

ASPECTOS REOLÓGICOS DE POLPAS EM SEDIMENTAÇÃO¹

José Aurélio Medeiros da Luz²

Resumo

A sedimentação é fenômeno crucial nas operações de industriais de processamento de sistemas particulados. Dentro desse contexto, o presente trabalho teve por objetivo estudar a sedimentação de partículas de minerais, em especial durante o espessamento, buscando-se a quantificação do impacto das mudanças dinâmicas de concentração volumétrica de partículas sólidas com morfologia arbitrária. A determinação de equações de sedimentação de partículas em polpas foi realizada a partir de ensaios em bancada. O programa de análise estatística utilizado foi o EasyPlot for Windows, o qual possibilita a adoção arbitrária do tipo de curva regressional, a partir de análise matemática com argumentação heurística. O presente trabalho resultou em desenvolvimento de equações que permitem ter previsibilidade do processo de sedimentação em polpas, constituindo-se excelente ferramenta para o dimensionamento e a simulação de equipamentos como espessadores, decantadores, classificadores e elutriadores, aplicáveis em diversos setores da indústria.

Palavras-chave: Reologia; Sedimentação; Sistemas particulados.

RHEOLOGICAL FEATURES OF PULPS UNDER SETTLING

Abstract

Settling plays a very important role in particulate system processing. So, this paper aims to study mineral particle settling, especially in thickening operation and was searched quantifying the dynamical changes in settling rate by volumetric concentration changes for particles displaying arbitrary shape. The determination of equation for settling rate of mineral pulps was done after bench tests according to usual procedure. The software used for data treatment was EasyPlot for Windows, which permits arbitrary selection of equations. This work has reached success in equation development for settling process, creating an useful tool for sizing and simulation of equipment like thickeners, clarifiers, hydrosizers in several industrial sectors.

Key words: Rheology; Settling; Particulate system.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia de Minas – Escola de Minas, UFOP.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e Objetivos

Sistemas particulados são ubíquos no âmbito da engenharia, por exemplo: na mineração, no beneficiamento de bens minerais, na química industrial, na metalurgia e na ciência dos materiais. Apesar da simplicidade aparente de tais sistemas particulados, o comportamento real destes materiais é complexo, compreendendo, muitas vezes, propriedades híbridas entre sólido e do fluido. Um exemplo particular disso são as polpas minerais, as quais exibem comumente comportamento reológico não newtoniano.

Dentre os fenômenos exibidos pelos sistemas particulados expandidos (nos quais as partículas exibem sensíveis mobilidade e distanciamento mútuo), a sedimentação é fenômeno crucial nas operações de industriais de processamento de sistemas particulados.

Dentro desse contexto, o presente trabalho teve por objetivo estudar a sedimentação de partículas de minerais, em especial durante o espessamento, buscando-se a quantificação do impacto das mudanças dinâmicas de concentração volumétrica de partículas sólidas com morfologia arbitrária.

1.2 Revisão da Literatura

O escoamento de material granular depende de parâmetros, como: rugosidade e tensões na parede confinante, geometria do conduto de escoamento, taxa de escoamento, concentração volumétrica, forma e tamanho das partículas, ângulo de atrito interno do sistema particulado, interação com o fluido intersticial (referido geralmente como meio), viscosidade do meio, entre outros fatores.

Partículas rígidas, esféricas e isoladas ($c_v \cong 0$), imersas em um meio viscoso e submetidas a um campo de força externo (no caso típico, o gravitacional), após um estágio inicial de aceleração decrescente, desenvolvem uma velocidade terminal de equilíbrio. Essa velocidade terminal de sedimentação, a mesma pode ser expressa genericamente por:

$$v_t(d_p, c_v = 0) = \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{(\rho_p - \rho_f) \times d_p \times g}{\rho_f \times C_{arr}}} \quad (1)$$

onde:

v_t – a velocidade de sedimentação [m/s]; d_p – diâmetro da partícula [m]; c_v – concentração volumétrica de partículas [-]; g – aceleração da gravidade local [m/s²]; ρ_p – massa específica da partícula [kg/m³]; ρ_f – massa específica do fluido [kg/m³]; η – viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s]; C_{arr} – coeficiente de arraste fluidodinâmico [-].

O coeficiente de arraste depende do regime fluidodinâmico, sendo que, na região de interesse do tratamento de minérios:

- Regime de Stokes (baseada na premissa de que a resistência ao movimento é proporcional à velocidade): $C_{arr} = 24/Re$ (para $Re < 0,2$)
- Regime de Newton (em que a resistência ao movimento é proporcional ao quadrado velocidade): $C_{arr} = 0,44$ (para $1.000 < Re < 200.000$).

- Regime transicional: há muitíssimas tentativas de descrever o comportamento do coeficiente de arraste fluidodinâmico nesse intervalo (entre os tramos de Stokes e de Newton). Podendo-se citar, como boas quantificações as seguintes:⁽¹⁻⁴⁾
 - Equação de Abraham:

$$C_{arr} = 0,284 \times \left(1 + \frac{9,06}{\sqrt{\text{Re}}} \right)^2 \quad (2)$$

- Equação de Ogawa:

$$C_{arr} = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}} + 0,4 \quad (3)$$

- Equação de Schiller-Naumann:

$$C_{arr} = \frac{24}{\text{Re}} \times (1 + 0,15 \times \text{Re}^{0,687}) \quad (4)$$

- Equação de Turton-Levenspiel:

$$C_{arr} = \frac{24}{\text{Re}} \times (1 + 0,173 \times \text{Re}^{0,657}) + \frac{0,413}{1 + 16300 \times \text{Re}^{-1,09}} \quad (5)$$

Registre-se, a título de completude, que o número de Reynolds é definido, neste contexto, por:

$$\text{Re} = \frac{\text{massa específica do fluido} \times \text{velocidade} \times \text{diâmetro da partícula}}{\text{viscosidade dinâmica do fluido}} = \frac{\rho_f \times v \times d_p}{\eta} \quad (6)$$

Representa, como se vê, a menos de uma constante, a razão entre as forças inerciais e viscosas intervenientes no sistema fluidodinâmico. A figura clássica que ilustra a aderência estatística das equações anteriores aos dados experimentais de diversos pesquisadores.

Quando o regime é laminar, a velocidade da partícula esférica isolada é dada pela equação de Stokes:

$$v = \frac{d^2 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_f)}{18 \cdot \eta} \quad (7)$$

As premissas da lei de Stokes são: 1) meio contínuo e infinito (sem efeito de paredes); 2) a partícula não é tão pequena como as moléculas; 3) partículas isoladas; 4) partículas rígidas (sem convecção interna); 5) não existem interações eletrostáticas entre as partículas.

Quando o regime é turbulento, a velocidade da partícula esférica isolada é dada pela equação de Newton. (baseada na premissa de que a resistência ao movimento é proporcional ao quadrado da velocidade):

$$v = \left[3,03.d.g. \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Têm sido propostas inúmeras equações para o regime do escoamento intermediário, as quais, entretanto, além da complexidade, acabam por apresentar problemas de aderência com os dados experimentais quando se considera toda a faixa entre os regimes de Stokes e de aquele de turbulência totalmente desenvolvida.

As equações acima consideradas são para partículas esféricas isoladas em meio infinito e contínuo. Quando as partículas não estão isoladas (isto é, depositam-se segundo uma concentração volumétrica, c_v), a interação entre as linhas de fluxo resultantes do movimento de cada uma delas gera uma certa turbulência devido ao fluxo intersticial, a qual leva ao desvio acentuado nas equações precedentes, sendo necessária a aplicação de um fator de correção do tipo:

$$v_s = v_0 \cdot f(c_v) \quad (9)$$

onde: v_s é a velocidade de sedimentação; v_0 é a velocidade da partícula isolada; $f(c_v)$ é uma função da concentração volumétrica. A função de correção devido à concentração volumétrica de partículas pode ser expressa por equação disponível na literatura, como a de Steinour, de van Rijn, de Merkel e de Gaudin. Dentre as diversas equações existentes para tal correção, citam-se:

- Happel-Epstein:⁽⁵⁾

$$f(c_v) = \frac{1}{1 + 1,5 \times \sqrt[3]{c_v}} \quad (10)$$

- Gaudin:

$$f(c_v) = \left(1 - c_v^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (1 - c_v) \cdot (1 - 0,25 \cdot c_v) \quad (11)$$

- Steinour:

$$f(c_v) = (1 - c_v)^2 \cdot e^{(-4,1908c_v)} \quad (12)$$

As equações precedentes (especialmente as duas últimas) são muito utilizadas em tecnologia mineral (assim como as equações de Richardson-Zaki). As equações para determinação das velocidades terminais para partículas não esféricas devem ser afetadas de coeficiente de correção morfológica (também multiplicativo), o qual não foi quantificado com rigor até o presente. As mais correções usualmente empregadas são os coeficientes ($f(\psi)$) baseados na esfericidade, como aqueles devidos a Pettyjohn e Christiansen:^(1,6)

- No regime de Stokes: $f(\psi)_s = 0,843 \times \log\left(\frac{\psi}{0,065}\right)$ (13)

- No regime de Newton: $f(\psi)_N = \sqrt{\frac{0,43}{5,31 - 4,88 \times \psi}}$ (14)

- No regime transicional: $f(\psi)_{tran} = [f(\psi)_S - f(\psi)_N] \times \frac{1000 - Re}{1000 - 0,2} + f(\psi)_N$ (15)

Note-se, que para o regime transicional ou intermediário, preconiza-se, por falta de quantificação mais robusta, a interpolação linear proposta por Geldart.⁽⁶⁾

A esfericidade, ψ , é a razão entre a área superficial de uma esfera de volume equivalente ao da partícula e a área superficial da partícula (por exemplo, para um cubo a esfericidade é 0,806). Já Camenen^(7,8) utiliza preferencialmente certo *roundness factor*, P, (coeficiente de arredondamento, o qual é “uma medida da variação da curvatura ao longo da superfície do grão”) e o chamado coeficiente morfológico de Corey, C_f , o qual é dado por:

$$C_f = \frac{c}{\sqrt{a \times b}} \quad (16)$$

Na formula precedente, a, b e c são as dimensões típicas da partícula (arestas do paralelepípedo envolvente), com: $a \geq b \geq c$. Assim, para esfera, tem-se $C_f = 1$ e, para uma plaqueta de muscovita, C_f , tende a zero. Já o coeficiente de arredondamento é um tanto intuitivo e formas clássicas de secção possuem os seguintes valores: para círculo, $P = 6$; para hexágono, $P = 4$; para quadrado, $P = 2$; e para polígono estrelado, tem-se que: $P = 0$.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento metodológico usual para um serviço da natureza do presente trabalho foi seguido. Dados de velocidade de sedimentação de partículas em vários regimes de sedimentação disponíveis na literatura foram utilizados para estudo analítico da velocidade de sedimentação em função da concentração de sólidos. Ensaio de sedimentação em proveta foram executados em laboratório, à temperatura média de 20°C, os quais serviram de base experimental para o estudo da velocidade de descensão da interface polpa/clarificado.

Ensaio subsidiários de estimativa indireta dos parâmetros reológico da polpa (via análise da velocidade de ascensão de esfera de massa específica controlada) foram feitos para a determinação de tensão inicial de cisalhamento de fluido não newtoniano. Foi obtida por método expedito a seguir descrito. Esfera oca de plástico, com diâmetro de 29,8 mm, era parcialmente preenchida com salmoura (por meio de seringa) para ajuste de sua massa específica e, conseqüentemente, seu empuxo arquimediano. A seguir a esfera era mergulhada na proveta (de diâmetro igual a 48 mm) contendo a polpa no início da sedimentação. A esfera só emergia se a resultante do peso menos o empuxo superavam o valor da tensão de cisalhamento inicial, τ_0 . O efeito de parede era quantificado e levado em conta nos cálculos.

O tratamento matemático dos dados foi feito com auxílio do programa computacional de análise estatística de dados gráficos *EasyPlot*, versão 4.0.4, desenvolvido por S. Karon, da *Spiral Software* (www.spiralsoftware.com).

O principal aspecto da paleta de ajuste estatístico de curvas do programa utilizado é que a essa ferramenta possibilita a adoção arbitrária do tipo de curva. O operador pode selecionar o tipo de curva de ajuste, a partir de uma análise matemática da nuvem de dados, em especial com a introdução de argumentação

heurística, baseada no conhecimento do sistema real. Naturalmente, ao menos um dos coeficientes da equação digitada deverá permanecer indeterminado para que o algoritmo de regressão não-linear possa trabalhar. Esse algoritmo usa um filtro de Marquardt-Levenberg (o qual, ao contrário do algoritmo de busca por simplex descendente, permite a estimação das incertezas associadas aos valores de regressão).

3 RESULTADOS

Os valores consignados pela IUPAC para viscosidade dinâmica da água líquida (em pascal-segundo, Pa.s), na faixa de 0°C a 100°C, permitiram a obtenção de sua expressão em função da temperatura, T (em kelvins). A qual é dada a seguir:

$$\eta_{H_2O} = a \times \exp(-b \times T^c) + d \quad (17)$$

onde: a = 0,001558; b = 0,044887; c = 0,91568; d = 0,000234.

A estimativa segundo a expressão acima dará desvio máximo de 6,9 μ Pa.s relativamente aos dados tabelados.

No que concerne à correção devido à concentração mássica de sólidos, foi obtida a seguinte expressão alternativa, a qual dá bons resultados e é dada por:

$$f(c_v) = (1 - c_v^{0,919})^{4,861} \quad (18)$$

Note-se que a equação precedente aplica-se, em princípio, a regime de sedimentação discreta, mas não inclui os efeitos de agregação de partículas, comumente ocorrentes na prática, quando se trata de decantação de finos de constituição diversa (ou de mesma constituição em pH próximo do ponto isoelétrico, ou em presença de agregantes). Nesse caso, a velocidade terminal apresenta aumento com a evolução dos fenômenos agregativos (coagulação e/ou floculação). A cinética de agregação condicionará o diâmetro efetivo dos agregados, devendo ser levada em conta na expressão da velocidade de sedimentação instantânea.

Essa dinâmica de aumento do diâmetro efetivo com a agregação pode ser avaliada na Figura 1, onde a presença de polímero (10 ppm de SuperFloc A-150, da Cytec) foi bem eficaz para sedimentação de ultrafino de carvão mineral em efluente pluvial. Partículas similares de carvão, isoladas em água no pH 7,0, apresentam-se grandemente dispersas. No ensaio de proveta correspondente a essa condição não se observa a formação de interface nítida nem mesmo após 24 horas de sedimentação.



Figura 1. Regime de sedimentação discreta de flocos de carvão em simulação de efluente pluvial. ⁽⁹⁾

Para as condições reinantes em espessamento a concentração volumétrica de partículas é grande o que faz com que haja regime de sedimentação por zona, com a mútua interferência das partículas na sedimentação. Assim as equações para sedimentação discreta perdem sua validade.

Isso pode ser apreciado nos ensaios de sedimentação em provetas para dimensionamento de espessadores. O tratamento de nuvem experimental de pontos de numerosos ensaios (finos de manganês, hidróxido de alumínio, lamas argilosas de hidrociclones de usinas de beneficiamento densitário de minerais pesados, finos de minério de ferro, etc.) permitiu o estabelecimento da seguinte equação descritora da evolução da cota (z) da interface entre o líquido clarificado e a polpa turva, em provetas:

$$z(t) = (z_0 - z_\infty) \times \left(1 - \frac{t^a}{t^a + b^a} \right) + z_\infty \quad (19)$$

onde: $z_0(t)$ – cota da interface clarificada no instante t [m]; $z_\infty(t)$ – cota de equilíbrio da interface clarificada no instante $t = \infty$ [m].

Já a e b são os parâmetros do modelo, e dependem das características das partículas e do ambiente físico-químico e químico da polpa. O parâmetro a é adimensional, enquanto b tem dimensão de tempo representa o intervalo temporal até que a interface atinja a cota em que tenha alcançado 50% de seu percurso evolutivo (similar ao conceito de meia-vida, na física e química).

Como se vê, a equação de evolução da cota da interface é uma modificação da equação sigmoideal de Hill. A velocidade de sedimentação em zona, em ensaios de proveta é obtida pela sua derivada em relação ao tempo de repouso, a qual resulta a expressão a seguir:

$$v(t) = \frac{dz(t)}{dt} = z'(t) = -(z_0 - z_\infty) \times \left[\frac{a \times b^a \times t^{a-1}}{(t^a + b^a)^2} \right] \quad (20)$$

O sinal negativo da velocidade de sedimentação é porque se trata de descensão da interface com o tempo. Percebe-se que há frenagem devida ao aumento da concentração de sólidos nos horizontes inferiores, a qual pode ser quantificada pela equação de aceleração da cota da interface clarificada:

$$a(t) = z''(t) = - \frac{(z_0 - z_\infty) \times a \times b^a \times t^{a-2} \times [(a-1) \times b^a - (a+1) \times t^a]}{(t^a + b^a)^3} \quad (21)$$

A título de ilustração da aderência estatística da equação proposta a dados experimentais, os valores dos parâmetros e dos coeficientes de correlação são aqui mostrados para o caso de sedimentação de finos provindos da lavagem em tambor de minério de manganês. O minério em questão é oriundo de ambiente de sedimentação química associado a jaspelitos (ligado ao maciço de Urucum, no Estado do Mato Grosso do Sul). A Tabela 1 dá os valores para várias condições de ensaio, ao passo que a Figura 2 ilustra o grau de aderência dos valores teóricos (linhas) aos empíricos (pontos).

Tabela 1. Parâmetros das curvas de regressão de Hill (modificadas).

Condição (reagente a 30 ppm)	Natural (branco)	Labufloc A157 (Hoechst)	Superfloc A150 (Cytec)	Amido de milho	Sulfato de alumínio
Cota inicial (z_0 , em mm)	333,0	342,0	350,0	342,0	340,0
Cota final (z_∞ , em mm)	50,0	102,0	94,0	57,0	56,5
Expoente a	1,3683	1,2952	1,1599	1,2158	1,3684
Parâmetro b	1413,9	30,844	19,471	629,8	1600,7
Coefficiente de correlação (R^2)	99,41%	99,89%	99,74%	99,77%	99,36%

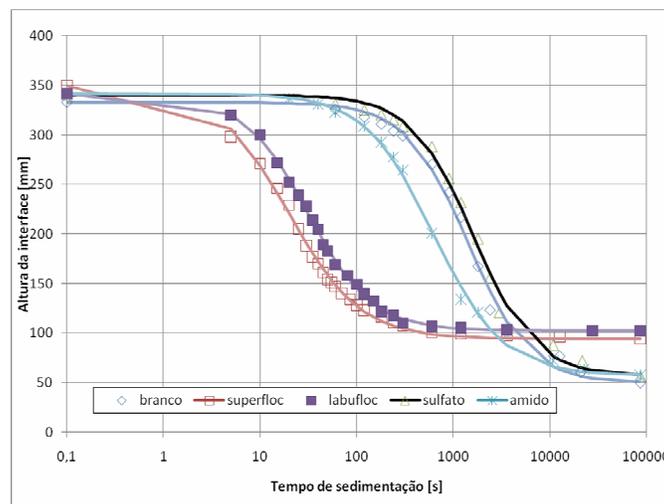


Figura 2. Sedimentação em proveta de finos de minério de manganês.

4 DISCUSSÃO

A comparação entre as curvas da Figura 3 mostra que a equação obtida para quantificação da frenagem da queda das partículas em função de sua concentração

praticamente coincide com a de Steinour. Note-se que a equação devida a Happel e Epstein (assim como as de Einstein, Batchelor, e outros) é aberrante para concentrações usuais em tratamento de minérios. A altas concentrações, a equação 18 pode, em tese, ser igualada à equação da velocidade de abaixamento da interface (equação 20). A partir daí, tendo-se o parâmetro exponencial e a meia-vida, resolver a equação por métodos numéricos, resultando, por exemplo, o valor do diâmetro virtual efetivo do processo de sedimentação.

Fenômenos nitidamente não-newtonianos ocorrem quando a concentração do sistema disperso aumenta. Exemplo são as lamas argilosas oriundas de usina de beneficiamento densitário de areias não litificadas contendo minerais pesados.

Pôde ser verificado comportamento tixotrópico, mesmo em concentrações mássicas de sólidos tão baixas como 9,0%. Aparentemente, a polpa tal-qual, apreende em uma malha tridimensional gelificada partículas maiores (de granulação de areia fina e silte), as quais, sob condições normais se decantariam prontamente. Decorre disso que o espessamento (industrial) fica reduzido a produzir “espessado” com 10% de sólidos e transbordo de 8% (amostragem pontual pelo autor).

Essa estrutura de gel é consequência de micropartículas placoidais de filossilicatos, como as argilas, exibirem cargas elétricas preferenciais: negativas nos planos cristalográficos de tetraedros de sílica (pela formação de silanóis) e positivas nas arestas das plaquetas, onde fica visível o plano de octaedros (“plano da gibbsita”) coordenados por cátions intercalados. Tende a ser formada estrutura prensora de “castelo de cartas”, a qual aprisiona partículas maiores e solvente, mas é instável a solicitações mecânicas.

No exemplo citado, se o pH da lama argilosa é elevado (desde pH 6,8), ao se atingir valores superiores a pH 8,5 há dispersão dos argiláceos e aparente quebra do gel., resultando na imediata deposição na base da proveta de um sedimento siltoso.

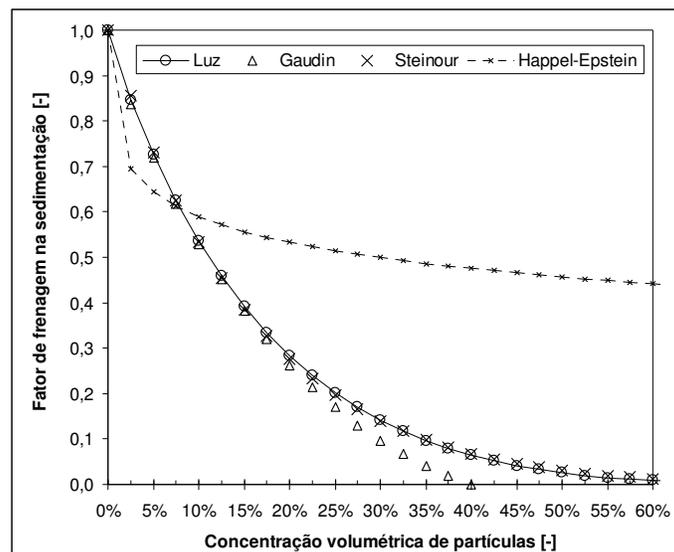


Figura 3. Correção da velocidade terminal devida à concentração do sistema disperso.

Nesses valores elevados de pH entretanto as partículas finas permanecem em suspensão prejudicando grandemente a cinética de sedimentação. Isso posto, para a eficácia do espessamento (em termos de balanço de sólidos) pode se fazer

necessária a adoção de operação em dois estágios: o primeiro, de dispersão para coleta dos sólidos de maior granulação; e o segundo, de floculação e/ou coagulação, para a reversão do efeito de dispersão e conseqüente agregação dos finos e ultrafinos.

A estrutura não newtoniana dessas polpas pode ser inferida visualmente pela formação de crateras na superfície da polpa confinada em proveta, constituindo-se de canalículos preferenciais de drenagem da água, os quais não se colapsam devido a existência de uma tensão de cisalhamento inicial ($\tau_0 > 0$, plástico de Bingham). A Figura 4 ilustra esse caso, mostrando canalículos milimétricos de drenagem.

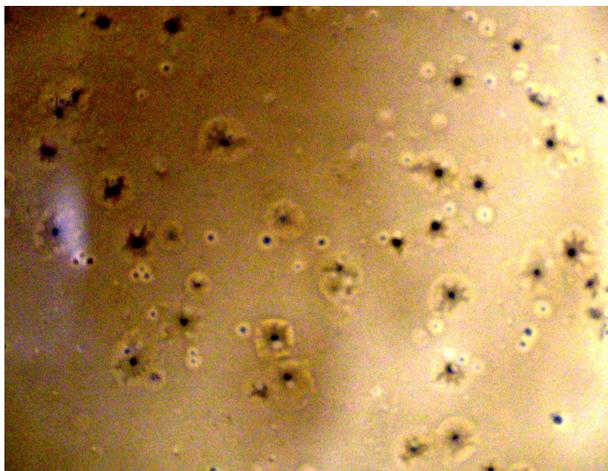


Figura 4. Crateras milimétricas de drenagem de líquido em lama de areia monazítica com sólidos com diâmetro mediano de 271 μm e com concentração mássica de 8,6 % (foto de topo da lama na proveta de 1 litro).

Outro exemplo de fenômeno reológico de caráter não newtoniano foi com polpas de finos de minério de ferro (rejeito de flotação), a alta concentração de sólido (70 % em massa). Tais polpas exibiram resistência inicial ao escoamento ($\tau_0 > 0$). Sua granulação pôde ser descrita por equação de Rosin-Rammler com agudez $n = 1,08$ e diâmetro mediano $d_{50} = 104 \mu\text{m}$ (coeficiente de correlação de 99,51%). Esferas ocas de plástico, parcialmente preenchidas com salmoura, só emergiam se a resultante do peso menos o empuxo superavam o valor de τ_0 (esfera com densidade de 1,09 para polpa com densidade de 2,20).

5 CONCLUSÃO

Percebe-se que a reologia das polpas minerais em sedimentação exhibe complexidade de difícil tratamento quantitativo com abordagem fenomenológica. Entretanto, a abordagem empírica pode suprir ferramentas de projeto valiosas para o engenheiro de processos. Assim preconiza-se neste trabalho o uso das seguintes ferramentas: Equação de viscosidade da água (equação 17); equação de sedimentação sob concentração volumétrica não desprezível (equação 18); equação de evolução da cota da interface de clarificação em ensaio de proveta (equação 19); e a avaliação da tensão inicial de cisalhamento de polpas concentradas por metodologia expedita (no lugar de custosos ensaios reológicos).

Agradecimentos

O autor expressa seu reconhecimento ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), o qual deu suporte ao trabalho aqui realizado, através de bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 ALMENDRA, E. R. *Velocidade de Sedimentação de Sistemas Particulados*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1979. 88 pp.
- 2 KING, P. *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001. 403 pp.
- 3 CLEZAR, C. A. & NOGUEIRA, A. C. R. *Ventilação Industrial*. Florianópolis: UFSC, 1999. 298 pp.
- 4 TOSUM, I. *Modelling in Transport Phenomena: A conceptual Approach*. Amsterdam: Elsevier, 2002. 590 pp.
- 5 DI FELICE, R. Liquid suspensions of single and binary component solid particles—An overview. *China Particuology*. V. 5 (2007); pp: 312–320.
- 6 GELDART, D. Estimation of Basic Particle Properties for Use in Fluid-Particle Process Calculations. *Powder Technology*. Volume 60, n. 1, January 1990, pp: 1-13.
- 7 CAMENEN, Benoît. Simple and General Formula for the Settling Velocity of Particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, February, 2007; pp: 229-233.
- 8 CAMENEN, Benoît. Settling velocity of sediments at high concentrations. Pp: 1-17. Acesso em 10/02/2009. www.lyon.cemagref.fr/hh/hydraulique/scientifiques/camenen/publications/Camenen-Intercoh05.pdf
- 9 LUZ, J. A. M. da. *Sistema de Tratamento de Efluentes do Pátio de Carvão: Ensaios de Simulação e Caracterização Físico-Química dos Efluentes* (relatório: MD-5380-15-P-002). EPC/Alunorte, 2005.