

MOBILIZAÇÃO DE PARTÍCULAS COLOIDAIS EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

J.F. Oliveira e L.P.G. Assis

Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
*e-mail: oliveira@metalmat.ufrj.br

ABSTRACT

Colloidal particles are commonly present in water as clay, metal oxides or organic colloids and can be carriers of toxic metals and organic pollutant compounds. Viruses and bacteria can be considered as a special class of colloidal particles. On the whole colloidal particles represent a problem considering the increasingly stringent standards for drinking water and discharge requirements for wastewater.

In the present paper, the fundamental theories of fine particles deposition onto granular packed-bed filters are discussed and an example of modelling of particulate deposition is presented. The overall removal of colloidal particles in granular filters can be addressed as a two step process. The first is the transport of particulate matter up to the surface of the grain of the filtering medium, which is governed primarily by diffusion and other physical forces. The second step, the attachment, is governed by the surface properties of both the fine particles and the grains forming the medium of the packed bed. The forces controlling the attachment step are dependent on the solution chemistry as well as on the interfacial properties of the media.

Due to similarities between filtration and colloidal particles transport in porous media of underground aquifer, the theory is used in the present paper in the modelling of colloid travel distance as a function of particle diameter for different conditions including grain size of the media, temperature, porosity and flow velocities. In accordance with other results recently found in the literature, the predicted results obtained by modelling are indicative of a specific critical colloid size for longer travel distance.

INTRODUÇÃO

Diversos poluentes orgânicos presentes em aquíferos adsorvem-se em partículas coloidais, que

podem ocorrer pela precipitação de fases supersaturadas ou pela mobilização de fases coloidais existentes (Pennel et al., 1993). A movimentação de colóides pode facilitar o transporte de compostos orgânicos em águas subterrâneas. A adsorção de poluentes orgânicos em colóides é controlada por interações hidrofóbicas cuja extensão pode ser avaliada pelo coeficiente de partição octanol-água e pelo teor de carbono orgânico na fase sólida (Robertson et al., 1984). Para espécies químicas orgânicas iônicas ou ionizáveis, contribuições referentes às interações eletrostáticas são relativamente importantes.

Vários estudos têm sido realizados sobre a mobilização de compostos orgânicos em sedimentos e aquíferos. A deposição de partículas finas sobre a superfície do meio poroso é fortemente influenciada pela força iônica e pelo pH. À luz da teoria de DLVO clássica, o processo de adesão depende das interações entre o meio e as partículas coloidais, resultado do somatório das forças eletrostáticas e de van der Waals. A adição de eletrólito, ou seja o aumento da força iônica, provoca uma compressão da dupla camada elétrica e consequentemente uma redução dos potenciais de superfície do meio poroso bem como das partículas coloidais, reduzindo a barreira de energia para a deposição. A variação do pH para valores próximos do ponto isoelétrico das partículas, também promove a redução das interações eletrostáticas do sistema.

O transporte dos compostos orgânicos hidrofóbicos em aquíferos apresenta frequentemente uma relação direta com a mobilização das partículas finas ao meio poroso. Este transporte vai depender da afinidade físico-química entre estes compostos e as partículas coloidais carreadoras. A contaminação e a subsequente dispersão de poluentes nos aquíferos de água subterrânea envolvendo rochas sedimentares de alta porosidade é um problema preocupante, principalmente nas proximidades de grandes centros urbanos. No entanto, a questão da migração de partículas coloidais é um assunto de grande importância também na área de produção petrolífera, devido ao bloqueio que estas partículas podem acarretar com a sua deposição no leito poroso das rochas.

Estudos em migração e precipitação de partículas coloidais em meio poroso foram realizados por Rosario et al., 1996. Leitos artificiais de caulim e alumina foram embebidos com uma solução contendo tioacetamida e fons ferrosos e aquecidos a 80°C para obter-se a formação de partículas coloidais de FeS com tamanhos inferiores a 1µm. A injeção de água no leito mostrou que a migração das partículas de FeS reduziu a permeabilidade do leito e a injeção de surfatantes restabeleceu a permeabilidade original após a redispersão das partículas coloidais.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A taxa de deposição de partículas coloidais em cada grão coletor (coletor unitário) do leito poroso (Elimelech et al., 1991) seria dada por:

$$I = \pi a_c^2 . U . C . \eta \quad (1)$$

onde:

πa_c^2 = área projetada do fluxo frente ao grão coletor unitário;

U = velocidade do fluxo;

C = concentração de partículas no fluido;

η = eficiência de remoção de partículas finas pelo coletor unitário.

O número de grãos coletores por fatia diferencial de volume do leito, N_c , seria dado por:

$$N_c = \frac{A_c . dz . (1 - f)}{\frac{4}{3} \pi a_c^3} \quad (2)$$

onde:

A_c = área de seção do leito;

dz = espessura diferencial da fatia de leito;

(1-f) = fração volumétrica efetivamente ocupada pelos sólidos (descontada a porosidade);

$\frac{4}{3} \pi a_c^3$ = volume de cada grão coletor unitário.

Portanto, a taxa de deposição global de partículas finas por diferencial de volume do leito seria dada por $N_c \times I$, cujos valores são dados pelas equações (1) e (2), ou seja:

$$\left(\frac{3}{4} (1-f) \frac{A_c}{\pi a_c^3} \right) (\eta U C \pi a_c^2) = \frac{3\eta(1-f)}{4a_c} C U A_c dz$$

No entanto, sendo Q, a taxa de fluxo volumétrico, dada por $Q = U A_c$, com base no balanço de massa (n.º de partículas que se depositam = n.º de partículas que desaparecem da água) podemos escrever:

$$\frac{3\eta(1-f)}{4a_c} C U A_c . dz = -QdC$$

ou ainda, por simplificação:

$$-\frac{3\eta(1-f)}{4a_c} dz = \frac{dC}{C}$$

Esta equação pode ser integrada, considerando-se toda a camada do leito, com as condições de contorno:

$C = C_o$ para $Z = 0$ (topo) e

$C = C_L$ para $Z = L_T$ (base)

Podemos, então, escrever:

$$\int_{C_o}^{C_L} \frac{dC}{C} = -\frac{3\eta(1-f)}{4a_c} \int_0^{L_T} dz$$

e portanto:

$$\ln \frac{C_L}{C_o} = \frac{3\eta(1-f)}{4a_c} L_T \quad (3)$$

onde

L_T = distância máxima de percurso de partículas coloidais em um sedimento.

Assim, para o cálculo da distância que pode ser percorrida por uma determinada partícula coloidal em um leito subterrâneo de rocha sedimentar, teríamos:

$$L_T = -\ln \frac{C_L}{C_o} \cdot \frac{4a_c}{3(1-f)\eta} \quad (4)$$

Nesta dedução não foram levadas em consideração as interações devidas a uma eventual repulsão de dupla camada elétrica. É comum introduzir-se um parâmetro (α) responsável pelas interações físico-químicas, tal que:

$$\eta = \alpha . \eta_o$$

Para o cálculo de η_o , uma expressão foi desenvolvida por Yao et al., 1971:

$$\eta_o = \eta_D + \eta_I + \eta_G \quad , \text{ onde}$$

$$\eta_D = 4.0A_s^{\frac{1}{3}} \left(\frac{D_\infty}{Ud_c} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ (difusão)}$$

$$\eta_I = \frac{3}{2}A_s \left(\frac{d_p}{d_c} \right)^2 \text{ (intercepção)}$$

$$\eta_G = \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu U} g d_p^2 \text{ (gravidade)}$$

onde: A_s = parâmetro de fluxo, decorrente do efeito que os demais grãos coletores individuais acarretam ao fluxo sobre um determinado coletor.

Uma expressão semelhante à de Yao et al.,1971, com algumas ajustes adicionais, foi desenvolvida por Rajagopalan et al., 1982, para o cálculo de η_0 , a qual será apresentada a seguir.

MODELAMENTO DA MIGRAÇÃO DE COLÓIDES

No exemplo a seguir para o cálculo de L_t (distância máxima de percurso de partículas coloidais em um sedimento), alguns parâmetros foram arbitrados como razoáveis.

Assim,

$$L = -\ln \left(\frac{C_L}{C_0} \right) \frac{4a_c}{3(1-f)\alpha\eta_0} \quad (5)$$

onde:

$C_L/C_0 = 0,001$ (99,9% de colóides depositados);

$a_c = 0,15\text{mm}$ (valor arbitrado para o raio da partícula do leito);

$f = 0,37$ (porosidade arbitrada);

$\alpha = 1,0$ (na ausência de repulsão de dupla camada elétrica)

O parâmetro η_0 pode ser calculado pela equação de Rajagopalan et al., 1982, dada por:

$$\eta_0 = 4.0A_s^{\frac{1}{3}} \left(\frac{D_\infty}{Ud_c} \right)^{\frac{2}{3}} + A_s N_{LD}^{\frac{1}{8}} R^{\frac{15}{8}} + 3.38 \times 10^{-3} A_s N_G^{1,2} R^{-0,4} \quad (6)$$

onde A_s (parâmetro de fluxo, função da porosidade) é dado por:

$$A_s = \frac{2(1-p^5)}{2-3p+3p^5-2p^6}, \text{ sendo}$$

$$p = (1-f)^{1/3}$$

$$D_\infty = \frac{kT}{6\pi a_c \mu} \text{ (coeficiente de difusão, Eq. de}$$

Stokes-Einstein)

e ainda,

U = velocidade do meio circulante; d_c = diâmetro de grão coletor;

$$N_{LD} = \frac{4A}{9\pi\mu U d_p^2},$$

onde:

A = constante de Hamaker (1×10^{-20} J);

d_p = diâmetro de partícula coloidal;

d_c = diâmetro do grão coletor;

μ = viscosidade do meio.

$$R = \frac{d_p}{d_c};$$

$$N_G = \frac{(\rho_p - \rho) g d_p^2}{18\mu U} \text{ (Stokes)}$$

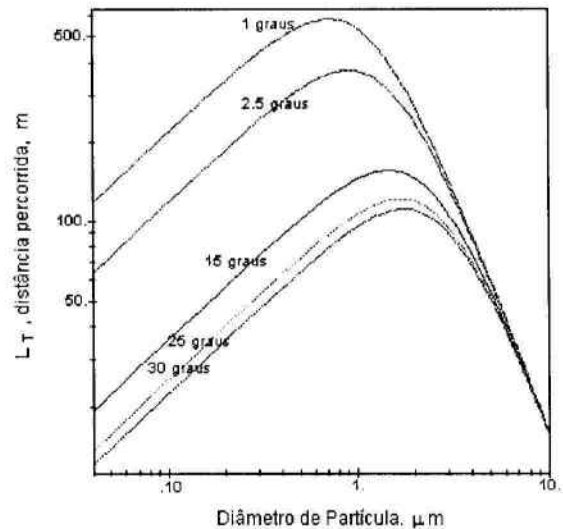


Figura 1 - Resultados de aplicação do modelo descrito. Distância percorrida pelas partículas coloidais em função do diâmetro da partícula para várias temperaturas (1, 2, 5, 15, 25 e 30°C). Velocidade limite = 0,5m/d; parâmetro de interação físico-química (α) = 0,001, raio do coletor $a_c=0,15\text{mm}$; porosidade = 0,37; densidade da partícula $\rho_p=1,05\text{g cm}^{-3}$; constante de Hamaker $A=1 \times 10^{-20}$ J.

Desta forma, tem-se todos os dados para determinação de η_0 e subsequente cálculo de L_T , a distância máxima de transporte das partículas coloidais.

Assim, para uma temperatura de 20°C e considerando-se os parâmetros mencionados na Figura 1, a expressão para o cálculo de L_T seria dada por:

$$L_T = 2,192938184 \times \frac{1}{A + B + C}$$

onde:

$$A = 1,01771276 \times 10^{-2} \left(\frac{1}{\pi \cdot d_p} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$B = 8,861750431 \times 10^{-4} \cdot \left(\frac{1}{d_p^2} \right)^{\frac{1}{8}} \cdot d_p^{\frac{15}{8}}$$

$$C = 1,011797682 \times 10^{-1} \times \frac{(d_p^2)^{1.2}}{d_p^4}$$

Com base no modelamento foram obtidos os resultados apresentados na Figura 1. Observa-se que existe, portanto, uma previsão de deslocamento máximo para partículas com tamanho da ordem de 1µm. Estes resultados estão em consonância com dados anteriormente publicados (Elimelech et al., 1995).

CONCLUSÕES

Os aspectos teóricos apresentados relativos à deposição de partículas finas em um leito poroso apresentado mostram que os parâmetros que mais afetam a distância percorrida pelas partículas coloidais são a porosidade, a eficácia de remoção de um único coletor η_0 e o parâmetro de interações físico-químicas α . No caso de η_0 , a velocidade do meio é um parâmetro que desempenha um papel importante no cálculo desse valor. O modelamento revela ainda uma tendência de diminuição do percurso das partículas finas com o aumento da temperatura, o que se justifica pela influência do aumento de temperatura no coeficiente de difusão (Eq. de Stokes-Einstein), acarretando um aumento no valor de η_0 e, conseqüentemente, uma diminuição na distância máxima percorrida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Elimelech, M., *J. Colloid Interface Sci.*, 146 (1991), 337.
- Elimelech, M., Gregory, J., Jia, X. and Williams, R. A., *Particle Deposition and Aggregation*, Butterworth (1995).
- Pennel, K.D.; Abriola, L.M., Weber Jr, W.J., *Environ. Sci. Technol.*, 27 (1993), 496.
- Robertson, W.D.; Barker, J.F.; Lebeau, Y.; Marcoux, S., *Ground Water*, 22 (1984), 191.
- Rosario, F.; Louvisse, A.M.T.; Saraiva, S.M.; Gonzalez, G.; Oliveira, J.F., *Journal of Colloid and Interface Science*, 181 (1996), 1.
- Rajagopalan, R., Tien, C., Pfeffer, R., Tardos, G., *Letter to the Editor, Am. Inst. Chem. Eng. J.*, 28 (1982), 871-872.
- Yao, K.M., Habibian, M.T., O'Melie, C.R., *Environ. Sci. Technol.*, 5 (1971), 1105-1112.