

## **I-313 – DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE FLOCO-FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTRO DE ETA**

**Karina Oliveira Chaves** <sup>(1)</sup>

Tecnóloga em Processos Químicos pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Doutoranda em Engenharia Civil no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC).

**Manoel do Vale Sales**

Doutor em Engenharia Civil pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC).

**José Capelo Neto**

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC).

**Endereço** <sup>(1)</sup>: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Seção Laboratorial de Qualidade de Água (SELAQUA), Bloco 720, Universidade Federal do Ceará, Av. Humberto Monte, s/n, 60451-970, Fortaleza – CE, Brasil. E-mail: chaves\_karina@ymail.com

### **RESUMO**

No cenário brasileiro, os resíduos de Estações de Tratamento de Água (ETAs) são normalmente lançados *in natura* em corpos hídricos, apresentando-se como potencialmente danosos ao meio ambiente, sendo necessário tratá-los para que sejam descartados conforme os aspectos legais. Estudos demonstram que a tecnologia da Flotação por Ar Dissolvido (FAD) tem sido viável para este fim. Acredita-se que a incorporação da floculação em cortinas numa mesma unidade de flotação possa promover elevada eficácia ao sistema, traduzindo-se como uma inovação tecnológica: o Floco-Flotador por Ar Dissolvido (FFAD). Nesta pesquisa, uma unidade piloto de FFAD foi desenvolvida para o tratamento da água de lavagem dos filtros (ALF) da ETA Gavião, pertencente à Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE). O objetivo consistiu em realizar ensaios de tratabilidade da água de lavagem do filtro da ETA com a avaliação dos parâmetros de processo da flotação: gradientes de velocidade, taxa de recirculação e taxa de aplicação superficial. Os resultados do tratamento na unidade piloto FFAD alcançaram elevada eficiência na remoção de turbidez (superior a 98%), com turbidez da água clarificada inferior a 5 uT mesmo enfrentando variações bruscas na qualidade da ALF (94,4 a 410 UT).

**PALAVRAS-CHAVE:** Água de lavagem de filtro, Floculação em cortina, Flotação por ar dissolvido.

### **INTRODUÇÃO**

Sabe-se que vinculado à demanda crescente por água potável tem-se o aumento da geração de resíduos, conhecido como lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA), o qual consiste em sólidos suspensos presentes na água *in natura* que se associaram aos produtos químicos aplicados na estação de tratamento.

A depender do tipo de tecnologia empregada, estes lodos podem ser oriundos das descargas dos decantadores ou flotadores e das unidades filtrantes. Nesta última, o lodo apresenta-se na forma líquida, intitulado de água de lavagem do filtro, contendo baixa concentração de sólidos, que são normalmente leves e com baixa velocidade de sedimentação. Demonstram ser potencialmente danosos ao meio ambiente quando sem tratamento são descartados em corpos hídricos.

Segundo Richter (2001), o destino final do lodo é uma das tarefas mais difíceis para o serviço de tratamento de água, pois envolve custos de manuseio, de transporte e restrições ambientais. Assim, um dos principais fatores no gerenciamento dos processos de tratamento de resíduos gerados em ETAs (ETRG) é a quantidade de água presente, capaz de tornar o efluente volumoso e gelatinoso, dificultando o seu desaguamento. Nesse contexto, a etapa de adensamento é requerida a fim de remover o máximo de água possível, de forma que, quanto mais adensado esteja o lodo, mais fácil e barato será a sua correta disposição.

Uma das técnicas convencionais para o adensamento do lodo é sedimentação. Contudo, o emprego da técnica flotação, em especial a flotação por ar dissolvido (FAD), apresenta vantagens sobre este processo convencional principalmente no que diz respeito à taxa de agregação de sólidos, baixas sensibilidades à variação da vazão afluente, além do fato de requerer menor área para a instalação desta tecnologia (ARNOLD *et al.*, 1995). Além destas vantagens afirma-se que a tecnologia FAD obtém água tratada com melhor qualidade, inicialização rápida do processo, alta taxa de operação, formação de lodo espesso, baixo tempo de residência e flexibilidade na alteração dos parâmetros de operação. Por essas razões, a flotação demonstra ser é um processo vantajoso quando comparado aos processos de filtração, precipitação e adsorção (FÉRIS *et al.*, 2001).

Diferentes autores propõem a flotação como tratamento viável para lodos de ETAs. Contudo, o desenvolvimento e/ou aprimoramento de tecnologias compactas e eficientes, que apresentem baixo custo para o tratamento de lodo, torna-se necessário, haja vista que o crescimento da demanda por água potável e o processo de eutrofização dos mananciais tem implicado em um aumento da quantidade de resíduos nas ETAs. Assim, novas tecnologias têm sido desenvolvidas a fim de aperfeiçoar a floculação em sistemas de flotação por ar dissolvido. Nesse contexto, acrescida às vantagens da FAD, espera-se que a incorporação de cortinas promovedoras de floculação seja capaz de reduzir o tempo de detenção hidráulico do tratamento sem interferir a eficiência do processo de tratamento. Em resumo, estas cortinas de floculação constituem em placas verticais com orifícios igualmente espaçados e perpendiculares ao sentido do escoamento horizontal da água.

No intuito de aplicar uma tecnologia tecnicamente viável e com reduzido tempo de detenção hidráulico para o tratamento de água de lavagem de filtro de ETA cuja água *in natura* apresenta-se em estágio de eutrofização, buscou-se avaliar o emprego de cortinas (placas perfuradas) capazes de promover a floculação simultânea ao processo flotação por ar dissolvido, constituindo a unidade piloto de floco-flotação por ar dissolvido (FFAD).

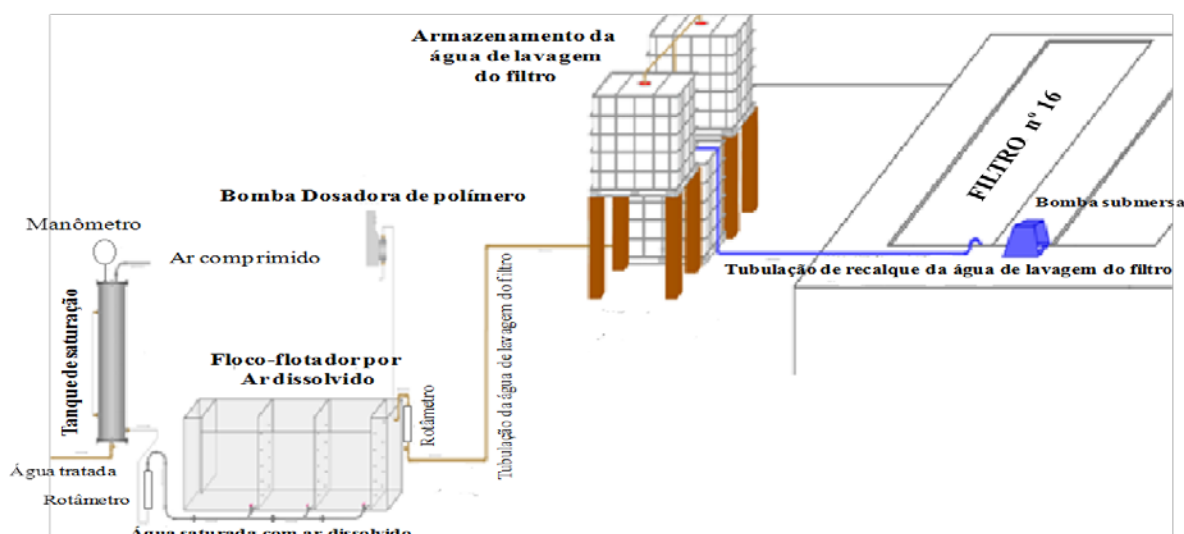
## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Desenvolvimento da unidade piloto de Floco-flotação por ar dissolvido (FFAD)**

O material em estudo, a água de lavagem do filtro (ALF), era obtida durante a operação de limpeza das unidades filtrantes (filtros rápidos descendentes). Esta limpeza consistia na inserção de água tratada de forma ascendente e superficial aos filtros, causando a expansão do leito filtrante seguida do desprendimento dos sólidos suspensos que foram retidos. A cada início do ensaio de floco-flotação, a coleta da ALF era realizada através de bomba submersa instalada no filtro 16 da estação de tratamento de água **ETA Gavião (Ceará)**, e em seguida armazenada em contêineres com capacidade total de 3m<sup>3</sup>.

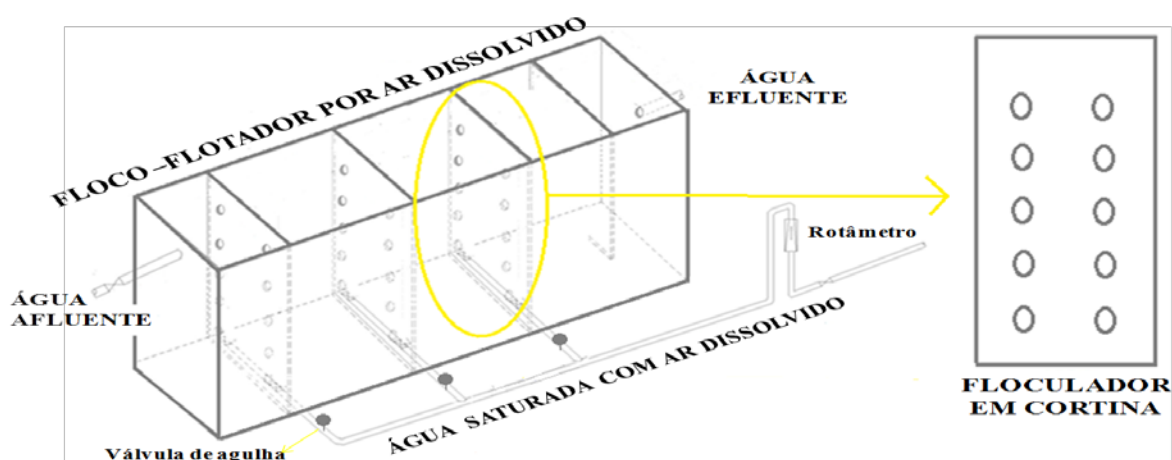
Por gravidade, a ALF armazenada era enviada ao equipamento floco-flotador por ar dissolvido (FFAD), sendo a vazão controlada por válvula de gaveta com auxílio de rotâmetro. Todo o sistema de coleta e unidade piloto está mostrado na Figura 01.

O equipamento FFDA (Figura 2) possui formato retangular, com altura útil de 0,75m, comprimento de 1,95m e largura de 0,25m. Ele agrega em uma mesma unidade o floculador de cortina e a câmara de flotação (delimitada pelas placas verticais perfuradas), constituindo no total em cinco câmaras, ambas formadas por placas em acrílico transparente. A primeira denomina-se câmara de mistura, onde a água de lavagem afluente é introduzida e misturada com a dosagem de polímero catiônico. O gradiente hidráulico da tubulação de entrada é aproveitado para promover a mistura do polímero. A injeção de ar dissolvido ocorre na parte inferior das 3 câmaras seguintes, chamadas câmaras de flotação, tendo como objetivo promover o contato e a agregação das microbolhas de ar ao floco em formação. A última placa, contendo uma divisória em acrílico não perfurado, delimita a última câmara, câmara de captação, a qual é utilizada para a coleta da água clarificada.



**Figura 1 - Esquema geral da unidade piloto de flotação por ar dissolvido para tratamento da água de lavagem do filtro nº 16 da ETA Gavião – CAGECE.**

O sistema de recirculação de água saturada com ar dissolvido é constituído um vaso de PVC, reforçado com fibra de vidro, que recebe água saturada com ar sob pressão através de um conjunto motor-bomba e de um compressor. Três válvulas em aço inox do tipo agulha são responsáveis pela despressurização e injeção da água saturada com ar dissolvido nas câmaras de flotação do equipamento. A pressão na câmara de pressurização foi mantida entre 4 e 5 Kgf/cm<sup>2</sup> e temperatura média de 27 °C.



**Figura 2 - Desenho do equipamento Floco-flotador por ar dissolvido (FFAD).**

Para o desenvolvimento do equipamento foram utilizados os parâmetros de projeto mostrados na Tabela 1. A taxa de recirculação (TR) e a taxa de aplicação superficial (TAS) foram calculadas baseadas na vazão afluyente da água de lavagem dos filtros (ALF), pois ambos são parâmetros de projeto. O cálculo do gradiente de velocidade foi baseado na modelagem proposta por Viana (2006), cujo modelo é empregado para floculadores do tipo bandeja e cortina para decantadores. Os parâmetros de projeto aplicados no FFAD encontram-se na Tabela 01.

**Tabela 1- Parâmetros e dados de projeto do equipamento Floco-Flotador por Ar Dissolvido (FFAD).**

<i>Taxas de aplicação superficial (TAS)</i>			<i>Unidade</i>
	<i>Relação A/S</i>	<i>Vazão 1,0 m<sup>3</sup>/h</i>	<i>Vazão 1,5 m<sup>3</sup>/h</i>
Taxa de Recirculação 10%	0,02	54,4	81,6
Taxa de Recirculação 15%	0,04	57,0	85,4
Taxa de Recirculação 20%	0,05	59,4	89,1
Taxa de Recirculação 30%	0,07	64,3	96,5
<i>Tempo de Detenção Hidráulico (TDH)</i>			<i>Unidade</i>
Tempo de Detenção Hidráulico (TDH)	22	15	minutos
Velocidade Longitudinal	9,0	13,3	cm/min
Distância entre os orifícios (S)		0,2	m
Número de orifícios na horizontal		2	-
Número de orifícios na vertical		5	-
Distância entre as cortinas		0,5	m
Diâmetro dos orifícios 1º cortina		8	mm
Diâmetro dos orifícios 2º cortina		10	mm
Diâmetro dos orifícios 3º cortina		15	mm
<i>Dados de Projeto da 1ª Cortina</i>			
Gradientes de velocidade (G)	19,3	35,0	s <sup>-1</sup>
Relação X/S	4,3	4,4	-
Número de Reynolds correspondente	4987	7480	-
Alcance do jato de água pelos orifícios (X <sub>o</sub> )	0,86	0,88	m
<i>Dados de Projeto da 2ª Cortina</i>			
Gradientes de velocidade (G)	12,4	22,6	s <sup>-1</sup>
Número de Reynolds correspondente	3989	5984	-
Relação X/S	4,3	4,4	-
Alcance do jato de água pelos orifícios (X <sub>o</sub> )	0,85	0,87	m
<i>Dados de Projeto da 3ª Cortina</i>			
Gradientes de velocidade (G)	5,6	10,1	s <sup>-1</sup>
Número de Reynolds correspondente	2660	3989	-
Relação X/S	4,2	4,3	-
Alcance do jato de água pelos orifícios (X <sub>o</sub> )	0,84	0,85	m

#### Ensaio de tratabilidade

Dois polímeros catiônicos foram avaliados em ensaios de tratabilidade em *jar tests*: o FO 4140 e FO4350, ambos da marca Floerger, no intuito de verificar a sua dosagem ótima. Não foram empregados agentes coagulantes, haja vista que a água de lavagem encontrava-se coagulada devido à adição do agente coagulante Cloreto de polialumínio (PAC) durante o processo de tratamento da água *in natura*.

Nesta etapa, também foi avaliada a viabilidade do conjunto decrescente de gradientes de velocidade utilizados para floculação em cortina no FFAD, que foi mensurada através da turbidez remanescente obtida em ensaios ocorridos no agitador *Jar test* modelo 218 da Nova Ética. Assim, para esta etapa, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Dosagem de polímero: 0 - 0,5 - 1,0 - 1,5 - 2,0 e 3,0 mg.L<sup>-1</sup>;
- Tempo de mistura rápida: 10s;
- Velocidade de agitação na mistura rápida: 300 rpm;
- Gradiente de velocidade na mistura rápida: 600s<sup>-1</sup>;
- Velocidades de agitação na mistura lenta para a vazão de 1m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>: 30-20-15 rpm
- Velocidades de agitação na mistura lenta para a vazão de 1,5m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>: 50-32-17 rpm;
- Gradientes de velocidade na mistura lenta para a vazão de 1m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>: 19,3 s<sup>-1</sup> / 12,4 s<sup>-1</sup> / 5,6 s<sup>-1</sup>

- h) Gradientes de velocidade na mistura lenta para a vazão de  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ :  $35 \text{ s}^{-1} / 22,6 \text{ s}^{-1} / 10,15 \text{ s}^{-1}$   
g) Tempo de floculação por câmara: 6 e 4 minutos (correspondente as vazões de  $1,0$  e  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , respectivamente);  
h) Velocidade de sedimentação:  $3,5 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

O tempo de floculação em *jar test* vinculado a cada gradiente de velocidade da câmara de flotação do equipamento foi equivalente ao tempo de detenção hidráulico calculado a partir do volume das câmaras de flotação e da vazão afluyente. Os gradientes de velocidade foram obtidos a partir da conversão da rotação por minuto (rpm) através das informações técnicas do equipamento. Concluído o tempo de floculação, a rotação das paletas do *jar test* era alterada a fim de corresponder ao gradiente de velocidade da câmara de flotação posterior. A aplicação de polímero aos jarros em triplicata era realizada de forma simultânea. Após o tempo requerido para a mistura rápida ajustava-se a rotação conforme o gradiente de velocidade correspondente, durante o tempo de floculação estipulado. Ao final da floculação, desligava-se o agitador para iniciar o processo de sedimentação. As amostras de água eram coletadas de forma simultânea a fim de verificar a turbidez remanescente.

### Ensaio na unidade piloto - FFAD

Após a escolha do polímero e da dosagem considerada ótima através dos ensaios de tratabilidade, tais parâmetros foram empregados nesta etapa, a fim de avaliar os seguintes parâmetros da flotação, conforme mostrados na Tabela 01:

- Taxa de aplicação superficial (TAS):  $54,4$  a  $96,5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ;
- Taxa de recirculação da água saturada com ar atmosférico (TR): 10, 15, 20 e 30%;
- Conjunto de Gradientes de velocidade decrescentes (Gr) para a vazão de  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ :  $19,3 / 12,4 / 5,6 \text{ s}^{-1}$
- Conjunto de Gradientes de velocidade decrescentes (Gr) para a vazão de  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ :  $35 / 22,6 / 10,15 \text{ s}^{-1}$

Após a análise dos resultados obtidos, foram verificados quais destes parâmetros conduziram a uma melhor eficiência em termos de remoção de turbidez, cor e sólidos.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Resultados dos ensaios de tratabilidade

#### Dosagem do polímero catiônico

Os testes em *jar test* indicaram a necessidade da utilização de polímeros para a tratabilidade da água de lavagem do filtro, haja vista que na ausência deste, a remoção de turbidez alcançou somente 76,1% e 77,3%, conforme evidenciado na Tabela 2. Quando avaliado o emprego de polímero catiônico, os resultados demonstraram eficiências elevadas, sendo superiores a 98%, corroborando a afirmação de Richter (2001) quanto à eficiência deste tipo de polímero. Desta forma, os resultados demonstraram necessidade de aplicação deste produto químico.

As eficiências em termos de turbidez exprimem equivalências quando houve variações na dosagem do polímero. Na dosagem de  $0,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , observa-se significativa eficiência na remoção de turbidez (98%), enquanto que com dosagens superiores a  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (eficiência 99%) não se verifica incremento significativo nas eficiências para ambos os polímeros (Tabela 02). Por outro lado, quando se analisa a turbidez remanescente nas amostras submetidas ao polímero FO 4350 com dosagens a partir de  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , verifica-se que estes valores ficaram próximos a  $1 \pm 0,1 \text{ uT}$ . Desempenho semelhante, utilizando o polímero FO 4140, não foi observado com concentração duplicada ( $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). Desta forma, mesmo tendo alcançado eficiências aproximadas, a turbidez da amostra tratada com o polímero FO 4350 mostrou valores inferiores aos obtidos com o polímero FO 4140 sob as mesmas condições de ensaio. A utilização do FO 4350 com dosagem de  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  foi considerada como sendo a mais eficaz na floculação da ALF em estudo, sendo, portanto, aplicada nos estudos realizados na unidade piloto. Freitas *et al.*, (2010), também adotou esta dosagem para a clarificação da água de lavagem em sua pesquisa.

**Tabela 2 - Resultados de Jar Test com gradiente de velocidade  $10\text{s}^{-1}$  utilizando os polímeros FO 4140 e FO 4350 em diferentes concentrações.**

POLIMERO FO 4350					POLIMERO FO 4140				
Dosagem (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor	pH	Remoção de Turbidez (%)	Dosagem (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor	pH	Remoção de Turbidez (%)
0	56,2	250	7,7	76,1	0	53,4	250	7,5	77,3
0,5	2,5	25	7,8	98,9	0,5	3,65	25	7,6	98,4
1	1,1	17,5	7,8	99,5	1	2,28	25	7,6	99,0
1,5	0,9	17,5	7,8	99,6	1,5	2,12	20	7,6	99,1
2	0,9	15	7,8	99,6	2	1,7	20	7,6	99,3
3	0,9	15	7,8	99,6	3	1,63	17,5	7,7	99,3

#### Avaliação dos gradientes de velocidade

Os resultados obtidos quando avaliados os conjuntos de gradientes de velocidade decrescentes estão contemplados na Tabela 03. A partir dela, observa-se que em baixos gradientes de velocidade ( $19,3$  a  $5,6\text{ s}^{-1}$ ), correspondente ao tempo de detenção hidráulico (TDH) de 22 minutos, a turbidez da água clarificada em *jar test* apresentou média de  $1,97\text{ uT}$  com 98% de remoção de turbidez, enquanto que para gradientes de velocidade maiores ( $35$  a  $10,1\text{ s}^{-1}$ ), correspondente ao TDH de 15 minutos, foi alcançada turbidez média de  $1,23\text{ uT}$  e 99% de remoção de turbidez, frente a turbidez de  $103,85\text{ uT}$  da ALF. Estes resultados demonstram viabilidade em utilizar o conjunto de gradientes de velocidade testados, por terem alcançado elevada eficiência em remoção de turbidez assim como baixa turbidez remanescente. Dessa forma, o floculador de cortina no equipamento FFAD foi construído tendo os seus diâmetros dimensionados conforme os gradientes de velocidade avaliados nesta etapa.

**Tabela 03 - Resultados de Jar test utilizando o polímero FO 4350 a  $1\text{mg.L}^{-1}$  referente à variação decrescente de gradientes de velocidade quando aplicados tempo total de floculação de 18 e 12 minutos.**

TDH = 22 minutos					TDH = 15 minutos				
Parâmetros		Turbidez (UT)			Parâmetros		Turbidez (UT)		
G ( $\text{s}^{-1}$ )	Tempo de floculação (minutos)	Jarro 1	Jarro 2	Jarro 3	G ( $\text{s}^{-1}$ )	Tempo de floculação (minutos)	Jarro 1	Jarro 2	Jarro 3
19,3	6				35,0	4			
12,4	6	1,91	2,18	1,81	22,6	4	1,31	1,21	1,18
5,6	6				10,1	4			

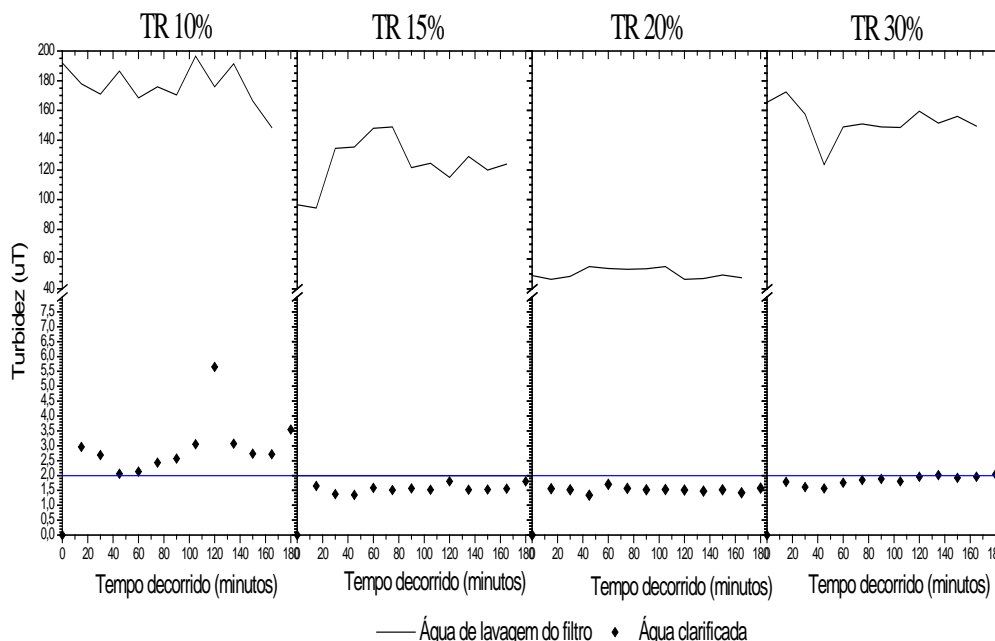
#### Resultados esperados dos testes na unidade piloto de FFAD

Conforme afirma Campos e Reali (1985) é difícil e exige muito critério analisar o desempenho de um sistema de tratamento quando este recebe uma água natural como afluente, pois esta água sofre variações sensíveis em pequenos intervalos de tempos e cujas características podem variar a cada ensaio. Assim, pode-se dizer que essa dificuldade torna-se ainda mais elevada quando se estuda a água residual oriunda da lavagem de filtro (ALF) após sua carreira de filtração, ou seja, após a saturação das unidades filtrantes por filtração direta em que o manancial adotado é do tipo superficial.

Sendo assim, conforme esperado, foi observado alterações quanto aos valores de turbidez na ALF durante os ensaios de Floco-Flotação por Ar Dissolvido (FFAD) conforme observado na Figura 03 e 04, vazão de  $1,0\text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  e  $1,5\text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ , respectivamente. Acredita-se que a variação desta característica durante o mesmo ensaio possa estar vinculada à forma de armazenamento da ALF, pois era requerida, a cada início do experimento, agitação manual nos reservatórios superiores, estando susceptível a não homogeneização eficiente do volume amostrado. Por outro lado, quanto às variações na ALF observadas nos diferentes ensaios de FFAD, acredita-se que seja proveniente de alterações nas características da água *in natura* e na dosagem de produtos químicos utilizados durante a potabilização da água na ETA Gavião, de forma a ocorrer coagulações diferentes, formando flocos com tamanhos variados capazes de alterar a carreira de filtração.



Em relação aos valores de turbidez encontrados na água clarificada (AC) (Figura 03), verifica-se que os maiores valores de turbidez remanescente na água clarificada foram obtidos quando aplicada taxa de recirculação igual a 10% da vazão afluyente, sendo observada a ocorrência de arraste de flocos para a câmara de coleta de água, configurando uma flotação parcial do material suspenso na ALF. Este fato pode estar vinculado à baixa relação ar /sólido (A/S), igual a 0,02 (Tabela 01), demonstrando ser baixa a disponibilidade de microbolhas de ar disponíveis para aderir-se aos flocos formados, desfavorecendo, portanto, a ocorrência da flotação.



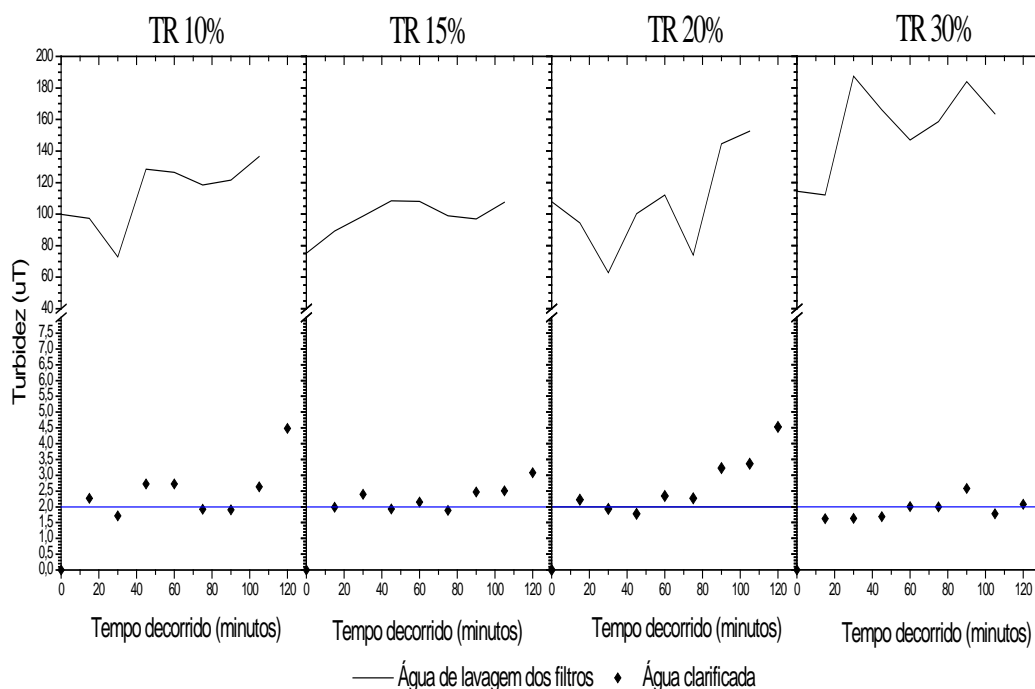
**Figura 03 – Valores de turbidez da água de lavagem afluyente ao FFAD e da água clarificada após o tratamento.**

Quando aplicado TR igual a 15% (relação ar/sólido de 0,04) obteve-se turbidez média na AC de 1,5 uT. O mesmo resultado médio de turbidez na AC também foi obtido quando aplicada a TR de 20% (relação ar/sólido média de 0,05). Pode-se dizer que, exceto para a TR de 10%, não foram verificadas variações significativas nos valores de turbidez das amostras de AC, indicando estabilidade no processo de tratamento para taxas de recirculação superiores. Acredita-se que haja uma quantidade suficiente de microbolhas de ar nas TRs de 15% e 20%, capazes de amortecer variações bruscas de turbidez, as quais apresentam relação A/S próximas e iguais a 0,04 e 0,05 para as TR 15% e 20%, respectivamente. Esta ideia se confirma quando se observa que o desvio padrão de turbidez da ALF encontrado para a TR 15% foi o maior (igual a 60 uT) comparado às outras amostras de ALF correspondentes as demais taxas de recirculação. No entanto, para a TR 20% não se pode mencionar tal consideração pelo fato do desvio-padrão ter sido o menor, apenas 4,2 uT.

Por último, quando aplicado TR de 30%, a turbidez média obtida na água clarificada foi de 1,8 uT. Para esta taxa, a razão média de A/S encontrada foi de 0,07. Pode-se dizer que o processo de flotação manteve-se estável por apresentar desvio-padrão da água clarificada igual a 0,15 uT. Desvio similar (0,14 uT) também foi obtido para a TR de 15%, enquanto que o menor encontrado (0,09 uT) foi durante a razão de reciclo de 20% e o maior desvio padrão (igual a 0,9 uT) na água clarificada quando empregado TR de 10%.

Os valores da turbidez encontrados na água de lavagem dos filtros e na água clarificada quando realizados ensaios de FFAD com vazão de  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  em diferentes taxas de recirculação encontram-se na Figura 04. As variações na turbidez da AC são ligeiramente correspondidas com os picos de turbidez verificados na ALF ao longo dos experimentos. Dessa forma, pode-se dizer que não foi observada estabilidade durante este processo, devido às variações da turbidez na AC, diferente de quando empregada vazão menor ( $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ). Porém, a água clarificada apresentou resultados de turbidez remanescente, inferiores a 5 uT para as TR adotadas. Nesse contexto, a qualidade da AC é considerada satisfatória do ponto de vista do parâmetro turbidez, para ser recirculada ao processo de tratamento da água *in natura* conforme recomendação do Reino Unido (UKWIR,

1998). Todavia, essa recomendação é menos restritiva que a adotada na Califórnia, onde a água clarificada para ser recirculada no sistema de tratamento deve atender a meta de turbidez máxima de 2 uT.



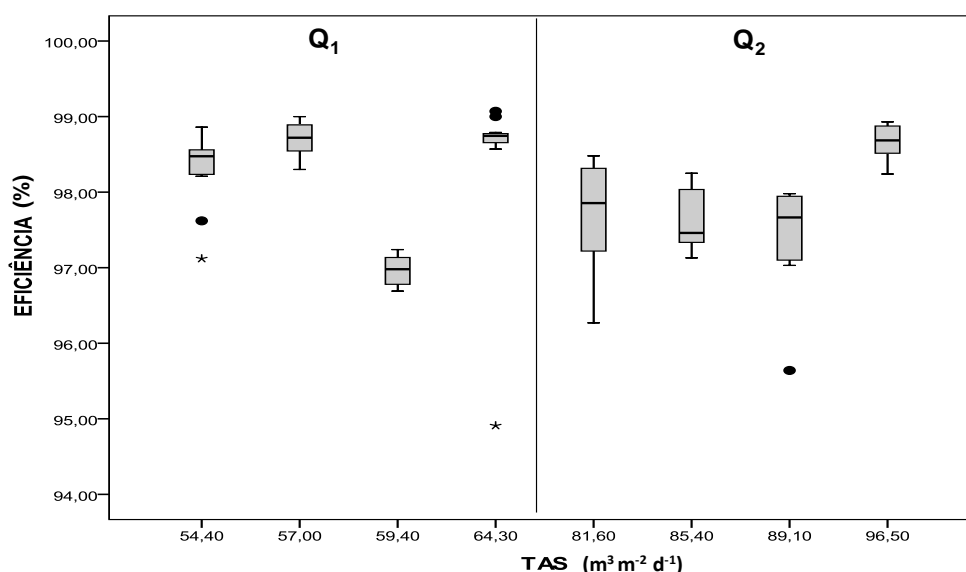
**Figura 04 – Turbidez da água de lavagem e da água clarificada via FFAD com vazão de  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .**

A ALF apresentou um mínimo de 52,8 uT (TR 10%) e um máximo de 187,5 uT (TR 30%), onde o ensaio de FFAD em que se obteve a maior turbidez média da ALF (154,1 uT) foi quando aplicada TR 30%, bem como a que obteve menor turbidez média remanescente na água clarificada (2 uT). Para as demais taxas, foram obtidas turbidez médias na AC iguais a 2,5 uT (TR 10%), 2,3 uT (TR 15%) e 2,7 uT (TR 20%). Assim, observa-se que, a turbidez da AC diminui à medida que a TR aumenta, para a vazão estudada.

Considerando os resultados obtidos nas vazões de  $1,0$  e  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , observa-se que os menores resultados de turbidez remanescente na água clarificada (1,5 uT) foram encontrados quando aplicado baixa taxa de aplicação superficial, com valores de  $57$  e  $59,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (TR 15% e 20%, respectivamente, na vazão  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ). Em contrapartida, para as taxas de aplicação superficial iguais a  $54,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (quando aplicada TR 10% da vazão afluyente de  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) e  $89,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (TR 20% da vazão afluyente de  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) são obtidos os maiores residuais de turbidez na água clarificada, 2,9 uT e 2,7 uT, respectivamente.

Em termos de eficiência na remoção de turbidez (Figura 05), todas as taxas de aplicação superficial estudadas alcançaram eficiências iguais ou superiores a 97%. Marques, Camelo e Brandão (1999) também alcançaram eficiências em remoção de turbidez semelhantes (98%) quando aplicada TAS inferiores a  $100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Destacam-se com eficiências similares (98,7%) as taxas de  $57$  e  $96,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , quando aplicada TR de 15 e 30% para vazões de  $1,0$  e  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , respectivamente. Com isso, observa-se que para um incremento de 50% da vazão afluyente, tem-se que a melhor taxa de recirculação obtida (30%) foi o dobro da melhor TR da vazão de  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (15%). O mesmo acontece com a relação A/S, passando de 0,03 a 0,07. Desta forma, a TAS de  $57 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , a qual obtêm a maior remoção média de turbidez (98,7%) com um menor consumo de ar (TR 15%). Apesar da TAS de  $64,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  com TR de 30% (vazão de  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) ter apresentado eficiência próxima (igual a 98,5%) à da TAS comentada anteriormente, sua turbidez média da água clarificada (1,8 uT) foi superior à da TAS  $57 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (1,5 uT).





**Figura 05 - Gráfico box-plot das taxas de aplicação superficial versus sua eficiência em remoção de turbidez com vazão de  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  e  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .**

Silva e Delazari (2004) conseguiram eficiência de 99,3% em remoção de turbidez de água de lavagem de filtro utilizando TAS  $293 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ , apenas após a filtração em um sistema convencional de FAD. Campos (1985) ao utilizar taxa de aplicação superficial de  $120 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$  e taxa de recirculação de 15%, observou tendência de diminuição na eficiência de remoção de turbidez à medida que aumentou a TAS. Esta mesma consideração também foi realizada por Filho e Brandão (2000) em seus experimentos de flotação por ar dissolvido.

## CONCLUSÕES

O emprego de polímero catiônico para o tratamento da água de lavagem de filtro de ETA demonstrou ser viável com 95% de eficiência em remoção de turbidez quando aplicada dosagem de  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

Baixos gradientes de velocidade ( $5$  a  $35 \text{ s}^{-1}$ ) aplicados em flocladores do tipo cortina quando associados a sistema de flotação por ar dissolvido também se mostraram eficazes quanto à remoção de turbidez (superior a 97%).

Em taxas de aplicação superficial de  $57$  a  $64,3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$  foram obtidas amostras com turbidez máxima de 2 uT, enquanto que o aumento para taxas de aplicação superficial de  $81,6$  a  $96,5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$  fez a água clarificada apresentar valores de turbidez superiores a 2 uT e inferiores a 5 uT.

O desenvolvimento de cortinas de floclação associada a flotação por ar dissolvido apresenta-se como uma tecnologia compacta, eficiente e promissora capaz de tratar água com elevados valores de turbidez.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FÉRIS, L. A.; GALLINA, C. W.; RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. Optimizing dissolved air flotation design and saturation. **Water Science and Technology**, v.43, n.8, p.145-157, 2001.
2. FREITAS, A. G. *et al.* Recirculação de água de lavagem de filtros e perigos associados a protozoários. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.15, n. 1 p. 37-46, 2010.
3. FILHO, A. C. T. P.; BRANDÃO, C. C. S. 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., **Anais...**
4. RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. 1º ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2001. 102 p.

5. MARQUES, S. F.; CAMELO, A. S.; BRANDÃO, C. C. 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., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1999, p. 1418-1427.
6. SILVA, N.; DELAZARI, P. V. Recuperação da água de lavagem de filtro através de uma ETA de Flotofiltração. **Saneamento Ambiental: a hora da solução**, v.11, 2004.
7. UNITED KINGDOM WATER INDUSTRY RESEARCH (UKWIR). **Guidance manual supporting the water treatment recommendations from the Badenoch group of experts on Cryptosporidium**. London: Water Industry Research Limited, 1998.
8. VIANA, Marcos Rocha. **Hidráulica Aplicada às Estações de Tratamento de Água**. 5º ed. vol. 1. Belo Horizonte: Imprimatur. 2006.