

# Resistência específica do material sedimentado em **ensaio de Jar Test**, obtido com a adição de lodo de **Estação de Tratamento de Água**

Por Leonora Milagre de Souza<sup>1</sup>, Paulo Sérgio Scalize<sup>2</sup>

## Introdução

É evidente a crescente demanda de água para consumo humano (FABRIZI *et al.*, 2010) e o alto grau de poluição e contaminação dos mananciais. As Estações de Tratamento de Água (ETAs) têm grande importância frente a essa problemática, pois removem o material em suspensão na água bruta e geram grandes quantidades de resíduos, muitas vezes dispostos diretamente nos corpos d'água.

Em geral, o resíduo das ETAs é constituído por matéria orgânica e inorgânica, além de grande concentração de água, de óxidos e hidróxidos de alumínio, no caso da utilização de coagulantes a base de alumínio (MILLER *et al.*, 2011).

De acordo com Moghaddam, Alavi Moghaddame e Arami (2010), com o aumento contínuo na produção desse tipo de resíduo e com a existência de normas que apontam a necessidade de evitar desperdícios, a reutilização do resíduo tem sido estudada e investigada particularmente nos últimos anos. Segundo os autores, os resíduos das ETAs podem ser considerados uma matéria-prima valiosa para o tratamento de diversos poluentes devido ao seu elevado teor de hidróxido de metal.

A utilização do resíduo de decantador na melhoria do processo de

coagulação/floculação tem se mostrado oportuna na solução de problemas das ETAs. Segundo Cordeiro (1981), quando o resíduo é empregado de forma controlada, pode contribuir para a redução do consumo de insumos químicos e a melhoria da sedimentabilidade dos flocos, obtendo-se, por consequência, a redução nos custos de tratamento de água.

A caracterização do resíduo é de extrema importância para os estudos de impacto ambiental (AYOL, DENTEL e FILIBELI, 2005) e para a definição de parâmetros de projeto para o transporte, o armazenamento, o aterro e as operações de dispersão, e de parâmetros de controle em muitos tratamentos, tais como o seu deságue (CHEN, LEE e LEE, 2005), o qual pode ser constatado pelo teste de resistência específica, definida pela APHA (2005) como sendo a resistência oferecida por um peso unitário de lodo por unidade de área de filtro, isto é, lodos com resistência específica menor são considerados de mais fácil deságue. O aumento dos valores de resistência implica que os poros entre os flocos tornaram-se menores e o impedimento correspondente foi alto para o transporte de água sob pressão.

Segundo Dong, Wang e Feng (2011), o condicionamento do resíduo de ETA pode alterar suas

características reológicas e fractais, como morfologia, tamanho e dimensões, variando com as dosagens de polímero. No caso da pesquisa desses autores, utilizando polímero de elevado peso molecular catiônico, o diâmetro médio dos flocos agregados nas suspensões do resíduo aumentou com certas dosagens de polímero, aumentando também a resistência específica para filtração. A dosagem ótima de polímero no estudo foi de 8 ou 24 kg.ton<sup>-1</sup> de resíduo seco, o que indica a necessidade de testes para determinar essa dosagem.

De acordo com Reali (1999), os resíduos podem apresentar valores de resistência específica entre  $5 \times 10^{12}$  e  $70 \times 10^{12}$  m.kg<sup>-1</sup>. No trabalho desenvolvido por Grandin (1992), com exceção do lodo novo dos decantadores sem condicionamento, que apresentou características boas de filtrabilidade com valor de  $2,72 \times 10^{12}$  m.Kg<sup>-1</sup>, os demais lodos não condicionados quimicamente apresentaram resistências específicas maiores que  $5 \times 10^{12}$  m.kg<sup>-1</sup>, sendo considerados de difícil desaguamento. Segundo esse autor, de forma geral, os lodos com resistência específica superior a  $5 \times 10^{12}$  m.kg<sup>-1</sup> são considerados de difícil deságue, e os com valores inferiores a  $1 \times 10^{12}$  m.kg<sup>-1</sup> são fáceis de desaguar. De acordo com Wolfe *et al.* (1996), os lodos com resistência específica

acima de  $10 \times 10^{12}$  m.kg<sup>-1</sup> têm baixa desaguabilidade.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da aplicação de resíduo de decantador de ETA, que utiliza sulfato de alumínio como coagulante, no desaguamento do material sedimentado em ensaio de *Jar Test*, por meio do teste de resistência específica à filtração.

## METODOLOGIA

### Resíduo para o teste de resistência específica

A aplicação do resíduo dos decantadores da ETA no tratamento de água se deu por meio de ensaios de bancada utilizando o equipamento de reatores estáticos *Jar Test*. Os parâmetros e seus valores aplicados nos ensaios estão descritos na Tabela 1. Mantiveram-se fixos os volumes de água (2.000 mL) e de resíduo (40 mL) aplicado em cada cuba do *Jar Test*; e variaram-se as dosagens de coagulante (30 a 90% da dosagem utilizada na ETA) e as concentrações de sólidos suspensos totais (SST) nas amostras de resíduo.

Os valores dos parâmetros de mistura rápida, floculação e sedimentação utilizados nos ensaios de *Jar Test* foram os mesmos utilizados nos ensaios de *Jar Test* na ETA e, conseqüentemente, aqueles empregados no tratamento da ETA.

O coagulante primário utilizado na etapa de coagulação do tratamento da água foi o sulfato de alumínio – Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.14H<sub>2</sub>O. As amostras do resíduo dos decantadores aplicadas nos ensaios de *Jar Test* foram preparadas para apresentar SST da ordem de 1.500, 3.000, 4.500, 6.000 e 9.000 mg.L<sup>-1</sup>.

Após a realização dos ensaios de *Jar Test* e a coleta das amostras do sobrenadante para caracterização, o restante do sobrenadante foi retirado com o auxílio do dispositivo de coleta de amostras do equipamento e de uma bomba a vácuo, com adaptação de uma pipeta na extremidade. Em cada cuba restou volume variável (55 a 90 mL) composto de um pouco de sobrenadante e material sedimentado no fundo da cuba. Esse método foi utilizado para minimizar a turbulência no sobrenadante e o revolvimento do resíduo sedimentado.

Tendo em vista que o volume de material sedimentado obtido nos ensaios de *Jar Test* era pequeno para a caracterização e o estudo de resistência específica, os ensaios foram realizados em réplicas, o que permitiu a geração de uma quantidade maior de material.

Os melhores resultados obtidos nas séries de ensaios utilizando água com valores de turbidez diferentes (séries 1 e 2) apresentaram concomitantemente a remoção de turbidez do sobrenadante igual ou superior à remoção no branco, a aplicação de menor dosagem de coagulante e a aplicação do resíduo com maior concentração de SST. Considerando a operacionalidade da ETA, os melhores resultados foram aqueles em que se utilizou a concentração do resíduo que atendeu aos critérios anteriores em todas as séries de ensaios.

O estudo de resistência específica foi realizado com o material sedimentado após realização dos ensaios de *Jar Test* considerando os melhores resultados das séries 1 e 2.

### Teste de resistência específica à filtração

O teste de resistência específica foi realizado com o objetivo de determinar a aptidão dos materiais sedimentados (com e sem aplicação do resíduo de ETA) ao desaguamento por meio de filtros prensas ou a vácuo, conforme indicado por Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001).

Devido à dificuldade de obtenção de volumes maiores de material, foi utilizado o teste da resistência específica conforme adaptado por Scalize e Di Bernardo (1999) com base no teste do tempo de filtração constante na 21<sup>a</sup> edição do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* publicado pela APHA (2005).

**Tabela 1.** Valores dos parâmetros de mistura rápida, floculação e sedimentação para ensaios de *Jar Test*.

Etapas	Parâmetros	Valores	Unidades
Mistura rápida	G <sub>mr1</sub>	200	s <sup>-1</sup>
	T <sub>mr1</sub>	60	s
	T <sub>mr2</sub>	20	s
Floculação	G <sub>f1</sub>	50	s <sup>-1</sup>
	T <sub>f1</sub>	12	min
	G <sub>f2</sub>	30	s <sup>-1</sup>
	T <sub>f2</sub>	06	min
	G <sub>f3</sub>	20	s <sup>-1</sup>
	T <sub>f3</sub>	06	min
Sedimentação	T <sub>s</sub>	5	min

De acordo com Almeida, Gonçalves e Guimarães (1991), numericamente a resistência específica pode ser determinada por meio da equação 1:

$$r = \frac{2 \cdot b \cdot P \cdot A^2}{\mu \cdot c} \quad (\text{Equação 1})$$

na qual:

$r$  = resistência específica (cm/g);  
 $P$  = pressão de filtração (g/cm.s<sup>2</sup>).  
 $A$  = área filtrante (cm<sup>2</sup>);  
 $\mu$  = viscosidade do filtrado (g/cm.s);  
 $c$  = massa de sólidos da torta seca por unidade de volume filtrado (g/cm<sup>3</sup>);  
 $b$  = valor da tangente no trecho retilíneo do gráfico “ $t/v$ ” (s/cm<sup>3</sup>) versus “ $v$ ” (cm<sup>3</sup>), resultante da equação 2:

$$b = \text{tg}\alpha = \frac{\left(\frac{t_2}{V_2}\right) - \left(\frac{t_1}{V_1}\right)}{V_2 - V_1} \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

$t$  = tempo de filtração (s);  
 $v$  = volume filtrado (cm<sup>3</sup>).

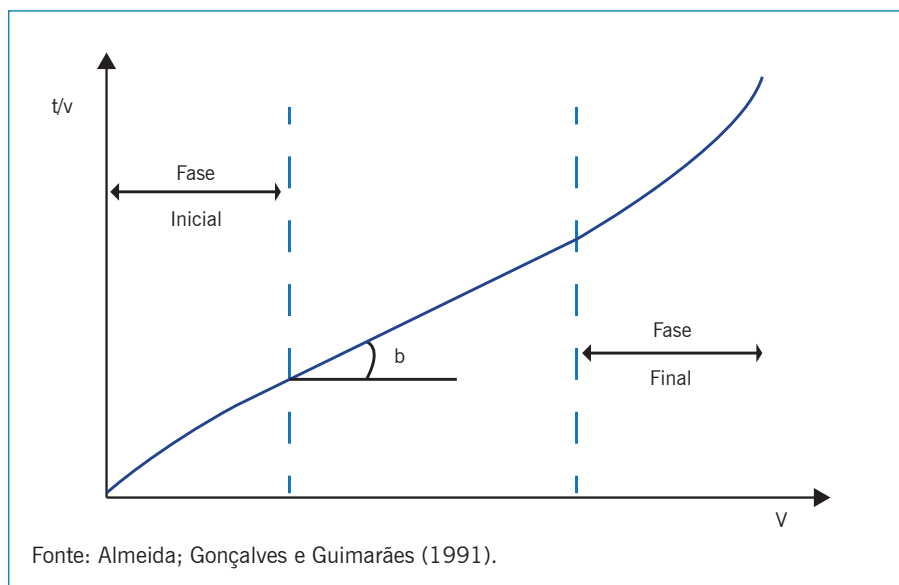
O valor de “ $b$ ” é obtido construindo-se um gráfico no qual se tem os valores de “ $v$ ” e “ $t/v$ ”, conforme mostrado na Figura 1.

A Figura 2 ilustra os equipamentos e materiais utilizados no teste de resistência específica.

## Resultados e discussões

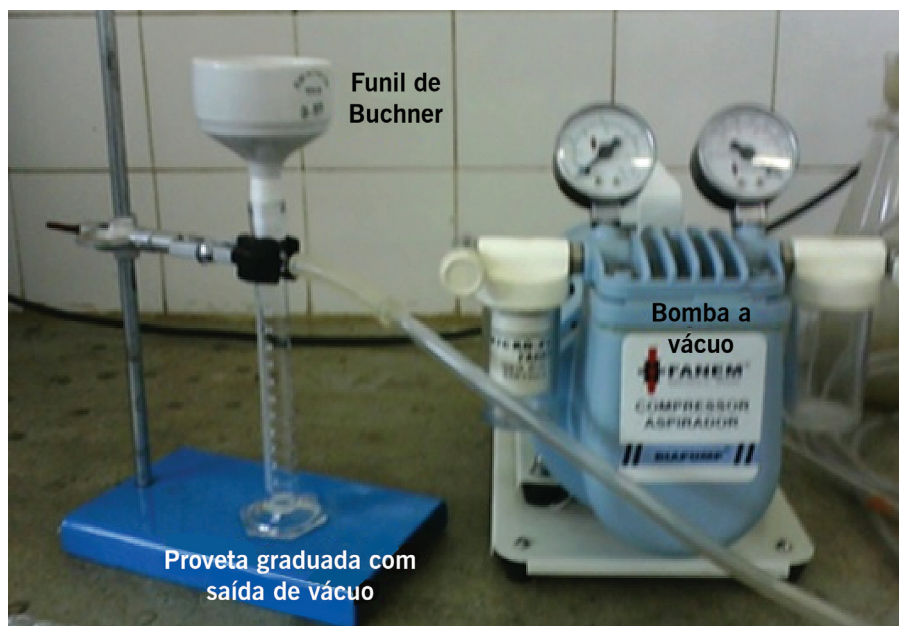
As amostras de água bruta coletadas na ETA e utilizadas nos ensaios apresentavam 95 UNT (série 1) e 218 UNT (série 2). As amostras preparadas do resíduo dos decantadores da ETA para aplicação nos ensaios de *Jar Test* apresentaram 2.615, 3.645, 4.664, 7.500, 8.573 e 9.670 mg.L<sup>-1</sup> de SST.

Os melhores resultados para a série 1 foram aqueles com 50% da dosagem de coagulante, com a aplicação de resíduo com 7.500 mg.L<sup>-1</sup>, e 75% da dosagem de coagulante, com aplicação de resíduo com



Fonte: Almeida; Gonçalves e Guimarães (1991).

**Figura 1.** Gráfico típico dos valores de “ $t/v$ ” em função de “ $v$ ”, para obtenção de “ $b$ ” no cálculo da resistência específica.



**Figura 2.** Equipamentos e materiais utilizados no teste de resistência específica.

3.645 mg.L<sup>-1</sup>. Para a série 2, os melhores resultados foram: 35 e 40% da dosagem de coagulante, com a aplicação de resíduo com 2.678 mg.L<sup>-1</sup> e 45 e 55% da dosagem de coagulante, com a aplicação de resíduo com 8.556 mg.L<sup>-1</sup>.

As amostras do material sedimentado gerado após os ensaios de *Jar*

*Test* foram caracterizadas quanto ao teor de sólidos, conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3.

As curvas dos volumes filtrados em função do tempo de filtração para as diferentes concentrações de resíduos aplicados nos testes de resistência específica estão apresentadas nas Figuras 3 e 4.

**Tabela 2.** Caracterização do material sedimentado nos melhores resultados para série 1.

Turbidez = 95 UNT			
SST do resíduo aplicado (mg.L <sup>-1</sup> )	0	3.645	7.500
Coagulante (% da dosagem da ETA)	100	75	50
Parâmetros	Resultados		
Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	7.160	10.472	13.568
Sólidos fixos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	5.604	7.556	10.720
Sólidos voláteis totais (mg.L <sup>-1</sup> )	1.556	2.916	2.848
Sólidos suspensos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	6.329	9.657	11.743
Sólidos suspensos fixos (mg.L <sup>-1</sup> )	5.143	7.243	10.557
Sólidos suspensos voláteis (mg.L <sup>-1</sup> )	1.186	2.414	1.186
Sólidos dissolvidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	831	815	1.825
Sólidos dissolvidos fixos (mg.L <sup>-1</sup> )	461	313	163
Sólidos dissolvidos voláteis (mg.L <sup>-1</sup> )	370	502	1.662

**Tabela 3.** Caracterização do material sedimentado nos melhores resultados para série 2.

Turbidez = 218 UNT					
SST do resíduo aplicado (mg.L <sup>-1</sup> )	0	2.678	2.678	8.556	8.556
Coagulante (% da dosagem da ETA)	100	35	40	45	55
Parâmetros	Resultados				
Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	9.993	12.750	12.867	19.953	17.320
Sólidos fixos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	8.177	10.343	10.473	16.493	14.080
Sólidos voláteis totais (mg.L <sup>-1</sup> )	1.817	2.407	2.393	3.460	3.240
Sólidos suspensos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	9.460	12.540	12.540	18.970	16.630
Sólidos suspensos fixos (mg.L <sup>-1</sup> )	7.680	10.310	10.290	15.660	13.560
Sólidos suspensos voláteis (mg.L <sup>-1</sup> )	1.780	2.230	2.250	3.310	3.070
Sólidos dissolvidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	533	210	327	983	690
Sólidos dissolvidos fixos (mg.L <sup>-1</sup> )	497	33	183	833	520
Sólidos dissolvidos voláteis (mg.L <sup>-1</sup> )	37	177	143	150	170

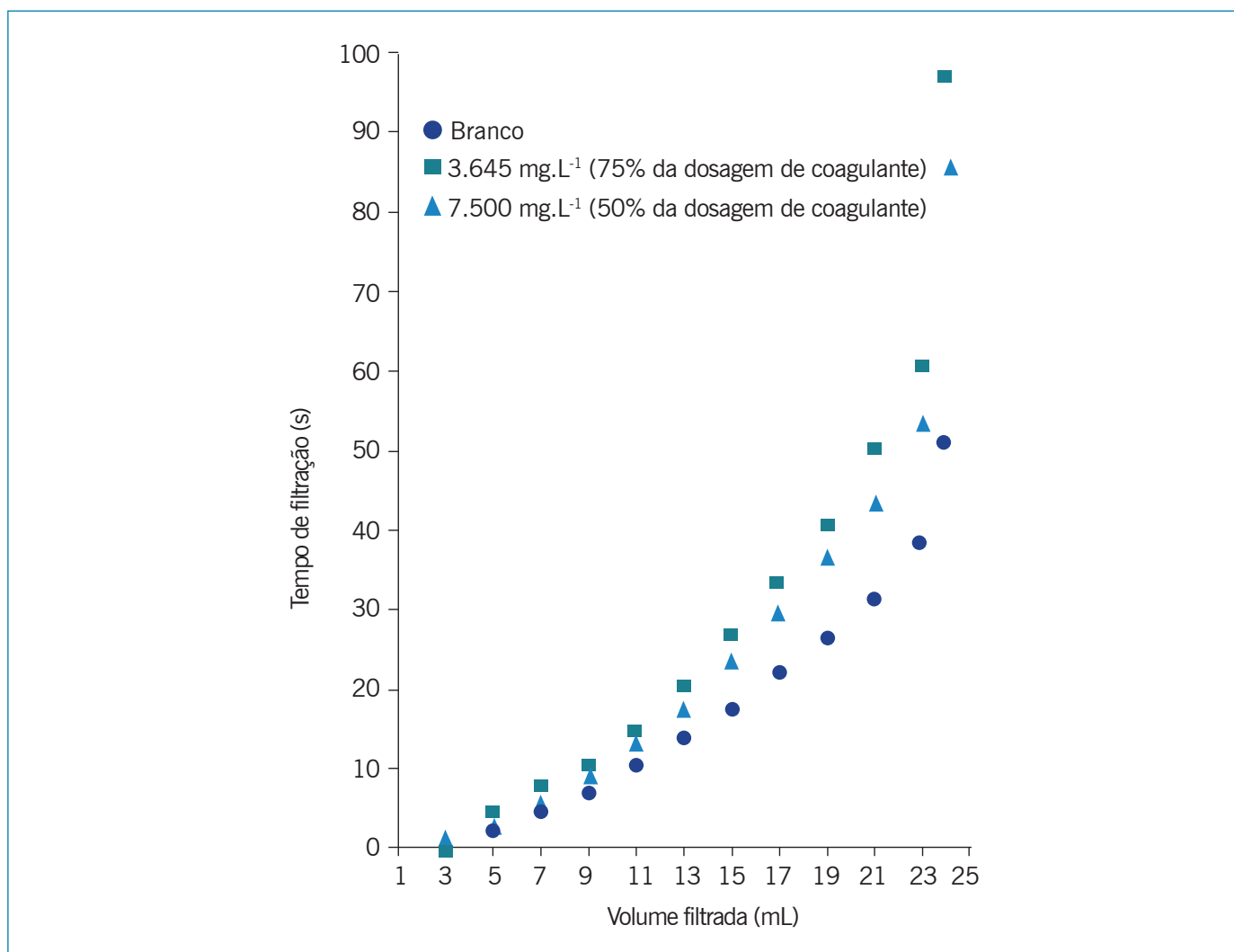
Ao adicionar o resíduo de ETA, o tempo de filtração do material sedimentado tornou-se maior se comparado à situação sem aplicação do resíduo, o que era esperado devido ao aumento na quantidade de sólidos. Nos ensaios com água de turbidez 218 UNT, o tempo de filtração foi maior com a aplicação do resíduo mais concentrado.

Nessa série, a resistência específica dos materiais sedimentados foi cerca de 70 a 130% maior que a resistência do material sedimentado que não recebeu resíduo da ETA, como apresentado na Tabela 4. Provavelmente, isso se deve a maior quantidade de hidróxido presente no material sedimentado, proveniente do resíduo da ETA adicionado ao ensaio de *Jar Test*. Esses resultados confirmam os resultados obtidos por Richter (2009), cuja indicação foi que os lodos com menor proporção de hidróxido de alumínio são mais fáceis de adensar e, portanto, desaguar.

Na série 1, o comportamento foi semelhante, porém com a exceção do material que recebeu resíduo com SST igual a 7.500 mg.L<sup>-1</sup>. Nesse caso, o desaguamento foi favorecido, já que a resistência foi inferior à obtida no branco ( $8,3 \times 10^{12}$  m.kg<sup>-1</sup>), como apresentado na Tabela 5.

Segundo a classificação de Grandin (1992), os materiais sedimentados são considerados de difícil desaguamento, exceto aquele gerado na série 2 sem aplicação de resíduo, cuja resistência é de  $3,8 \times 10^{12}$  m.kg<sup>-1</sup>. Segundo este autor, a comparação dos resultados de resistência específica de resíduos de estudos distintos deve ser cuidadosa. Deve-se levar em consideração, entre outros aspectos, o condicionamento químico, a idade do lodo, a área do meio filtrante utilizada no teste, já que podem ocorrer variações nas determinações por alterações na espessura da torta, efeitos de parede e eventual compressão da torta.

Nos estudos realizados por Grandin (1992), o lodo novo de decantador (tempo de armazenamento inferior a



**Figura 3.** Volume filtrado em função do tempo de filtração do material sedimentado para os melhores resultados dos ensaios com água 95 UNT (série 1).

dez dias) apresenta desaguamento superior ao do lodo velho, quando não há condicionamento químico. No caso deste estudo, o tempo de armazenamento do material sedimentado foi superior a dez dias, indicando que o deságue poderia ser superior se o processo de desidratação fosse feito com o material mais novo, como ocorreria em uma ETA.

Ainda que não tenha sido realizado condicionamento químico do material sedimentado para o teste de resistência, sabe-se que a adição de polieletrólito, em dosagens específicas, poderia melhorar substancialmente o seu desaguamento, já que garantiria a formação de uma estrutura pouco compressível e de alta filtrabilidade.

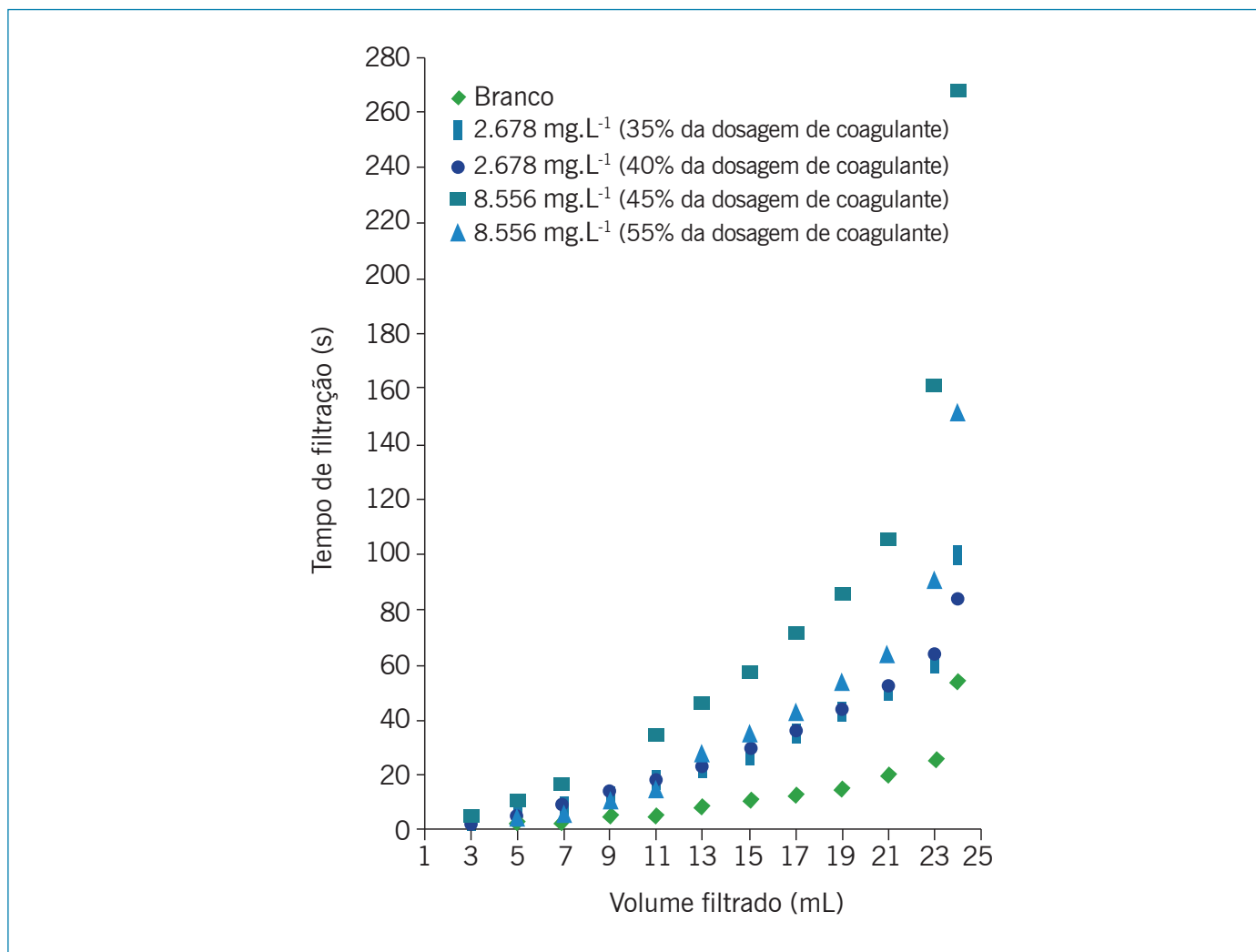
Na Figura 5 observa-se que não houve correlação entre a resistência específica e a concentração de SST nas amostras. Segundo Christensen e Dick (1985) *apud* Grandin (1992), a resistência se torna relativamente independente para altas concentrações de SST, como é o caso deste estudo.

### Conclusão e Recomendação

O desaguamento, em escala laboratorial, do material sedimentado em ensaio de *Jar Test* por meio do teste de resistência específica ficou prejudicado com a aplicação do resíduo de decantador de ETA, exceto para o ensaio com água de 95 UNT e resíduo

com 7.500 mg.L<sup>-1</sup> e 50% de sulfato de alumínio. Nesse caso, a resistência foi igual a  $6,8 \times 10^{12}$  m.kg<sup>-1</sup>, inferior ao valor obtido na amostra sem adição do resíduo ( $8,3 \times 10^{12}$  m.kg<sup>-1</sup>). Nas amostras analisadas ao longo do estudo, não foi verificada correlação entre a resistência específica e a concentração de SST.

Recomenda-se a realização de estudos considerando o condicionamento químico do material sedimentado para o deságue por meio de filtração, verificando as vantagens e desvantagens. É importante que os estudos sejam realizados de tal forma que a água bruta e o material sedimentado sejam analisados em menor tempo possível, reduzindo as interferências do armazenamento. 🔄



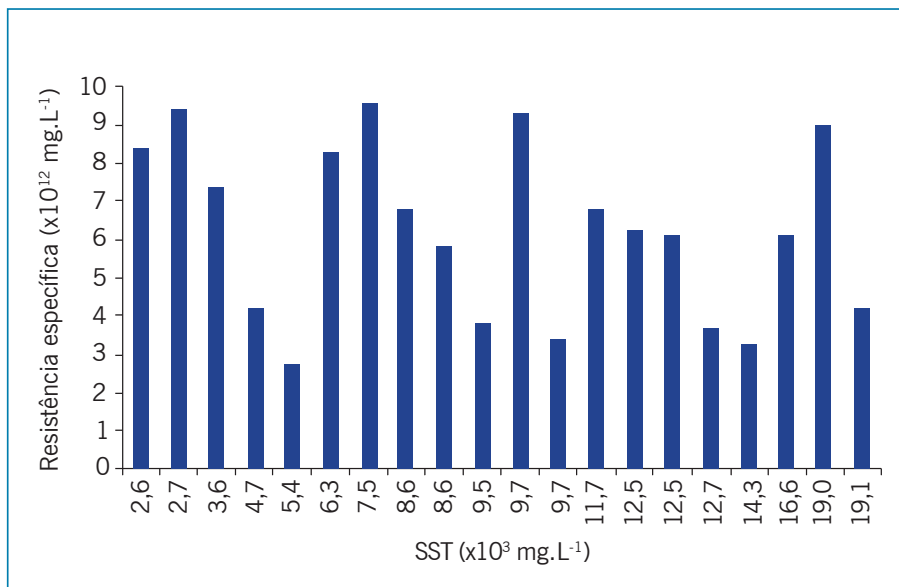
**Figura 4.** Volume filtrado em função do tempo de filtração do material sedimentado para os melhores resultados dos ensaios com água 218 UNT (série 2).

**Tabela 4.** Resistência específica do material sedimentado após realização do ensaio de Jar Test – série 2 (218 UNT).

Turbidez = 218 UNT					
SST do resíduo aplicado (mg.L <sup>-1</sup> )	0	2.678	2.678	8.556	8.556
Coagulante (% da dosagem da ETA)	100	35	40	45	55
SST do material sedimentado (mg.L <sup>-1</sup> )	9.460	12.540	12.540	18.970	16.630
Resultados					
Resistência específica (x10 <sup>12</sup> m.kg <sup>-1</sup> )	3,8	6,3	6,1	9,0	6,1

**Tabela 5.** Resistência específica do material sedimentado após realização do ensaio de Jar Test – série 1 (95 UNT).

Turbidez = 95 UNT			
SST do resíduo aplicado (mg.L <sup>-1</sup> )	0	3.645	7.500
Coagulante (% da dosagem da ETA)	100	75	50
SST do material sedimentado (mg.L <sup>-1</sup> )	6.329	9.657	11.743
Resultados			
Resistência específica (x10 <sup>12</sup> m.kg <sup>-1</sup> )	8,3	9,4	6,8



**Figura 5.** Valores de resistência específica em função da concentração de SST no resíduo aplicado no ensaio de *Jar Test* e no material sedimentado na cuba do *Jar Test*.

## Referências

ALMEIDA, N. A.; GONÇALVES, M. C.; GUIMARÃES, S. A. Z. Utilização do teste de resistência específica na operação de filtros prensa. *Revista DAE*, v. 51, n. 160, p. 20-26, 1991.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. 21 ed. Washington, D.C, USA, 2005.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2001. v. 6. 484 p.

AYOL, A.; DENTEL, S. K.; FILIBELI, A. Dual polymer conditioning of water treatment residuals. *Journal Environmental Engineering*, v. 131, p. 1132- 1138, 2005.

CHEN, B.-H.; LEE, S.-J.; LEE, D. J., Rheological characteristics of the cationic polyelectrolyte flocculated wastewater sludge. *Water Research*, v. 39, n. 18, p. 4429-4435, 2005.

CORDEIRO, J. S. *Disposição, tratabilidade e reuso de lodos de ETA*. 1981. 155 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

DONG, Y. J.; WANG, Y .L.; FENG, J. Rheological and fractal characteristics of unconditioned and conditioned water treatment residuals. *Water Research*, v. 45, p. 3871-3882, 2011.

FABRIZI, L. *et al.* The role of polymer in improving floc strength for filtration. *Environment Science Technology*, v. 44, n. 16, p. 6443-6449, 2010.

GRANDIN, S. R. *Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água*. 1992. 456 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

MILLER, M. L. *et al.* Aluminum water treatment residuals as permeable reactive barrier sorbents to reduce phosphorus losses. *Chemosphere*, v. 83, p. 978-983, 2011.

MOGHADDAM, S. S.; ALAVI MOGHADDAM, M. R.; ARAMI, M. Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from water treatment plant: Optimization through response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, v. 175, p. 651-657, 2010.

REALI, M. A. P. Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETAs. In: \_\_\_\_\_. *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água*. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999, cap. 2., p. 21-39.

RICHTER, C. A. *Sedimentação e Decantação*. In: RICHTER, C. A. *Água: Métodos e tecnologia de tratamento*. São Paulo: Editora Blucher, 2009, cap. 10., p. 160-218.

SCALIZE, P. S.; DI BERNARDO, L. Resistência específica de lodo obtido em ensaio de clarificação, por sedimentação, da água de lavagem de filtros rápidos de ETAs. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 4, n. 1, jan/mar, e n. 2, abr/jun 1999.

WOLFE, T. A., *et al.* Characterization of water treatment plant residuals. In: EPA, NRMRL, ASCE e AWWA. *Manuals and reports of engineering practice*, n. 88 – management of water treatment plant residuals. EUA, 1996, cap 4., p. 41-72.

<sup>1</sup>Bacharel em Química Industrial pela Universidade Estadual de Goiás (UFG). Mestre em Engenharia do Meio Ambiente pela Universidade Federal de Goiás (UFG). Analista Ambiental do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) – Brasília (DF), Brasil. E-mail: le.milagre@hotmail.com.

<sup>2</sup>Biomédico e Engenheiro Civil. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia Civil de São Carlos (EESC-USP). Professor da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC-UFG) e do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás (UFG) – Goiânia (GO), Brasil. E-mail: pscalize.ufg@gmail.com.