

## I-027 – REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ UTILIZANDO CICLO COMPLETO COM FLOTAÇÃO: ESTUDO EM ESCALA DE BANCADA

**Fernando César Andreoli<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutorando em Hidráulica e Saneamento na EESC/USP.

**Dayane Mendes Boni<sup>(2)</sup>**

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná (UNICENTRO). Mestra em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

**Lyda Patricia Sabogal-Paz<sup>(3)</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 7D, 254 – Vila Santa Cruz - Itirapina - SP - CEP: 13530-000 - Brasil - Tel: (16) 997586043 - e-mail: fernandoandriolli@yahoo.com.br

### RESUMO

Esta pesquisa avaliou a remoção de turbidez e cor aparente de amostras de água de abastecimento utilizando a tecnologia de ciclo completo com flotação (coagulação, floculação, flotação e filtração) em escala de bancada, empregando o cloreto de polialumínio – PAC como coagulante. A água de estudo apresentava, aproximadamente, 50 uT de turbidez e 80 uH de cor verdadeira. O aumento da turbidez aconteceu pela adição de caulinita (Caolim, Pheur – *Sigma-Aldrich*® – Fluka-60609) e a presença de cor verdadeira pela adição de ácido húmico (Sal Sódico, Grau Técnico *SigmaAldrich*® – H16752). A dosagem de PAC definida foi de 25 mg.L<sup>-1</sup> e foram estabelecidos os seguintes valores de tratabilidade: Gmr = 700s<sup>-1</sup>, Tmr = 10s, Gml = 60s<sup>-1</sup>, Tml = 4min, Tf = 10min e Rec = 5%. A dosagem de PAC utilizada foi eficiente na remoção dos parâmetros presentes na água de estudo e o tratamento de ciclo completo com flotação e filtração utilizado obteve valores na água final que atenderam ao padrão de potabilidade (Portaria MS nº 2914/2011).

**PALAVRAS-CHAVE:** Flotação, PAC, diagrama de coagulação, filtro de areia, padrão de potabilidade.

### INTRODUÇÃO

A tecnologia de ciclo completo é mais utilizada no Brasil. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010), entre os municípios que possuem tratamento de água, 54% utilizam esse tipo de tratamento. Porém, em termos de volume, tal tecnologia responde por cerca de 70% da água tratada no país. Esta tecnologia consiste em um conjunto de processos e operações (coagulação, floculação, decantação ou flotação e filtração). Posteriormente à filtração, também são realizados os processos de desinfecção e ajuste do pH.

Atualmente, existem diversas alternativas de tratamento de água, entre elas, o ciclo completo com flotação se destaca, pois possui grande capacidade de remoção de cor verdadeira, muitas vezes associada à presença de algas nos mananciais. Com o aumento da eutrofização dos corpos d' água, pode-se supor a tendência de maior utilização dessa tecnologia.

O tratamento por flotação pode ser simulado através de ensaios em escala de bancada, assim é possível obter de forma mais rápida e econômica alguns parâmetros de projeto. O aparelho floteste pode ser utilizado para tal fim, sendo constituído por câmara de pressurização, jarros, conjuntos de dosagem e de coleta e motor agitador. Em alguns casos o floteste permite a instalação de filtros de laboratório visando simular o tratamento completo, da coagulação até a filtração.

A utilização do PAC normalmente elimina o uso de alcalinizante ou acidificante, reduzindo os custos (SILVA *et al.*, 2009). Caetano e Lopes (2009) ressaltam a possibilidade de o PAC apresentar uma menor capacidade de

produção de lodo quando comparado aos coagulantes tradicionalmente empregados no tratamento de águas de abastecimento.

A correta disposição dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água – ETA apresenta um grande desafio para as instituições que gerenciam tais sistemas, tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo. A NBR 10004 (ABNT, 2004) diz que os resíduos de ETA, mesmo contendo mais de 95% de água na maioria dos casos, são considerados como “resíduos sólidos”, portanto, não podem ser lançados nos cursos hídricos. Mesmo com essas proibições, 67% dos municípios brasileiros que geram lodo no tratamento de água despejam esses resíduos nos rios (IBGE, 2010).

## OBJETIVO

Avaliar o desempenho da tecnologia de ciclo completo com flotação, em escala de bancada, na remoção de cor e turbidez.

## METODOLOGIA

Para a realização da pesquisa, foi preparada uma água de estudo que se assemelhe às características comuns às águas brutas tratadas pela tecnologia de ciclo completo com flotação, especialmente em relação aos parâmetros de cor verdadeira e turbidez. Nesse sentido, foram adicionados 18g de caulinita e 2g de ácido húmico em bateladas de 200L de água de poço e agitados em misturador elétrico.

Através do equipamento conhecido como floteste, foram realizados diversos ensaios visando reproduzir a tecnologia de ciclo completo com flotação, em escala de bancada (Figura 1). Os ensaios foram realizados utilizando o cloreto de polialumínio – PAC como coagulante e como referência as metodologias de Di Bernardo et al. (2011) e Edzwald & Haarhoff (2011).

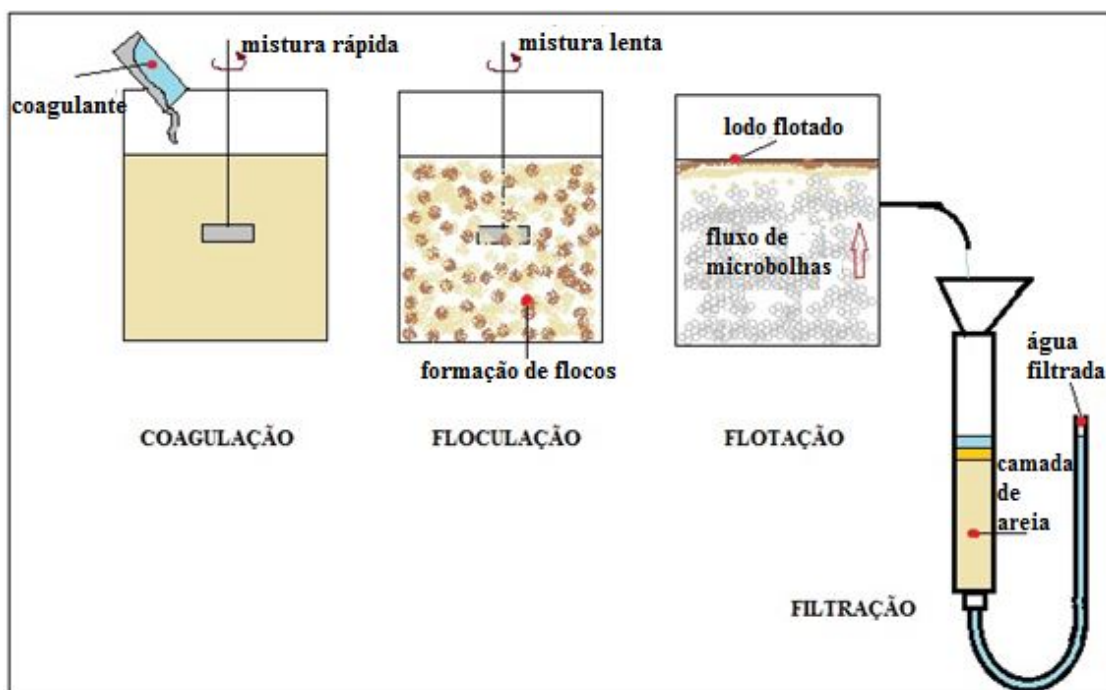


Figura 1: Esquema do tratamento por ciclo completo com flotação em escala de bancada

Depois de fixados alguns parâmetros de tratabilidade e repetidos diversos ensaios variando as dosagens de coagulante e alcalinizante (hidróxido de sódio), diagramas de coagulação foram construídos para indicar as melhores remoções de cor aparente e turbidez na água clarificada.

Após a definição da dosagem de coagulante, ensaios foram realizados visando a otimização dos seguintes parâmetros: gradiente médio de mistura rápida - Gmr e tempo de mistura rápida - Tmr; gradiente médio de mistura lenta - Gml e tempo de mistura lenta - Tml; tempo de flotação - Tf e taxa de recirculação - Rec.

Posteriormente, o aparelho conhecido como flotateste de coluna foi utilizado para a determinação das curvas de flotação da água de estudo.

Para os ensaios com filtração, foram utilizados filtros de laboratório de areia e seguindo a metodologia utilizada por Giglio (2015). A taxa de filtração máxima estabelecida foi de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ .

A água de estudo, a água clarificada e os resíduos (lodo flotado e água de lavagem dos filtros) obtidos no flote teste foram caracterizados seguindo as metodologias de APHA et al. (2012), analisando os seguintes parâmetros: turbidez, cor aparente, cor verdadeira, pH, potencial zeta, condutividade, absorvância, alcalinidade, série de sólidos (sólidos totais, fixos e voláteis e sólidos solúveis totais, fixos e voláteis), sólidos sedimentáveis, COT, DQO e metais (alumínio, chumbo, cádmio, ferro, manganês e mercúrio).

## RESULTADOS

As características das amostras avaliadas estão na Tabela 1 e os diagramas de coagulação obtidos estão nas Figuras 2 e 3. Os resultados da otimização estão nas Figuras 4 e 5.

**Tabela 1: Características das águas e resíduos gerados nos ensaios**

Parâmetros	Água de estudo	Lodo flotado	Água clarificada	Água de lavagem	Água filtrada
Turbidez (uT)	54,8	459	3,64	3,56	0,2
Cor aparente (uH)	165	395	16,8	11,9	0
pH	6,64	6,73	6,69	6,42	6,8
Potencial zeta (mV)	25,2	-0,169	-0,611	0,454	-0,22
Condutividade ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	60,7	41,95	56,67	15,472	53,25
Absorvância (254)	0,259	0,028	0,017	0,012	0,016
Alcalinidade ( $\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ )	51,35	35,79	35,79	10,89	32,29
Sólidos totais ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NM	0,71	NM	0,12	NM
Sólidos voláteis totais ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NM	0,17	NM	0,09	NM
Sólidos fixos totais ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NM	0,54	NM	0,03	NM
Sólidos suspensos totais ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NM	0,48	NM	0,01	NM
Sólidos suspensos voláteis ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NM	0,07	NM	0,01	NM
Sólidos suspensos fixos ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NM	0,41	NM	0	NM
Sólidos sedimentáveis (%)	NM	1,8	NM	NM	NM
COT ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	2,205	11,454	NM	0,048	NM
DQO ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NM	105,84	NM	0	NM
Alumínio ( $\text{mg Al} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0,69	0,83	0,83	1,17	0,21
Chumbo ( $\text{mg Pb} \cdot \text{L}^{-1}$ )	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cádmio ( $\text{mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0,019	0,003	0,003	0,031	0,005
Ferro ( $\text{mg Fe} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0,26	0,063	0,063	0,104	0,062
Manganês ( $\text{mg Mn} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0,006	0,006	0,006	0,014	0,019
Mercúrio ( $\text{mg Hg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD

Nota: NM: não medido; LD: limite de detecção

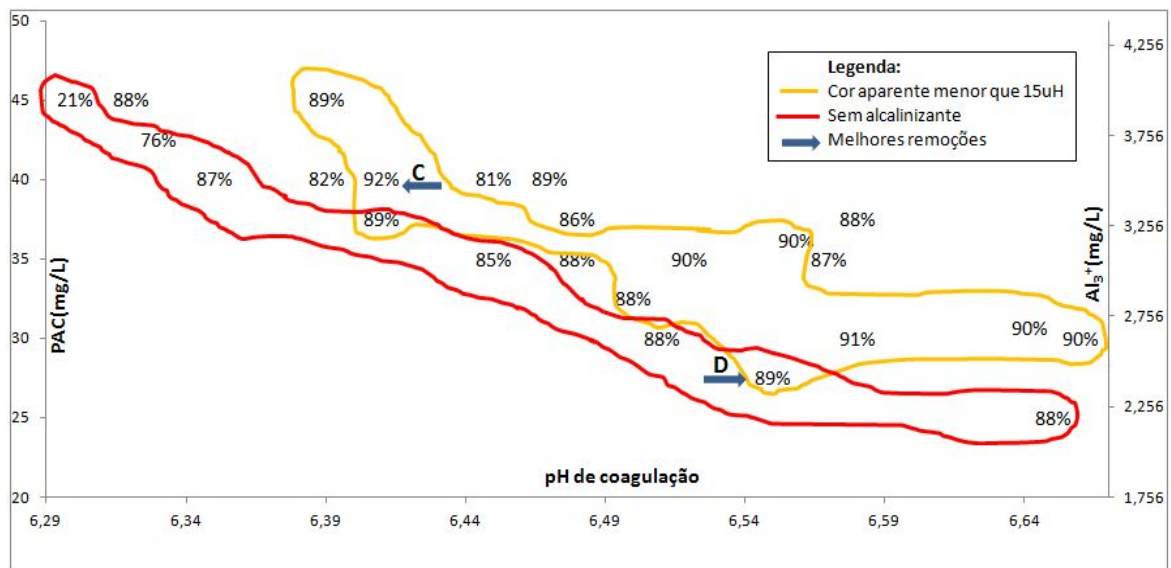


Figura 2: Diagrama de coagulação em relação à cor aparente

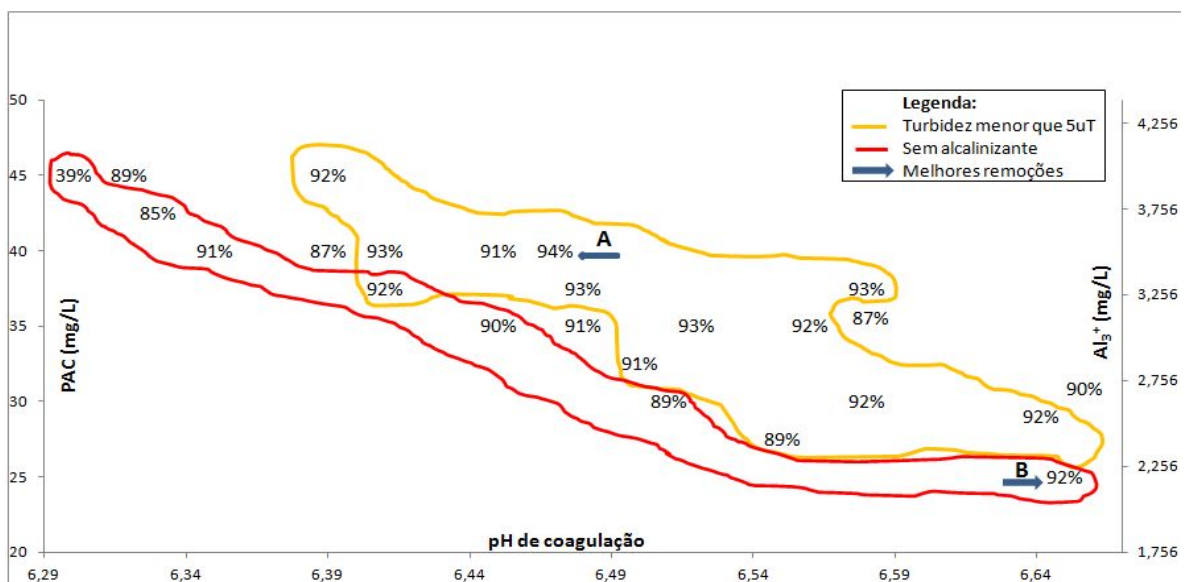


Figura 3: Diagrama de coagulação em relação à turbidez

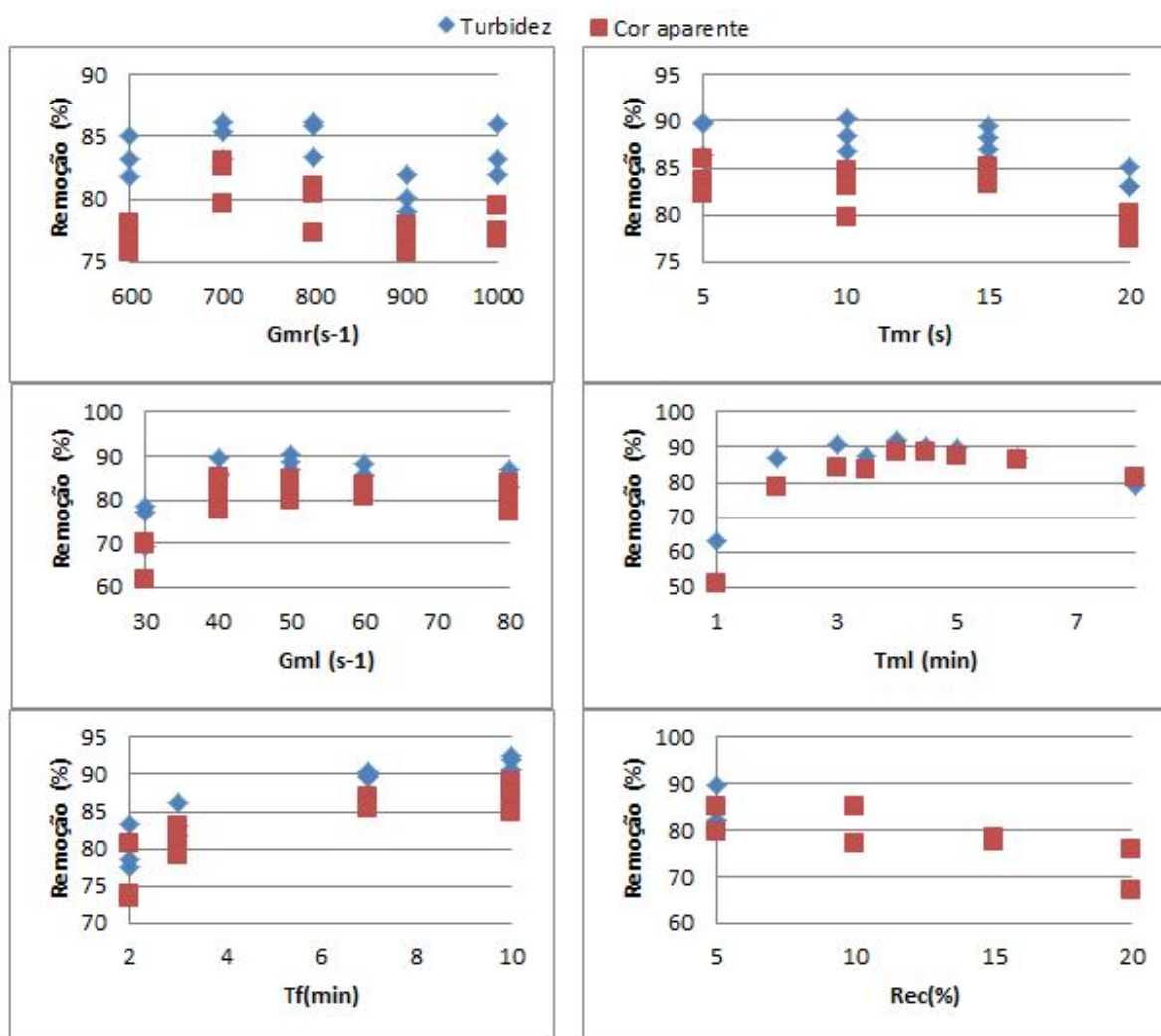


Figura 4: Otimização de parâmetros

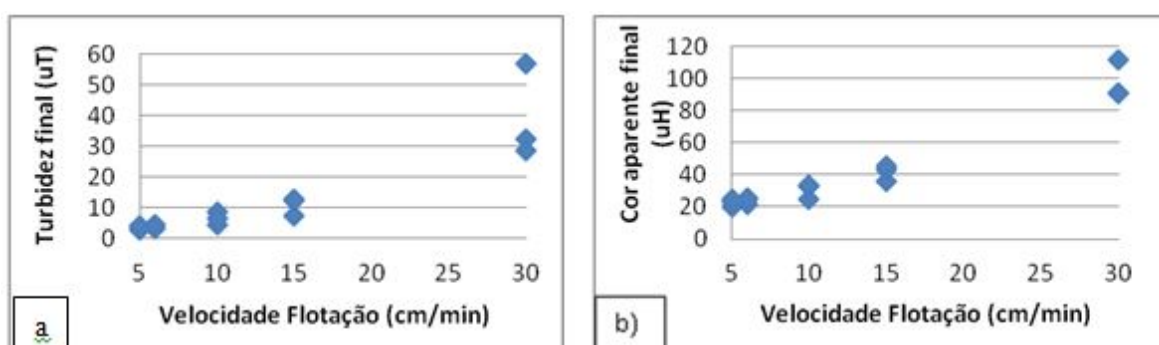


Figura 5: Curvas de flotação para turbidez (a) e cor aparente (b)

A água de estudo tinha valores de cor, turbidez e COT semelhantes aos apresentados por Valade et al. (2009) para as águas brutas características nas quais se recomenda a utilização do tratamento por ciclo completo por flotação, segundo Tabela 1.

Ao analisar os parâmetros medidos (Tabela 1), é possível observar os maiores valores no lodo flotado, principalmente em relação à cor, turbidez, sólidos, DQO e COT. Tal fato indica a separação das impurezas da água de estudo e conseguinte concentração das mesmas no resíduo. Além disso, ao comparar as características do lodo flotado com os resultados de Marwell (2004) sobre o resíduo gerado na instalação piloto de flotação

da ETA-Brasília (DQO de 19,1mg.L<sup>-1</sup>, pH de 5,4 e 2,6% de sólidos totais), nota-se que os resíduos são diferentes, apesar de ambos utilizarem o mesmo tipo de coagulante (PAC). Tal constatação indica que as características do lodo flotado dependem da qualidade da água bruta.

A água de lavagem dos filtros apresentou, no geral, maior concentração de metais em comparação às demais amostras (Tabela 1). Apesar disso, nota-se a presença de metais no lodo flotado, assim como foram detectados também no resíduo flotado da instalação experimental do rio Pinheiros (CIRQUEIRA, 2009).

Também é possível observar a redução gradual de muitos parâmetros entre a água de estudo, a água clarificada e a água filtrada, advertindo a eficiência progressiva do tratamento (Tabela 1).

Em relação ao alumínio, houve uma maior concentração nos resíduos do que na água de estudo, fato que confirma a presença desse elemento no coagulante (PAC).

Nos diagramas de coagulação (Figuras 2 e 3), o ponto selecionado foi o ponto B, que apresentou maior eficiência sem necessidade de alcalinizante, por ser viável economicamente em sistemas em escala plena. Essa dosagem de coagulante escolhida (25mg.L<sup>-1</sup> de PAC) foi a mesma definida por Giglio (2015) e Maciel (2014) em ensaios de tratabilidade com sedimentação.

Ao analisar os resultados da otimização de parâmetros, foram definidos os seguintes parâmetros de projeto: Gmr = 700s<sup>-1</sup>, Tmr = 10s, Gml = 60s<sup>-1</sup>, Tml = 4min, Tf = 10min e Rec = 5% (Figura 4).

Nas curvas de flotação obtidas (Figura 5), as melhores remoções de turbidez e cor aparente se encontram nas menores velocidades de flotação. Tal resultado é semelhante às curvas de flotação realizadas por Reali et al. (2003) na otimização de parâmetros para tratamento de água com alta turbidez. Assim, a velocidade de flotação de 5,0cm.min<sup>-1</sup> foi selecionada.

Segundo a Portaria nº 2914 (BRASIL, 2011), a água potável, tratada por tecnologias com coagulação química, deve apresentar até 0,5uT e 15uH para turbidez e cor aparente, respectivamente. Portanto, sobre esses parâmetros a pesquisa atendeu ao padrão de potabilidade.

## CONCLUSÕES

A água de estudo preparada e os ensaios de tratabilidade em escala de bancada permitiram verificar o funcionamento do tratamento de ciclo completo com flotação. Consequentemente, os seguintes parâmetros de projeto foram obtidos: dosagem de PAC = 25mg.L<sup>-1</sup>; Gmr = 700s<sup>-1</sup>; Tmr = 10s; Gml = 60s<sup>-1</sup>; Tml = 4min; Tf = 10min; Rec = 5% e Velocidade de flotação de 5cm.min<sup>-1</sup>.

A qualidade das águas clarificada e filtrada revelou a remoção progressiva das variáveis de interesse e a água filtrada atendeu ao padrão de potabilidade.

## 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 às instituições Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CPNq e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelas bolsas concedidas nos mestrados de Fernando César Andreoli e Dayane Mendes Boni, respectivamente.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Norma Brasileira 10004: Resíduos Sólidos – Classificação, 2004. Disponível em: <<[http://www.ccs.ufrj.br/images/biosseguranca/CLASSIFICACAO\\_DE\\_RESIDUOS\\_SOLIDO\\_S\\_NBR\\_10004\\_ABNT.pdf](http://www.ccs.ufrj.br/images/biosseguranca/CLASSIFICACAO_DE_RESIDUOS_SOLIDO_S_NBR_10004_ABNT.pdf)
2. APHA; AWWA; WEF. Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington. 22º Ed. EUA. 2012.
3. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de Dezembro de 2011. Publicada no D.O.U. Nº 239, Seção 1, página 39 de 14/12/2011. Brasília. 2011.
4. CAETANO, J. F.; LOPES, W. R. D. Avaliação da eficiência do coagulante cloreto de polialumínio na ETA Alto da Boa Vista, como alternativa ao sulfato e cloreto férricos. 19º ENCONTRO TÉCNICO AESABESP. São Paulo, 2009.
5. CIRQUEIRA, L.N. Estudo da Composição do Lodo de Flotação. Universidade Federal do ABC. 2009.
6. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. Tratamento de Água e dos Resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água. Editora LdiBe. 2011.
7. EDZWALD, J; HAARHOFF, J. Dissolved air flotation for water clarification. McGraw-Hill, New York. 2011.
8. GIGLIO, G.L. Avaliação de Diversos Métodos de Detecção de Cistos de *Giardia* spp. e *Cryptosporidium parvum* Presentes no Resíduo Gerado Após o Tratamento de Água de Abastecimento com Turbidez Elevada. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos. 2015.
9. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Rio de Janeiro. Brasil, 2010.
10. MACIEL, P.M.F. Remoção de *Giardia* spp. e *Cryptosporidium* spp. em Águas de Abastecimento com Turbidez Elevada Utilizando Cloreto de Polialumínio: Estudo em Escala de Bancada e Desafios Analíticos. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos. 2014.
11. MARWELL, D.T.B. Estudo da Desidratação por Centrifugação do Lodo Produzido do Flotador da ETA Piloto Brasília. Universidade de Brasília, Brasília. 2004
12. REALI, M.A.P; MORUZZI, R.B.; PATRIZZI, L.J. Flotação por ar dissolvido aplicada na clarificação de águas que apresentam picos de turbidez. 22º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, 2003.
13. SILVA, E. G. P.; NASCIMENTO, S. G.; AGUIAR, J. H. S. O.; SHINDO, N.; GINO, M. A. P. Uso do Cloreto de Polialumínio na Estação de Tratamento de Água – Guaraú. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25, 2009, Recife. Anais eletrônicos: I-034.
14. VALADE, M.T.; BECKER, W.C.; EDZWALD, J.K. Treatment Selection Guidelines for Particle and NOM Removal, Journal of Wather Supply: Research and Technology – Aqua. 2009.