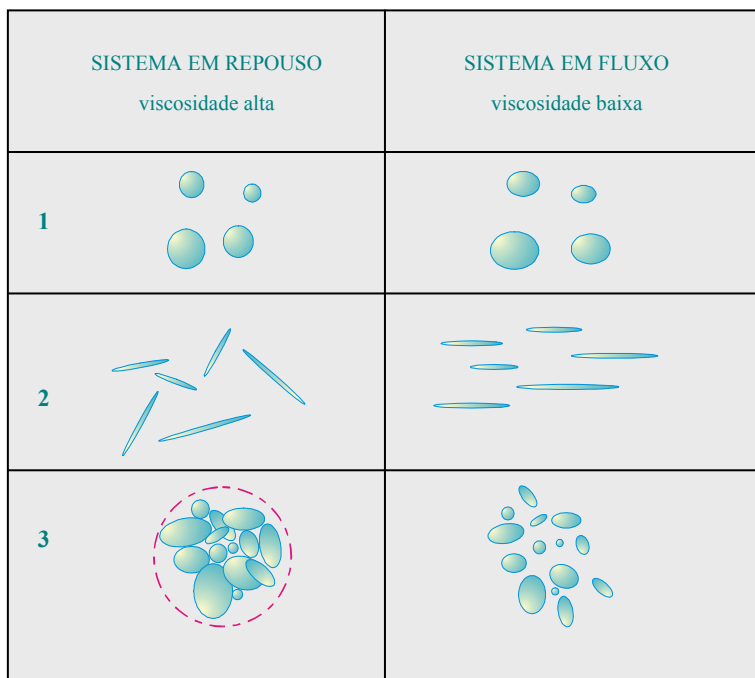


Figura 3. Esquema representativo da influência do fluxo na deformação de gotículas (1), orientação de partículas (2) e destruição de aglomerados (3) de sistemas bifásicos.

Dá-se o nome de tixotropia ao fenômeno observado quando o processo de recomposição da estrutura é mais lento que o processo de destruição da estrutura inicial. Já os materiais reopéticos, extremamente raros, apresentam o processo de recomposição da estrutura mais rápido do que o processo de destruição. Materiais tixotrópicos apresentam diminuição da viscosidade com o tempo quando submetidos a uma taxa de cisalhamento constante [Figura 4].

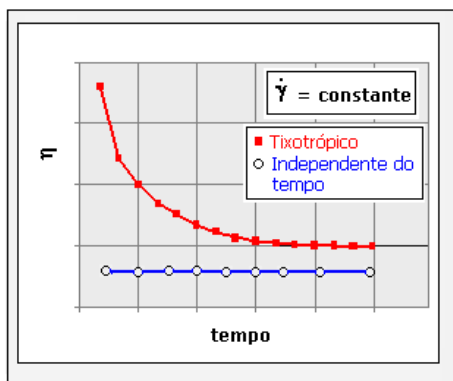


Figura 4. Curvas de viscosidade *versus* tempo a uma taxa de cisalhamento constante

A relação existente entre a tensão (τ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) do fluido é chamada equação reológica de estado ou equação constitutiva (Bretas e D'Avila, 2000). Alguns modelos matemáticos se ajustam razoavelmente bem às curvas obtidas experimentalmente para os diversos tipos de fluidos, conforme mostrado na Tabela 1. O modelo mais simples é o de Newton, que é expresso por uma função linear cujo coeficiente angular é a viscosidade (η). O comportamento dos fluidos pseudoplásticos e dilatantes pode ser descrito pelo modelo da lei das potências, onde a constante K é chamada de consistência e o

índice n é uma medida do grau de “pseudoplasticidade” do fluido. Os fluidos pseudoplásticos possuem valores de n inferiores a 1, enquanto que os fluidos dilatantes possuem $n > 1$. O valor de n pode ser calculado com base na inclinação da curva $\log \eta$ versus $\log \dot{\gamma}$. Os modelos de Bingham, Herschel – Bulkley e Casson levam em consideração um valor de tensão crítica ou tensão de escoamento (τ_0), que é o valor mínimo de tensão para que ocorra o escoamento do material. Abaixo deste valor de tensão, considera-se que o material possua viscosidade infinita (He, 2004 e Turian, 1998).

Tabela 1. Modelos matemáticos que descrevem o comportamento de fluidos diversos

Tipo de fluido	Modelo	Equação
Newtoniano	Newton	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Pseudoplástico	Lei das potências	$\tau = K_p \dot{\gamma}^{n_p}$
Dilatante	Lei das potências	$\tau = K_p \dot{\gamma}^{n_p}$
Bingham	Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$
Plástico	Herschel – Bulkley	$\tau = \tau_0 + K_h \dot{\gamma}^{n_h}$
Plástico	Casson	$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\eta \dot{\gamma})^{1/2}$
Plástico	Sisko	$\tau = \eta_p \dot{\gamma} + K_s \dot{\gamma}^{n_s}$

Onde τ_0 é a tensão de escoamento; n_p , n_h e n_s são os índices de potência e K_p , K_h e K_s são as consistências para os respectivos modelos

3 | PROPRIEDADES REOLÓGICAS

A viscosidade é uma das propriedades reológicas mais importantes e que pode sofrer variações devido a vários fatores. A viscosidade tende a diminuir com o aumento da temperatura e aumentar com o aumento da pressão, contudo, essa variação pode ser desprezível para alterações pequenas de temperatura e pressão. Também existem exceções para esta regra como, por exemplo, a presença de aditivos e a perda de água ou solvente durante a análise (no caso de aquecimento) podem inverter essa tendência. O tempo em que o material é cisalhado também pode influenciar no valor da viscosidade, se a amostra for tixotrópica. No caso das suspensões, a viscosidade é sensível à variação da concentração, ao tamanho e distribuição de tamanhos das partículas, a forma das partículas e a qualquer outro fator que modifique o nível de agregação das partículas, tais como a presença de sais, agentes dispersantes ou mudança de pH.

Alguns pesquisadores investigaram essas tendências. He e colaboradores (He, 2004) comentaram sobre os resultados de pesquisa de diversos pesquisadores que estudaram a influência da distribuição de tamanhos de partículas na viscosidade da suspensão. Nas pesquisas feitas com carvão e dióxido de titânio foi demonstrado que uma distribuição larga no tamanho de partículas leva a queda da viscosidade e da tensão no ponto de escoamento.

Garcia e colaboradores (2003) relataram que a viscosidade aumenta conforme o tamanho de partícula diminui e que a tensão no ponto de escoamento é proporcional ao número de contatos e a energia total entre as partículas. Segundo estes autores, numa dada concentração da fase dispersa, a diminuição de tamanho de partícula resulta na redução da distância

média de separação entre as partículas e, como consequência, num aumento das interações hidrodinâmicas e da viscosidade.

Zhou e colaboradores (2001) avaliaram extensivamente a influência de diversas variáveis nas propriedades reológicas de suspensões de óxidos metálicos e relataram que um dado sistema constituído por partículas tipo esferas sólidas apresenta viscosidade mínima se comparado com outros sistemas de mesma distribuição de tamanhos de partículas e fração volumétrica.

Em seu artigo, Bhattacharya (1998) também comenta sobre as características das partículas nas propriedades reológicas. Sobre a forma da partícula, este autor relata que existe um consenso geral de que a viscosidade aumenta conforme aumenta o desvio da esfericidade. Já sobre a influência que o tamanho de partícula tem sobre a tensão de escoamento, Bhattacharya encontrou discordâncias entre os autores pesquisados.

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

O perfil da curva de viscosidade pode variar de acordo com o tipo de agregado formado e o percentual de agregação, conforme mostrado nas Figuras 5, 6 e 7. Quando a forma de atração entre as partículas proporciona o tipo de agregado face a face, o agregado pode se comportar como uma partícula com esfericidade e tamanho maiores e, assim, a viscosidade tende a diminuir com o aumento do número de agregados, desde que a concentração não seja muito alta [Figura 5]. Conforme a con-

centração aumenta, o número e tamanho dos agregados crescem muito e começa a haver a oclusão da água presente na suspensão no interior desses mega agregados [Figura 6], levando ao aumento da viscosidade. O agregado do tipo face/extremidade (castelo de cartas) [Figura 7], originado da heterocoagulação, produz um impacto bem maior na viscosidade justamente por sua capacidade de oclusão de água ser bem maior (Sánchez-Muñoz e Castelló, 2003).

A viscoelasticidade é uma característica que alguns materiais possuem e que, resumidamente, significa ter um comportamento intermediário entre um sólido elástico e um fluido viscoso. Quando um material viscoelástico é deformado, parte dessa deformação desaparece (deformação elástica) e outra parte permanece (deformação plástica) depois de cessada a origem da deformação. Os materiais que possuem essas características pronunciadas são os polímeros, cujas cadeias longas tendem a formar emaranhados que “prendem” parcialmente a estrutura, e algumas suspensões com fortes interações entre as partículas [Figura 8]. As propriedades viscoelásticas servem para indicar a estabilidade de uma suspensão (quanto mais estável, maior é a característica elástica) e fornece informações sobre modificações estruturais ao longo do tempo, em função da temperatura, ocorrência de alguma reação química etc.

Em algumas aplicações, é desejável que a suspensão possua estabilidade quanto à sedimentação. Wollny (2001) relata em seu trabalho sobre a importância das propriedades viscoelásticas na previsão da sedimentação das partículas. Segundo o autor, o aumento da viscosidade garante apenas que o tempo para que a sedimentação ocorra será prolongado e que uma forma para prever a estabilidade da suspensão é pela determinação das propriedades viscoelásticas, mais especificamente,

a determinação dos módulos de perda (G'') e de armazenamento (G'). Sabe-se que quando a razão G''/G' , também conhecida como $\tan \delta$, for inferior a um, o caráter elástico da suspensão está predominando sobre o viscoso e, portanto, a suspensão é estável.

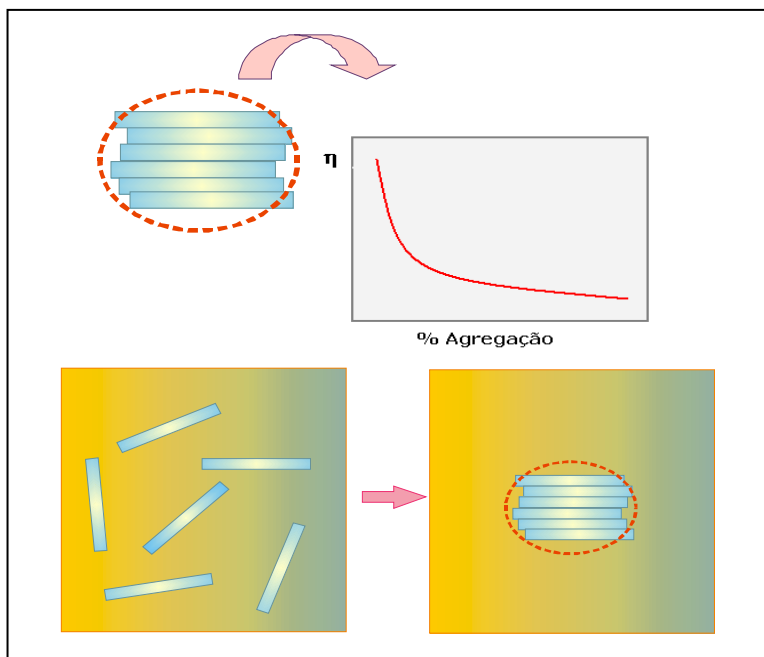


Figura 5. Desenho representativo do agregado tipo face a face e sua influência na viscosidade quando presente em baixa concentração.

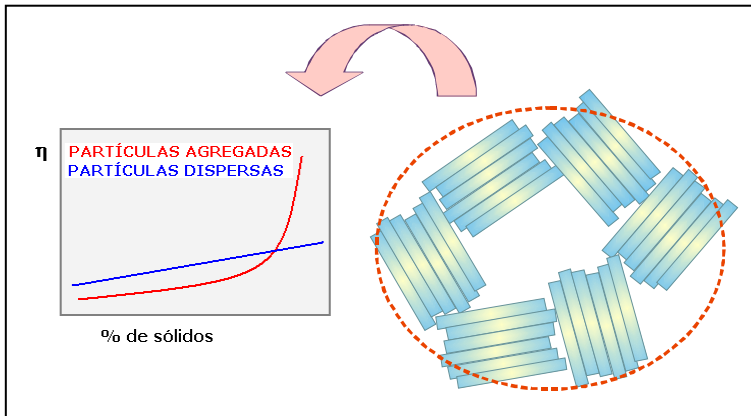


Figura 6. Desenho representativo do agregado tipo face a face e sua influência na viscosidade quando presente em alta concentração

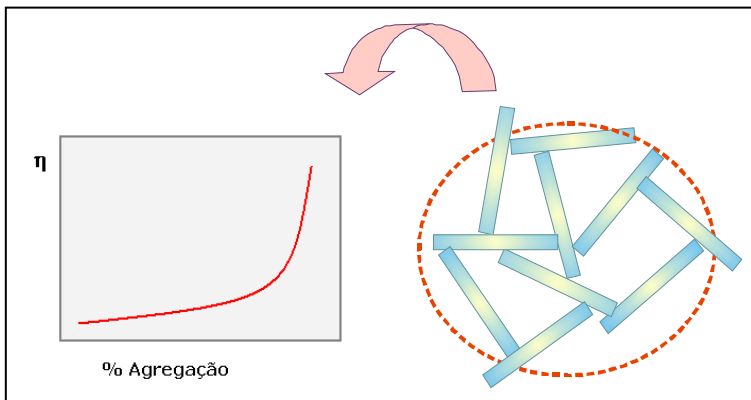


Figura 7. Desenho representativo do agregado tipo face/extremidade e sua influência na viscosidade

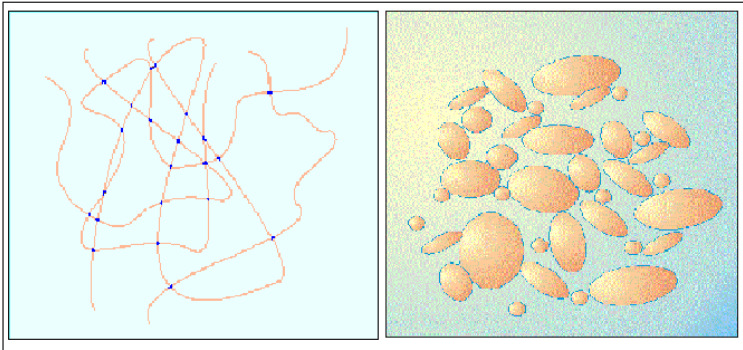


Figura 8. Desenho representativo de cadeias poliméricas emaranhadas e de partículas presentes numa suspensão

4 | REOMETRIA

Reometria é o termo utilizado para a descrição do conjunto de técnicas experimentais adotadas na determinação das propriedades reológicas. Os ensaios reológicos são realizados por meio de instrumentos conhecidos como viscosímetros e reômetros. Os reômetros podem ser considerados como uma evolução tecnológica dos viscosímetros, visto que possuem maior sensibilidade e recursos do que seus antecessores. Contudo, os viscosímetros ainda são largamente utilizados devido a seu baixo preço.

Reômetros com várias geometrias foram construídos no intuito de se determinar a viscosidade e demais propriedades reológicas dos materiais. Dentre eles, destacam-se os reômetros rotacionais e os reômetros capilares. Os princípios adotados nas análises feitas nesses reômetros são os mesmos assumidos na descrição do modelo de placas paralelas, mudando apenas as equações devido às alterações dos parâmetros geométricos do equipamento e das grandezas medidas [Figura 9].

Os reômetros rotacionais possuem várias geometrias do elemento sensor que fica em contato direto com a amostra, sendo que a escolha deste elemento está atrelada às características físicas das amostras e condições de análise. Por exemplo, o reômetro do tipo cilindros coaxiais é adequado para amostras com baixa viscosidade, tais como suspensões e soluções enquanto que os reômetros do tipo cone e placa ou placas paralelas [Figura 10] é mais utilizado para pastas viscosas e polímeros fundidos. Além disso, cada tipo de sensor possui várias opções para as dimensões de seus elementos, que também devem ser escolhidos de forma apropriada. Exemplificando: se a intenção for investigar o comportamento reológico de uma polpa em altas taxas de cisalhamento, deve-se escolher um

sensor do tipo cilindros coaxiais com a menor distância possível entre o cilindro externo e interno. Assim, podem ser obtidas altas taxas com um pequeno valor de torque – na Figura 1 pode ser observado que, conforme a distância h diminui, $\dot{\gamma}$ aumenta, pois são inversamente proporcionais.

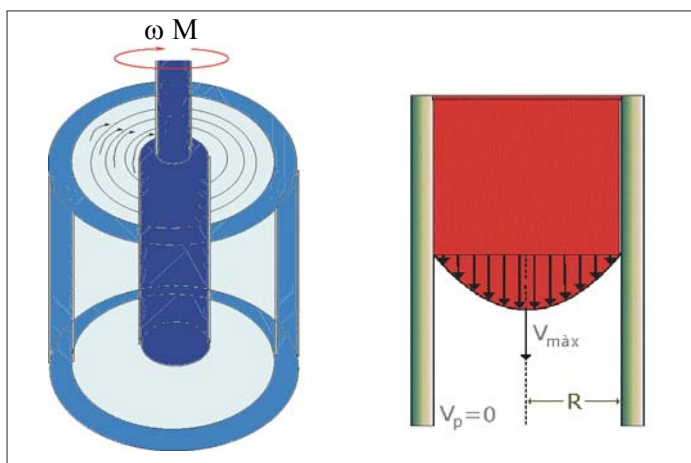


Figura 9. Fluxo laminar no interior de um reômetro rotacional tipo cilindros concêntricos e de um reômetro capilar. ω é a velocidade angular, M é o torque, V_p é a velocidade do fluido na parede do capilar, $V_{m\acute{a}x}$ é a velocidade do fluido no centro do capilar e R é o raio do capilar

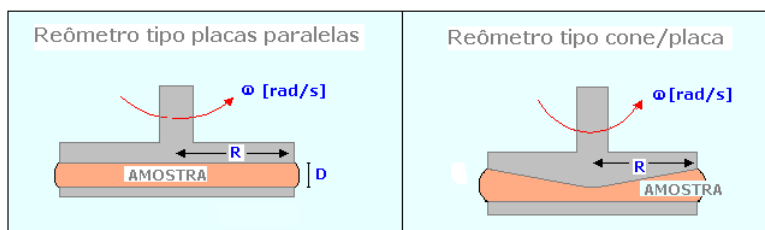


Figura 10. Reômetros rotacionais tipo placas paralelas e cone/placa

As grandezas medidas ou controladas durante um ensaio reológico em cisalhamento simples num reômetro rotacional são o torque e a velocidade de rotação, podendo ainda ser medido o tempo de resposta (defasagem) entre uma determinada perturbação e a reação do material, no caso de um ensaio dinâmico. O valor de tensão de cisalhamento é obtido através de uma relação com o torque, relação esta que depende dos parâmetros geométricos do sensor. Por analogia, a taxa de cisalhamento é obtida por uma relação com a velocidade de rotação.

Os reômetros capilares são adequados para ensaios realizados em taxas de cisalhamento superiores a 10 s^{-1} . Nesse reômetro, o fluxo é parcialmente controlável (longe da entrada do capilar), ou seja, as linhas de fluxo são paralelas ao eixo do capilar mas o perfil de velocidades depende da natureza do fluido (Bretas e D'Avila, 2000). As grandezas medidas num reômetro capilar são a vazão (Q) e a diferença de pressão (ΔP), que estão relacionadas com a taxa e a tensão de cisalhamento, conforme apresentado na Figura 11. A expressão para o cálculo da viscosidade (η), mostrada na Figura 11, pode ser aplicada diretamente para fluidos Newtonianos. Para fluidos não Newtonianos é necessário que seja feita a correção de Rabinowitch para a taxa de cisalhamento na parede do capilar, usando o seguinte procedimento:

(i) a partir de alguns pontos experimentais, que podem ser obtidos variando-se a vazão, por exemplo, constrói-se um gráfico de $\log \tau_w$ versus $\log \dot{\gamma}_w$.

(ii) se a curva obtida for uma reta, a inclinação n (índice da lei das potências) deverá ser calculada. No caso em que n é igual a 1, o fluido é Newtoniano e não há necessidade de fazer a correção. Se n for maior ou menor que 1, a correção deve ser feita mediante a aplicação das Equações 1 ou 2.

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\pi R^3} \quad [1]$$

$$\dot{\gamma}_{w \text{ corr}} = \frac{4Q}{\pi R^3} \frac{3+b}{4} \quad [2]$$

Onde:

$$b = \frac{d \ln \frac{4Q}{\pi R^3}}{d \ln \frac{\Delta P R}{2L}}$$

(iii) se a curva obtida não for uma reta, então n é função de $\dot{\gamma}_w$ e a correção é feita pela Equação 2.

Um outro fator que pode ocasionar em erro nas medidas feitas no reômetro capilar é o efeito de entrada do capilar. Este efeito se refere a instabilidades no fluxo que ocorrem na entrada do capilar e que ocasionam numa queda de pressão nessa região. Para corrigir essa diferença de pressão, deve-se calcular o comprimento que o capilar teria para que fosse obtido o fluxo completamente desenvolvido, comprimento este definido como $L + eR$. Aplicando-se a Equação 3, é obtido o valor corrigido da tensão de cisalhamento na parede do capilar ($\tau_{w \text{ corr}}$).

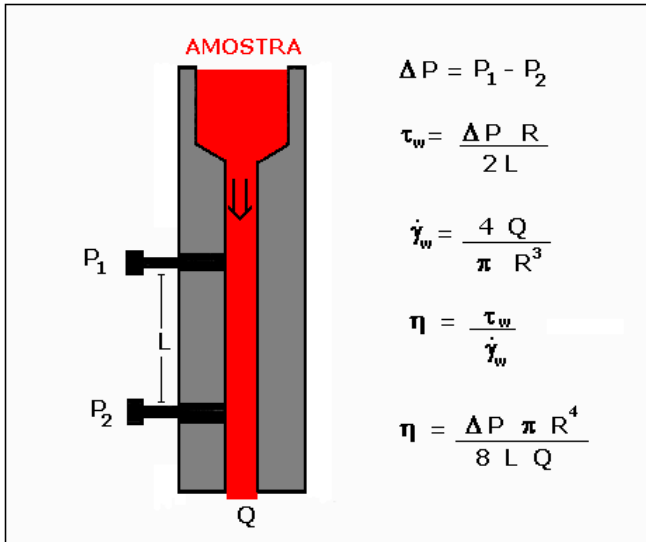


Figura 11. Desenho representativo do funcionamento de um reômetro capilar. Onde ΔP é a diferença de pressão entre os pontos 1 e 2, R é o raio do capilar, L é o comprimento do capilar entre os pontos 1 e 2, Q é a vazão volumétrica, η é a viscosidade e τ_w e $\dot{\gamma}_w$ são a tensão e taxa de cisalhamento na parede do capilar, respectivamente

$$\tau_{w \text{ corr}} = \frac{\Delta P \cdot R}{2(L + e \cdot R)} \quad [3]$$

O valor de e é determinado graficamente, construindo-se o gráfico ΔP versus L / R , utilizando capilares com mesmo diâmetro e comprimentos diferentes e a mesma vazão Q . As retas obtidas devem ser extrapoladas para $\Delta P = 0$ e e é obtido como a distância entre o ponto de interseção das retas com o eixo das abscissas e o eixo das ordenadas [Figura 12]. Existem muitos

casos em que e é desprezível e, na prática, esta correção só deve ser aplicada quando a razão L/R for inferior a 10.

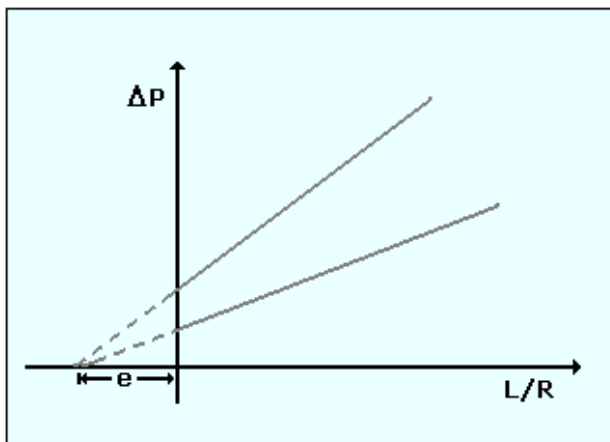


Figura 12. Determinação gráfica de e .

Em seu artigo, He (2004) comenta sobre o uso de cada tipo de reômetro e as dificuldades experimentais quando se trabalha com lamas minerais. No caso do reômetro tipo cilindros coaxiais, He cita que a possibilidade de ocorrer sedimentação durante a análise consiste num sério problema, podendo ser contornado pelo uso de adaptações em que a polpa é recirculada durante o teste.

De acordo com a informação desejada, as medidas reológicas podem ser feitas em regime oscilatório ou dinâmico. Neste caso, a deformação de cisalhamento $\gamma(t)$ varia com o tempo de forma senoidal, com amplitude e frequência determinadas. Se medirmos a tensão de cisalhamento $\tau(t)$, verificaremos que esta oscilará com a mesma frequência, mas terá um tempo de defasagem δ em relação à deformação. A razão $\tau(t) / \gamma(t)$ é definida como o módulo complexo em cisalhamento G^* , que

pode ser desmembrado em duas componentes: o módulo de armazenamento em cisalhamento G' e o módulo de perda em cisalhamento G'' [Figura 13]. Os ensaios dinâmicos são especialmente úteis na avaliação da estabilidade de suspensões, já que é conhecido que valores de $\tan \delta$ inferiores a um indicam que a suspensão não possui tendência à sedimentação (Laxton e Berg, 2005).

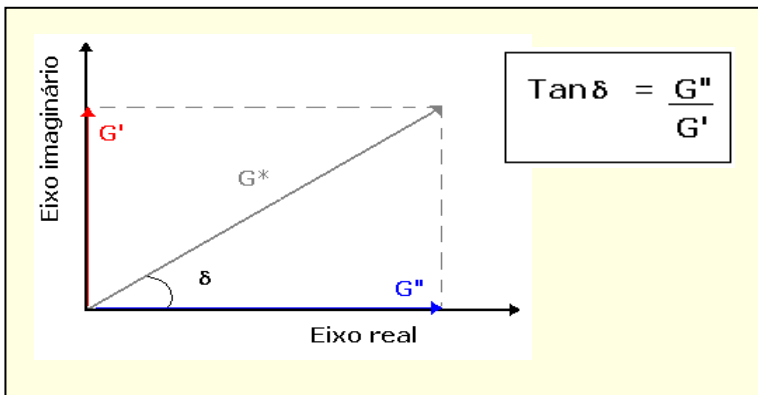


Figura 13. Relação entre o módulo complexo G^* e seus componentes

5 | ESTUDO DE CASOS*

5.1 | Reologia aplicada ao estudo de polpas contendo caulim

I - Marco e colaboradores (2004) pesquisaram o efeito da adição de polieletrólitos, tais como poli(acrilato de sódio) e copolímeros diversos, no comportamento reológico de suspensões de caulim, objetivando avaliar o potencial desses aditivos como agentes dispersantes. Esses componentes proporcionam homogeneidade às dispersões aplicadas na manufatura de materiais cerâmicos, possibilitando que a dispersão possua baixa viscosidade mesmo quando um alto teor de sólidos é adicionado. O efeito de dispersão é obtido devido à adsorção do polieletrólito na interface sólido/líquido, o que infere a repulsão entre as partículas. Esta repulsão pode ocorrer por efeito de barreira estérica e/ou elétrica. Sabe-se que a eficácia do polímero está relacionada com a sua conformação em solução, pois esta influencia no efeito estérico de repulsão. A presença de grupos hidrofílicos na cadeia polimérica, com o conseqüente envolvimento intenso destes grupos por moléculas de água, torna a macromolécula um obstáculo para que as partículas de caulim se aproximem a distâncias nas quais as forças atrativas de van der Waals sejam efetivas.

Segundo os autores, as propriedades reológicas podem ser relacionadas ao efeito dos polieletrólitos nas suspensões. Seu estudo abrangeu dados reológicos determinados no estado de equilíbrio, aspectos cinéticos e efeitos de elasticidade estrutu-

* Nesta seção foram mantidas as notações adotadas pelos autores em cada uma das publicações relatadas.

ral. As propriedades e parâmetros determinados foram os seguintes:

(i) Índice de consistência (k) e índice de comportamento de fluxo (n), obtidos no estado de equilíbrio, utilizando a Equação da lei das potências [Equação 4].

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad [4]$$

Onde:

η é a viscosidade

$\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento

k é o índice de consistência

n é o índice de comportamento de fluxo

(ii) Viscosidade em taxa de cisalhamento igual a zero (η_0).

(iii) Parâmetro tixotrópico de tempo (tt) e módulo elástico (G), considerando o modelo de Maxwell de viscoelasticidade.

Feita a comparação entre esses parâmetros, foi possível avaliar o efeito dos diversos polieletrólitos e concluir que aqueles que continham grupos funcionais derivados de ácidos fortes - copolímeros derivados do poli(acrilato de sódio) com grupos sulfonatos - foram os agentes dispersantes mais efetivos. Em resumo, o polieletrólito considerado mais eficaz é aquele que, em baixa concentração, proporciona uma redução mais significativa na viscosidade da suspensão e na tixotropia.

II - Andreola e colaboradores (2004) verificaram o efeito da adição do hexametáfosfato de sódio (NaHMP) em duas amostras de caulim com diferentes graus de pureza. O NaHMP é um agente dispersante amplamente utilizado, cuja ação sobre as

partículas de caulim pode ser explicada por meio de vários mecanismos, como, por exemplo, sua adsorção aos sítios positivos presentes nas bordas das partículas de caulim. Com essa adsorção, ocorre uma mudança na densidade de carga superficial, deixando o potencial eletrocinético do caulim mais negativo, o que favorece a repulsão entre as partículas. A capacidade de complexação de íons que tem ação floculante sobre o caulim, como os íons Ca^{++} , seria um outro mecanismo citado na literatura.

Foi observado que, conforme aumentou a concentração de NaHMP adicionado, a viscosidade aparente diminuiu até um valor mínimo a partir do qual seguiu-se um aumento. A concentração relativa ao ponto de mínimo é a concentração ótima, na qual o máximo efeito dispersante é obtido. Apesar das amostras possuírem valores similares de área superficial específica, foi observado que a amostra mais impura necessitou de uma quantidade bem mais elevada de dispersante para atingir o valor de viscosidade mínima. Considera-se que o ponto de viscosidade mínima corresponde à quantidade máxima de NaHMP adsorvida e que, a partir desta quantidade, ocorre a remoção progressiva do alumínio presente nos planos octaédricos da caulinita. Com a solubilização do alumínio, ocorre a redução dos sítios ativos para a adsorção, restringindo o efeito do dispersante.

Deste trabalho, foi concluído que a presença de impurezas minerais, mesmo em pequena quantidade, afeta consideravelmente o comportamento reológico do caulim visto que essas substâncias podem reagir com o dispersante. A introdução do dispersante causa a modificação superficial da partícula e a solubilização de íons que, quando presentes na estrutura da partícula, são capazes de interagir com o próprio dispersante.

III - O efeito da adição do ligante carboximetil-celulose (CMC) no comportamento reológico de suspensões de caulim foi investigado por Conceição e colaboradores (2003), objetivando também explicitar a influência do modo de preparo da suspensão e do peso molecular da CMC. O preparo das suspensões foi realizado de duas maneiras:

(i) Pela adição do caulim seco à água já contendo agente dispersante, de modo a obter suspensões com concentrações na faixa de 20 – 45% (vol.). Em seguida foram executadas as etapas de mistura, moagem em moinho de bolas e de-aeração.

(ii) Pela diluição da amostra mais concentrada (45%), obtida no final do processo descrito no item (i), de modo a obter amostras dentro da mesma faixa de concentração.

A estas suspensões foram adicionados dois tipos de CMC com pesos moleculares distintos. As suspensões foram submetidas aos testes reológicos, executados na faixa de taxa de cisalhamento de $0,1 - 1.300 \text{ s}^{-1}$, e a densidade do material foi determinada após procedimentos de moldagem e secagem.

Foi observado que as amostras obtidas por diluição (modo de preparo (ii)) apresentaram valores de viscosidade inferiores, indicando uma melhor dispersão destas amostras e um provável ganho de eficiência na etapa de delaminação (moagem) devido à alta concentração da suspensão mãe (45%). Um maior teor de sólidos facilitaria a destruição dos aglomerados durante a moagem ao passo que para as amostras preparadas numa concentração menor o efeito cisalhante não seria tão intenso. Assim, uma amostra diluída após o processo de moagem conteria menos aglomerados do que uma amostra em que a mesma quantidade de água fosse adicionada antes da moagem.

A adição de CMC aumentou o caráter pseudoplástico da suspensão, observado em baixas taxas de cisalhamento. A viscosidade da suspensão tende a aumentar com o aumento do peso molecular da CMC.

IV - A interação entre dois tipos de carboximetil-celulose de sódio (NaCMC), com graus de substituição** distintos, e amostras de suspensões de caulim foi estudada por Husband (1998). A adsorção de NaCMC foi menor quando a amostra de suspensão continha agente dispersante (o poli(acrilato de sódio)), evidenciando que os dois aditivos competem pelos mesmos sítios ativos do caulim. Foi constatado o comportamento pseudoplástico das suspensões contendo NaCMC por meio das curvas de viscosidade *versus* quantidade de NaCMC, utilizando testes com várias taxas de cisalhamento. Pela determinação das propriedades viscoelásticas, obtidas por métodos dinâmicos, foi possível observar que o aumento do grau de substituição da NaCMC promoveu um aumento considerável do módulo elástico da suspensão. Contudo, os testes de adsorção comprovaram que houve uma redução drástica da quantidade da NaCMC adsorvida no caulim conforme aumentou o grau de substituição. A origem da elasticidade tem sido freqüentemente atribuída à formação de uma rede entre o polímero que está adsorvido e o que está em solução, todavia, a adsorção desprezível da NaCMC nas partículas de caulim faz com que este mecanismo seja inconsistente com os resultados experimentais. O autor sugere que os efeitos reológicos observados fo-

** A carboximetil-celulose de sódio é obtida pela reação da celulose com sal de sódio e ácido monocloroacético, levando a substituição dos grupos $-CH_2OH$ por grupos $-CH_2OCH_2COO^- Na^+$. O grau de substituição refere-se ao número de substituições que ocorre, em média, na estrutura de repetição da celulose.

ram causados por um processo de floculação por depleção ocasionado pela adição da NaCMC.

V - A adsorção de espécies oligoméricas contendo alumínio é capaz de alterar as propriedades reológicas das suspensões, causando uma redução da viscosidade. Normalmente, a estabilização das suspensões de caulim é feita pela adição do agente dispersante em meio ácido ou básico, dependendo do tipo de agente. Em ambos os casos, a carga presente na borda das partículas de caulim é revertida, ocasionando num aumento da repulsão entre bordas ou entre borda e face e desfazendo a estrutura tipo “castelo de cartas”, responsável pela alta viscosidade das suspensões concentradas. Garrido e colaboradores (1997) estudaram o comportamento das suspensões de caulinita em função do pH, da quantidade do íon de Keggin de alumínio (Al_{13}) adicionada e da adsorção do agente dispersante hexametáfosfato de sódio (HMP), adicionado posteriormente. Esse estudo abrangeu a determinação do ponto isoelétrico, da quantidade de material sedimentado, da distribuição de volume de poro, das curvas de fluxo e das isotermas de adsorção dos íons $PO_4H_2^-$.

As curvas de fluxo foram determinadas para amostras de suspensões de caulim (50% p/p), feitas a partir do caulim original e do caulim tratado com Al_{13} em diferentes pHs (Al – K). Antes do teste reológico, foi adicionada a mesma quantidade de HMP a cada amostra. Foi observado um comportamento ligeiramente dilatante para as amostras com uma quantidade de alumínio inferior a $53 \mu\text{mol g}^{-1}$. Para a concentração de $74 \mu\text{mol Al g}^{-1}$, um perfil mais complexo da curva de viscosidade, com faixas de comportamento pseudoplástico e dilatante, foi observado.

5.2 | Reologia aplicada ao estudo de polpas contendo minerais diversos

5.2.1 | Estudos com ênfase na caracterização estrutural

I - Olhero e Ferreira (2004) utilizaram testes reológicos, nos quais a taxa de cisalhamento variou na faixa de $0,1$ a 550 s^{-1} , para estudar a influência da distribuição granulométrica e o empacotamento das partículas em materiais cerâmicos, confeccionados com o auxílio de suspensões de sílica. Basicamente, foram analisadas as curvas de fluxo e observados os comportamentos pseudoplástico e dilatante das suspensões. Comparando as medidas de densidade dos corpos de prova moldados com os valores de viscosidade das suspensões, foi verificado que o empacotamento das partículas é favorecido quando a suspensão possui baixa viscosidade. A homogeneidade no empacotamento das partículas é um fator decisivo para as propriedades finais do material cerâmico.

II - A química interfacial de dispersões de talco foi investigada por Bremmell e Addai-Mensah (2005), que se basearam nos resultados de medidas reológicas e eletrocinéticas para a realização deste trabalho. Particularmente, a determinação da tensão no ponto de escoamento de suspensões com diversos valores de pH e concentrações foi útil para levantar informações sobre a interação entre as partículas. O talco é um silicato de magnésio ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) freqüentemente utilizado na composição de tintas, lubrificantes, plásticos, cosméticos, produtos farmacêuticos e cerâmicas. As partículas de talco consistem de finas camadas cuja superfície da face principal contém menos que 90% de grupos hidroxila ou íons ativos, conferindo ao talco um caráter inerte e hidrofóbico. Já as bordas das

partículas possuem caráter hidrofílico devido à presença de grupos $-\text{SiOH}$ e $-\text{MgOH}$. Na indústria de um modo geral, as finas partículas de talco costumam gerar dificuldades durante seu manuseio e, especificamente na indústria de processamento de minérios, o talco pode estar presente de forma significativa nos rejeitos a serem descartados. Quando o talco é disperso em meio aquoso, o entendimento e a manipulação da interação entre as partículas faz-se necessário para o controle da estabilidade da suspensão e do comportamento de fluxo. Sabe-se que a dissolução do talco depende do pH, que tem sua solubilidade aumentada conforme aumenta a concentração dos íons H^+ [Reação 1].

Reação 1



Sabe-se, ainda, que a presença de íons metálicos hidrolisáveis, como o Mg^{2+} , pode influenciar nas propriedades da suspensão coloidal. A hidrólise do íon também é função do pH e a adsorção do íon hidrolisado sobre a partícula de talco pode facilitar a agregação e sedimentação do material.

De acordo com os resultados do estudo reológico, foi observado que a tensão no ponto de escoamento independe do pH no caso de suspensões com baixo teor de sólidos pois as partículas não estão próximas o bastante para que a interação seja “observável” por essa técnica. Em concentrações superiores a 40% em peso, já é possível verificar que o aumento da tensão no ponto de escoamento é máximo em pH 10, no caso em que o pH diminuiu de 11,5 a 5,5. Este foi justamente o valor de pH em que o potencial Zeta das partículas está próximo de zero. Quando o experimento foi repetido variando, desta vez, o pH

de 5,5 a 11,5, verificou-se que o maior valor de tensão no ponto de escoamento foi obtido para a suspensão contendo 45% de sólidos no pH de 11,5. Esses resultados comprovam que a maneira pela qual se varia o pH (aumentando ou diminuindo) tem influência na interação entre as partículas, provavelmente devido a diferença na concentração das espécies iônicas obtidas no meio – enquanto a obtenção do íon Mg^{2+} é relevante em pHs baixos, o produto da sua hidrólise ($Mg(OH)^+$) ocorre predominantemente em pHs maiores que 9.

III - No trabalho de Sakairi e colaboradores (2005) foi comprovada a relação entre a tensão no ponto de escoamento com a fração volumétrica e a força iônica de suspensões de montmorilonita sódica. O interesse nesse estudo advém do fato das suspensões de argila serem utilizadas no processo de perfuração de poços de petróleo e como meio de adsorção de contaminantes, daí a importância de se compreender as propriedades macroscópicas da suspensão em termos das interações microscópicas entre as partículas.

As medidas da tensão de escoamento (τ_y) foram realizadas utilizando um rotor tipo *vane*, o qual foi inserido na suspensão após esta ser agitada para que fossem eliminados os efeitos da tixotropia. Utilizando os resultados experimentais de τ_y , foram construídos os gráficos de τ_y versus fração volumétrica para as suspensões com diversos valores de força iônica. Comparando os resultados experimentais com as curvas teóricas, obtidas pela Equação 5, os autores constataram a necessidade da introdução de um fator de correção cuja interpretação será objeto de um estudo posterior.

$$\tau_y = 64 n_0 k T \gamma_0^2 \exp \left[-k \delta \left(\frac{1}{\phi} - 1 \right) \right] \quad [5]$$

Onde:

τ_y é a tensão no ponto de escoamento

n_0 é a concentração numérica de íons

K é a constante de Boltzmann

T é a temperatura absoluta

\mathcal{I}_0 é uma função do potencial de superfície

k é o inverso do comprimento de Debye

δ é a espessura da camada de argila

ϕ é a fração volumétrica da argila

IV - Suspensões elaboradas com materiais diversos, tais como caulim, dióxido de titânio e a mistura de sílica com dióxido de titânio, foram investigadas por Uhlherr e colaboradores (2005) com relação à transição sólido-líquido induzida por cisalhamento. Os pesquisadores utilizaram os testes de variação de tensão de cisalhamento (em rampa e em degraus) e de fluência e recuperação em sua pesquisa. Nas curvas de tensão de cisalhamento *versus* deformação foi observada a existência de um platô de tensão que separa as regiões que representam o comportamento sólido e líquido. O platô de tensão representa o processo de quebra da maioria das ligações e a inclinação deste platô está relacionada à uniformidade da estrutura do material. Se o platô ocorre numa faixa estreita de tensões, isto implica que a força das ligações está uniformemente distribuída na rede. Na investigação de suspensões de dióxido de titânio com diferentes pHs, foi verificado que a suspensão que apresentou o maior valor de tensão no ponto de escoamento era aquela cujo pH estava bem próximo ao do ponto isoelétrico, determinado pelas medidas eletrocinéticas.

V - Rossi e colaboradores (2003) estudaram as propriedades reológicas de suspensões de montmorilonita sódica na pre-

sença de polímeros não iônicos. As propriedades viscoelásticas das suspensões foram determinadas por métodos oscilatórios e as curvas de fluxo foram ajustadas usando o modelo de Herschel Bulkley. Foram determinados os módulos de armazenamento e de perda (G' e G'') e a tensão no ponto de escoamento (τ_0) para suspensões de montmorilonita com diversas quantidades de polímeros adicionadas. Sabe-se que suspensões dessa argila com concentração acima de 4% são predominantemente elásticas devido à formação de uma estrutura tipo rede estabelecida entre as partículas. Foi observado que a estabilidade da suspensão aumentou com o aumento da adsorção do polímero na argila.

5.2.2 | Estudos com ênfase no desenvolvimento e otimização de processos

I - O comportamento reológico de suspensões concentradas de calcita foi investigado por Garcia e colaboradores (2003) com o intuito de se estudar o efeito da concentração volumétrica e do uso de poli(acrilato de sódio) durante o processo de moagem a úmido desse material. Sabe-se que durante o processo de moagem ocorre a geração de partículas muito finas que tendem a formar agregados e aumentar a viscosidade do meio. O uso de um agente dispersante ajuda a prevenir a agregação e assegura a boa dispersão das partículas finas.

Pelas curvas de fluxo e de viscosidade, os pesquisadores puderam observar que as suspensões de calcita tinham comportamento pseudoplástico com tensão no ponto de escoamento (τ_0). As suspensões com fração volumétrica de 14% que foram moídas por mais de 1,5 min apresentaram aumento da viscosidade aparente com o aumento do tempo de moagem, indi-

cando a influência das partículas finas. O modelo de Herschel Bulkley foi utilizado para a determinação de τ_0 . O valor de τ_0 é proporcional ao número de contatos entre as partículas e a energia total das interações entre as partículas. Para uma dada concentração, τ_0 aumenta lentamente no princípio da moagem, quando o processo de fragmentação das partículas predomina. Em seguida, conforme aumenta o tempo de moagem, ocorre um aumento expressivo de τ_0 já que processo de agregação de finos começa a ganhar importância.

Com a aplicação do agente dispersante poli(acrilato de sódio) numa concentração de 1% foi possível reduzir a viscosidade aparente e, conseqüentemente, aumentar a eficiência da moagem.

II - A floculação e o desaguamento de suspensões de hematita foram estudados por Hulston e colaboradores (2004), com o objetivo de avaliar o efeito da temperatura nestes processos. Para tanto, foram determinadas a taxa inicial de sedimentação, a turbidez do sobrenadante, a altura de equilíbrio do leito e as tensões no ponto de escoamento nos modos de compressão e de cisalhamento.

Operações de separação sólido-líquido a altas temperaturas tem importância em muitos processos industriais como, por exemplo, no processo Bayer para a obtenção de alumina. Nesse processo, ocorre o espessamento e lavagem da lama vermelha residual e a temperatura nesta operação decresce numa faixa de 110 a 35°C. Daí a relevância deste trabalho, que buscou reproduzir os processos de desaguamento e floculação da lama vermelha por meio de um sistema modelo composto de partículas de óxido de ferro (90% de hematita), poli(acrilato de sódio-co-acrilamida) (floculante), hidróxido de sódio, nitrato de sódio e carbonato de sódio.

Dentre os parâmetros utilizados nesse estudo, está o parâmetro reológico denominado tensão no ponto de escoamento, a qual pode ser definida como a tensão mínima requerida para que a suspensão flua, sendo um indicativo da força da interação entre as partículas. Um aumento na tensão no ponto de escoamento significa que aumentou a resistência da rede formada pelas partículas, ou seja, a força de repulsão entre as partículas diminuiu, o que facilita a agregação necessária ao processo de sedimentação.

Como conclusões deste trabalho tem-se que o aumento da temperatura acarretou em um significativo aumento da taxa de sedimentação, entretanto, houve pouca influência na turbidez do sobrenadante das suspensões não tratadas com floculante. Por outro lado, a turbidez do sobrenadante das suspensões floculadas foi reduzida conforme aumentou a temperatura. Este efeito, em parte, foi atribuído à redução da viscosidade do meio, que promove o aumento da velocidade de sedimentação das partículas. O aumento da temperatura também levou a um aumento da altura de equilíbrio do leito e das tensões no ponto de escoamento nos modos de compressão e de cisalhamento. Uma possível explicação para esses resultados seria o aumento das forças atrativas de van de Waals e/ou a redução da dupla camada elétrica.

III - Segundo Vlasak e Chara (1999), o transporte via minerodutos de suspensões minerais com alto teor de sólidos traz inúmeras vantagens, dentre elas a possibilidade do processamento direto do material, com a eliminação de uma etapa de desaguamento. Por outro lado, o transporte hidráulico requer altas pressões operacionais e o investimento em bombas e equipamentos de controle de boa qualidade. Além disso, o conhecimento em profundidade sobre o comportamento de fluxo se faz necessário.

Os pesquisadores utilizaram em seu estudo um sistema fechado de tubulação no qual a polpa investigada é recirculada. Esse sistema, conhecido como *loop*, era constituído por tubos de aço com diâmetro interno distintos, uma bomba espiral com regulador de velocidade e tanque de armazenamento de polpa com sistema de agitação. O *loop* também dispunha de sistemas que permitiam a medição da pressão e da vazão, que são as grandezas utilizadas no estudo reológico. Foram investigadas as polpas de caulim e de resíduo de gesso.

Os parâmetros reológicos tensão no ponto de escoamento (τ_y), índice de consistência (k) e índice de comportamento de fluxo (n) foram determinados, sendo assumida a consideração de que o comportamento de fluxo da polpa pode ser descrito por modelos reológicos de regime laminar. O modelo utilizado [Equação 6] é aplicável a materiais pseudoplásticos que possuem tensão no ponto de escoamento. Desenvolvendo a Equação 6, de modo a que a expressão fique apropriada para ser aplicada num sistema tipo *loop*, chega-se a Equação 7. Para aplicar esta equação, os parâmetros V e τ_w são determinados experimentalmente, D é conhecido e K , n e τ_y são calculados.

$$\tau = \tau_y + k \left[-\frac{du}{dr} \right]^n \quad [6]$$

$$V = \left(1/k\right)^{1/n} \cdot \frac{D}{2\tau_w^3} \cdot (\tau_w - \tau_y)^{n+1/n} \times \left[\frac{(\tau_w - \tau_y)^2}{1 + 3n} + \frac{2\tau_y(\tau_w - \tau_y)}{1 + 2n} + \frac{\tau_y^2}{1 + n} \right] \quad [7]$$

Onde:

τ , τ_y e τ_w é a tensão de cisalhamento, tensão no ponto de escoamento e tensão na parede do tubo, respectivamente.

K é a consistência do fluido

n é o índice de comportamento do fluido

u é a velocidade local

r é a coordenada cilíndrica

V é a velocidade média

D é o diâmetro do tubo

Nos experimentos em que foi estabelecido o regime de fluxo turbulento, os modelos de Wilson e Thomas e de Slatter foram aplicados, sendo comprovada a utilidade de ambos modelos na previsão do comportamento de fluxo das polpas de caulim.

Na discussão dos resultados sobre os experimentos em fluxo turbulento, os pesquisadores buscaram explicitar, por meio de gráficos, a dependência do índice de comportamento de fluxo em relação à concentração da polpa e o efeito da velocidade média e do índice de comportamento de fluxo na razão entre os gradientes de pressão $(I_s/I_w)^{***}$, para uma dada concentração e diâmetro de duto.

IV - Sofrá e Borger (2002) estudaram as características reológicas da lama vermelha (resíduo do processo Bayer) visando otimizar as operações relativas ao depósito deste resíduo. Tradicionalmente, o processamento de minerais gera um considerável volume de rejeitos o que, somado às exigências ambien-

*** I_s/I_w é a razão entre o gradiente de pressão da polpa e o gradiente de pressão da água, existente no interior do duto.

tais e econômicas atuais, faz com que a tendência de restrição ao uso de grandes volumes de água nos processos esteja cada vez mais presente. Neste contexto, as técnicas de depósito a seco - *dry disposal* - possuem vantagens significativas em comparação com o tradicional depósito a úmido. As técnicas de depósito a seco requerem que o resíduo sofra uma etapa anterior de espessamento ou desaguamento. Uma dessas técnicas é o empilhamento a seco, que consiste na deposição sucessiva dos resíduos, após o desaguamento, sobre leitos do próprio resíduo. A previsão da inclinação do depósito formado pelos resíduos é necessária para garantir a máxima eficiência do seu acúmulo em reservatórios. Entre outros parâmetros, a inclinação também é função de propriedades reológicas como a viscosidade e a tensão no ponto de escoamento. A existência de um valor de tensão no ponto de escoamento é essencial para a viabilidade do empilhamento a seco do resíduo já que esta propriedade está intimamente ligada à imobilidade do material depositado. Um valor adequado de tensão no ponto de escoamento também é um indicativo de que não ocorrerá segregação de partículas por tamanho (a pilha de resíduos será homogênea) e de que a pilha terá o ângulo de repouso requerido. Também é essencial que haja um bom desempenho nos processos de desaguamento dos resíduos até as altas concentrações requeridas e de bombeamento do material desde o espessador até o depósito. Como o projeto de um sistema de depósito a seco requer a previsão do ângulo de repouso ou, mais especificamente, da inclinação formada pelo resíduo depositado, se uma relação entre a reologia da suspensão, as condições operacionais e o comportamento do material depositado for conhecida, alguns parâmetros poderiam ser manipulados a fim de se obter a inclinação desejada.

Suspensões concentradas geralmente exibem comportamento não Newtoniano, portanto, para a determinação das condições operacionais da planta, é necessário o conhecimento sobre a dependência das propriedades da suspensão em relação à taxa ou a tensão de cisalhamento. As medidas para o estudo do comportamento de fluxo podem ser realizadas por meio de reômetros capilares, que são dispositivos adequados para a obtenção dos dados de tensão-taxa de cisalhamento, necessários para a determinação da energia requerida ao bombeamento. A utilização deste tipo de reômetro requer cuidados para a eliminação dos erros causados pelos efeitos de parede e de final de capilar, o que significa que deve ser feita a escolha de capilares com relação L/D (comprimento por diâmetro) adequada. Além disso, a escolha do diâmetro do capilar deve ser tal que o mesmo seja pelo menos sessenta vezes maior do que o diâmetro médio das partículas.

Para a determinação da tensão no ponto de escoamento, foi escolhido o método usando um rotor tipo *vane* que, segundo os autores, proporciona determinações mais acuradas.

Comparando a variação da tensão no ponto de escoamento *versus* concentração de resíduos de diversos minerais, tais como manganês, ouro, níquel, carvão e de amostras de lama vermelha provenientes de várias localidades, os autores observaram um aumento exponencial da curva para todos os casos estudados, o que significa que para cada material existe um valor de concentração a partir da qual a tensão no ponto de escoamento cresce muito rapidamente. Isto requer um cuidado especial na escolha das bombas já que valores elevados de tensão podem até impossibilitar a partida das mesmas. Por outro lado, o valor de tensão no ponto de escoamento deve ser

tal que permita que o transporte do fluido ocorra em fluxo laminar, sem que haja sedimentação dentro da tubulação.

Como resultado, os autores verificaram o comportamento pseudoplástico da lama vermelha em diversas concentrações, sendo que a redução da viscosidade foi bem maior para as suspensões com alto teor de sólidos. O efeito do cisalhamento prévio também foi avaliado, sendo constatado o caráter tixotrópico da suspensão, ou seja, as suspensões cisalhadas por um período anterior às medidas reológicas apresentaram queda da viscosidade e da tensão no ponto de escoamento. Esta queda se acentuou conforme aumentou o tempo de pré-cisalhamento até que se obteve um valor de equilíbrio, em que o aumento do tempo não interfere mais nas propriedades.

Os dados obtidos podem ser empregados na determinação da queda de pressão na tubulação e na energia requerida no bombeamento. Para uma dada produtividade (em termos de peso de sólidos por unidade de tempo) foi observado que existe um valor ótimo de concentração em que a energia requerida para o bombeamento é mínima. Nesta concentração, o fluxo se encontra na região de transição entre laminar e turbulento. Para concentrações superiores, tem-se que o fluxo se torna laminar, com um aumento expressivo da viscosidade e da tensão no ponto de escoamento, resultando num aumento da queda de pressão. Já para concentrações menores, ocorre o fluxo turbulento e também o aumento da queda de pressão devido ao alto fator de atrito.

A tixotropia da lama vermelha é um fator complicador na previsão da queda de pressão devido à mudança das propriedades em função do pré-cisalhamento. Devido ao alto tempo necessário para alcançar o estado de equilíbrio dinâmico, em que as

taxas de quebra e recomposição de estruturas são as mesmas, este estado não é atingido durante as operações industriais.

Na previsão do ângulo de repouso, os autores investigaram a influência dos seguintes parâmetros:

- (i) reológicos – viscosidade e tensão no ponto de escoamento.
- (ii) operacionais – taxa de escoamento no depósito e topografia (inclinação da base).

Apesar do comportamento reológico da lama vermelha ser melhor descrito pelo modelo de Herschel-Bulkley, os autores preferiram aplicar o modelo de Bingham [Equação 8] devido à necessidade prática de se obter um valor constante e representativo de viscosidade.

$$\tau = \tau_y + \eta_B \cdot \dot{\gamma} \quad [8]$$

Onde:

τ e τ_y é a tensão de cisalhamento e tensão no ponto de escoamento, respectivamente

η_B é a viscosidade de Bingham

$\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento

A relação linear entre ângulo de depósito e tensão no ponto de escoamento foi observada quando a inclinação da base era de zero grau.

A análise dos resultados obtidos nos experimentos feitos em plano inclinado revelou que o ângulo de repouso (θ) é função da tensão no ponto de escoamento (τ_y), do número de Reynolds (Re) e do número de Froude (Fr) [Equação 9]. Contudo, os autores concluíram que, apesar deste modelo ter utili-

dade na previsão do ângulo de repouso formado no depósito do resíduo concentrado, é necessário um estudo adicional em que seja investigado o efeito do espalhamento lateral do material, que ocorre em operações industriais em larga escala.

$$\theta = f\left(\frac{\tau_y \cdot Fr}{Re}\right) = f\left(\frac{\tau_y \cdot \eta}{\rho^2 \cdot W^2 \cdot g \cdot v}\right) \quad [9]$$

Onde:

θ é o ângulo de repouso

Re é o número de Reynolds

Fr é o número de Froude

τ_y é a tensão no ponto de escoamento

η é a viscosidade

ρ é a densidade da suspensão

W é a largura do plano inclinado

g é a aceleração da gravidade

v é a velocidade do fluxo

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo reológico pode contribuir na avaliação da eficiência de dispersantes e demais aditivos capazes de interagir com a superfície dos minerais em suspensão, além de fornecer informações sobre a estrutura dos agregados presentes. É importante enfatizar que no estudo da estrutura dos materiais, a análise reológica atua de forma complementar às demais caracterizações. Estimativas sobre a estabilidade da suspensão quanto à sedimentação podem ser feitas a partir das propriedades reológicas tensão limite de escoamento e tangente de perda ($\tan \delta$).

A utilização de reômetros rotacionais e capilares para a determinação das propriedades reológicas tem destaque na literatura especializada.

BIBLIOGRAFIA

- ANDREOLA, F.; CASTELLINI, E.; MANFREDINI, T. & ROMAGNOLI, M. (2004) - The role of sodium hexametaphosphate in the dissolution process of kaolinite and kaolin em **Journal of the European Ceramic Society**, vol. 24, pg. 2113 – 2124.
- BHATTACHARYA, I. N.; PANDA, D. & BANDOPADHYAY, P. (1998) – Rheological behaviour of nickel laterite suspension em **Int. J. Miner. Processing**, vol. 53, pg. 251 – 263.
- BREMMELL, K. E. & ADDAI-MENSAH, J. (2005) – Interfacial-chemistry mediated behavior of colloidal talc dispersions em **Journal of Colloid and Interface Science**, vol. 283, pg. 385 – 391.
- BRETAS, R. E. S & D'AVILA, M. A. (2000) – Reologia de polímeros fundidos. Editora da UFSCar.
- CONCEIÇÃO, S.I.; VELHO, J. L. & FERREIRA, J. M. F. (2003) - Influence of deagglomeration and carboxymethyl cellulose binders on rheological behaviour of kaolin suspensions em **Applied Clay Science**, vol. 23, pg. 257 – 264.
- GARCIA, F.; LE BOLAY, N. & FRANCES, C. (2003) – Rheological behavior and related granulometric properties of dense aggregated suspension during an ultrafine comminution process em **Powder Technology**, vol. 130, pg. 407 – 414.
- GARRIDO, L.B.; VOLZONE, C. & SÁNCHEZ, R. M. T. (1997) - OH-Al polymers and HMP adsorption on kaolinite: experimental conditions and viscosity of deflocculated suspensions em **Colloids and Surfaces - A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol. 121, pg. 163 – 171.
- HE, M.; WANG, Y. & FORSSBERG, E. (2004) - Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review em **Powder Technology**, vol. 147, pg. 94 –112.
- HULSTON, J.; DE KRETZER, R. G. & SCALES, P. J. (2004) - Effect of temperature on the dewaterability of hematite suspensions em **Int. J. Miner. Process.**, vol. 73, pg. 269– 279.

- HUSBAND, J. C. (1998) - Adsorption and rheological studies of sodium carboxymethyl cellulose onto kaolin: effect of degree of substitution em **Colloids and Surfaces - A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol. 134, pg. 349-358.
- LAXTON, P. B. & BERG, J. C. (2005) – Gel Trapping of dense colloids em **Journal of Colloid and Interface Science**, vol. 285, pg. 43 – 47.
- MARCO, P.; LABANDA, J. & LORENS, J., (2004) - The effects of some polyelectrolyte chemical compositions on the rheological behaviour of kaolin suspensions em **Powder Technology**, vol. 148, pg. 43 – 47.
- MACOSKO, C.W. (1994) – Rheology - Principles, Measurements and Applications. New York, John Wiley & Sons Inc.
- OLHERO, S. M. & FERREIRA, J. M. F. (2004) – Influence of particle size distribution on rheology and particle packing of silica-based suspension em **Powder Technology**, vol. 139, pg. 69 – 75.
- ROSSI, S.; LUCKHAM, P. F. & TADROS, T. F. (2003) – Influence of non-ionic polymers on the rheological behaviour of Na⁺ - montmorillonite clay suspension. Part II. Homopolymer ethyleneoxide and polypropylene oxide - polyethylene oxide ABA copolymers em **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, vol. 215, pg. 1 – 10.
- SAKAIRI, N.; KOBAYASHI, M. & ADACHI, Y. (2005) – Effects of salt concentration on the yield stress of sodium montmorillonite suspension em **Journal of Colloid and Interface Science**, vol. 283, pg. 245 – 250.
- SÁNCHEZ-MUÑOZ, L. & CASTELLÓ, J. B. C. (2003) – Matérias primas y aditivos cerâmicos, Capítulo XVII, Faenza Editrice Ibérica, s.l.
- SOFRÁ, F. & BOGER, D. V. (2002) - Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry em **Chemical Engineering Journal**, vol. 86, pg. 319 – 330.

- TURIAN, R. M.; MA, T.-W.; HSU, F.-L. G & SUNG, D.-J. (1998) – Flow of concentrated non-Newtonian slurries: 1. friction losses in laminar, turbulent and transition flow through straight pipe em **Int. J. Multiphase Flow**, vol. 24, n0 2, pg. 225 – 242.
- UHLHERR, P. H. T.; GUO, J.; TIU, C.; ZHANG, X.-M.; ZHOU, J.Z.-Q. & FANG, T.-N. (2005) – The shear-induced solid-liquid transition in yield stress materials with chemically different structures em **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, vol. 125, pg. 101 – 119.
- VLASAK, P. & CHARA, Z. (1999) - Laminar and turbulent flow experiments with yield-power law slurries in **Powder Technology**, vol. 104, pg 200–206.
- WOLLNY, K. (2001) – New rheological test method to determine the dewatering kinetics of suspension em **Applied Rheology**, vol. 11, n0 2, pg. 197 - 202.
- ZHOU, Z.; SCALES, P. J. & BOGER, D. V. (2001) - Chemical and physical control of the rheology of concentrated metal oxide suspensions em **Chemical Engineering Science**, vol. 56, pg. 2901 – 2920.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2007, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, cerca de 200 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Rochas e Minerais Industriais

SRMI-10 – **Estudo de Alterabilidade de Rochas Silicáticas para Aplicação Ornamental.** Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Julio César Guedes Correia, Juliana Maceira Moraes e Adriano Caranassios, 2008.

SRMI-09 – **Pegmatitos do Nordeste: Diagnóstico sobre o Aproveitamento Racional e Integrado.** Adão Benvindo da Luz, Fernando A. Freitas Lins, Bernardo Piquet, Mário Jorge Costa e José Mário Coelho, 2003.

SRMI-08 – **Técnicas Alternativas para a Modificação do Caulim.** Marisa Bezerra Mello Monte, Paulo Renato Perdigão de Paiva e Flávia Elias Trigueiro, 2003.

SRMI-07 – **Beneficiamento de Diatomita da Bahia.** Sílvia Cristina Alves França e Adão Benvindo da Luz, 2002.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Geral: (21) 3867-7222 - Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233
Telefax: (21) 2260-2837
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.