

## I-059 - ENSAIOS DE TRATABILIDADE E AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO EM FILTROS DE LABORATÓRIO ACOPLADOS AO JARTESTE

**Guilherme Lelis Giglio<sup>(1)</sup>**

Professor na Engenharia Civil da Universidade José do Rosário Vellano UNIFENAS (Alfenas/MG). Professor na Engenharia Agrônômica do Centro Superior de Ensino e Pesquisa de Machado CESEP (Machado/MG). Engenheiro Ambiental pela Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista FCT/UNESP (Presidente Prudente/SP). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo EESC/USP (São Carlos/SP).

**Lyda Patricia Sabogal-Paz<sup>(2)</sup>**

Professora do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo EESC/USP (São Carlos/SP).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Afonso Arinos, 291- Centro – Alfenas - MG - CEP: 37130-017 - Brasil - Tel: (35) 9-8444-3401 e-mail: [giglio.ambiental@gmail.com](mailto:giglio.ambiental@gmail.com)

### RESUMO

Definir as condições adequadas do tratamento de água de abastecimento é fundamental para elaboração de projetos de Estações de Tratamento de Água (ETA). Para tanto, é necessária a realização de diversos ensaios de tratabilidade realizados muitas vezes em aparelho Jarteste. Quando estes ensaios são realizados juntamente com filtros de laboratório de areia (FLA), é possível simular, além dos processos de coagulação, floculação e sedimentação, o processo de filtração. Nesta etapa, especificamente, a possibilidade da eficiência do processo pode ser afetada devido às características do próprio filtro, além do meio filtrante e da forma com que é realizado o controle do processo de filtração. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade hidrodinâmica dos FLA no tratamento de águas de turbidez elevada. Os ensaios hidrodinâmicos foram realizados pela aplicação de sal (NaCl) na forma de pulso. Durante a etapa de filtração, a concentração de sal na água filtrada era medida sistemática e periodicamente a cada 3 s por uma sonda de condutividade com interface Go!link. A partir das curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) obtidas, foi possível aplicar os modelos N-CSTR (N-*Continuous stirred-tank reactor*), de pequena dispersão e de grande dispersão foram aplicadas. A comparação dos resultados obtidos com a aplicação destes modelos demonstrou que o modelo N-CSTR é aquele que apresentou os melhores resultados, com uma quantidade reatores em série  $N = 6$  na curva real e de  $N = 35$  excluindo-se o encaudamento da curva gerada no ensaio.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaio Hidrodinâmico, Filtro de Laboratório de Areia (FLA), Jarteste.

### INTRODUÇÃO

A definição dos parâmetros utilizados no tratamento de água é indispensável ao funcionamento adequado de um sistema de abastecimento. Diante desta lógica, os ensaios de tratabilidade e, se possível, combinados com testes em instalação piloto, são fundamentais para estabelecer, com critério, os principais parâmetros de projeto a serem utilizados no dimensionamento de uma Estação de Tratamento de Água (ETA).

Conforme Di Bernardo e Dantas (2005) e Libânio (2008), a realização de ensaios de tratabilidade permite definir a dosagem ótima de produtos químicos (coagulantes, alcalinizantes e acidificantes) em conjunto com as melhores as faixas de pH de acordo com o produto utilizado. Além disso, é possível estabelecer quais gradientes médios de velocidade e os tempos de mistura rápida e lenta; aferir quais as velocidades de sedimentação viáveis; e determinar condições da filtração, bem como é possível ponderar as particularidades dos resíduos gerados.

A otimização de parâmetros necessários ao tratamento de água de abastecimento pode ser conseguida pela aplicação de aparelhos e equipamentos, tais como o aparelho Jarteste e os filtros de laboratório de areia (FLA), que simulam os processos de coagulação, floculação, sedimentação ou flotação, e filtração. Entretanto, resultados inconsistentes podem advir do manuseio e preparo inadequado destes equipamentos.

Especificamente em relação aos FLA, as condições de filtração também podem variar. A altura e a granulometria da camada filtrante, a carga hidráulica disponível no filtro e no jarro de Jarteste, os dispositivos para controle de vazão, são alguns fatores que influenciam nessa variação.

Além do mais, segundo Pegoraro (2012), os elementos constituintes de fluidos, atravessam os filtros, na grande maioria dos casos, com velocidades diferentes. Portanto, são necessários diferentes tempos para que estes elementos percorram todo o filtro e a distribuição deste tempo é denominada distribuição do tempo de residência – DTR.

A DTR é uma das principais ferramentas do ensaio hidrodinâmico, pois possibilita aferir quantitativamente a presença de anomalias presentes em um filtro, tais como zonas mortas, caminhos preferenciais, curto-circuito, recirculação do fluido e retromistura (LEVENSPIEL, 2000). Além disso, o ensaio hidrodinâmico permite avaliar o desempenho de filtros não ideais tendo em vista de sua aplicação em otimização de processos, permitindo detectar problemas em unidades em escala de laboratório, piloto ou até mesmo real. Desta forma, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar o escoamento nos FLA através de ensaios hidrodinâmicos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em três etapas, todas realizadas no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Água (LATAR) do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – EESC/USP.

A pesquisa foi dividida em três etapas: i) otimização dos parâmetros em jarteste; ii) realização de ensaios hidrodinâmicos para avaliar o escoamento em filtros de laboratório de areia (FLA) acoplados ao jarteste; e iii) avaliação da qualidade da água filtrada em função da turbidez remanescente.

### Primeira Etapa: Otimização dos Parâmetros em Jarteste

Na primeira etapa, a água de estudo utilizada na pesquisa foi preparada pela adição de 0,16 g/L de caulinita à água de um poço, de forma a elevar a turbidez a valores próximos de 130 uT. Tal água de estudo era homogeneizada em agitador mecânico por 30 min antes de realizar os ensaios em jarteste. A metodologia descrita em Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011) foi adotada para os ensaios.

O cloreto de polialumínio (PAC) com teor de 16,36% de  $Al_2O_3$  foi utilizado como coagulante e, quando necessária, a correção de pH foi realizada com hidróxido de sódio (NaOH).

Na realização dos ensaios preliminares alguns valores foram fixados (Tabela 1) conforme os resultados obtidos por Pavanelli (2001), De Júlio, Fioravante e Graham (2010) e Ferrari, De Júlio e De Júlio (2011).

**Tabela 1: Valores dos parâmetros adotados nos sete ensaios preliminares.**

PARÂMETRO	SIGLA	UNIDADE	VALORES ADOTADOS
Gradiente de velocidade na mistura rápida	$G_{mr}$	$s^{-1}$	1000
Tempo de mistura rápida	$T_{mr}$	s	15
Gradiente de velocidade na mistura lenta	$G_{ml}$	$s^{-1}$	25
Tempo de mistura lenta	$T_{ml}$	min	20
Velocidades de sedimentação	$V_s$	$cm.min^{-1}$	2,5; 2,0; e 1,5
Dosagem de PAC	-----	$mg.L^{-1}$	5 – 65
Dosagem de alcalinizante	-----	$mg.L^{-1}$	0 – 15
pH de coagulação	-----	-----	5,0 – 9,0

O diagrama de coagulação foi construído, determinando a dosagem e o pH ótimos de coagulação. Além disso, os gradientes de mistura rápida ( $G_{mr}$ ) e lenta ( $G_{ml}$ ), os tempos de mistura rápida ( $T_{mr}$ ) e lenta ( $T_{ml}$ ) e a velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) foram otimizados.

## Segunda Etapa: Realização dos Ensaios Hidrodinâmicos

Na segunda etapa, o escoamento nos FLA foi avaliado. Cada filtro, constituído por tubos de acrílico de 19 mm de diâmetro interno e 40 cm de altura, foi preenchido com grãos de areia de granulometria variando entre 0,30 a 0,59 mm (0,42 mm de tamanho efetivo). Cada FLA era preenchido com 15 cm de areia. Na realização de um novo ensaio, a areia era removida, reagrupada em um béquer de 2 L, enxaguada com água da torneira e levada a mufla por 24 h a 110°C.

Além da areia, os FLA eram preenchidos com água da torneira até que fosse obtida uma coluna de água de 17 cm acima do leito filtrante. Os jarros de Jarreste também eram preenchidos com água da torneira até a marcação de 2 L. Por fim, realizavam-se os ajustes das válvulas até que fosse obtida uma taxa de filtração próxima a 20 mL.min<sup>-1</sup> (100 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>).

O ensaio hidrodinâmico consistia na aplicação de sal (NaCl) como traçador injetado como pulso com concentração de 50.000 mg.L<sup>-1</sup>. Tal concentração deveria ser diluída na coluna de 17 cm de água de forma a atingir uma concentração de 100 mg.L<sup>-1</sup>. Para tanto, mediu-se o volume de 50 mL de água removendo-se a mangueira na saída do filtro e coletando em uma proveta. Através da Equação 1, realizou-se o cálculo do volume de pulso a ser inserido na coluna de água.

$$Vol_{pulso} = \frac{Conc_{desejada} \cdot Vol_{filtro} \cdot 1000}{Conc_{pulso}} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que, Vol<sub>pulso</sub>: volume de solução mãe (μL); Conc<sub>desejada</sub>: concentração desejada (mg.L<sup>-1</sup>); Conc<sub>pulso</sub>: concentração do pulso (mg.L<sup>-1</sup>); e Vol<sub>filtro</sub>: volume de água no filtro (mL).

O ensaio hidrodinâmico era iniciado logo após a inserção do pulso na superfície da coluna de água por meio de uma micropipeta automática. Em seguida, iniciava-se a filtração e também a medição da concentração de sal da água filtrada. Tal medição era realizada a cada 3 s por meio de uma sonda de condutividade com interface Go!link.

A curva da distribuição do tempo de residência (DTR) foi obtida conforme equações da Tabela 2.

**Tabela 2: Definição das Variáveis Utilizadas no Ensaio Hidrodinâmico.**

VARIÁVEL	SIGLA	DEFINIÇÃO
Distribuição do tempo de residência (DTR) medido	E(t)	$\frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$
Tempo de residência médio	$\theta_h$	$\int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt$
Tempo de residência adimensional	$\Theta$	$\frac{t}{\theta_h}$
DTR em função do tempo de residência adimensional	$E_{\Theta}$	$\theta_h \cdot E(t)$
Variância na curva DTR	$\sigma^2$	$\int_0^{\infty} (t - \theta_h)^2 \cdot E(t) dt$
Variância adimensional na curva DTR	$\sigma_{\Theta}^2$	$\frac{\sigma^2}{(\theta_h)^2}$

Legenda – C: concentração; t: tempo.  
(2000).

Fonte – Levenspiel

A partir da definição da curva DTR foram aplicados os modelos hidrodinâmicos conforme a Tabela 3.

**Tabela 3: Modelos Hidrodinâmicos Aplicados.**

MODELO	PARÂMETRO	EQUAÇÃO
Pequena dispersão	$\frac{D}{uL} = \frac{\sigma_{\theta}^2}{2}$	$E_{\theta} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi \left(\frac{D}{uL}\right)}} \exp \left[ -\frac{(1 - \theta)^2}{4 \cdot \left(\frac{D}{uL}\right)} \right]$
Grande dispersão	$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left(\frac{D}{uL}\right) + 8 \left(\frac{D}{uL}\right)^2$	$E_{\theta} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi \left(\frac{D}{uL}\right)}} \exp \left[ -\frac{(1 - \theta)^2}{4 \cdot \theta \cdot \left(\frac{D}{uL}\right)} \right]$
N-CSTRs em série	$N = \frac{1}{\sigma_{\theta}^2} = \frac{(\theta_h)^2}{\sigma^2}$	$E_{\theta} = \frac{N(N \cdot \theta)^{N-1}}{(N-1)!} \exp(-N \cdot \theta)$

Legenda – D/uL: número de dispersão.

A análise da qualidade do ajuste dos modelos matemáticos aos dados obtidos experimentalmente foi feita a partir da análise do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), fornecido pela Equação 2.

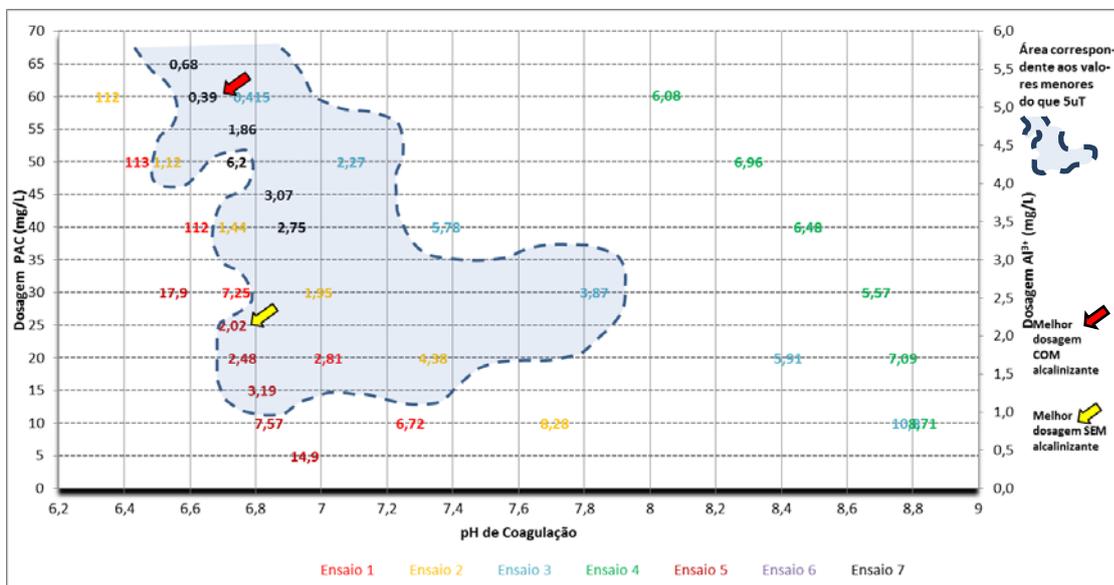
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(E_{\theta})_{real} - (E_{\theta})_{estimado}]^2}{\sum_{i=1}^n [(E_{\theta})_{real} - (E_{\theta})_{m\u00e9dio}]^2} \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o (2)}$$

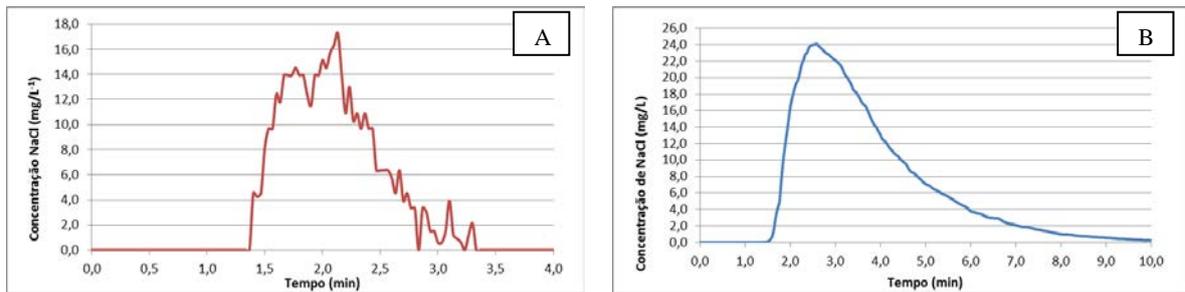
### Terceira Etapa: Avaliação da Qualidade da Água Filtrada

Um \u00faltimo ensaio de tratabilidade da \u00e1gua de estudo (\u00e1gua com caulinita) foi realizado para avaliar a capacidade dos filtros (FLA) em reduzir a turbidez atingindo valores inferiores a 0,5 uT, conforme determina a Portaria MS n\u00b0 2914/2011.

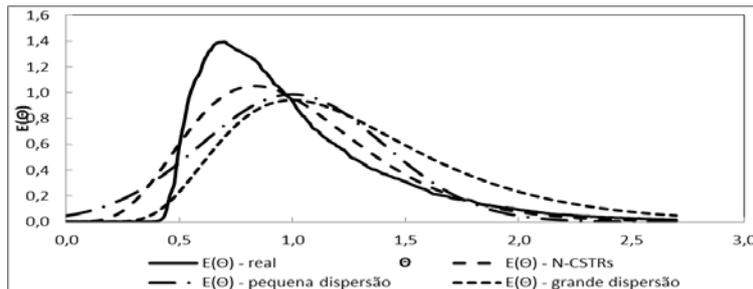
## RESULTADOS

As Figuras 2 a 5 e as Tabelas 2 a 4 apresentam os resultados obtidos.

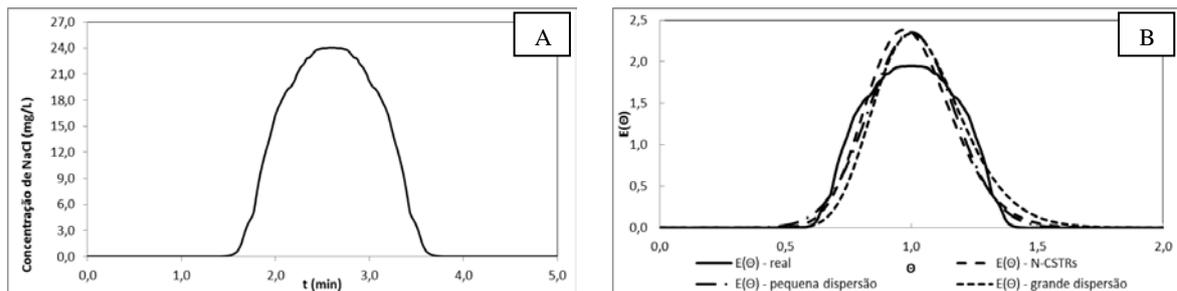




**Figura 3: Ensaios hidrodinâmicos: A – Insatisfatório; B – Satisfatório.**



**Figura 4: Aplicação dos modelos hidrodinâmicos em função da curva DTR real**



**Figura 5: A - Ajuste da curva DTR real; B – Aplicação dos modelos em função da curva DTR ajustada.**

**Tabela 2: Parâmetros Obtidos Após Otimização do Tratamento em Jarteste.**

PARÂMETROS	SIGLA	UNIDADE	VALOR
Dosagem de coagulante	-----	mg.L <sup>-1</sup>	25
Gradiente de mistura rápida	G <sub>mr</sub>	s <sup>-1</sup>	1000
Tempo de mistura rápida	T <sub>mr</sub>	s	10
Gradiente de mistura lenta	G <sub>ml</sub>	s <sup>-1</sup>	25
Tempo de mistura lenta	T <sub>ml</sub>	min	30
Velocidade de sedimentação	V <sub>s</sub>	cm.min <sup>-1</sup>	1,5

**Tabela 3: Parâmetros dos Modelos Ajustados.**

	MODELOS APLICADOS					
	N-CSTRs em série		Pequena dispersão		Grande dispersão	
Curvas DTR	N	R <sup>2</sup>	D/uL	R <sup>2</sup>	D/uL	R <sup>2</sup>
Real	6	0,88	0,082	0,71	0,089	0,59
Ajustada	35	0,94	0,014	0,95	0,014	0,93

**Tabela 4: Qualidade da Água Filtrada.**

FILTRO	TURBIDEZ INICIAL DA ÁGUA DE ESTUDO (uT)	TURBIDEZ EFLUENTE AOS FILTROS (uT)	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ (%)
1	126	0,303	99,76
2	124	0,456	99,63
3	125	0,333	99,73
4	125	0,439	99,65
5	124	0,372	99,70
6	123	0,288	99,77

O diagrama de coagulação (Figura 2) permitiu selecionar como ponto ótimo de tratamento aquele sem o uso de alcalinizante. A turbidez remanescente atingiu o valor de 2,2 uT, com pH de coagulação próximo a 6,75 e dosagem de coagulante PAC de 25 mg.L<sup>-1</sup> (Figura 2). De Júlio *et al.* (2010) determinaram como dosagem ótima de PAC 40 mg.L<sup>-1</sup> que correspondeu a 2,27 mg.L<sup>-1</sup> de Al<sup>+3</sup> e com pH de coagulação de 6,47, valores próximos ao encontrado na presente pesquisa.

Na realização dos ensaios hidrodinâmicos dois resultados demonstraram comportamentos divergentes dos filtros. No comportamento insatisfatório (Figura 3-A) há diversos picos de concentrações de sal e segundo Levenspiel (2000), a anomalia observada corresponde à recirculação do fluido ou formação de caminhos preferencias, o que impossibilita uma análise mais detalhada. Após realização do ensaio, verificou-se a presença de bolsões de ar no filtro, o que pode ter influenciado negativamente no ensaio. No ensaio satisfatório (Figura 3-B), o tempo de detenção hidráulica (TDH) de 2,6 min condiz ao TDH teórico de 2,5 min. O ensaio realizado foi importante para orientar o tempo certo de coleta das amostras visando avaliar a eficiência do tratamento.

Cota (2011) utilizou NaCl como traçador em forma de pulso e também verificou curva assimétrica e cauda alongada nos ensaios hidrodinâmicos, assim como se observa na Figura 4-B. O autor acredita que essa característica seja consequência de fenômenos de difusão em zonas mortas no filtro. Ele também acredita que o traçador (sal) possa ter se difundido nestas zonas, sendo liberado aos poucos, por isso o atraso na resposta.

A aplicação dos modelos hidrodinâmicos (Tabelas 2 e 3) ao a detenção do tempo de residência (DTR) real obtido na Figura 4-B gerou os gráficos apresentados na Figura 5. Observa-se que o modelo que mais se aproxima é o modelo N-CSTRs.

De forma a avaliar melhor o comportamento do filtro evitou-se o encaudamento quando a curva DTR real (Figura 4-B) foi “rebatida” gerando a Figura 5-A. Os modelos N-CSTR, de grande e pequena dispersão foram novamente aplicados e gerou-se a Figura 5-B. Além disso, os modelos ajustados foram descritos na Tabela 3.

A análise da Tabela 3 comprova a escolha do modelo CSTR de acordo com o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) gerado, sendo de 0,88 para o modelo CSTR, e de 0,71 e 0,59 para os modelos de pequena e grande dispersão, respectivamente. A quantidade reatores em série obtida foi de N = 6 para o ajuste do modelo CSTR na curva real e de N = 35 excluindo-se a cauda. Segundo Levenspiel (2000), para N > 30 o equacionamento do sistema pode ser feito seguindo-se o modelo de fluxo em pistão ideal. Portanto, o filtro avaliado pode trabalhar de maneira pistonada variando entre 6 e 35 reatores em série.

Na terceira etapa, um último ensaio de tratabilidade foi realizado e verificou-se que a turbidez remanescente atingiu o padrão de potabilidade (Tabela 3), com remoção superior a 99%.

## CONCLUSÕES

O tratamento nas condições ótimas, utilizando cloreto de polialumínio como coagulante, removeu mais de 99% de turbidez, atendendo ao padrão de potabilidade. Os filtros de laboratório podem trabalhar de forma pistonada variando entre 6 e 35 reatores em série. Os ensaios hidrodinâmicos são fundamentais para determinar o tempo certo de coleta das amostras visando avaliar o desempenho do tratamento.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo projeto temático (Processo nº 2012/50522-0) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa de mestrado outorgada a Guilherme Lelis Giglio.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12 de Dezembro de 2011. Publicada no D.O.U. Nº 239, Seção 1, página 39 de 14/12/2011. Brasília.
2. COTA, R. S. Hidrodinâmica e desempenho de filtros verticais com alimentação em pulso, plantados e não plantados, empregados no tratamento de esgoto sanitário bruto. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Brasil, 2011.
3. DE JULIO, M.; FIORAVANTE, D. A.; GRAHAM, N. J. D. Remoção de cianobactérias de água proveniente de manancial brasileiro eutrofizado, utilizando os diagramas de coagulação para o sulfato de alumínio e PAC. Engenharia Civil UM, nº 37, 2010.
4. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. São Carlos, RiMa, 2ed. v. 2, p. 1565, 2005.
5. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. Tratabilidade de Água e dos Resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água. Editora LDiBe, 2011.
6. FERRARI, T. N.; DE JULIO, M.; DE JULIO T., S. Emprego do Sulfato de Alumínio e do Cloreto de Polialumínio em estudos de Tratabilidade da Água que abastece o Município de São José dos Campos - Sp. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 4, p. 118-137, 2011.
7. LEVENSPIEL, O. Engenharia das Reações Químicas. São Paulo: Blucher, 2000.
8. LIBÂNIO, M. Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água. Ed. Átomo. Belo Horizonte-MG, 2008.
9. PAVANELLI, G. Eficiência de Diferentes Tipos de Coagulantes na Coagulação, Flocculação e Sedimentação de Água com Cor ou Turbidez Elevada. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo - EESC/USP. Brasil, 2001.
10. PEGORARO, P. R. Distribuição do tempo de residência e letalidade no processamento térmico contínuo de líquidos com escoamento laminar não ideal em trocadores bitubulares. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo – USP. Brasil, 2012.