



Estudo do Efeito da Colmatação sobre a Condutividade Hidráulica, Porosidade Total e Remoção da Turbidez Utilizando Diferentes Meios Filtrantes, como Apoio à Implementação da Técnica da Filtração em Margem
Study About Clogging Effect on Hydraulic Conductivity, Total Porosity and Turbidity Removal by Using Different Filtration Media, as Support to Bank Filtration Technic Implementation

Marcus Soares & Bruno Segalla Pizzolatti

*Universidade Federal de Santa Maria,
Depº. de Engenharia e Tecnologia Ambiental, Linha Sete de Setembro s/n, 98400-000, Frederico Westphalen, RS - Brasil
E-mail: marcus.soares@ufsm.br; brunosegalla@me.com
Recebido em: 16/09/2019 Aprovado em: 22/11/2019
DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_130_137*

Resumo

A filtração em margem é uma técnica de tratamento de água, que utiliza poços de captação instalados nas margens de rios e lagos. Durante o processo de filtração, o sedimento do manancial está sujeito ao processo de colmatação. O processo de colmatação reduz a capacidade específica dos poços de captação, com reflexo direto nos custos de produção de água. Desta forma, o presente estudo avaliou o efeito desta colmatação na redução da condutividade hidráulica, porosidade total e turbidez, utilizando colunas preenchidas com meios filtrantes de 50 cm de profundidade, constituídos por grãos de areia e esfera de vidro de tamanhos distintos, de granulometria uniforme e mal graduados de acordo com sua distribuição granulométrica. A porosidade total dos meios filtrantes constituídos por areias fina e grossa foi reduzida em 54% e 41%, enquanto que as esferas de vidro finas e grossas reduziram em 44% e 25%, respectivamente. A condutividade hidráulica do meio filtrante formado por areia fina obteve a maior redução entre os meios filtrantes (1,2 log aproximadamente). Este estudo demonstrou que, além de outros importantes parâmetros, a cuidadosa avaliação das características físicas do sedimento do leito do manancial, no que se refere a forma, tamanho e distribuição granulométrica são essenciais para minimizar os impactos causados pelo processo de colmatação quando a técnica da filtração em margem é utilizada.

Palavras-chave: filtração em margem; colmatação; cond. hidráulica; porosidade total; turbidez

Abstract

Bank filtration is a water treatment technique, which uses production wells located at bank of rivers or lakes. Because of filtration process, sediment clogging might be developed. Clogging process reduces specific capacity of production wells, which affects directly water production costs. In this way, this study evaluated clogging effect on hydraulic conductivity, total porosity and turbidity removal, by using columns filled with sand and glass beads of different sizes, composed by uniform grains as well as a poorly graded grain size distribution. The column filled with fine sand showed the largest hydraulic conductivity reduction if compared with other media (1,2 log approximately). Total porosity of fine and coarse sand reduced 54% and 41%, while fine and coarse glass beads reduced 44% and 25%, respectively. This study showed that besides other important parameters, a careful river/lake sediment physical characterization considering important factors such as shape, size and size distribution of the grains, are important to minimize impacts caused by sediment clogging process at bank filtration sites.

Keywords: bank filtration; clogging; hydraulic conductivity; total porosity; turbidity

1 Introdução

Lagos e rios têm sido utilizados para implantação da técnica da filtração em margem (FM) por mais de 140 anos na Europa. Muitos países em desenvolvimento, como o Brasil, Índia e Tailândia, têm estudado esta técnica como fonte de água para abastecimento público nos últimos anos (Pholkern *et al.*, 2015; Sandhu *et al.*, 2011; Romero-Esquivel *et al.*, 2017), devido à sua provada eficiência na remoção de organismos patogênicos e contaminantes persistentes (Gunkel & Hoffmann, 2009).

Na filtração em margem, a colmatação é um processo no qual é observada a redução da porosidade total e, conseqüentemente, da porosidade efetiva. Isto acontece devido a sedimentação/intrusão de partículas físicas em suspensão e precipitação química no leito do rio ou lago. Como resultado, tem-se a redução da condutividade hidráulica do sedimento, que na prática significa uma redução da capacidade específica do poço de produção. Com isso pode-se observar um aumento significativo nos custos de consumo de energia elétrica na captação, uma vez que a altura manométrica total do sistema alteraria em função do incremento do rebaixamento do nível dinâmico do poço de produção.

Segundo Schälchli (1993) o entupimento dos poros ou colmatação pode ocorrer através de três processos distintos: (1) colmatação física (filtração de partículas de silte, argila ou pequenos grãos de areia em suspensão); (2) colmatação biológica (acumulação de substâncias orgânicas e bactérias); (3) colmatação química (reações químicas de precipitação). Rinck-Pfeiffer *et al.* (2000) mencionam o quarto tipo: colmatação mecânica (refere à formação e acúmulo de gás entre os poros).

A colmatação causada por sedimentos finos em suspensão (colmatação física) é especialmente importante, devido a sua agressividade na redução da condutividade hidráulica do meio poroso (Soares, 2015; Rosenberry & Pitlick, 2009; Packman *et al.*, 1997).

Na colmatação biológica os microrganismos mais abundantes são organismos eucarióticos, fungos, algas, protozoários, ciliados, além de diversos

tipos de bactérias. Tais organismos são encontrados há poucos centímetros da superfície do sedimento do manancial superficial (Hoffmann & Gunkel, 2011; Baveye *et al.*, 1998).

A colmatação química é um fenômeno causado pelas mudanças das condições redox, pH e temperatura nas áreas de infiltração, assim como ocorre na filtração em margem quando a água superficial infiltra no sedimento do leito do manancial (Hoffmann & Gunkel, 2011; Soares, 2015).

A colmatação mecânica, conhecida pela redução da condutividade hidráulica do sedimento devido ao aprisionamento de ar/gás no espaço poroso, também foi identificada por diversos autores (Cuthbert *et al.*, 2010; Rinck-Pfeiffer, 2000).

Além das quatro formas de entupimento dos poros citados, a distribuição granulométrica das partículas em suspensão e do sedimento do leito do manancial superficial definirão se o processo de colmatação se desenvolverá na superfície do sedimento (colmatação externa), ou entre os poros do material filtrante (colmatação interna) (Soares *et al.*, 2013; Wooster *et al.*, 2008; Herzig *et al.*, 1970), cuja análise criteriosa do coeficiente de uniformidade e curvatura da curva de distribuição granulométrica é fundamental.

De forma geral, a colmatação é governada pelo processo de infiltração. Assim, modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para entender o comportamento deste processo no meio filtrante (Kozeny, 1927 *apud* Trussell & Chang, 1999; Carman, 1937).

Com base no exposto acima e como apoio a implementação da técnica da filtração em margem em diferentes situações, este estudo teve como foco avaliar o efeito da colmatação sobre a condutividade hidráulica e porosidade total, utilizando diferentes meios filtrantes.

2 Metodologia

2.1 Caracterização Física dos Materiais Filtrantes

Os materiais filtrantes das colunas foram submetidos previamente à análise de peneiramento em

laboratório para a confirmação de sua caracterização física (ABNT, 2003). Os diâmetros de interesse foram obtidos através da curva granulométrica, e utilizados para o cálculo do coeficiente de curvatura (C_c), coeficiente de uniformidade (C_u), média (M) e mediana (M_d), conforme a Tabela 1.

Material	Finos** (%)	d_{10} (mm)	d_{25} (mm)	d_{30} (mm)	d_{50} (mm)	d_{60} (mm)	d_{75} (mm)	C_u #	C_c #	M #	M_d #	S_k #
E.V. Fina*	0	0,23	0,28	0,29	0,34	0,36	0,40	1,6	1,0	0,34	0,34	0,0
Areia Fina	0,07	0,19	0,26	0,27	0,34	0,36	0,40	1,9	1,0	0,33	0,34	0,2
E.V. Grossa*	0	0,99	1,10	1,21	1,40	1,59	1,80	1,6	0,9	1,45	1,40	0,1
Areia Grossa	0,05	0,96	1,10	1,19	1,40	1,56	1,80	1,9	0,9	1,45	1,40	0,1

Tabela 1 Características físicas dos materiais filtrantes utilizados nas colunas.

*Esfera de Vidro; **grãos menores que 0,075 mm; #Coef. de Uniformidade (C_u), Coef. de Curvatura (C_c), Média (M), Mediana (M_d) e Assimetria (S_k)

Todos os materiais utilizados nas colunas possuem grãos de características uniforme e mal graduados de acordo com sua distribuição granulométrica, considerando os valores de d_{10} , d_{30} e d_{60} . Os valores do coeficiente de assimetria, obtidos através da metodologia apresentada por Folk & Ward (1957), mostram um sedimento com uma distribuição bastante simétrica, com exceção da areia fina que mostrou sua distribuição granulométrica levemente deslocada para o sentido dos grãos mais grosseiros.

Calculado o coeficiente de condutividade hidráulica através da equação de Darcy, o mesmo foi comparado ao resultado utilizando a equação de Beyer para sedimento sob densidade natural (Soares, 2015), o qual considera apenas as características físicas do material filtrante (Tabela 2). Devido à interferência da temperatura, os valores da condutividade hidráulica estimados pela equação de Darcy foram corrigidos à uma temperatura padrão (10°C), como demonstrado por McKenzie *et al.* (2002). A porosidade efetiva (n_e) foi estimada utilizando sal como traçador natural (Soares, 2015; Grischek, 2003), e a porosidade total (n_t) foi calculada baseada na determinação do índice de vazios apresentada na conhecida equação de Kozeny-Carman (Trussel & Chang, 1999). A taxas de infiltração aplicadas foram iguais para todas as colunas.

Material	K_{10} – Darcy (m.s ⁻¹)	K-Bayer (m.s ⁻¹)	Porosidade Efetiva (%)	Porosidade Total (%)	T.I.# (m.s ⁻¹)
E.V. Fina*	4,4E-4	4,7E-4	35,4	41,9	2.0E-5
Areia Fina	1,6E-4	3,1E-4	34,4	35,8	
E.V. Grossa*	5,1E-3	8,8E-3	35,9	37,2	
Areia Grossa	3,4E-3	8,3E-3	35,6	37,9	

Tabela 2 Características iniciais dos materiais filtrantes utilizados nas colunas

*Esfera de Vidro (E.V.); #Taxa de infiltração aplicada

2.2 Preparação do Material Filtrante nas Colunas

Colunas de aço com diâmetro interno de 100 mm e comprimento de 55 cm foram utilizadas neste experimento. O preenchimento das colunas com os materiais filtrantes selecionados seguiu metodologia específica, para minimizar importantes interferentes como o acúmulo de bolhas de ar entre os grãos, e a utilização de uma densidade uniforme de material ao longo da coluna. Assim, para remover a umidade natural e evitar coesão entre os grãos devida à mesma, os quatro tipos de material filtrante foram secos em estufa à 105 °C durante um período mínimo de 24 horas, ou até sua constância de massa. Posteriormente, os materiais foram pesados em balança de bancada ($\pm 0,1$ g) e introduzidos aos poucos nas colunas. O material foi então compactado com um martelo de diâmetro levemente inferior ao da coluna até atingir a densidade desejada. Para se obter uma densidade uniforme, o material foi compactado a cada 3 cm, com posterior adição de água degaseificada em contrafluxo, para retirar o ar retido entre os grãos, com paralelo monitoramento da perda de carga. Este procedimento foi utilizado até o completo preenchimento das colunas, chegando à uma altura máxima de 50 cm.

2.3 Montagem e Monitoramento do Experimento

Água bruta foi trazida de um rio através de uma bomba submersível (Modelo AL-KO TDS 1001/3) para um tanque de nível constante, onde duas bombas peristálticas (Modelo ISMATEC IS-M834C) eram responsáveis por abastecer as colunas continuamente. A vazão e a perda de carga foram

monitorados diariamente pelo método volumétrico com auxílio de um Becker e cronômetro e as leituras na mesa de piezômetros, respectivamente (Fig. 1). A turbidez e a temperatura da água bruta e filtrada foram medidas com o auxílio de um turbidímetro (HACH 2100P) e um sensor de temperatura (WTW 350i), respectivamente.

3 Resultados e Discussões

Como observado na Figura 2 A e Figura 2 B, o parâmetro condutividade hidráulica (K) foi alterado diferentemente de acordo com o meio filtrante utilizado. No experimento em coluna preenchida com esfera de vidro fina foi observado aproximadamente 1 log de redução ($4,4E-4 \rightarrow 4,3E-5 \text{ m.s}^{-1}$) nos valores de condutividade hidráulica, após 14 dias

de monitoramento. No mesmo período foi observado uma redução de aproximadamente 1,2 log ($1,6E-4 \rightarrow 8,9E-6 \text{ m.s}^{-1}$) na coluna preenchida com areia fina, o que demonstra uma diferença de 0,2 log em relação à coluna preenchida com esfera de vidro fina.

As colunas preenchidas com material grosso (esfera de vidro e areia) apresentaram uma redução de menos de 1 log nos valores de condutividade hidráulica, após 23 dias de monitoramento. A coluna preenchida com esfera de vidro apresentou uma redução de $5,1E-3$ para $1,6E-3 \text{ m.s}^{-1}$, e na coluna preenchida com areia foi observada uma redução de $3,4E-3$ para $4,4E-4 \text{ m.s}^{-1}$, o que demonstra uma maior redução na coluna preenchida com areia grossa. Entretanto, ambas as colunas obtiveram menor redução da condutividade hidráulica se comparadas

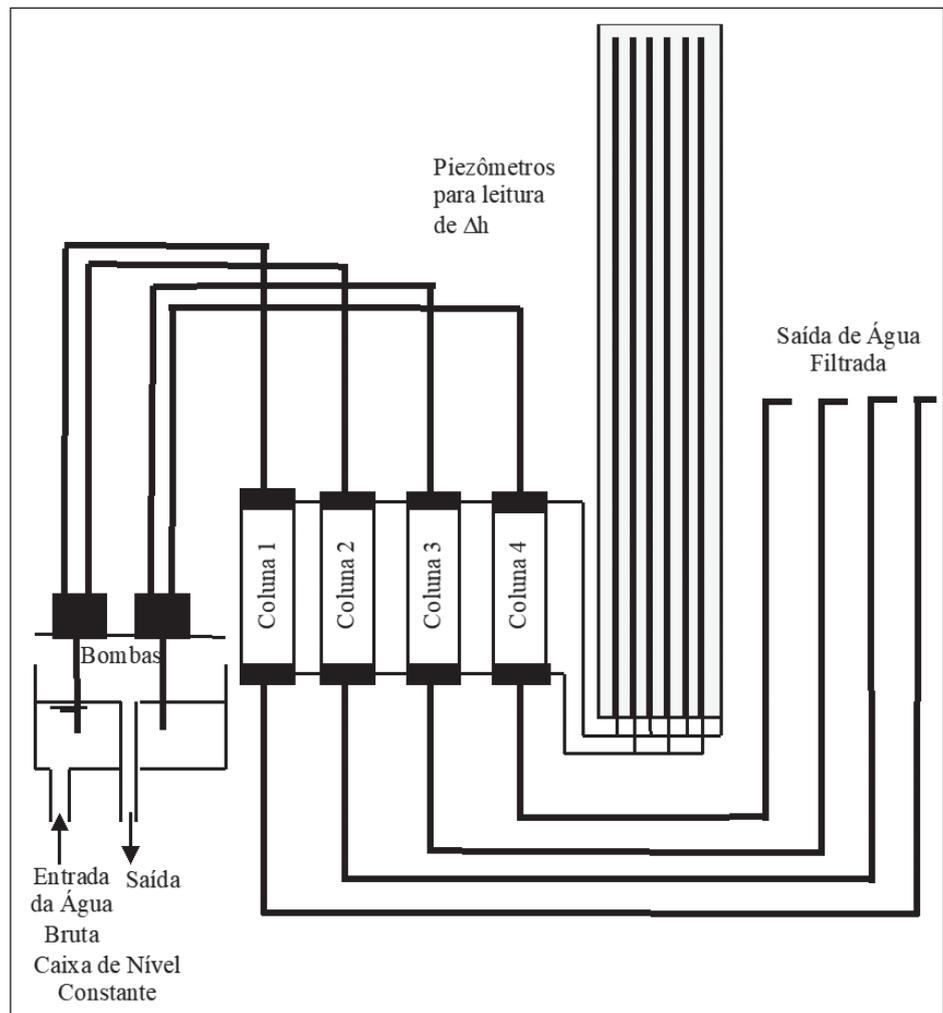


Figura 1 Desenho esquemático do experimento.

as colunas preenchidas com material filtrante fino, mesmo após 23 dias de monitoramento.

O processo de colmatação leva ao preenchimento do espaço poroso do meio filtrante, que pode ser observado através da alteração da porosidade total. Assim, a coluna preenchida com esfera de vidro fina apresentou uma redução de 44% nos valores de porosidade total (42% → 23,4%), e na coluna preenchida com areia fina foi observada uma redução de 54% nos valores de porosidade total (35,8% → 16,3%) após 14 dias, demonstrando uma diferença final de 10% entre os dois materiais filtrantes finos utilizados (Fig. 2 A).

A redução do espaço poroso das colunas preenchidas com material grosso, devido ao processo de colmatação, pode também ser observada na Figura 2 B. Utilizando tais materiais foi observada uma diferença de redução de aproximadamente 16% entre a coluna preenchida com esfera de vidro (37,2% → 27,8% - 25,2% de redução), e a coluna preenchida com areia (37,9% → 22,3% - 41,1% de redução). Mesmo após 23 dias de monitoramento, ambas as colunas apresentaram menor redução do espaço poroso se comparadas às colunas preenchidas com material fino.

A turbidez da água bruta durante todo o período de monitoramento é apresentada na Figura 3 C. Apesar das altas taxas de remoção da turbidez de todos os materiais filtrantes analisados (superior à 90%), as colunas preenchidas com material filtrante fino apresentaram maior remoção da turbidez nas primeiras 24 horas de monitoramento, se compara-

das às colunas preenchidas com material filtrante grosso (E.V. Fina: 92,1%; Areia Fina: 94,9%; E.V. Grossa: 85,7%; Areia Grossa: 88,6%) (Fig. 3 A e Fig.3 B).

Em termos gerais tanto a coluna preenchida com areia fina, como a coluna preenchida com esfera de vidro fina apresentaram valores de turbidez muito próximos à 1 NTU (Fig. 3 A). Valores de turbidez semelhantes foram observados somente após 4 dias de operação na coluna preenchida com areia grossa, e somente após 15 dias de operação nas colunas preenchidas com esfera de vidro grossa (Fig. 3 B).

De maneira genérica, as colunas preenchidas com grãos angulares (areia fina ou grossa) apresentaram remoção levemente superior da turbidez se comparadas às colunas preenchidas com grãos arredondados (esfera de vidro fina ou grossa), principalmente nas primeiras horas de monitoramento. Este fenômeno também é observado quando os parâmetros condutividade hidráulica e porosidade total são avaliados. Isto se dá devido à geometria angular peculiar, e conseqüentemente, à conhecida elevada capacidade de retenção específica desta forma de grão. Além disso, grãos finos apresentaram maior capacidade de retenção de materiais em suspensão da água bruta, se comparados aos grãos grossos, devido ao menor espaço poroso disponível.

Os resultados demonstrados neste estudo estão de acordo com a teoria da filtração desenvolvida por conhecidos pesquisadores, os quais demonstram a importância do tamanho e da forma do grão na alteração da perda de carga em meio poroso (Carman,

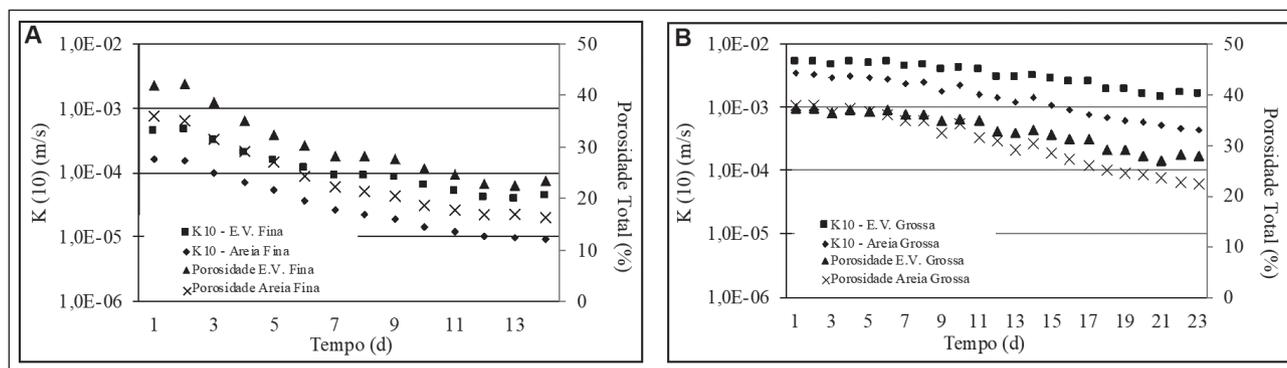


Figura 2 Redução da condutividade hidráulica e da porosidade total das colunas preenchidas com esfera de vidro e areia fina (A) e com esfera de vidro e areia grossa (B).

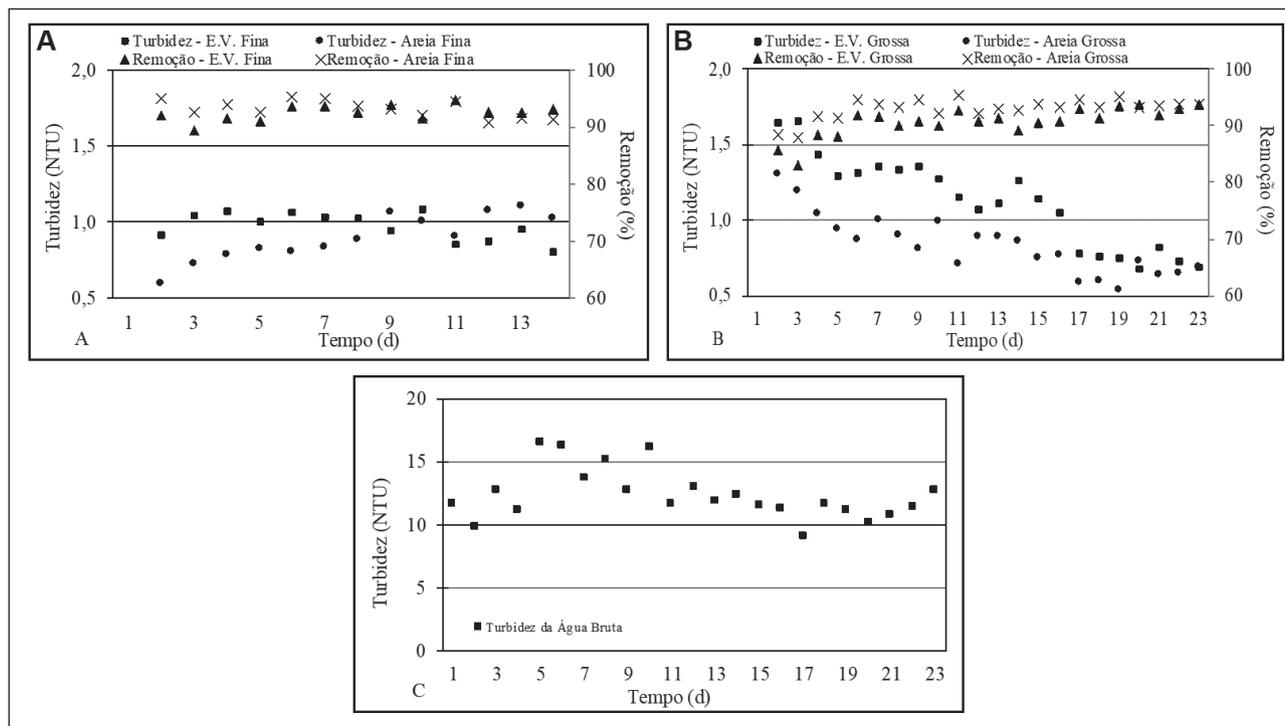


Figura 3 Variação da turbidez nas colunas preenchidas com esfera de vidro e areia fina (A), com esfera de vidro e areia grossa (B) e da água bruta (C).

1937; Kozeny, 1927 *apud* Trussel & Chang, 1999). Shepherd (1989) demonstrou não só a importância da forma do grão, mas também da tortuosidade e a distribuição granulométrica na determinação da condutividade hidráulica e, conseqüentemente, monitoramento da colmatação em um meio poroso.

A importância do tamanho, da forma do grão e na sua distribuição granulométrica na redução da porosidade e, conseqüentemente, da condutividade hidráulica é notadamente demonstrada neste estudo. Assim, em termos práticos, a produção específica de poços de produção de sistemas de filtração em margem é claramente mais afetada pela colmatação de leitos de mananciais, com sedimentos formados por grãos pequenos e de geometria angular. Grãos pequenos causam a colmatação externa do meio filtrante, e grãos angulares tendem a ter maior capacidade de retenção de materiais em suspensão, de acordo com o modelo teórico apresentado por Herzog *et al.* (1970). Esta associação causará uma redução mais acentuada da porosidade e, conseqüentemente, da condutividade hidráulica do meio filtrante, como observado nos resultados apresentados.

De acordo com Gibson *et al.* (2009), diferentemente de grãos angulares, grãos arredondados tendem a causar uma maior intrusão de sedimentos suspensos, causando uma colmatação interna do meio filtrante, mesmo em sedimentos bem graduados. Resultados semelhantes foram observados por Diplas (1994) e Alem *et al.* (2013). Isto demonstra que a turbidez remanescente nas colunas preenchidas com esfera de vidro e areia, de ambas as granulometrias, pode ter como causa o arraste de materiais em suspensão provenientes da água bruta ao longo dos 50 cm de material filtrante. Isso deve-se à uniformidade dos grãos, que é conseqüência da má graduação da distribuição granulométrica dos materiais filtrantes. Os autores anteriormente mencionados destacam também a importância da distribuição granulométrica do sedimento em suspensão, no processo de intrusão e colmatação do meio poroso. O processo de colmatação interna e externa e suas conseqüências foram largamente estudados e apresentados na literatura durante o decorrer dos anos (Wooster *et al.*, 2008; Herzog *et al.*, 1970). Soares (2015) verificou que a taxa de infiltração utilizada é inversamente proporcional à eficiência de remoção

de partículas em suspensão e, conseqüentemente, na formação da colmatação interna e externa do material filtrante, em sedimentos uniformes e mal graduados. Além do mais, a colmatação ocorre mais rapidamente quando altas taxas de infiltração são aplicadas, segundo o autor.

Demonstrando através de dados, utilizando sedimento de granulometria bem graduada e diâmetro efetivo (d_{10}) de 0,5 mm, Rehg *et al.* (2005), por exemplo, observaram uma redução de aproximadamente 1 log nos valores de condutividade hidráulica, devido à colmatação causada por caulinita, em um experimento em canal montado em laboratório sob carga hidráulica constante. Como resultado, foi observada uma redução de 71% da porosidade total após 50 horas. Goldenberg *et al.* (1993) observaram uma redução de aproximadamente 50% da permeabilidade devido ao processo de colmatação, utilizando um experimento com meio filtrante de granulometria uniforme de diâmetro 0,2 mm, e caulinita como material em suspensão com concentração de aproximadamente 500 mg L⁻¹.

Outros efeitos da colmatação e, conseqüentemente, da redução da porosidade e da condutividade hidráulica também são apresentados na literatura. Cunningham *et al.* (1987), avaliando um experimento de canal sob carga hidráulica constante, observaram o efeito na redução da vazão de aproximadamente 90% em apenas 24 horas, utilizando areia como meio filtrante, além de uma concentração de 1200 ppm de sedimentos em suspensão, com 35% de partículas menores que 0,063 mm.

4 Conclusões

Este estudo demonstrou que a porosidade de areias finas e grossas reduziram 54% e 41%, enquanto a porosidade das esferas de vidro finas e grosseiras reduziram 44% e 25%, respectivamente, quando submetidas ao fluxo de fluidos em ensaios de coluna com materiais em suspensão. Isto demonstra que, mesmo funcionando 9 dias a menos que as colunas preenchidas com grãos grosseiros, grãos pequenos e angulares possuem um elevado potencial de retenção de materiais em suspensão, causando a colmatação mais rápida do espaço poroso. Efeitos semelhantes

são observados na redução da condutividade hidráulica dos materiais filtrantes utilizados. A condutividade hidráulica do meio filtrante formado por areia fina obteve a maior redução entre os meios filtrantes (1,2 log aproximadamente). Quando o meio filtrante grosso é utilizado, a areia grossa apresentou redução superior da condutividade hidráulica quando comparada à esfera de vidro grossa.

Quando o parâmetro turbidez é avaliado, este estudo demonstrou que, em termos gerais, grãos angulares apresentaram superior remoção da turbidez se comparados aos grãos arredondados nas primeiras horas de monitoramento, devido à sua geometria peculiar. Grãos finos apresentaram maior capacidade de retenção da turbidez da água bruta, devido ao menor espaço poroso entre os grãos. A turbidez remanescente nas colunas preenchidas com material filtrante grosso nos primeiros dias de monitoramento será foco dos próximos estudos. Tal efeito pode ter ocorrido devido a uniformidade dos grãos, e da má graduação da distribuição granulométrica do material filtrante utilizado, aliado à taxa de infiltração aplicada e da distribuição granulométrica do material em suspensão.

Na prática, o efeito da colmatação demonstra uma redução da capacidade específica do poço de produção em sistemas de filtração em margem, e conseqüentemente, o aumento dos custos no consumo de energia elétrica na captação. Assim, o sucesso na escolha de locais para a implantação de sistema de filtração em margem deve considerar, além de outros importantes parâmetros, uma cautelosa avaliação das características físicas do sedimento do leito do manancial no que se refere a forma, tamanho e distribuição granulométrica dos grãos, para minimizar os impactos causados pelo processo de colmatação.

5 Referências

- Alem, A.; Elkawafi, A.; Ahfir, N-D. & Wang, H. 2013. Filtration of kaolinite particles in a saturated medium: hydrodynamics effects. *Hydrogeology Journal*, 21:573-586.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR NM 248-2003. Agregados – Determinação da composição granulométrica.
- Baveye, P.; Vandevivere, P.; Hoyle, B.L.; DeLeo, P.C. & San-

- chez de Lozada, D. 1998. Environmental impact and mechanisms of biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Critical Reviews in Environmental Sciences and Technology*, 28(2):123-191.
- Carman, P.C. 1937. Fluid flow through granular beds. *Transactions of Chemical Engineers*, 15:S32 – S48.
- Cunningham, A.B.; Anderson, C.J. & Bouwer, H. 1987. Effects of sediment laden flow on channel bed clogging. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 113(1):106-118.
- Cuthbert, M.O.; Mackay, R.; Durand, V.; Aller, M.-F, Greswell, R.B. & Rivett, M.O. 2010. Impacts of river-gas on the hydraulic and thermal dynamics of the hyporheic zone. *Advances in Water Resources Journal*, 33:1347-1358.
- Diplas, P. 1994. Modelling of fine and coarse sediment interaction over alternate bars. *Journal of Hydrology*, 159:335-351.
- Folk, R.L. & Ward, W.C. 1957. Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1):3-26.
- Gibson, S.; Abraham, D.; Heath, R. & Schoellhamer, D. 2009. Vertical gradational of fines deposited in a gravel framework. *Sedimentology*, 56:661-676.
- Grischek, T. 2003. *Zur Bewirtschaftung von Uferfiltratfassungen an der Elbe*. Programa de Pós-graduação em Engenharia. Technische Universität Dresden. Tese de Doutorado, 192p.
- Goldenberg, L.C.; Hutcheon, I.; Wardlaw, N. & Melloul, A.J. 1993. Rearrangement of fine particles in porous media causing reduction of permeability and formation of preferred pathways of flow: Experimental findings and a conceptual model. *Transport in Porous Media Journal*, 13:221-237.
- Gunkel, G. & Hoffmann, A. 2009. Bank filtration of rivers and lakes to improve the raw water quality for drinking water supply. In: GERTSEN, N. & SONDERBY, L. (ed.). *Water Purification*. Editora Nova Science, p.137-169.
- Herzig, J.P.; Leclerc, D.M. & Le Goff, P. 1970. Flow of suspensions through porous media. New differential equation for clogged bed is derived. *Industrial and Engineering Chemistry*, 62(5):8-35.
- Hoffmann, A. & Gunkel, G. 2011. Carbon input, production and turnover in the interstices of a Lake Tegel bank filtration site, Berlin, Germany. *Limnologia Journal*, 41:151-159.
- McKenzie, N.; Coughlan, K. & Cresswell, H. 2002. *Soil physical measurements and interpretation for land evaluation*. Editora CSIRO, 379 p.
- Packman, A.I.; Brooks, N.H. & Morgan, J.J. 1997. Experimental techniques for laboratory investigation of clay colloid transport and filtration in a stream with a sand bed. *Water, Air and Soil Pollution*, 99:113-122.
- Pholkern, K.; Srisuk, K.; Grischek, T.; Soares, M.; Schäfer, S.; Archwichai L.; Saraphirom, P.; Pavelic, P. & Wirojanagud, W. 2015. Riverbed clogging experiments at potential river bank filtration sites along the Ping River, Chiang Mai, Thailand. *Environmental Earth Sciences*, 73(12):7699-7709.
- Rehg, K.J.; Packman, A.I. & Ren, J. 2005. Effects of suspended sediment characteristics and bed sediment transport on streambed clogging. *Hydrological Processes Journal*, 19:413-427.
- Rinck-Pfeiffer, S.; Ragusa, S.; Sztajn bok, P. & Vandeveld, T. 2000. Interrelationships between biological, chemical and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) wells. *Water Resources*, 34(7):2110-2118.
- Romero-Esquivel, L.G.; Grischek, T.; Pizzolatti, B.S.; Mondardo, R.I. & Sens, M.L. 2017 Bank filtration in a coastal lake in South Brazil: water quality, natural organic matter (NOM) and redox conditions study. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1:1-14.
- Rosenberry, D.O. & Pitlick, J. 2009. Effects of sediment transport and seepage direction on hydraulic properties at the sediment-water interface of hyporheic settings. *Journal of Hydrogeology*, 373:377-391.
- Sandhu C.; Grischek T.; Schoenheinz D.; Prasad T. & Thakur A.K. 2011. Evaluation of Bank Filtration for Drinking Water Supply in Patna by the Ganga River, India. In: SHAMRUK M. (eds) *Riverbank Filtration for Water Security in Desert Countries*. Editora Springer, p. 203-222.
- Schälchli, U. 1993. *Die Kolmation von Fließgewässersohlen: Prozess und Berechnungsgrundlagen*. ETH Zürich. Tese de Doutorado, 156 p.
- Shepherd, R.G. 1989. Correlation of permeability and grain size. *Ground Water*, 27(5):633- 638.
- Soares, M.; Grischek, T. & Gunkel, G. 2013. Simulation of physical clogging at RBF sites using a laboratory channel experiment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MANAGEMENT OF AQUIFER RECHARGE, 8, Beijing, 2013. *Proceedings*. Editora IAHR, p. 192-193.
- Soares, M. 2015. *The influence of high infiltration rates, suspended sediment concentration and sediment grain size on river and lake bed clogging*. Programa de Pós-graduação em Engenharia. Technische Universität Berlin. Tese do Doutorado, 133p.
- Trussell, R.R. & Chang, M. 1999. Review of flow through porous media as applied to head loss in water filters. *Journal of Environmental Engineering*, 125:998-1006.
- Wooster, J.K.; Dusterhoff, S.R.; Cui, Y.; Sklar, L.S.; Dietrich, W.E. & Malko, M. 2008. Sediment supply and relative size distribution effects on fine sediment infiltration into immobile gravels. *Water Resources Research*, 44:1:18.