

# **ESPESSAMENTO DE POLPAS MINERAIS CONTENDO ELEVADO TEOR DE FINOS**

A.S. Nunes

Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto

Rua Pandiá Calógenas S/N – Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, 35400-000. Email:

[alexandre2306@gmail.com](mailto:alexandre2306@gmail.com)

## **RESUMO**

O comportamento reológico de polpas minerais com alta proporção de argiláceos é complexo. O caráter não newtoniano de polpas pode levar a resultados conflitantes com os objetivos de operações de separação sólido-líquido. Incluem-se nesse caso, minérios associados a cordões litorâneos litoclásticos portadores de ilmenita, zirconita, rutilo e monazita, os quais comumente têm cerca de 5 % de argilominerais. Seu beneficiamento, como regra, se inicia com o expurgo dessas argilas (por atrição, lavagem e ciclonagem), as quais têm efeito deletério nos processos de concentração dos minerais densos, em especial por afetar a viscosidade da polpa, prejudicando a seletividade do processo. Dentro desse contexto, efluentes de processo industrial de concentração de minerais densos foram estudados, buscando-se a viabilidade de seu desaguamento, com reinserção da água clarificada no processo. Devido a características reológicas do material em questão, com ocorrência inclusive de tixotropia, o desaguamento não se mostrou tarefa fácil com métodos de filtração e espessamento tradicionais, exigindo uma abordagem a nível molecular com o uso de reagentes orgânicos e inorgânicos na floculação/coagulação desta polpa mineral. O comportamento reológico da polpa, a cinética de sedimentação das partículas e o efeito do pH sobre a sedimentação foi estudado. Além disso, abordagens inéditas - como o uso de ultrassonificação - na otimização da sedimentação e compactação do espessado foram testadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reologia; Polpas minerais; desaguamento;

## 1. INTRODUÇÃO

Na cidade de Buena (RJ), esta localizada a jazida de terras raras das Indústrias Nucleares do Brasil (INB) que produz seu minério associado a altas concentrações de argiláceos processados com o minério na etapa de beneficiamento mineral, gerando um expurgo em forma de polpa com alta concentração de particulados finos, chegando até a granulometria coloidal. A concentração alta de sólidos juntamente com a granulometria das partículas presentes, dificulta o processo de desaguamento, impedindo que a água volte a ser reutilizada, deixando de evitar a captação de uma quantidade maior de água nos rios ou em lagos próximos, desrespeitando o meio ambiente e a legislação ambiental.

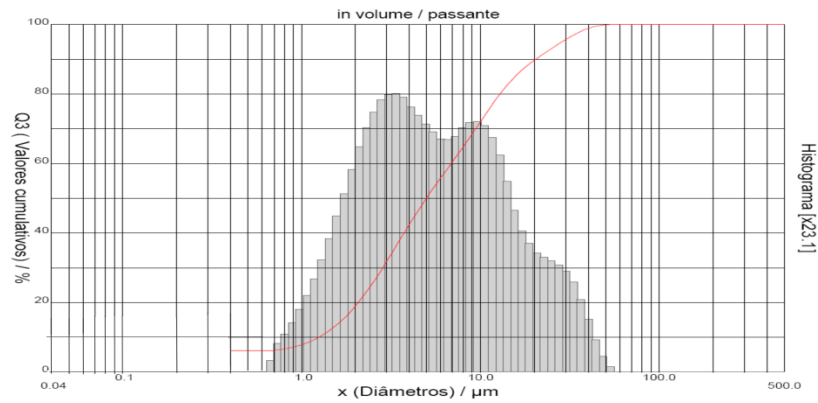
Como proposta de solução do problema, foi sugerida o uso de polímeros na floculação e/ou a coagulação dos particulados coloidais polidispersos em suspensão na polpa. Se caso utilizassem um meio filtrante comum, este rapidamente teria os poros preenchidos com a grande quantidade de partículas finas presentes, havendo pouca ou nenhuma eficiência no processo de desaguamento, tornando-o extremamente oneroso. Devido ao comportamento reológico peculiar da polpa, o uso de polímeros não chegou ao resultado desejado, tendo a suspeita da formação de arranjos tixotrópicos, que interferem na viscosidade aparente do meio de forma a aumentar, dando a sensação de se tratar de um pseudogel. Isto implica que os flocos ou coágulos não têm livre passagem pelo meio, sendo aprisionados pelo gel (num efeito teia de aranha) e assim permanecendo em suspensão. Esta estrutura pode ser quebrada, mas enquanto ela permanece a viscosidade é muito alta, não permitindo a decantação dos flocos gerados pela adição de polímeros que deveriam sedimentar por ter massa suficiente para isso. Quando a rede do pseudogel sofre uma quebra por força cisalhante, a viscosidade cai assintoticamente alcançando o mais baixo valor para uma taxa de cisalhamento constante. Na tentativa de promover constantemente esta força cisalhante, testou-se também a ultrassonificação como processo de quebra da referida estrutura em gel, de forma a permitir a passagem dos flocos ou coágulos pelo meio.

## 2. OBJETIVOS

Análise do comportamento de polpas minerais com alta concentração de argiláceos polidispersos de granulometria colóide/argila quanto da coagulação ou floculação no processo de sedimentação, uma vez que estas polpas, por vias tradicionais de filtragem e espessamento, não apresentam resultados satisfatórios no desaguamento.

## 3. METODOLOGIA

A água utilizada no processo contínuo de beneficiamento mineral de terras raras da INB termina o processo com alta concentração de particulados suspensos que não devem retornar ao processo como carga circulante, após a etapa de desaguamento. Ciclones desaguadores são utilizados na tentativa de separar a fração sólida da líquida, mas tanto o underflow quanto o overflow tem produtos ainda com uma carga elevada de material sólido em suspensão. As amostras retiradas destes ciclones possuem granulometria praticamente bitolada entre 6 e 60 $\mu$ m, com diâmetro médio das partículas de 8,3 $\mu$ m conforme figura 1, indicando se tratar de partículas muito finas, difíceis de serem tratadas, principalmente devido a fenômenos interfaciais que estão diretamente ligados a área superficial, a qual aumenta à medida que a granulometria diminui.



**Figura 21: Distribuição granulométrica da amostra do underflow dos hidrociclones de Buena.**

Em laboratório, o minério vindo de diversas frentes de lavra foram lavados e separados, sendo a lavagem feita utilizando peneira vibratória de 500 mm x 500 mm, com malha quadrada de 75  $\mu\text{m}$  (malha 200), sendo o expurgo deste processo (polpa argilosa) aproveitado como material de interesse para o trabalho, por possuir aproximadamente a mesma faixa granulométrica das amostras retiradas do ciclone da usina de beneficiamento primário de Buena.

Em seguida a polpa argilosa foi adensada até uma concentração mássica da ordem de 10,0%, se equivalendo à amostra trazida dos hidrociclones de Buena, conforme tabela 1, sendo em seguida estocada. Com esta polpa foram preparados diversos testes de proveta com o objetivo de determinar os melhores polímeros disponíveis no mercado, que mais se aproximam da clarificação do sobrenadante com uma velocidade de sedimentação apropriada, permitindo que a água possa voltar ao circuito de beneficiamento de minérios ou que seja devolvida ao meio ambiente.

**Tabela 6: Amostra de Lama INB/Buena**

pH	7,6
Concentração de sólidos (g/L)	96,9
Conc. mássica (medida no Demin)	9,15%
Conc. mássica (medida em Buena)	8,60%
Granulometria:	
Diâmetro a 10%: ( $\mu\text{m}$ )	1,24
Diâmetro a 50%: ( $\mu\text{m}$ )	4,98
Diâmetro a 90%: ( $\mu\text{m}$ )	20,40
Diâmetro médio: ( $\mu\text{m}$ )	8,32
Amostra Úmida (g)	46,24
Amostra Seca (g)	4,23
Massa específica da polpa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1059,65

### 3.1 Preparação da amostra de proveta

#### 3.1.1 Concentração mássica

A concentração mássica das provetas foi determinada pelas concentrações de sólidos obtidas com as amostras industriais, as quais, para efeito de praticidade, foram fixadas em 10 %, sendo um valor muito próximo daquele encontrado no hidrociclone de Buena.

#### 3.1.2 pH

Como o pH é uma característica importante no processo de sedimentação, uma vez que dependendo de seu valor as partículas podem passar a coagular, não se limitou esse parâmetro a apenas um valor encontrado na amostra oriunda de Buena. Desse modo usaram-se três valores iniciais de pH, a saber: pH 5,5, pH 7,0 e pH 8,5. Com isso, caracterizamos as faixas ácida, neutra e básica para análise do comportamento que cada polímeros apresentou nesses três ambientes.

Uma forma de se obter um resultado ótimo é associando coagulantes e floculantes. Para tanto é necessário ter cuidado com o pH, pois além de afetar a carga superficial das partículas, ele afeta também a ionização dos polímeros. É necessário conhecer a faixa de ionização do floculante e trabalhar dentro dela.

### 3.1.3 Floculantes

Ao todo, foram usados quarenta e dois reagentes para agregação (coagulantes e floculantes). A tabela a seguir sistematiza as informações sobre os mesmos.

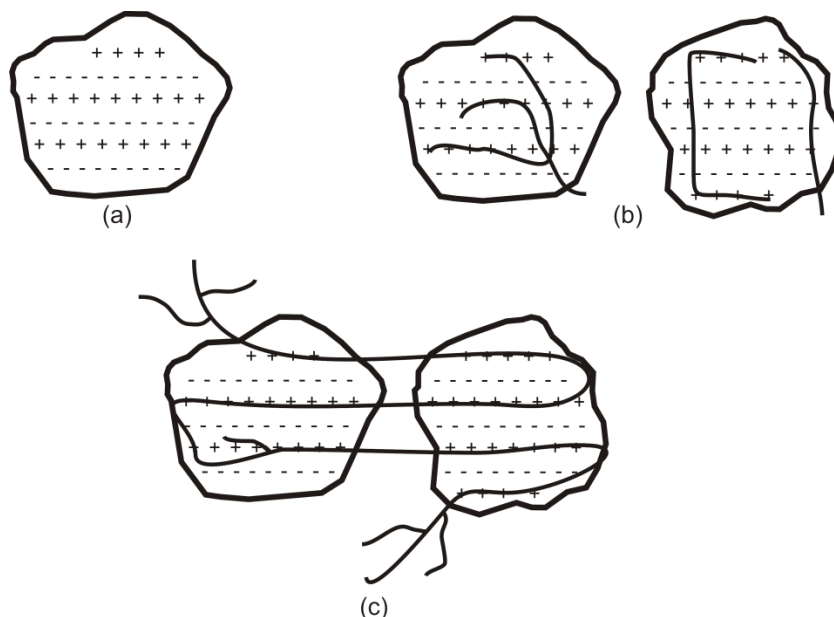
**Tabela 7: Lista de Floculantes e Coagulantes**

MARCA:									
SNF do Brasil Floerger			GE Betz		IWT Services		Cytec Industries Inc.		
AH912		FO4190	Catiônico	PolyFloc AE1125	Aniônico	IFLOC 101		Superfloc A100	Aniônico
AN905	Aniônico	FO4240	Catiônico	PolyFloc AE1115P	Aniônico	IFLOC 107		Superfloc A 130 HMW	Aniônico
AN910	Aniônico	FO4290	Catiônico	PolyFloc AP1120P	Aniônico	IFLOC 504		Superfloc C581 (Amina)	Catiônico
AN913	Aniônico	FO4350	Catiônico	PolyFloc AP1707P	Catiônico	IFLOC 507		Superfloc N300	Neutro
AN923	Aniônico	FO4400	Catiônico	Klaraid IC1176L	Coagulante	IFLOC 521BT			
AN934	Aniônico	FO4440	Catiônico			IFLOC 523BT			
AN945	Aniônico	FO4490	Catiônico			IZET 803			
AN956	Aniônico	FO4550	Catiônico			IZET810			
FA920	Poliacrilamida	FO4650	Catiônico			SUL. AL			
FO4115	Catiônico	FO4700	Catiônico						
FO4123	Catiônico	FO4800	Catiônico						
FO4140	Catiônico	FO4990	Catiônico						

Estes polímeros variam em seu comprimento relativo, sendo polímeros orgânicos e inorgânicos de cadeia curta ou longa.

A ação de um polímero de cadeia curta, num sistema de particulados com cargas carregadas negativamente, se dá por meio de um floculante catiônico. Este é adsorvido numa área restrita da superfície da partícula, neutralizando as cargas negativas e deixando um saldo de cargas positivas. Como consequência, a superfície apresentará áreas carregadas positivamente cercadas de áreas carregadas negativamente (figura 2-a). Disso decorre que áreas carregadas positivamente numa partícula atraiam áreas carregadas negativamente de outra e vice-versa, formando aglomerados ou flocos (figura 2-b) que, a partir de certo tamanho, sedimentam. Esta ação é muito semelhante à dos coagulantes.

Outro mecanismo de floculação é a ação de um polímero de cadeia longa que permite a formação de pontes. O polímero é adsorvido pela partícula apenas em alguns pontos da cadeia molecular. O resto da cadeia polimérica fica livre para adsorver em outras partículas (figura 2-c).



**Figura 22: Partículas carregadas eletricamente num ambiente com polímeros.**

Polímeros de baixa massa molecular (cadeia curta) tendem a formar flocos pequenos e apertados. Polímeros de maior massa molecular (cadeia longa) têm flocos maiores e mais soltos, traduzindo numa sedimentação mais rápida, mas também pela maior retenção de líquido dentro do floco (vai haver menor compactação). Estes flocos são mais delicados, uma vez que são mais sensíveis a tensões de cisalhamento.

É fato que quanto maior a percentagem de sólidos, melhor é a floculação, uma vez que a probabilidade de colisão entre as partículas e a cadeia de floculante aumenta. Isto não significa necessariamente que haverá clarificação ou somente uma interface, no processo de sedimentação.

A capacidade de adsorção do polímero pode ser comprometida se for utilizado polímero em excesso. Desse modo, o polímero ocupa toda a superfície da partícula e passa a agir como um colóide protetor, anulando o efeito floculante e agindo como se fosse um dispersante. O mesmo acontece quando a cadeia de um polímero é cortada pela hélice de um agitador, por exemplo.

### **3.1.4 Ultrasonificação**

Visando a estudar o efeito da agitação em escala microscópica sobre a cinética de agregação, alguns ensaios em proveta foram realizados em presença de ondas de ultra-som. Para estes ensaios a proveta com a polpa se posiciona dentro de um reservatório com água ligado ao sistema de geração de ultrassom. A proveta fica parcialmente submersa, pois é mantida lâmina de 6 cm. Durante a sonificação, as amostras são mantidas em um banho de água fria para que a temperatura não exceda 30 °C. O sistema de sonificação permanecia acionado durante todo o ensaio de sedimentação, o qual tinha a duração de uma hora. Baixos níveis de energia ultra-sônica geram um potencial de destruição de agregados, podendo não ser interessante para este projeto que visa justamente o contrário, ou seja, a agregação de particulados para a floculação e posterior clarificação do sobrenadante. Ensaios correspondentes, sem o sistema de ultrasonificação, eram realizados paralelamente, com propósitos comparativos.

Revisões de literatura sobre dispersão ultra-sônica indicam que não há um método padrão em uso. Numerosos fatores, como potência liberada pelo aparelho, tempo de sonificação, relação partícula-água, especificações do equipamento, temperatura da suspensão, gás dissolvido e profundidade de inserção do cilindro na suspensão, podem influir na eficiência, e conseqüentemente na probabilidade de colisão entre partículas.

Nesses ensaios eram registrados, ademais, os valores de concentração mássica de sólidos na fase sobrenadante, ao final do ensaio de sedimentação. A coleta era feita com a introdução cuidadosa de um cilindro de 130 mililitros até uma cota fixa de referência dentro da zona de sobrenadante (“clarificado”). Isso permitia uma análise comparativa entre os diversos reagentes e condições.

### **3.1.5 Compressão**

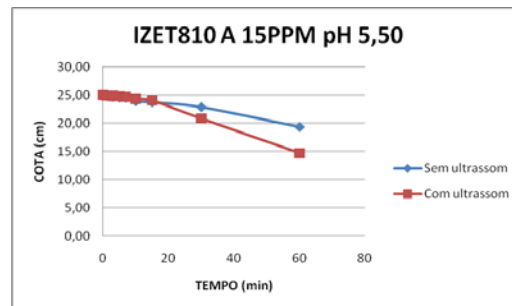
Os resultados dos experimentos de sedimentação em proveta são plotados na forma de gráfico de sedimentação. A determinação do ponto de início de compressão é feita usando o gráfico de Roberts, conforme metodologia convencional. Roberts (1949), através dos estudos dos trabalhos de Coe e Clevenger, propôs um método matemático através de função logarítmica, na curva de altura, em função do tempo para ensaios descontínuos de espessamento. O autor relaciona o final do processo de sedimentação com um comportamento logarítmico e propõe um método gráfico onde o ponto crítico, início do regime de compressão, fica evidenciado.

#### 4. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

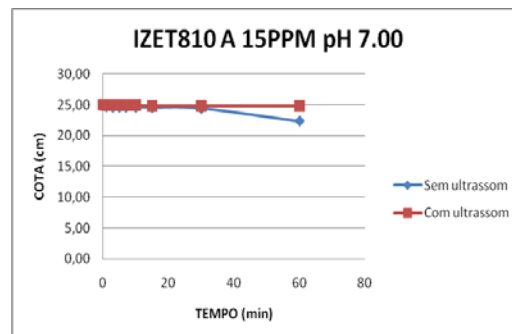
O tempo que levou cada processo de sedimentação foi cronometrado e coletaram-se medidas da cota da interface clarificada a intervalos pré-definidos de tempo. Os dados foram coletados em cada proveta de forma individual e sistematizados em planilhas, contendo informações relevantes como os polímeros usados, os valores de pH e as frentes de lavras de onde se originaram as polpas ensaiadas. Em seguida foram traçados gráficos de *sedimentação X tempo*, o qual permitiu a identificação dos polímeros que obtiveram melhores resultados.

#### 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O resultado do processo de desaguamento reproduzido em laboratório pode ser representado de forma genérica por dois ensaios de proveta que obtiveram bons resultados no uso de um mesmo polímero. Em determinado momento é mantido o pH baixo, em torno de 5,50 na polpa enquanto se analisa a resposta do desaguamento com e sem o uso do ultrassom, em outro é a vez de se manter o pH neutro fixado em 7,00 enquanto se alterna o uso da referida sonificação. Após um intervalo de uma hora, percebe-se que os resultados foram distintos em ambos os casos, como analisados a seguir.



**Figura 23: Altura da compactação em 2 horas: 17,80 cm**  
**Altura da compactação em 1 hora com ultrassom: 14,67 cm**



**Figura 24: Altura da compactação em 2 horas: 15,10 cm**  
**Altura da compactação em 1 hora com ultrassom: 24,81 cm**

Dependendo do pH da solução, o processo de agregação é comprometido e a associação das partículas não ocorre, ainda que em um ambiente com agitação sônica, quando se usa um equipamento de ultrassom. Este fato se deve à característica pericínética dominante quando o pH não está em um valor baixo o suficiente. As partículas neste caso não conseguem se agregar devido ao movimento browniano dominante, que é uma resultante do maior número de interações eletrostáticas ocorridas no seio da solução, fazendo com que o uso da sonificação não consiga auxiliar no processo de agregação, pois o que acaba por fazer é aumentar o efeito caótico, podendo este, em alguns casos, até mesmo desassociar uma partícula agregada existente ou recém formada. Mas quando a sonificação é usada em um ambiente com pH baixo o resultado é diferente. Por si só um ambiente ácido neutraliza o excesso de cargas dominantes existentes na polpa facilitando a associação e a estabilidade do novo agregado ortocinético (age como um coagulador). Assim, uma

parcela das partículas sedimentará, enquanto que outra parcela maior sedimentará quando sob a influência do ultrassom. Ressalta-se que a partícula ultracoloidal que sofre influência de uma agitação sônica, não sedimenta na rapidez desejada, ainda que em um ambiente acidificado. Mas por outro lado, aquelas que têm massa e tamanho suficiente para sedimentar acabam por fazê-lo numa velocidade e com uma compactação maiores, gerando um produto decantado estratificado (por densidade). Além da ultrassonagem, existem outros fatores importantes que determinam as reações de natureza superficial da partícula, como a temperatura do sistema e a presença de íons no seio da solução.

Os experimentos de sedimentação em proveta foram plotados na forma de gráfico de sedimentação, tendo o ponto de início de compressão da polpa determinado pelo gráfico de Roberts, o qual evidencia as mudanças do regime de sedimentação. Nos ensaios que utilizam ultrassom há certa particularidade, pois o regime transiente aparentemente é mais duradouro. Isto se deve a agitação das partículas, que faz com que a parte mais fina e leve permaneça um tempo maior em suspensão do que permaneceriam caso estivessem em um ambiente estático. Já a compactação do produto espessado ocorreu de forma mais eficiente, num intervalo de tempo menor, fazendo com que o uso do ultrassom tenha certa vantagem sobre os outros testes que não o utilizaram, porém neste caso o sobrenadante não é clarificando e o processo só é eficiente em pH mais baixo.

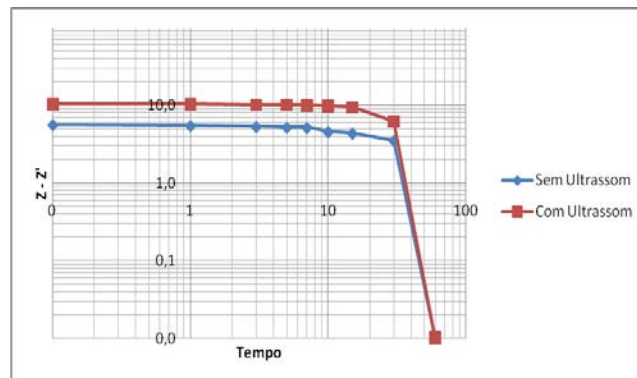


Figura 25: Gráfico de Roberts comparando o início do ponto de compressão em um ambiente sem o uso do ultrassom e em outro com uso.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados mostram que, aumentando o pH, e ao se atingir valores próximos de pH 8,5, ocorre mudança abrupta do volume sedimentado em cinco minutos, o qual não é detectável em valores inferiores de pH. Nota-se que esse aumento da taxa de sedimentação não foi de modo algum acompanhado pela clarificação do sobrenadante.

Mesmo após 24 horas de repouso, nos ensaios acima do pH 8,5, a interface de clarificação está não mais que a 2 mm da superfície da lâmina d água na proveta, mostrando condição de dispersão elevada, impedindo a sedimentação dos finos. Esse comportamento está compatível com a hipótese do comportamento tixotrópico das argilas presentes no minério tratado atualmente em Buena.

Essa hipótese também explica porque o espessado e a lama têm praticamente a mesma quantidade de sólidos na prática industrial, quando a usina está tratando minérios de frentes problemáticas.

Com isso o balanço de massas ficará facilitado em termos de rejeição de sólidos se adotarem uma etapa prévia de sedimentação de “grossos” via dispersão e quebra do gel tixotrópico (em pH 8,5).

Para se conseguir eliminar os ultrafinos e, portanto, clarificar a água para reciclo na usina será preciso uma etapa secundária de floculação, a qual dependerá da frente em lavra. Os resultados

mostraram que o desaguamento pode ser melhorado com a combinação de atuadores químicos estagiados.

O uso do ultrassom só é viável em alguns casos específicos, o que o torna um método muito restrito. Ainda assim, pode ser usado com bons resultados se o objetivo final não for a clarificação do sobrenadante. Este método tem uma ótima compactação do afundado além de diminuir o tempo de subsidência, dando um resultado mais rápido.

## 7. COMENTÁRIO FINAL

Os resultados obtidos nos experimentos que utilizaram ultrassom mostraram, de fato, como podem ser totalmente alterados os resultados mudando apenas uma variável. Estes resultados abriram caminho para uma nova compreensão da amostra de lama estudada, uma vez que o uso de ultrassom melhorou o resultado em alguns testes como também piorou em outros.

O processo de ultrassonagem contribuiu mais para a compactação do espessado que para a sedimentação propriamente dita. Isto não quer dizer que o processo foi um fracasso, em condições mais favoráveis o uso do ultrassom pode acarretar em uma grande vantagem para o desaguamento. Esta vantagem é que a sedimentação torna-se mais rápida, exigindo menor tempo de permanência, e o afundado é classificado densitariamente, sendo permitido, dependendo do interesse, aproveitar o mineral-minério livre no sedimentado.

## 8. FONTES DE REFERÊNCIA

SANTOS, Pércio de Souza. *Ciência e Tecnologia de Argilas*, São Paulo; Ed. Edigard Blucher, v.1, 1992. 408 pp.

JOCHIMEK, Mirian Rosenthal. *Mineralogia de Argilas*; Apostila do DEMIM, 73 pp.

CHAVES, Arthur Pinto. *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios*, São Paulo, Signus Editora, v.2, 2004 199 pp.

LUZ, Adão Bemvindo da (Ed.). *Tratamento de Minérios*; Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2004, 867 pp.

ROBERTS, E.J.; *Thickening, art or science*; Mining Engineering v. 1; p. 61 (1949).