

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

EFICIÊNCIA DA FLOCULAÇÃO EM CORTINAS INTEGRADA À FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO APLICADA AO TRATAMENTO DE AGUA DE LAVAGEM DE FILTROS

Karina Oliveira Chaves¹
Manoel do Vale Sales²
*José Capelo Neto³

*EFFICIENCY OF CURTAIN FLOCCULATION INTEGRATED
WITH DISSOLVED AIR FLOTATION APPLIED TO WATER
TREATMENT SLUDGE*

Recibido el 15 de octubre de 2014; Aceptado el 9 de septiembre de 2015

Abstract

The idea of integrating hydraulic flocculation with Dissolved Air Flotation (DAF) into one unit had as fundamental hypothesis the simplicity of this type of flocculation, the reduction of the required volumes and the high efficiency and robustness provided by dissolved air flotation. A pilot Flocculation - Dissolved Air Flotation (FDAF) unit was built to treat filter backwash-sludge produced by a direct filtration water treatment plant. The new system required a low overall hydraulic detention time (22 min) and showed high efficiency with significant removal of colour (98.1%), total coliform (98.2%), suspended solids (87.1%), COD (92.5%), aluminium (88.5%) and turbidity (99.2%). The FDAF adjusted the effluent to Brazilian reuse standards and presented a high resilience to affluent quality variations. Thus, FDAF technique proved to be feasible for the treatment of filter backwash-sludge and for other types of wastewater containing low-density solids, reducing significantly the volume requirement as compared to conventional sedimentation or dissolved air flotation clarification processes.

Key Words: Curtin flocculation, dissolved air flotation, WTP sludge treatment.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil.

² Companhia de Água e Esgoto do Ceará, Brasil.

³ Universidade Federal do Ceará - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Brasil.

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Seção Laboratorial de Qualidade de Água (SELAQUA), Bloco 720, Universidade Federal do Ceará. Av. Humberto Monte, s/n, CEP - 60451-970, Fortaleza – CE, Brasil.
Email: capelo@ufc.br

Resumo

A ideia de integrar em uma só unidade a floculação em cortinas com a flotação por ar dissolvido, teve como hipótese inicial a possibilidade da redução dos volumes necessários ao sistema de tratamento de lodo de ETA, mantendo a elevada eficiência da Flotação por Ar Dissolvido (FAD). Uma unidade piloto de floco-flotação por ar dissolvido (FFAD) foi construída para tratar água de lavagem dos filtros (ALF) oriunda de ETA por filtração direta. A ALF e a água clarificada via FFAD foram caracterizadas segundo a legislação de lançamento de efluentes em corpos hídricos e para reuso. Diversas condições operacionais foram testadas e os resultados demonstraram que o novo sistema apresenta um baixo tempo de detenção hidráulica (22 min.), elevada eficiência com redução significativa de cor (98.1%), turbidez (99.2%), coliformes totais (98.2%), sólidos suspensos (87.1%), alumínio (88.5%) e demanda química de oxigênio - DQO (92.5%). O efluente foi ajustando aos padrões de lançamento, além de elevada estabilidade frente às variações da qualidade do afluente.

Palavras chave: Floculação em cortinas, flotação por ar dissolvido, tratamento de lodo de ETA.

Introdução

Os resíduos de estações de tratamento de água (ETA) ou lodos de ETA, são formados basicamente pelos sólidos suspensos presentes na água *in natura* associados aos produtos químicos adicionados durante o tratamento. É caracterizado como um fluido não newtoniano, volumoso e tixotrópico, apresentando-se em estado gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado (Silva Júnior e Isaac, 2002). São oriundos das descargas dos decantadores e/ou da água de lavagem dos filtros, a depender da tecnologia de tratamento adotada na estação de tratamento (Di Bernardo e Dantas, 2005).

A água de lavagem dos filtros apresenta baixa concentração de sólidos, sendo constituída por flocos na forma de hidróxidos metálicos, que são normalmente leves e com baixa velocidade de sedimentação. Esses flocos são formados através da ligação entre as partículas contidas na água e os agentes coagulantes e floculantes. Estes produtos químicos contendo cátions com maiores valências são capazes de melhorar o desempenho das etapas de coagulação e floculação no tratamento de água (Bourgeois *et al.*, 2004).

Um dos principais fatores no gerenciamento dos processos de tratamento de resíduos gerados em ETAs é a quantidade de água presente. Esta água torna o resíduo volumoso e gelatinoso, dificultando o seu desaguamento. Assim, faz-se necessária uma etapa para redução do volume, o adensamento, seja por gravidade ou flotação. O destino final dos resíduos é uma das tarefas mais difíceis nas ETAs, pois envolve elevados custos de manuseio, de transporte e várias restrições ambientais (Januário e Ferreira Filho, 2007). Dessa forma, configura-se em mais um desafio a ser enfrentado pelas companhias de saneamento, que tem recebido uma maior atenção no Brasil nos últimos anos.

O tratamento dos resíduos de ETA depende da qualidade da água *in natura*, pois quando nesta há sólidos com densidade elevada, o processo de sedimentação é favorecido. Caso contrário, quando os sólidos apresentam-se com baixa densidade (algas, por exemplo) a flotação por ar dissolvido (FAD) torna-se a técnica mais indicada (Bourgeois *et al.*, 2004).

A FAD é projetada para separação de sólido-líquido ou líquido-líquido quando se deseja remover partículas, geralmente encontrada como emulsões muito finas, sólidos em suspensão, microrganismos ou dispersão coloidal (Rosa e Rubio, 2005). Essa técnica oferece vantagens sobre os processos de sedimentação, filtração, precipitação e adsorção por melhorar a qualidade da água clarificada, rápida inicialização do processo, alta taxa de operação, formação de lodo adensado, baixo tempo de residência, melhor taxa de agregação de sólidos, baixas sensibilidades à variação da vazão afluente, além de requerer menores áreas para instalação e maior flexibilidade na alteração dos parâmetros operacionais (Arnold *et al.*, 1995; Ferris *et al.*, 2001). Desta forma, diferentes autores propõem a FAD para o tratamento destes resíduos, por apresentar vantagens técnicas e econômicas (Rubio *et al.*, 2002; Tessele *et al.*, 2005).

Diversas configurações de sistemas de flotação têm sido desenvolvidas (Rubio *et al.*, 2002). Contudo, para tratamento de água, a unidade de floculação, com tempo de detenção hidráulica-TDH entre 20 e 30 minutos, encontra-se geralmente antecedendo (em linha) a etapa da flotação, com TDH entre 15 e 20 minutos (Kawamura, 2000), tornando elevado o TDH de todo o processo de clarificação.

Assim, com o objetivo de reduzir o TDH global mantendo-se a qualidade obtida no processo de FAD, este trabalho tem como hipótese a possibilidade de incorporar a floculação em cortinas (placas verticais com orifícios) na mesma unidade onde a FAD se processa, promovendo a formação do floco com a agregação das microbolhas de forma concomitante. Com isto, espera-se reduzir o tempo de detenção do processo e conseqüentemente minimizar os custos de implantação das estações de tratamento de rejeitos gerados - ETRG, tornando o atendimento às exigências ambientais economicamente viáveis.

Este trabalho tem como objetivos, investigar as diferentes condições operacionais de um novo sistema de tratamento que agrega em uma só as unidades de floculação e FDA, de forma a subsidiar futuros projetos em escala piloto e real e confrontar sua eficiência no tratamento do lodo de ETA frente às exigências legais estadual e federal.

Metodologia

Construção da Unidade Piloto de Floco-Flotação por Ar Dissolvido (FFAD)

A unidade piloto de FFAD (Figura 1) foi construída em acrílico transparente, de forma a facilitar a visualização do processo, e adjacente a uma estação de tratamento de água por filtração direta que utiliza água de manancial superficial. A água de lavagem do filtro (ALF) foi coletada através de bomba submersa e em seguida armazenada por curto período de tempo (máximo de 3 horas) em contêineres agitados com capacidade total de 3m^3 e a partir daí, encaminhada por gravidade ao equipamento FFAD. A vazão foi controlada por válvula do tipo gaveta com auxílio de rotâmetro. A cada início dos experimentos, coletava-se a ALF proveniente de um mesmo filtro com carreira de filtração média de 6 horas.

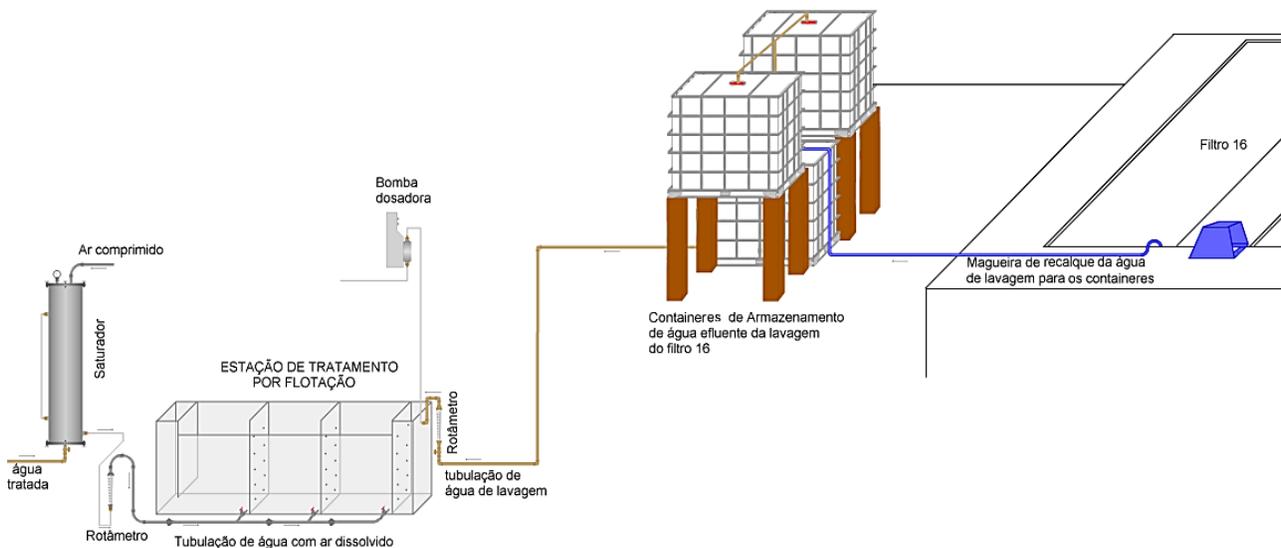


Figura 1. Ilustração esquemática da unidade piloto de Floco- Flotação por Ar Dissolvido (FFAD)

Para a construção do equipamento, foram utilizados os parâmetros de projeto apresentados na Tabela 1. A taxa de recirculação (TR) corresponde à razão entre a vazão de água saturada com ar dissolvido e a vazão afluyente ao equipamento, enquanto que a Taxa de Aplicação Superficial (TAS) foi definida pela soma das duas vazões (afluyente e de recirculação) dividida pela área útil do equipamento.

Tabela 1. Parâmetros e dados de projeto utilizados para construção do FFDA

PARÂMETROS DE PROJETO E OPERAÇÃO		
Taxa de aplicação superficial	54.4	$\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{dia}^{-1}$
Gradientes de velocidade (1º, 2º e 3º cortinas)	19.3 / 12.4 / 5.6	s^{-1}
Tempo de Detenção Hidráulico	22	min.
Diâmetro dos orifícios da 1ª câmara	8	mm
Diâmetro dos orifícios da 2ª câmara	10	mm
Diâmetro dos orifícios da 3ª câmara	15	mm
Distância entre as cortinas	0.5	m
Distância entre os orifícios	0.2	mm
Número de orifícios na horizontal	2	-
Número de orifícios na vertical	5	-
Velocidade Longitudinal	9	cm s^{-1}

O equipamento FFDA agrega em um mesmo tanque o floculador de cortina e a área disponível para flotação de sólidos. Tem formato retangular, com altura útil de 0.75m, comprimento de 1.94m e largura de 0.25m (Figura 2). Utilizaram-se placas verticais perfuradas para delimitar as três câmaras de flotação, onde ocorre a introdução da água saturada com ar dissolvido.

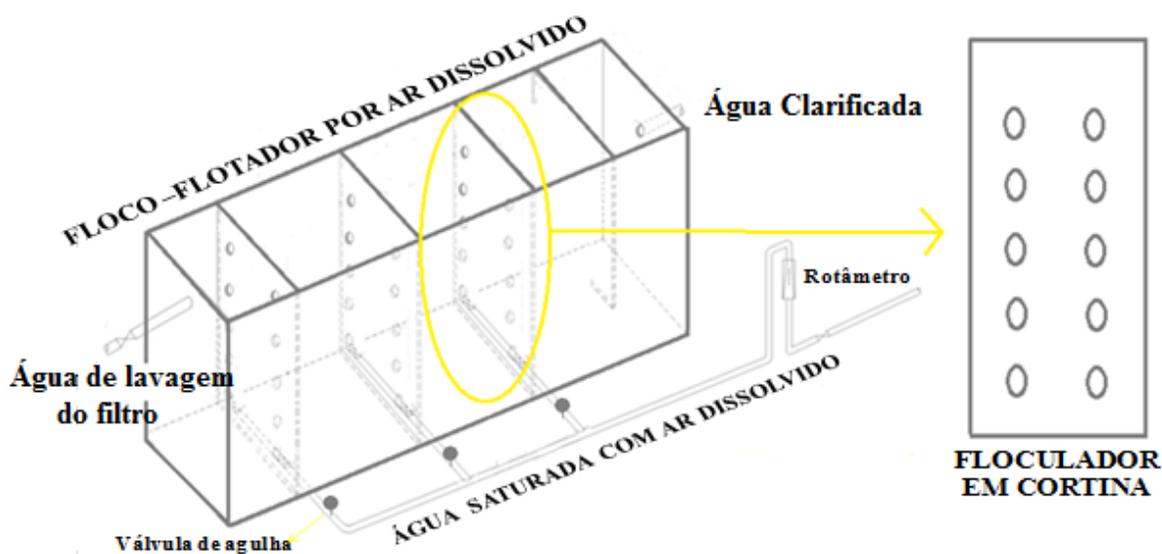


Figura 2. Ilustração do equipamento FFAD e das cortinas responsáveis pela floculação

A diminuição do gradiente de velocidade médio ao longo da unidade de floculação em escoamento contínuo tem sido amplamente utilizada em projetos de estações de tratamento de água já que apresenta um potencial do aumento da eficiência de clarificação (Di Bernardo *et al.*, 2005). Assim, as placas do floculador de cortina foram dimensionadas para proporcionar gradientes hidráulicos gradualmente decrescentes nas três câmaras ao longo do percurso longitudinal da água.

Vários conjuntos de gradientes de velocidade (Gr) foram testados em *jar-test*, sendo os utilizados os que resultaram em melhor eficiência (dados não apresentados). A formulação matemática para o dimensionamento dos Gr das placas perfuradas foi baseada na metodologia estabelecida para o projeto de cortinas de distribuição de água floculada em decantadores (Di Bernardo e Giorgetti, 1980). Os equipamentos acessórios utilizados foram: bombas dosadoras para aplicação de polímero, câmara de saturação de alta pressão, sistema de ar comprimido, bomba centrífuga multiestágio de alta pressão e dois rotâmetros, um para a ALF e outro para a água saturada.

O equipamento FFDA foi compartimentalizado em cinco câmaras. A primeira denomina-se câmara de mistura, sendo utilizada para a introdução da ALF juntamente com a dosagem de polímero. A agitação da tubulação de entrada ($Gr=800\text{ s}^{-1}$) foi aproveitada para promover a mistura do polímero. A injeção de água saturada com ar dissolvido ocorreu na parte inferior das 3 câmaras seguintes, denominadas de câmaras de flotação. A última placa, uma divisória em acrílico não perfurada, delimitou a última câmara, câmara de captação, utilizada para a coleta de água clarificada (AC).

O sistema de recirculação de água saturada contendo ar dissolvido foi constituído basicamente por um vaso de PVC, reforçado com fibra de vidro, que recebe água clarificada e ar sob pressão de um conjunto motor-bomba e de um compressor, respectivamente. Três válvulas em aço inox do tipo agulha foram responsáveis pela despressurização e injeção da água saturada com ar atmosférico nas câmaras de flotação do equipamento. A pressão na câmara de saturação, com uma eficiência projetada de $f=0.8$, foi mantida em 5 Kgf.cm^{-2} e temperatura média de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Testes em Bancada

Inicialmente, foram realizados ensaios de floculação em *jar-test* para verificar a eficiência da aplicação de polímero catiônico (FO4350, Floerger) como auxiliar de floculação. O *jar-test* é uma ferramenta viável e simples para identificação da eficiência da floculação de água e efluentes (Monteggia e Tessele, 2001), podendo seus resultados serem aplicados de forma confiável tanto na clarificação por sedimentação quanto por flotação. Não houve a necessidade do emprego de agentes coagulantes já que os sólidos da água de lavagem dos filtros encontravam-se desestabilizados. Este trabalho não teve como objetivo a verificação da eficiência de diferentes auxiliares de coagulação nem da observação do efeito do tamanho da bolha e portanto, as estas

duas variáveis foram mantidas constantes. Para os ensaios de tratabilidade, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- (a) Dosagem de polímero (mg.L^{-1}): 0; 0.5; 1; 1.5; 2 e 3;
- (b) Tempo de mistura rápida: 10 s;
- (c) Tempo de floculação: 20 minutos;
- (d) Velocidade de sedimentação: 3.5 cm.m^{-1} ;
- (e) Gradiente de velocidade na mistura rápida: 800 s^{-1} ;
- (f) Gradiente de velocidade na mistura lenta: 20 s^{-1} .

Testes na Unidade Piloto

Utilizando um conjunto de gradientes de velocidade (Gr) decrescente e a melhor dosagem de polímero encontrado no ensaio de floculação, buscou-se avaliar a taxa de recirculação da água saturada (TR = 10, 15, 20 e 30%) que proporcionasse o menor valor de turbidez remanescente na água clarificada (AC). Após definida a taxa de recirculação, ensaios em triplicata foram realizados utilizando os parâmetros ótimos a fim de verificar a adequação da AC aos padrões de lançamento de efluentes de tratamento (Portaria nº 154/02 da Superintendência Estadual do Meio Ambiente - SEMACE e as resoluções nº 430/11 e 357/05 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA) e a eficiência do equipamento na remoção de outros parâmetros.

Parâmetros avaliados para caracterização da água de lavagem do filtro e da água clarificada

A água de lavagem do filtro e a água clarificada via FFAD foram caracterizadas segundo os principais parâmetros físico-químicos e bacteriológicos de acordo com o Standard Methods (APHA, 2005): sólidos totais e suspensos, demanda química de oxigênio (DQO), alumínio, amônia, coliformes totais, turbidez e cor aparente. Através destes resultados, calculou-se a eficiência de remoção bem como o atendimento aos aspectos legais quanto ao lançamento da ALF e da água clarificada em corpos hídricos, conforme legislações citadas.

Resultados e discussões

Resultados dos Testes em Bancada.

Nesta etapa, a ALF apresentou turbidez média de 235.5 uT e cor aparente de 350 uH. Não foi necessário o ajuste de pH, já que o mesmo encontrava-se dentro da faixa de atuação do auxiliar de floculação, em média igual a 7.8. Os ensaios indicaram a necessidade da utilização de polímero, já que sem o mesmo, a remoção de turbidez foi de somente 76%. Quando aplicada dosagem de polímero igual a 0.5 mg.L^{-1} , observou-se significativa eficiência na remoção de turbidez (98%), enquanto que com dosagens superiores a 1 mg.L^{-1} (eficiência 99%) não houve incremento significativo (Tabela 2). 1.0 mg.L^{-1} foi considerada a melhor dosagem, já que obteve-se elevada eficiência tanto na remoção de turbidez como de cor aparente.

Freitas *et al.* (2010) encontraram semelhante dosagem ótima de polímero para a clarificação por sedimentação da água de lavagem dos filtros da ETA da Universidade Federal de Viçosa, com turbidez média de 58.4 uT. Contudo, pesquisas de Scalize e Di Bernardo (1998) para clarificação por sedimentação de ALF (turbidez 154 uT), apresentaram melhores resultados de turbidez remanescente (10.1 uT) quando aplicada dosagem de polímero aniônico de 4.2 mg.L⁻¹.

Tabela 2. Resultados do ensaio de floculação da ALF frente à variação na dosagem do polímero

Dosagem de polímero (mg/L)	0	0.5	1	2	3	4
Turbidez (uT)	56.2	2.5	1.1	0.9	0.9	0.9
Cor Aparente (uH)	250	25	17.5	17.5	15	15
pH	7.7	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
Remoção de turbidez (%)	76.1	98.9	99.5	99.6	99.6	99.6
Remoção de cor (%)	28.5	92.8	95	95	95.7	95.7

Testes com a unidade piloto de FFAD

Influência da taxa de recirculação (TR)

As TR de 10, 15, 20 e 30% da vazão afluyente foram avaliadas adotando uma TAS de 54.4 m³.m⁻².d⁻¹ e dosagem de polímero de 1 mg.L⁻¹. Os valores de turbidez da ALF e da AC obtidos nestas condições de teste são apresentados na Figura 3. A partir desta, observa-se que a ALF não apresentou valores de turbidez constantes durante as corridas experimentais. Conforme Campos e Reali (1985), é difícil analisar o desempenho de um sistema de tratamento quando este recebe um efluente que sofre variações de qualidade em pequenos intervalos de tempos ou a cada ensaio. Pode-se dizer que essa dificuldade torna-se ainda mais elevada quando se avalia a água residual oriunda da lavagem do filtro.

Em relação à turbidez da AC, verifica-se que os valores mais altos foram obtidos quando aplicada TR = 10%. Nesta TR, foi observado o arraste de flocos para a câmara de coleta de AC, sendo esta a razão para os maiores valores de turbidez remanescente. Acredita-se que este fato esteja vinculado à baixa disponibilidade de microbolhas de ar geradas devido à menor taxa de recirculação e indicando uma flotação parcial do material suspenso. Importante ressaltar que o pico de turbidez na AC correspondente ao minuto 120 do ensaio com TR = 10%, ocorreu devido a uma falha pontual no sistema de dosagem de polímero. Após a reparação desta falha, a eficiência do sistema foi restabelecida conforme observado nos minutos posteriores. A turbidez média da AC para a TR = 10% foi igual a 3 uT.

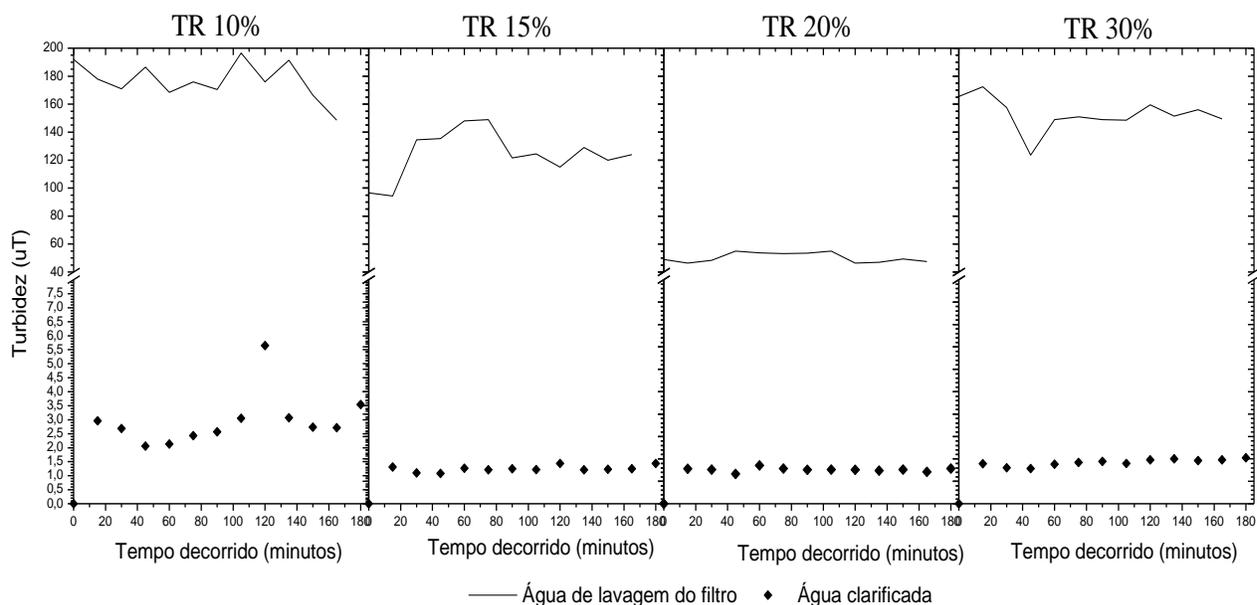


Figura 3. Turbidez da ALF e da água clarificada via FFAD frente diferentes taxas de recirculação

Quando aplicado TR = 15%, obteve-se turbidez média na AC de 1.5 uT e não houve nuances significativas nos resultados como no ensaio com TR = 10%. Resultados similares foram obtidos quando analisados os valores de turbidez na AC quando aplicada TR = 20%. Para esta taxa, a turbidez média encontrada foi também de 1.5 uT. Por último, ao aplicar TR = 30% obteve-se turbidez média na AC de 1.8 uT.

Em suma, o aumento da TR de 10% para 15% ocasionou uma diminuição significativa de 47% na turbidez da AC. Ao elevar a razão de reciclo de 15% para 20% a melhora não foi significativa. Por último, quando elevada a TR de 20% para 30%, foi observada uma elevação da turbidez correspondente a 18%. Acredita-se que este aumento na turbidez esteja vinculado à agitação excessiva no sistema devido ao aumento da vazão, o suficiente para ocasionar a ruptura e posterior arraste dos flocos. Estes resultados indicam que a inserção de bolhas podem intensificar o gradiente de velocidade da floculação além do imposto pelas cortinas. Os melhores resultados obtidos tanto com relação à turbidez remanescente média quanto à variabilidade da turbidez em torno da média (Figura 4), correspondem as TRs de 15 e 20%. Dessa forma, a TR de 15% foi adotada para os ensaios seguintes já que apresentou maior eficiência com um menor requerimento de vazão.

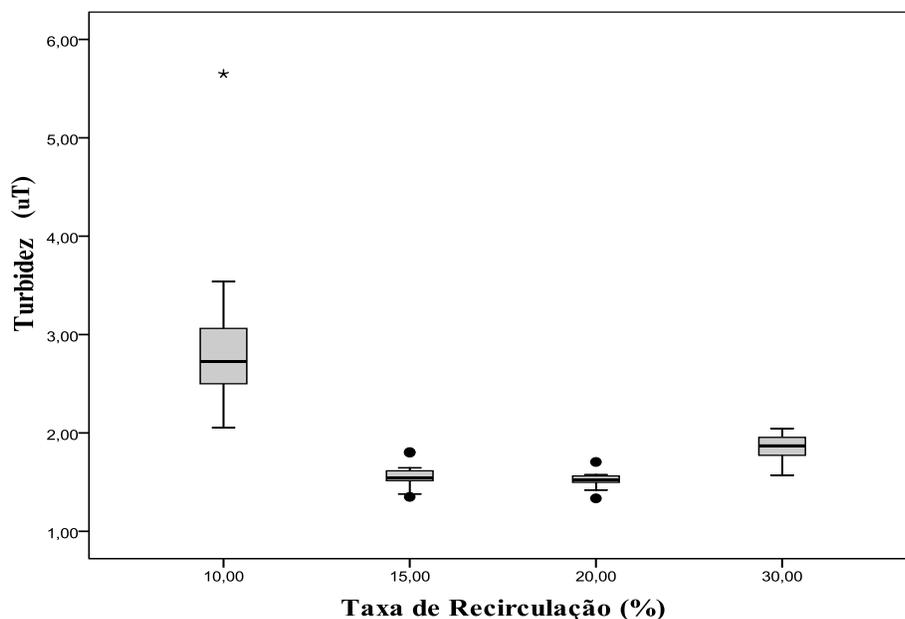


Figura 4. Turbidez remanescente em função da variação das taxas de recirculação

A escolha da TR de 15% está de acordo com Filho e Brandão (2000), que afirmam serem necessárias taxas de recirculação na faixa de 10% a 20% para garantir a dosagem adequada de ar. As eficiências e TR desta pesquisa corroboram também com os resultados obtidos por Marques *et al.* (1999) para o tratamento de ALF. Reali *et al.* (2003) ao tratarem água com turbidez de 200 uT via FAD, conseguiram elevada eficiência em remoção de turbidez (97%) quando aplicada taxa de recirculação de apenas 10%, contudo, a turbidez remanescente da água clarificada foi elevada (5.5 uT). Silva e Delazari (2004) avaliando o tratamento da água de lavagem da ETA do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Mogi Mirim, São Paulo, alcançaram eficiência de remoção de turbidez de 99.3% por FAD seguida de filtração, utilizando TR de 12%.

Reali (1999) desenvolveu experimentos de flotação em escala de bancada e em batelada para espessamento de lodo proveniente da descarga de decantadores de duas ETAs, uma utilizando como coagulantes sulfato de alumínio e outra, cloreto férrico. No caso da primeira ETA, o autor atingiu uma velocidade de clarificação de até $19 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($\text{TAS}=270 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) enquanto no segundo caso a velocidade de clarificação foi de até $18 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($\text{TAS}=259 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$). Vale ressaltar que, além deste experimento ter sido realizado em escala de bancada e em batelada, o lodo dos decantadores considerados por Reali (1999) tinha uma concentração de SST de aproximadamente 0.6%, enquanto o lodo apreciado neste trabalho teve uma concentração de SST muito menor (<0.04%).

Os resultados obtidos com um flotador de bancada tratando lodos biológicos da ETE - Barueri mostrou que o procedimento experimental foi adequado quando operado com TAS de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (Goncalves e Aguiar, 2012). Aisse *et al.* (2001) desenvolveram vários estudos referentes à flotação de efluentes anaeróbios, em escala de laboratório. Amostras coletadas com TAS de $70 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, TR de 20% e pressão de saturação de 450 kPa (22°C) apresentaram boa eficiência de tratamento.

Comparando-se somente a taxa de aplicação superficial da FFAD ($54 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) com as propostas na literatura (Tabela 3), não se verifica uma vantagem competitiva. Entretanto, levando-se em consideração que o equipamento funde duas unidades em uma só, floculador hidráulico (com TDH entre 20 e 30 min) e câmara de flotação (com TDH entre 15 e 20 min), observa-se uma diminuição significativa do TDH total envolvido quando se compara o tratamento via FAD convencional (<35 min) ao tratamento via FFAD (22 min). Essa diminuição de aproximadamente 37% no TDH reduz proporcionalmente o volume do sistema de clarificação e, conseqüentemente, os custos de implantação da ETA. Com relação aos custos de operação do novo processo FFAD, pode-se afirmar que são inferiores aos da FAD convencional, haja visto que apesar das dosagens de coagulante e a TR serem praticamente iguais ao do processo convencional, a floculação na FFAD se dá por meios hidráulicos, diminuindo os custos com equipamentos eletromecânicos. Segundo Haarhoff (2008), os custos de capital do FDA são geralmente mais baixos que a sedimentação. Em contrapartida, apresentam maiores custos operacionais. Infelizmente, custos operacionais de sistemas de tratamento via sedimentação e FAD convencionais não estão disponíveis na literatura, fazendo a tarefa de comparação com os custos do novo sistema FFAD impraticável.

Tabela 3. Processos de tratamento de água e lodo considerando taxas de aplicação superficial e tempos de detenção hidráulica

Processo	Tempo de detenção hidráulica (min.)	Matriz	Fonte
Floculação	20 - 30	Água	AWWA (2012); Kawamura (2000)
Decantador de alta taxa (h=4.5m)			
$57 - 175 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	100-33	Água	AWWA (2012)
Flotação por ar dissolvido (h=3.5m)			
$240 - 288 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	21 - 18	Água	AWWA (2012)
$100 - 300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	50 - 17	Água	Di Bernardo (1993)
$140 - 215 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	36 - 23	Água	Reali (1991)
$235 - 320 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	20 - 15	Água	Kawamura (2000)
$270 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	19	Lodo de ETA (decantador)	Reali (1999)
$60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	96	Lodo de ETE	Goncalves e Aguiar (2012)

No que tange á qualidade, Teixeira e Rosa (2006, 2007) realizaram experimentos para remoção de *Microcystis aeruginosa* em águas naturais via coagulação / floculação / FDA comparando a água clarificada à tratada via coagulação / floculação / sedimentação. Os autores demonstraram que a eficiência de flotação foi superior a 92%, mostrando ser mais eficiente que a sedimentação. Reali *et al.* (2004) identificaram que a FDA foi bem mais eficaz na remoção simultânea de ferro e manganês que o processo de sedimentação. Para Haarhoff (2008), a FDA é um método de clarificação mais eficaz que a sedimentação, principalmente para o tratamento de águas que contêm altas concentrações de fitoplâncton. Além disso, necessita de uma área muito menor que a maioria dos outros métodos de clarificação e, portanto, é indicada para compor sistemas compactos de tratamento.

Caracterização da ALF e da AC e eficiência do tratamento por FFAD

Após definida a melhor TR = 15%, foram realizados ensaios em triplicata com o FFAD utilizando dosagem do polímero a 1 mg.L⁻¹. Os resultados da caracterização da ALF e da AC estão apresentados na Tabela 4, bem como a eficiência de remoção para cada parâmetro. Os padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos estipulados pela Portaria nº 154/02 da Secretaria Estadual do Meio Ambiente - SEMACE e as resoluções nº 430/11 e 357/05 do CONAMA, também são apresentados na Tabela 4. A partir desta, observa-se que para a ALF, somente os parâmetros amônia, fluoreto, pH, sólidos dissolvidos atendem as referidas legislações. Enquanto os parâmetros: alumínio, cor, DQO, sólidos suspensos, sólidos sedimentáveis e turbidez, superam o valor máximo permitido para o lançamento em corpos d'água, requerendo, portanto, tratamento para que seja lançada em consonância com os dispositivos legais.

O tratamento da ALF via FFAD evidenciou elevada eficiência, especialmente para a remoção de sólidos suspensos (87.1%), coliformes totais (98.2%), turbidez (99.2%), DQO (92.5%), cor (98.1%) e alumínio (88.5%). Estes resultados demonstram a elevada capacidade de tratamento da ALF da ETA em estudo. Somente os parâmetros sólidos dissolvidos e fluoreto apresentaram baixa eficiência (< 6%), haja vista que os mesmos encontram-se, em grande parte, solubilizados. Desta forma, observa-se que a AC atendeu integralmente aos padrões de lançamento estipulados pelo CONAMA e SEMACE quanto aos parâmetros analisados.

Uma reflexão pertinente nesta fase do trabalho é a questão do "up-scaling" da unidade de FFAD. McEwen (1998) afirma que para unidades de floculação existe um problema de "up-scaling" da escala piloto para a escala real já que os gradientes de velocidade ótimos em escala piloto são geralmente maiores que os encontrados em unidades reais. McEwen (1998) afirma ainda que as bacias de clarificação em escala piloto de fluxo horizontal, como é o caso do FFAD, apresentam remoção relativa de turbidez mais fidedigna à escala real que valores absolutos e propõe que taxa de aplicação superficial e tempo de detenção hidráulico podem ser usados como critérios de

projeto. Assim, acredita-se que antes da difusão ampla da tecnologia, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos mais aprofundados sobre a hidráulica do equipamento em escala real.

Tabela 4. Valores dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos da ALF e da AC e padrões de lançamento da SEMACE nº 154 e CONAMA nº 430 / nº 357

PADRÕES FÍSICO-QUÍMICOS E BACTERIOLÓGICOS						
Legislação	pH	Alumínio mg.L ⁻¹	Amônia mg L ⁻¹	DQO mg O ₂ .L ⁻¹	Cor uH	Fluoreto mg.L ⁻¹
CONAMA nº 430 / nº 357	5.0 – 9.0	0.1	20	-	75	10
SEMACE nº 154	5.0 – 9.0	-	20*	200	-	10
Legislação	Sólidos Sedim. mg.L ⁻¹	Sólidos Dissolvidos mg.L ⁻¹	Sólidos Suspensos mg.L ⁻¹	Coliformes Totais NMP.100 mL ⁻¹	E. coli NMP.100 mL ⁻¹	Turbidez UNT
CONAMA nº 430 / nº 357	Até 1	500	-	-	1000	100
SEMACE nº 154	Até 1	-	100	-	5000	-
RESULTADOS EXPERIMENTAIS						
Parâmetros	Unidade	ALF Média	Atendimento ao CONAMA/ SEMACE	AC Média	Atendimento ao CONAMA/ SEMACE	Eficiência (%)
Alumínio	mg.L ⁻¹	0.35	✘ / -	0.04	✓ / -	88.5
Amônia	mg.L ⁻¹	0.22	✓ / ✓	0.09	✓ / ✓	59.9
Coliformes Totais	NMP.100 mL ⁻¹	36913	- / -	628.1	- / -	98.2
Cor	uH	677.6	✘ / -	12.8	✓ / -	98.1
DQO	mg O ₂ .L ⁻¹	410.3	- / ✘	30.8	- / ✓	92.5
Fluoreto	mg.L ⁻¹	0.64	✓ / ✓	0.61	✓ / ✓	5.0
pH	-	7.4	✓ / ✓	7.4	✓ / ✓	0
Sólidos Totais	mg.L ⁻¹	650	- / -	339.6	- / -	47.7
Sólidos Sedimentáveis	mg.L ⁻¹	33.66	✘ / ✘	<1.0	✓ / ✓	100
Sólidos Suspensos	mg.L ⁻¹	346.6	- / ✘	44.7	- / ✓	87.1
Sólidos Dissolvidos	mg.L ⁻¹	303	✓ / -	303	✓ / -	0
Turbidez	UNT	263	✘ / -	2.1	✓ / -	99.2

Nota: * Valor alterado pela Portaria nº 111/2011 da SEMACE, em 05 de abril de 2011.

✓: Atendimento à legislação;

✘: Não atendimento à legislação;

- : Não contemplado na legislação.

Conclusões

O equipamento designado Floco-Flotador por Ar Dissolvido (FFAD), que agrega em um único vaso os processos de floculação em cortinas e flotação por ar dissolvido, proporcionou elevada eficiência na remoção de sólidos suspensos (87.1%), coliformes totais (98.2%), turbidez (99.2%), DQO (92.5%), cor (98.1%) e alumínio (88.5%). Estes resultados foram conseguidos através das seguintes condições operacionais: dosagem de polímero catiônico de 1 mg.L^{-1} , taxa de recirculação de 15%, taxa de aplicação superficial de $54.4 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, baixos gradientes de velocidade (19.3 s^{-1} , 12.4 s^{-1} e 5.6 s^{-1}) e principalmente, um baixo tempo de detenção hidráulica de 22 minutos quando comparado aos processos convencionais de FAD com um TDH <35 minutos. O sistema apresentou também uma elevada robustez, isto é, uma estabilidade na qualidade do efluente mesmo com variações significativas da qualidade do afluente. Dessa forma, a técnica FFAD demonstrou ser viável para o tratamento da água de lavagem dos filtros da ETA, além de ser uma tecnologia promissora para tratamento de água e de outros efluentes líquidos contendo sólidos de baixa densidade, podendo representar uma diminuição significativa dos volumes necessários os processos de flotação por ar dissolvido e sedimentação convencional. Os gradientes de velocidade para floculação ótimos utilizados nas placas perfuradas estão abaixo dos propostos na literatura, podendo indicar que existe um contribuição de mistura adicional impressa pela adição do ar dissolvido.

Referências

- Aisse, M.M., Jürgensen, D., Reali, M.A.P., Penetra, R., Florencio, L., Além Sobrinho, P. (2001) Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de flotação. Capítulo 6. Acesso em: 20/10/2014, disponível em: <http://www.finep.gov.br/prosab/livros/ProsabCarlos/Cap-6.pdf>.
- APHA. (2005) Standard Methods for the examination of water and wastewater. 21ª ed. Washington: American Public Health Association,
- Arnold, S.R., Grubb, T.P., Harvey, P.J. (1995) Recent applications of dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, **31**, 327-340.
- AWWA (2012). *Water Treatment Plant Design*, Fifth Edition. By Stephen J. Randtke, Michael B. Horsley, Editors, McGraw-Hill, American Society of Civil Engineers, 1376 pp. ISBN: 9780071745727.
- Bourgeois, J.C., Walsh, M.E., Gagnon, G.A. (2004) Treatment of drinking water residuals: comparing sedimentation and dissolved air flotation performance with optimal cation ratios. *Water Research*, **38**, 1173–1182.
- Campos, J.R., Reali, M.A.P. (1985) Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento de água para abastecimento. *Revista DAE*, **45** (142).
- CONAMA, Conselho Nacional de Meio Ambiente (2011) *Resolução nº. 430/2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005*, Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente, Brasília.
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2005) *Resolução nº 357/2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento*, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília.
- Di Bernardo, L., Botari, A., Sabogal-Paz, L.P. (2005) Uso de modelação matemática para projeto de câmaras mecanizadas de floculação em série em estações de tratamento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental* **10**(1) 82-90.

- Di Bernardo, L., Dantas, A.D. (2005) *Métodos e técnicas de tratamento de água* Edição 2ª, vol. 2. São Carlos: Rimas.
- Di Bernardo, L. (1993) *Métodos e técnicas de tratamento de água*. Rio de Janeiro, vol. 2. ABES.
- Di Bernardo, L., Giorgetti, M.F. (1980) The use of perforated baffles at the inlet of settling basis. *Journal of the American Water Works Association*, **72**(9), 528-553.
- Féris, L.A., Gallina, C.W., Rodrigues, R.T., Rubio, J. (2001) Optimizing dissolved air flotation design and saturation. *Water Science and Technology*, **43**(8) 145-157.
- Filho, A.C.T.P., Brandão, C.C.S. (2000) Avaliação do potencial da flotação por ar dissolvido sob pressão como pós-tratamento para efluentes de reatores anaeróbios de fluxo ascendente. In: *Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27. Porto Alegre: AIDIS.
- Freitas, A.G., Bastos, R.K.X., Bevilacqua, P.D.; Pádua, V.L.; Pimenta, J.F.P., Andrade, R.C. (2010) Recirculação de água de lavagem de filtros e perigos associados a protozoários. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **15**(1) 37-46.
- Gonçalves, M.C., Aguiar, V.L.A. (2012) Flotacao por ar dissolvido de lodos biológicos. In: *Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental 23*, Junho de 2012, Salvador.
- Januário, G.F., Ferreira Filho, S.S. (2007) Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da região metropolitana de são paulo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **12**(2), 117-126.
- Haarhoff, J. (2008) Dissolved air flotation: progress and prospects for drinking water treatment”, *Jour. Water Supply: Research and Technology.- Aqua* **57** (8), 555-567.
- Kawamura, S. (2000) *Integrated design and operation of water treatment facilities*. John Willey & Sons. New York, 2ª. Ed. 628 p.
- Teixeira, M.R., Rosa, M.J. (2006) Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa*: Part I: The key operating conditions. *Separation and Purification Technology* **52**(1) 84-94.
- Teixeira, M.R., Rosa, M.J. (2007) Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa*: Part II. The effect of water background organics. *Separation and Purification Technology* **53**(1) 126–134.
- Marques, S.F., Camelo, A.S., Brandão, C.C. (1999) Estudo da utilização da flotação por ar dissolvido na recuperação da água de lavagem de filtros. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 20, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: ABES, p. 1418-1427.
- Monteggia, L.O., Tessele, F. (2001) Remoção físico-química de algas e fósforo de efluentes de lagoas de alta taxa Projeto PROSAB – Edital II tema 2 – Pós-Tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Coordenador: Carlos Augusto Lemos Chernicharo, 544p.
- Reali, M.A.P. (1991) Avaliação de um Sistema Original Compacto para Clarificação de Águas de Abastecimento, Utilizando o Processo de Flotação a Ar Dissolvido e Filtração com Taxa Declinante. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, 364p.
- Reali, M.A.P. (coordenador). (1999) *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 250p.
- McEwen, J.B. (Editor). (1998) *Treatment Process Selection for Particle Removal*. American Water Works Assotiation / International Water Supply Association. Colorado. 375p
- Reali, M.A.P., Moruzzi, R. B., Patriazzi, L. J. (2003) Flotação por ar dissolvido aplicada na clarificação de águas que apresentam picos de turbidez. In: *Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental*, 22, 2003. Anais... São Paulo: ABES, p.1-9, CD-ROM.
- Reali, M.A.P., Moruzzi, R.B., Patrizzi, L. J. (2004) Comparing sedimentation and dissolved air flotation (DAF) for organic iron compounds removal focusing coagulation/floculation processes. *Minerva - Pesquisa e Tecnologia*, **4**(1), 11-18.
- Rosa, J.J., Rubio, J. (2005) The FF (flocculation–flotation) process. *Minerals Engineering* **18**, p. 701–707.

- Rubio, J., Souza, M.L., Smith, R.W. (2002) Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, **15**, 139–155.
- Scalize, P.S., Di Bernardo, L. (1998) Clarificação da água de lavagem de filtros rápidos e caracterização do sobrenadante e lodo. In: *Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental*, 26., Lima.
- SEMACE, Superintendência Estadual do Meio Ambiente (2002) Portaria nº 154/02. *Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras*. Ceará, Brasil.
- Silva, N., Delazari, P.V. (2004) Recuperação da água de lavagem de filtro através de uma ETA de Flotofiltração. *Saneamento Ambiental: a hora da solução*, **11**.
- Silva Júnior, A.P., Isaac, R.L. (2002) Adensamento por Gravidade de Lodo de ETA Gerado em Decantador Convencional e Decantador Laminar. In: *Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental 28*, Cancún – México. Anais... Cancún: AIDIS, 2002.
- Tessele, F., Rosa, J.J., Souza, M.L., Rubio, J. (2005) Avanços da Flotação no tratamento de águas e efluentes. Parte II: Aplicações. *Saneamento Ambiental*, **115**(8).