

# O USO DE PRODUTOS QUÍMICOS PARA MELHORAR O DESEMPENHO DO DESAGUAMENTO DE CONCENTRADOS <sup>1</sup>

Laurindo de Salles Leal Filho<sup>2</sup>  
Arthur Pinto Chaves<sup>3</sup>

## Resumo

São revisados os aspectos teóricos envolvidos com o desaguamento em pilhas, peneiras, centrífugas e filtros e é apresentado o tratamento quantitativo dado ao fenômeno. Adicionalmente descreve-se a maneira como a água que constitui a umidade dos minérios se apresenta na superfície das partículas. Isto serve de base para entender a ação de produtos químicos que são utilizados como auxiliares de desaguamento.

Tais produtos agem de três maneiras: a primeira é diminuindo a tensão superficial da água, o que possibilita o seu escoamento mais fácil; a segunda é diminuindo a sua viscosidade, e funciona da mesma maneira. Finalmente, é possível tornar a superfície da partícula mineral repelente à água, o que leva aos níveis de umidade mais baixos.

Como conclusão, é descrita a experiência dos autores com o desaguamento de concentrados de minérios brasileiros.

palavras-chave: desaguamento mecânico, auxiliares de desaguamento, produtos químicos para a mineração.

---

<sup>1</sup>contribuição técnica para o I Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro

<sup>2</sup> Engenheiro de minas, Doutor em engenharia, Professor assistente, Depto. Engenharia de Minas da EPUSP.

<sup>3</sup> Membro da ABM, engenheiro metalurgista, professor titular de Tratamento de Minérios, Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP

## TEORIA DO DESAGUAMENTO

Os fenômenos envolvidos no desaguamento e na filtragem são complexos demais para poderem ser completa e satisfatoriamente quantificados por qualquer tratamento teórico. Faremos por isto uma revisão sucinta e não exaustiva dos aspectos principais envolvidos. O objetivo é apenas prover o ferramental de raciocínio necessário para uma melhor compreensão do processo (1, 2, 3).

Stroh e Stahl (4) descreveram uma torta de filtragem ou um leito de partículas em uma pilha, ou ainda, o leito de partículas numa cesta de centrifuga, como um *conjunto de partículas* mais outro *conjunto de canais capilares* entre elas (figura 1). Tanto as partículas como os canais têm diâmetros variados.

Quando um líquido percola este leito, seu movimento é afetado por diferentes parâmetros, notadamente, pela porosidade do leito - que depende do tamanho das partículas e da sua distribuição granulométrica - da viscosidade do líquido e dos efeitos capilares.

### aspectos fluido-dinâmicos

A primeira avaliação quantitativa do fenômeno foi dada por Darcy (5, 6):

$$\text{fluxo através do leito} = \frac{B \Delta p}{\mu L}, \text{ onde}$$

B é a permeabilidade do leito,

$\Delta p$  é a diferença de pressão através do leito,

$\mu$  é a viscosidade do líquido, e,

L é a espessura do leito.

Para escoamento laminar, a permeabilidade do leito pode ser expressa pela equação de Kozeny (IV):

$$B = \frac{1}{k} \frac{\varepsilon^3}{s^2 (1 - \varepsilon)^2}, \text{ onde}$$

$\varepsilon$  é o índice de vazios no leito = relação entre o volume de vazios e o volume do leito,

k é uma constante, função da porosidade, forma das partículas, orientação das partículas no leito e distribuição granulométrica, e,

s é a área de superfície.

Juntando as duas equações, chega-se a:

$$\text{escoamento através do leito} = \frac{1}{k\mu s^2} \frac{\varepsilon^3 \Delta p}{(1 - \varepsilon)^2 L}$$

O exame desta equação leva às seguintes conclusões:

1 - aumentando o diferencial de pressão através do leito (vácuo de um lado, pressão do outro lado, ou então, ambas as ações combinadas), aumentará o escoamento através do leito;

- 2 - aumentando a espessura do leito, diminuirá o escoamento através do leito;
- 3 - aumentando a viscosidade do líquido, o escoamento através do leito diminuirá;
- 4 - aumentando a área de superfície das partículas do leito, o escoamento através do leito diminuirá.

Em outras palavras: a *velocidade de desaguamento* depende da diferença de pressão através do leito e da resistência que o leito oferece ao escoamento.

Esta resistência cresce conforme aumenta o comprimento dos canais capilares a serem percorridos, conforme o diâmetro destes canais diminui, ou ainda, quando ocorre a colmatação do leito. Usualmente, os problemas de desaguamento são mais evidentes quando existem muitos finos no material que constitui o leito, capazes de bloquear os canais capilares ou de aumentarem a área de superfície do sistema.

Os teóricos da filtragem preferem descrever o mesmo comportamento a partir da equação de Poiseuille adaptada (forma diferencial):

$$\text{fluxo através do leito} = \frac{\Delta p}{\mu [\alpha (W/A) + r]}, \text{ onde}$$

o fluxo é referido à unidade de área,

$\alpha$  é a resistência específica do meio filtrante (tela e suporte),

W é a massa de sólidos (secos) da torta,

r é a resistência do meio filtrante.

$\alpha (W/A) + r$  exprime a soma das resistências da torta e do meio filtrante.

Se se admite que a torta seja incompressível, esta equação torna-se:

$$\text{fluxo total através do leito} = \frac{\text{área} \cdot \Delta p}{\mu \alpha' (W/A)}, \text{ onde}$$

$\alpha'$  é uma constante, função principalmente do tamanho das partículas.

A velocidade do escoamento de líquido resulta ser, portanto, diretamente proporcional à área de filtragem e à pressão aplicada e, inversamente proporcional à viscosidade do líquido e à quantidade de massa na torta. Integrando-se essas equações, chega-se a relações que expressam os fatos de que o volume de filtrado é proporcional ao quadrado da área de filtragem e inversamente proporcional à massa da torta e ao quadrado da espessura da torta.

Este tratamento não consegue considerar o efeito da tela independentemente. Recomenda-se usar um tecido tão aberto quanto possível para reduzir o entupimento, mas tão fechado quanto possível para evitar a passagem das partículas mais finas. A temperatura não é mencionada nas equações, mas, como a viscosidade é função dela, quando o líquido é a água e a temperatura sobe de 20 para 60°C, a vazão dobra. A distribuição granulométrica também não entra no tratamento,

embora saibamos que diminuindo o tamanho das partículas, diminui o fluxo de filtrado e aumenta a umidade da torta.

### fenômenos de superfície

Quando os interstícios entre as partículas estão cheios de água, ocorrem os fenômenos chamados capilares. Ou seja, os canais dentro do leito comportam-se como capilares e a equação da pressão capilar pode ser aplicada:

$$\text{pressão capilar} = \gamma \cos \Theta \frac{2}{r} \quad \text{onde:}$$

$\gamma$  é a tensão superficial, e,  
 $\Theta$  é o ângulo de contacto.

A pressão capilar tende a manter o líquido preso dentro do leito. Para começar a haver escoamento do líquido é necessário que a diferença de pressão através do líquido seja maior que a pressão capilar. O valor da pressão necessária para iniciar o processo é chamado *pressão de entrada* (7, 8). É óbvio que os primeiros capilares a drenar serão aqueles de maior diâmetro. Seguir-se-ão os de diâmetros sequencialmente decrescentes.

No começo do processo todos os capilares estão cheios de água (o leito está encharcado). Esta situação é chamada de *estado capilar*. Conforme o líquido escoar, o leito tem ainda quantidade considerável de água, mas já não está mais encharcado: atinge-se uma situação em que não há mais líquido suficiente para formar um filme contínuo; gotas discretas de água permanecem em alguns locais onde o diâmetro dos canais é menor, situação referida como *estado funicular* (5). Se a diferença de pressão é aumentada mais ainda, toda a água acaba por ser removida, *exceto as moléculas de água adsorvidas (física ou quimicamente) na superfície das partículas sólidas*.

Esta situação significa que *existe um limite para a remoção mecânica de umidade de um leito sólido*. Remoção adicional de água exigirá o uso da secagem. Mais importante ainda: *esta água remanescente não é mais uma fase líquida, mas está num estado sólido* - água de solvatação, cobrindo a superfície das partículas. Este estado é chamado na literatura de *estado pendular*.

A figura 2 mostra a variação da água contida em um leito em função da pressão aplicada sobre ele (indiferente se é um vácuo ou uma pressão positiva). Ela foi estabelecida por Versluys, em 1917, mas somente em 1976 Nicol (8) relacionou-a aos tres estados descritos acima.

### AÇÃO DOS PRODUTOS QUÍMICOS

A remoção da água capilar é usualmente fácil, mas pode tornar-se difícil quando os diâmetros dos espaços entre as partículas (capilares) forem pequenos. A expressão da pressão capilar sugere o modo de enfrentar o problema: a primeira idéia é *diminuir o valor da pressão de entrada*, o que pode ser conseguido via

diminuição da tensão superficial do líquido a ser drenado. O aquecimento da água mediante a injeção de vapor super-aquecido, nos instantes finais do ciclo de filtração, foi usado para minérios de ferro, no passado. O uso de tenso-ativos é outra maneira de fazê-lo.

Quando na torta existem finos que colmatam os canais, é necessário *agregá-los às partículas maiores*, de modo a retirá-los do percurso da água. Isto pode ser feito com coagulantes e parece ser efetivo na remoção tanto da água capilar como da água funicular. O uso de floculantes também resulta numa diminuição da área de superfície.

Permanece entretanto o problema da água pendular. Como se trata de *água adsorvida à superfície* das partículas, as condições para uma remoção bem sucedida dependerão de se conseguir *mudar as propriedades destas superfícies*. Isto pode ser conseguido pela introdução de surfactantes que tornem estas partículas hidrofóbicas, isto é, repelentes à água.

O potencial para o uso destes produtos, entretanto é maior, pois eles passarão a competir com a água pela superfície das partículas. Isto é, conforme sejam adsorvidos, expulsam a água da superfície. Isto implica em que:

1 - *existe a possibilidade teórica de reduzir a umidade abaixo do valor correspondente ao estado pendular*, mediante meios exclusivamente mecânicos.

2 - se o surfactante adsorve na superfície das partículas e as torna hidrofóbicas, *ele as previne contra um molhamento ulterior*.

Silverblatt e Dahlstrom, em 1954, fizeram as primeiras tentativas neste sentido, procurando desaguar tortas problemáticas de carvão americano fino via filtração a vácuo (9). Usaram produtos químicos para mudar a viscosidade e a tensão superficial da água e concluíram que a redução de viscosidade fora mais efetiva.

Nicol, em 1976 (7) estudou o efeito de floculantes nas razões de espessamento e de filtração e o efeito de tensoativos na umidade final de tortas de carvão. Os floculantes levaram a razões de espessamento excelentes, a razões de filtração mais baixas e a tortas mais úmidas. Os surfactantes levaram a umidades finais menores.

Isto pode ser interpretado porque os floculantes - por definição - têm um peso molecular elevado e um número grande de grupos polares por molécula de monômero. Os grupos polares orientam a molécula na direção da água e retêm moléculas desta, independentemente da presença de surfactantes. Os coagulantes agem sobre o potencial eletrocinético (potencial  $\zeta$ ) e fazem as partículas ficarem mais próximas umas das outras, obrigando a água a sair de entre elas. Os floculantes, especialmente os de cadeia longa, fazem flocos soltos, com água aprisionada dentro. Por isto são efetivos no espessamento - mas não na filtração ou drenagem.

A compreensão global deste comportamento foi estabelecida por Stroh e Stahl (4), em 1991. Eles estudaram o mecanismo da ação de surfactantes sobre o desagramento e explicaram como estes produtos contribuem para abaixar a umidade de tortas de filtração. Eles estudaram diferentes alcoois sobre um leito de lascas de

vidro e verificaram que a pressão de entrada dinâmica (depois que o escoamento da água começa) era muito próximo da pressão de entrada estática (antes do escoamento começar) quando a concentração dos surfactantes estava próxima da concentração micelar crítica (CMC). A explicação deste comportamento é que a superfície líquida dentro dos poros forma um menisco e este aumenta durante o desaguamento, conforme mostrado na figura 3. Se não existem moléculas em número suficiente, o número de moléculas por unidade de área diminuirá, aumentando assim a tensão superficial dinâmica.

A diminuição da pressão capilar dinâmica para concentrações em torno da CMC pode ser explicada pela dissolução espontânea das micelas e subsequente migração das moléculas na direção da superfície.

Trabalhando com tortas de carvão, eles verificaram que, para uma espessura de torta constante o tempo de formação era sempre o mesmo, a despeito da adição de surfactantes. A umidade variou e mostrou uma redução significativa para concentrações em torno da CMC. A explicação aventada é mostrada na figura 4: em concentrações inferiores à CMC, as moléculas de surfactante orientar-se-iam como mostrado no lado esquerdo da figura, com a porção polar voltada para a fase líquida. As cargas elétricas da porção polar retêm um número maior de moléculas de água. Acima da CMC, elas se dispõem conforme mostrado na parte direita da mesma figura, com a porção molecular voltada para a fase líquida e assim tornando a superfície hidrofóbica.

## APLICAÇÕES

Os Autores começaram a se preocupar com o problema a partir de 1992, com uma consulta da Ferrominera Orinoco, da Venezuela.

Em 1993, em conjunto com a Hoechst brasileira, estudaram as possibilidades de redução da umidade do sinter feed de Carajás. Em 1994, a partir do sucesso do trabalho anterior, fizeram trabalho análogo para a bauxita de Porto Trombetas (2, 3). A maneira de trabalhar era o ensaio de desaguamento in natura e com o uso de produtos comerciais da Hoechst. A partir dos melhores resultados, as cadeias moleculares destes produtos eram verificadas e tentava-se modificá-las de modo a melhorar os resultados obtidos. Isto foi feito em etapas sucessivas. Eventualmente eram verificados efeitos indesejados como a ação espumante do produto e isto tinha que ser desfeito. Outrossim, o custo dos produtos químicos foi sempre monitorado, de modo a viabilizar o resultado industrial.

Para Carajás, a Hoechst desenvolveu sucessivamente 120 produtos, buscando o melhor resultado técnico e econômico. Os resultados finais de drenagem em pilha e durante o manuseio foram:

	umidade final (%)		
	após drenagem	após 17 h na pilha	após 24 h na pilha
sem produto químico	12,0	8,9	7,0
TF-110 (ca. 100 g/t)	10,7	7,7	5,9

O aspecto mais interessante evidenciado pelo trabalho experimental foi o de que a ação hidrofóbica é tão efetiva que, após o desaguamento, se houver um novo encharcamento, por exemplo, por uma chuva, *a umidade final após a segunda drenagem pode ser menor que a anterior*. Isto indica que água pendular adicional pode ser removida.

Para a bauxita fina da Mineração Rio do Norte foi seguido o mesmo procedimento de ir testando os produtos químicos, inicialmente os de linha comercial, e adaptando-os conforme os resultados experimentais indicassem. O interesse aqui era a filtragem das frações -14 + 150# e -150 + 400#. 31 produtos diferentes foram desenvolvidos e estudados. Em escala de laboratório obtiveram-se reduções de umidade de 17 para 8,7 %. Em ensaio industrial, os resultados, embora satisfatórios, foram mais modestos: 17,6 para 13,6 %, com um consumo de 150 g/t.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - LEAL FILHO, L.S.; CHAVES, A.P.; PEREIRA, L.G.E. Aspectos teóricos da filtragem e do desaguamento. In: CHAVES, A.P. *Teoria e prática do tratamento de minérios*. cap. 8, Editora Signus, São Paulo, 1996. p. 416-24.
- 2 - PEREIRA, L.G.E.; LEAL FILHO, L.S.; CHAVES, A.P. Análise da viabilidade técnica da redução da umidade da bauxita da MRN via surfactantes. CONGRESSO ITALO-BRASILIANO D'INGEGNERIA MINERARIA, 3, Verona, 1994. *Annals*, Cagliari, Associazione Nazionale Ingegneri Minerari, 1994, p. 231-7.
- 3 - CHAVES, A.P.; LEAL FILHO, L.S. The use of chemicals to improve dewatering of ore concentrates. SYMPOSIUM ENTWÄSSERUNG FEINSTKÖRNIGER FESTOFFE, Aachen, 1995. *Proceedings*. RWTH Aachen, Aachen, 1995, paper 19.
- 4 - STROH, G.; STAHL, W. Basics of surfactant aided dewatering in mineral processing. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 17, Dresden, 1991. *Preprints*. Freiberg, Polygraphischer Bereich, 1991, v. 3, p. 287-300.
- 5 - COULSON, J.M.; RICHARDSON, J.F. Flow of fluids through granular beds and pocked columns. *Chemical engineering*, McGraw Hill, New York, 1954, p. 387-413.
- 6 - CLEMENT, M.; BONJER, J. Investigation on mineral surfaces for improving the dewatering of slimes with polymer flocculants. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 11, Cagliari, 1975. *Proceedings*. Cagliari, Istituto di Arte Mineraria, 1975, p. 271-95.
- 7 - NICOL, S.K.; DAY, J.C.; SWANSON, A.R. Oil assisted dewatering of fine coal. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FINE PARTICLES PROCESSING,

- Las Vegas, 1980. *Fine particles processing: proceedings*. New York, Time, 1980, v. 2, ch. 83, p. 1661-75.
- 8 - NICOL, S.K. The effect of surfactants on the dewatering of fine coal. *Proceedings, Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, nr. 260, p. 37-44, Dec. 76.
- 9 - SILVERBLATT, C.E.; DAHLSTROM, D.A. Moisture content of a fine-coal filter cake: effect of viscosity and surface tension. *Industrial and engineering chemistry*, v. 46, nr. 6, p.1201-7, Jun. 54.

## THE USE OF CHEMICALS TO IMPROVE DEWATERING OF ORE CONCENTRATES

Laurindo de Salles Leal Filho  
Arthur Pinto Chaves

### Abstract

This paper reviews theoretical aspects concerning the mechanical dewatering of ores in piles, screens, centrifuges and filters. Quantitative treatment is given to the matter as well as is described the way water rests on particles' surface. This is the basis for the discussion of how chemicals can improve dewatering.

Such chemicals act in three ways: first one is by decreasing the water surface tension; second one is by decreasing water viscosity, which acts in the same way. Finally, it is possible to render the ore surface water repellent, what yields the best results.

As a conclusion, experience with the dewatering of Brazilian ores is described.

*key words: mechanical dewatering, dewatering aids, mining chemicals.*

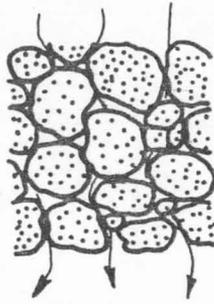


Figura 1: modelo reológico de um leito de partículas

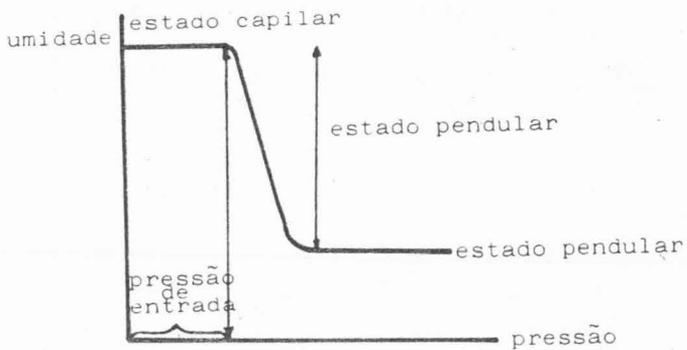


Figura 2: representação de Nicol dos tres estados da água

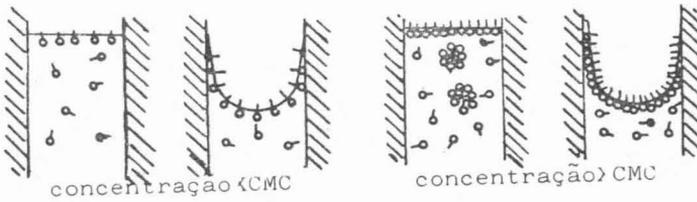


Figura 3: modelo de desaguardamento de Stroh e Stahl

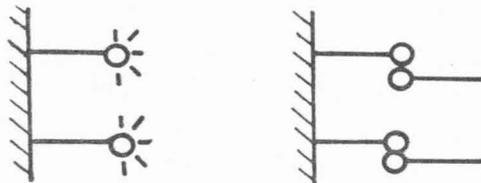


Figura 4: orientação dos dipolos em monocamadas e micelas

