

Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento de água para abastecimento

José Roberto Campos (1)
Marco A. Penalva Reali (2)

Neste trabalho são relatados os resultados de pesquisa realizada com base na operação de uma instalação-piloto constituída por unidades de mistura rápida, floculação e flotação, cuja alimentação foi efetuada com água bruta destinada ao abastecimento da cidade de São Carlos, SP, Brasil.

Foram testadas taxas de escoamento superficial iguais a 120 m³/m²/dia, 180 m³/m²/dia e 240 m³/m²/dia, para pressão na câmara de saturação igual a 3,5 kgf/cm²; e também foram realizados testes adicionais com a taxa de 180 m³/m²/dia, para pressões iguais a 2,5 kgf/cm² e 4,5 kgf/cm².

Para cada caso foi determinada a razão de recirculação (no caso, entre 7% e 15%), que ofereceu os melhores resultados no que se refere à remoção de cor, turbidez e sólidos suspensos.

São também estudados os valores da relação ar/sólidos e feitas comparações entre os resultados (em termos de remoção de cor e de turbidez) obtidos através da flotação com aqueles decorrentes de ensaios de sedimentação.

Agradecimentos

Os autores manifestam seus agradecimentos ao CNPq-Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (processo n.º 400.989/82), pelo auxílio financeiro concedido, assim como ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos, SP, Brasil, principalmente ao seu diretor, eng. Salvador Honce De Cresce e ao químico Luiz Barbosa de Campos Jr., chefe do Tratamento de Água e, também, a todos os funcionários da Estação de Tratamento de Água de São Carlos.

Além do auxílio à pesquisa, o CNPq concedeu bolsa de estudos ao eng. Marco Antonio Penalva Reali, durante o período de desenvolvimento deste trabalho, pelo qual os autores também agradecem.

(1) Professor da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo — Departamento de Hidráulica e Saneamento.

(2) Aluno de Pós-Graduação da Área de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP.

1 Introdução

A flotação, como operação de separação de fases sólido-líquido ou líquido-líquido, teve sua gama de aplicação bastante ampliada nas últimas décadas. Inicialmente utilizada no campo de processamento de minerais, a flotação passou a ser empregada também em diversos outros processos industriais, tais como, separação de sementes, recuperação de óleos e gorduras, separação de glúten do amido etc.

No campo de tratamento de águas residuárias, a aplicação da flotação por ar dissolvido (FAD), apresenta-se como solução promissora para um número cada vez maior de situações problemáticas desta área. No processo de lodos ativados, por exemplo, a unidade de flotação é utilizada em muitos casos em substituição ao decantador secundário ou também como unidade de espessamento de lodos; apresentando, de maneira geral, excelentes resultados, destacando-se o elevado teor de sólidos do lodo flotado e a maior capacidade das instalações. Ainda em tratamento de esgotos, a flotação por ar dissolvido também pode ser utilizada, conjugada a tratamento físico-químico para tratar esgotos brutos, podendo, em determinadas situações, apresentar maiores vantagens que outras alternativas, conforme constataram Bratby, J. (1), Di Bernardo, L. et alii (2), os autores do presente trabalho (3) e outros.

A idéia de se aplicar a flotação por ar dissolvido no tratamento de águas para abastecimento, somente nos anos mais recentes tem recebido maior atenção por parte dos pesquisadores.

Segundo Hyde, R. A. et alii (4), na Inglaterra e na Suécia, algumas pesquisas estão sendo realizadas há algum tempo nesta área, de maneira que em 1973 já existiam 16 unidades de flotação por ar dissolvido, em escala real, operando em estações de tratamento de água no norte da Europa, com capacidade variando entre 10 m³/h e 3 mil m³/h.

Segundo Zabel, T. F. e Hyde, R. A. (5), foi implantada no Water Research Centre, Inglaterra, uma linha de pesquisas com a intenção de se realizar

estudos sobre a viabilidade do emprego da FAD ao tratamento de águas de abastecimento que apresentavam características diferentes. Inicialmente, foram realizados estudos em escala de laboratório, seguidos de estudos em duas estações-piloto de FAD, uma com capacidade de 1,8 m³/h e outra de 8,2 m³/h, instaladas às margens do rio Tâmis. Tais estudos visaram também à determinação das principais variáveis do processo e a uma estimativa preliminar de custos. A estação-piloto para 1,8 m³/h consistiu de um misturador rápido, floculador mecanizado composto por quatro câmaras em série, seguido de uma câmara de flotação circular-cônica. Já a instalação-piloto para 8,2 m³/h consistiu de unidades de mistura rápida e floculação análogas à anterior, diferindo no tipo de câmara de flotação, agora de forma retangular com fundo plano, seguida de filtros rápidos de antracito e areia.

Entre as conclusões obtidas pelos autores, podem-se destacar:

— os experimentos com testes de flotação em laboratório mostraram que os flocos formados no tratamento de vários tipos de água, empregando-se sais de ferro e de alumínio podem ser separados por FAD sem a adição de agentes químicos de ação superficial;

— os estudos realizados com as unidades-piloto demonstraram que a flotação é uma alternativa tecnicamente viável para a clarificação do rio Tâmis;

— a FAD é um processo de alta taxa; o tempo de detenção no tanque de flotação foi de 5,5 a 6,5 minutos, correspondendo a taxas de aplicação superficial de 11,4 a 9,4 m/h e um tempo total de tratamento anterior à filtração de 16 a 17 minutos. Qualidade aproximadamente constante da água efluente ("regime de equilíbrio") foi alcançada dentro de 45 minutos, após a partida no equipamento e a resposta a alterações nas condições de operação foi rápida (20 a 30 minutos);

— a FAD é um processo eficiente para a remoção de algas diatomáceas, predominantes no rio Tâmis;

— a concentração do lodo produzido na flotação foi consideravelmente maior que a conseguida em clarifica-

dores do tipo "manta de lodo", variando de 1 a 14%, dependendo da qualidade da água bruta e frequência de remoção. A remoção contínua do lodo flotado resultou em menor teor de sólidos no lodo, mas, em compensação, não ocorreu nenhuma deterioração na qualidade da água, enquanto a remoção intermitente produziu maiores teores de sólidos e deterioração na qualidade da água tratada durante o período de remoção;

— a quantidade ótima de ar requerida para a flotação, em termos de quantidade de água tratada, foi de 5 a 7 g de ar/metro cúbico de água do rio Tâmis. Isto corresponde a uma recirculação de 6 a 8% de água tratada a uma pressão de 345 kPa.

Em trabalho subsequente, Hyde, R. A. et alii (4), ainda na linha de pesquisas do Water Research Centre e utilizando as mesmas instalações descritas, concluíram, através de testes de laboratório, que é tecnicamente viável a utilização do processo da FAD na remoção dos flocos resultantes da coagulação e floculação de diversos tipos de água, tais como: águas contendo alta concentração de algas, águas com cor elevada e águas turvas com baixo conteúdo orgânico. Sendo, segundo os autores, surpreendente a eficiência de remoção em tais casos, utilizando-se apenas os produtos químicos normalmente empregados para coagulação. Após os testes nas instalações-piloto, os autores concluíram ser a flotação consideravelmente promissora como processo rápido de separação.

Krofta, M. et alii (6) realizaram testes com unidades de laboratório e com uma estação-piloto de FAD aplicadas ao tratamento das águas que abastecem a cidade de Pittsfield, Massachusetts - USA. O sistema-piloto consistiu de floculação, FAD e filtração em meio duplo. Como coagulante foi utilizado sulfato de alumínio e como auxiliar de coagulação usou-se um polieletrólito orgânico aniônico. Foi testado, sem sucesso, o método de pressurização total do afluente, ocorrendo a quebra da estrutura dos flocos durante a pressurização. Optou-se, então, pelo método de recirculação pressurizada, com vazão de recirculação de 15%.

Os autores concluíram que o sistema de FAD é tecnicamente viável, produzindo lodo com teores de sólidos mais elevados que na sedimentação, além do que a FAD exige menores espaços que os decantadores. Através de análise econômica, a FAD apresentou custo anual total menor que o de um sistema convencional (decantadores). Finalmente, foi recomendado que o novo sistema proposto seja seriamente considerado pelas municipa-

lidades para a purificação de águas.

Richard, Y. (7) relata resultados de pesquisa realizada com base em trabalhos de laboratório e na operação de um sistema de flotação com capacidade de 1.200 m³/h, composto por quatro unidades de 300 m³/h cada uma, construído em Moulle (França).

Como já existia instalação convencional para tratamento de água nessa localidade, foi possível verificar que a flotação possibilitou uma redução média no consumo de coagulantes primários da ordem de 20%, para se obter água tratada com a mesma qualidade daquela efluente dos decantadores.

Na referida instalação de Moulle, também é utilizada a flotação para concentração do lodo descartado dos decantadores. Esse lodo, que contém apenas cerca de 0,2% a 0,3% em sólidos, passa a apresentar 2,5% a 3,0%, após flotação aliada à adição de alginato de sódio como auxiliar.

Bratby, J. et alii (8) utilizaram uma unidade-piloto de FAD para espessamento do efluente proveniente das descargas de fundo dos decantadores da estação de tratamento de água de Kloal Nek, África do Sul.

A vazão de água descartada junto com o lodo correspondia a 2,5% da vazão tratada pela estação. Após a realização dos testes foi constatado que o uso de flotação poderia reduzir esse descarte para apenas 0,05% da vazão da água tratada, tendo em vista a possibilidade de retorno da água recuperada nesse sistema adicional.

Evidentemente, os trabalhos que vêm sendo realizados levam a crer que a pesquisa visando ao melhor conhecimento da aplicabilidade da flotação por ar dissolvido no tratamento de água para abastecimento assume grande importância quando se considera a existência de alguns problemas ou situações que ocorrem em estações de tratamento de água, que podem ser superados facilmente com o emprego de flotação. Entre as circunstâncias favoráveis à aplicação da FAD como alternativa para tratamento preliminar (precedendo a filtros), têm-se:

— ocorrência de dificuldades relacionadas com águas que possuem cor elevada e baixa turbidez, que, ao flocularem, produzem flocos leves, os quais "atravessam" os decantadores, sobrecarregando e prejudicando os filtros de areia;

— ocorrência de algas em grande quantidade no manancial, cujas águas dão origem a flocos leves em estações convencionais ou provocam problemas, quando o tratamento é feito através de filtração direta;

— ocorrência de baixa concentração de sólidos no lodo de decantadores, resultando em perda de água e

no custo elevado das instalações relativas à disposição final deste lodo:

— ocorrência de restrição que exige unidade mais compacta, por não se dispor de área necessária para a construção de sistemas convencionais de tratamento de água;

— ocorrência de águas com turbidez muito elevada e conteúdo orgânico relativamente baixo.

Com base em levantamento da literatura concernente e nos resultados da presente pesquisa acredita-se que a utilização de unidades compactas de floculação e flotação possa vir a representar, nas circunstâncias mencionadas, alternativa atraente em relação ao uso de unidades convencionais de floculação e de decantação destinadas ao tratamento de água.

É interessante ressaltar que as unidades de coagulação, floculação e decantação convencionais exigem tempo de detenção total da ordem de três a cinco horas, enquanto as utilizadas nesta pesquisa, isto é, unidades de coagulação, floculação e flotação, exigem tempo de detenção total inferior a 1 hora.

2 Objetivos

A presente pesquisa foi desenvolvida visando alcançar aos seguintes objetivos principais:

— projeto e construção de uma instalação-piloto de flotação por ar dissolvido para tratamento de água para abastecimento, constituída por unidades de coagulação e de floculação, câmara de mistura e tanque de flotação;

— operação da instalação-piloto de maneira a serem obtidas informações acerca da influência dos seguintes parâmetros: taxa de aplicação hidráulica, pressão interna na câmara de saturação e vazão de recirculação.

3 Descrição da instalação-piloto

A unidade-piloto foi instalada nas dependências da estação de tratamento de água da cidade de São Carlos-SP, e, durante a pesquisa, a mesma foi alimentada com água que já recebera os coagulantes primários (sulfato de alumínio e cal) aplicados na referida estação, através de sifonamento da água após sua unidade de mistura.

A instalação-piloto é composta basicamente por unidade de mistura (que durante essa pesquisa não foi utilizada), câmara de floculação compacta mecanizada tricompartmentada, câmara de saturação e câmara de flotação. Tal instalação foi idealizada de modo a se dispor de duas opções básicas

para alimentação da instalação, cujas características são:

Opção I — Alimentação da instalação-piloto através de sifonamento de parcela da vazão de água coagulada proveniente da saída da unidade de mistura rápida da Estação de Tratamento de Água (ETA) de São Carlos, aproveitando-se, assim, do sistema de controle de drenagem de produtos químicos da mesma.

Opção II — Alimentação da instalação-piloto através de bombeamento de parcela da vazão da água bruta que chega à ETA. Tal parcela, desta forma, é encaminhada à câmara de mistura rápida da instalação-piloto, recebendo aí os produtos químicos dosados por bombas apropriadas.

Deve-se salientar que os ensaios programados para a presente pesquisa foram realizados utilizando-se apenas a Opção I. A Opção II foi projetada, tendo-se em vista o interesse de se empregar essa instalação para outras pesquisas futuras.

A figura 3.1 apresenta esquematicamente as unidades que compõem a referida instalação.

As características principais das unidades que compõem a instalação são especificadas a seguir:

— Unidades de mistura rápida e de floculação: essas unidades, durante todos os testes, foram sempre alimenta-

das com uma mesma vazão, superior à máxima prevista para ser recalçada ao sistema de flotação, sendo o excesso descartado. Esse fato permitiu com que fossem reduzidas ao máximo as consequências que poderiam ocorrer em função da variação das condições físicas nessas unidades quando fosse imposta alteração nas taxas testadas no sistema de flotação propriamente dito.

Assim sendo, a unidade de mistura rápida tem condições de funcionar com tempo de detenção de 44,5 s, associado a gradiente de velocidade de 4.900 s^{-1} .

A unidade de floculação possui três compartimentos em série, que possibilitam a utilização de diferentes valores de gradiente de velocidade (o maior valor utilizado na primeira câmara foi de 60 s^{-1}), através da alteração da rotação do sistema de agitação que é constituído por placas perfuradas fixas em eixo vertical central.

Durante todos os testes foram respeitados as mesmas condições e gradiente de velocidade e o mesmo tempo de detenção (12,1 minutos).

— Câmara de saturação: essa unidade possui volume total de $125,7 \text{ l}$ e pode suportar, com segurança, a pressão interna de trabalho até $5,5 \text{ kgf/cm}^2$.

— Câmara de flotação: a câmara de flotação foi construída em chapa metálica, de forma circular com fundo plano. No fundo da unidade foi prevista calha de coleta do lodo que é arastado por um sistema de limpeza de fundo. Analogicamente foi instalado um "raspador" superficial, com a finalidade de encaminhar o material flutuado para dentro de outra calha situada na parte superior da unidade.

O cilindro central da câmara de flotação foi construído de maneira a permitir que se varie sua altura, a fim de que se possa, em pesquisa futura, determinar a sua influência no desempenho do sistema.

Para girar o eixo vertical, ao qual estão solidários os raspadores superficial e de fundo, foi acoplado um micromotor com redutor de saída dentada.

A unidade de flotação possui diâmetro externo de $0,9 \text{ m}$ e altura útil de $1,68 \text{ m}$, resultando em volume igual a 1.069 m^3 . A área em que ocorre fluxo ascendente é igual a $0,432 \text{ m}^2$.

Para a presente pesquisa foram programados testes empregando-se taxa de escoamento superficial variando de acordo com os seguintes volumes: $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$, $180 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ e $240 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$, correspondendo a tempos de detenção, respectivamente iguais a 29,7 minutos, 19,8 minutos e 14,9 minutos.

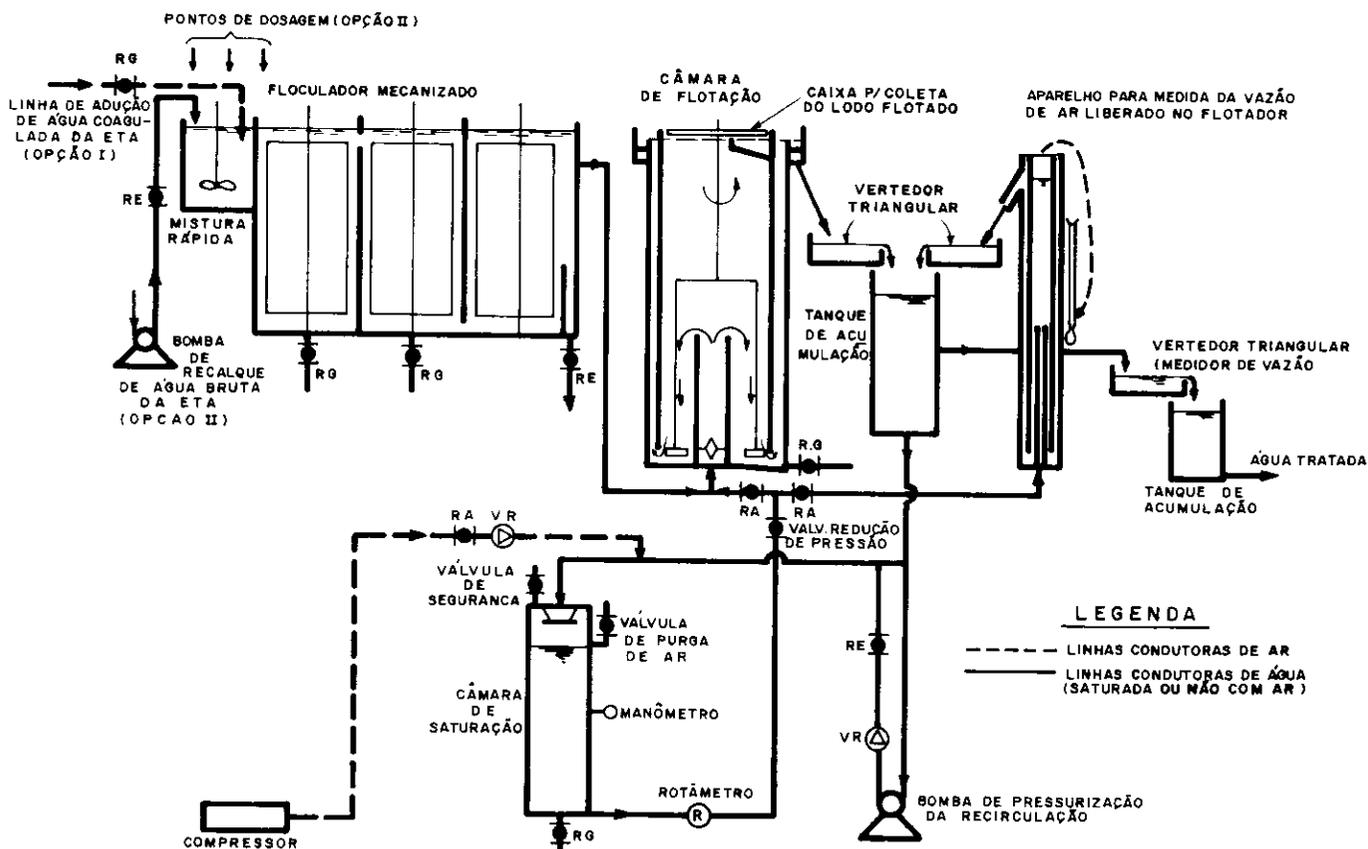


Figura 3.1 — Fluxograma da instalação-piloto de flotação

4 Ensaios com a instalação-piloto

4.1 Ensaio preliminar

É reconhecido o fato da importância da influência da eficiência da câmara de saturação no desempenho de um sistema de flotação como um todo.

Assim sendo, antes da realização dos testes de flotação, foram feitos ensaios visando à determinação de "curvas de saturação" da água pressurizada para a avaliação do tempo de detenção ótimo na câmara de saturação que deveria ser adotado nos ensaios com o sistema de flotação.

As curvas apresentadas na figura 4.1 representam a tendência de variação da eficiência da câmara de saturação em função do tempo de detenção, para as pressões de 2,5 kgf/cm² e 3,5 kgf/cm². No caso, a maior eficiência está associada ao tempo de detenção para o qual ocorre a maior concentração de ar possível de liberação posterior na câmara de flotação.

4.2 Testes com a instalação-piloto

A tabela 4.1 apresenta as condições fundamentais dos ensaios que foram realizados com a instalação-piloto.

Tabela 4.1 — Programação dos Ensaios

ENSAIO Nº	PRESSÃO RELATIVA (kgf/cm ²)	TAXA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL (m ³ /m ² .dia)	PORCENTAGEM DE RECIRCULAÇÃO (%)
1	3,5	120	7
2		120	7
3		120	11
4		120	15
5		180	7
6		180	11
7		180	15
8		180	25
9		240	7
10		240	11
11		240	18
12	2,5	180	7
13		180	11
14		180	15
15	4,5	180	5
16		180	7
17		180	11
18		180	15

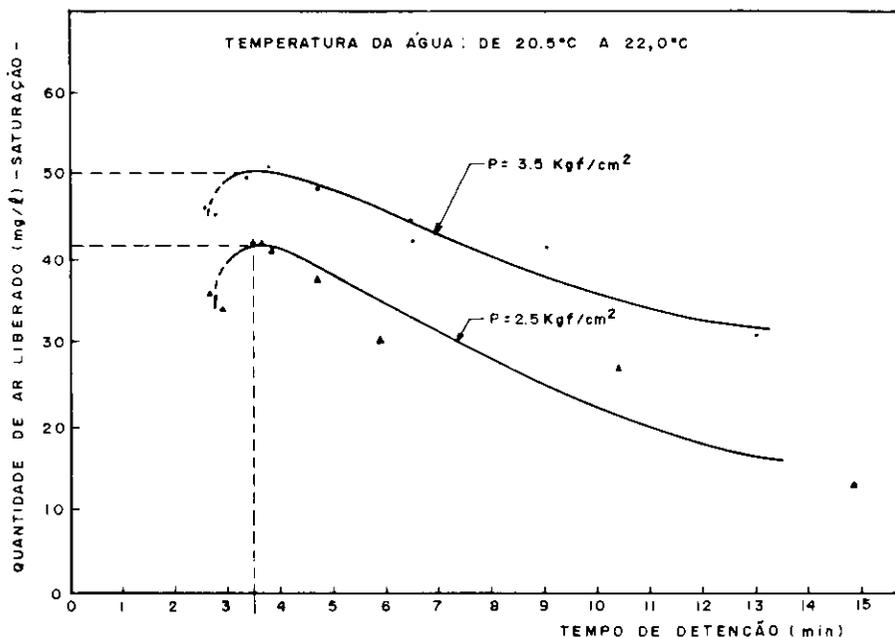


Figura 4.1 — Quantidade de ar liberado em função do tempo de detenção na câmara de saturação

Os ensaios n.º 1 e n.º 2 apresentam as mesmas condições físicas, porém, a turbidez e a cor da água bruta assumem valores significativamente diferentes, permitindo, assim, a obtenção de informações adicionais acerca do desempenho da instalação-piloto, quan-

do as características do afluente sofrerem variações sensíveis.

Durante todos os ensaios foram mantidas inalteradas as seguintes condições:

- tempo de detenção (12,1 minutos) e gradiente de velocidade na unidade de flocação;

- altura do cilindro central na câmara de flotação (0,63 m);

- tempo de detenção "ótimo" na câmara de saturação (3,5 minutos);

- dosagem de amido (0,50 ± 0,05 mg/l) que foi empregado como auxiliar de flocação.

Visando à obtenção de dados que possibilitassem a avaliação da eficiência da flocação na unidade-piloto, amostras de água floculada eram colocadas em repouso em "becker" de 2 mil ml, e, em intervalos de tempo convenientes e padronizados eram retiradas amostras (a 0,1 m da superfície), de acordo com padronização de ensaios de flocação recomendada por Hudson, H. E. Jr. (9), por sifonamento. Com a determinação de valores de cor e de turbidez dessas amostras eram construídas curvas de remoção em função do tempo.

Através dessas curvas é possível a avaliação aproximada da velocidade de sedimentação associada a uma determinada porcentagem de turbidez ou cor (9).

Para permitir a avaliação global do desempenho da unidade-piloto eram coletadas e analisadas amostras de água bruta na entrada da ETA de São

Carlos, SP, e para permitir a avaliação do desempenho da unidade de flotação propriamente dita eram efetuadas determinações de sólidos suspensos totais, fixos e voláteis na entrada e na saída da mesma.

Portanto, durante os ensaios coletaram-se amostras no canal de água bruta da ETA. Na saída da câmara de floculação piloto e na saída da câmara de flotação. Essas amostras eram coletadas em intervalos regulares de tempo, os quais dependiam da taxa de aplicação adotada para a câmara de flotação. As determinações realizadas com as amostras são as seguintes:

— água bruta: cor, turbidez, pH e temperatura;

— água floculada: neste caso diversas amostras eram coletadas em intervalos regulares durante o ensaio e ao final do mesmo fazia-se a homogeneização precedendo à determinação de sólidos suspensos correspondente à média verificada durante o respectivo ensaio;

— efluente do flotador: neste caso eram coletadas diversas amostras durante a realização do ensaio, determinando-se para cada uma delas os seguintes parâmetros: cor, turbidez, pH e temperatura. Também era determinada a concentração média de sólidos suspensos, de maneira idêntica à efetuada para a água floculada.

Durante os ensaios também eram coletadas amostras do material flotado, visando à determinação da concentração de sólidos no mesmo.

No período em que foram realizados os testes considerados nesta pesquisa, a temperatura da água variou entre 21,5°C e 24°C.

5 Discussão dos resultados

5.1 Resultados

É muito difícil e exige muito critério qualquer análise de desempenho de um sistema de tratamento quando o mesmo recebe como afluente uma água natural, portanto, que sofre variações sensíveis em intervalos de tempo relativamente pequenos ou cujas características variam de ensaio para ensaio.

Além disso, como anteriormente ao processo de flotação há necessidade de se promover a floculação da água, qualquer falha na adição de produtos químicos, ou no processo de floculação propriamente dito, provoca alterações na qualidade da água afluente ao sistema de flotação, interferindo na eficiência do mesmo. Portanto, além dos fatores relacionados com a variação da qualidade da água em si, soma-se a qualidade da floculação obtida.

Assim sendo, toda a análise e discussão dos resultados far-se-ão apenas dentro dos limites julgados razoáveis, levando-se em conta essas observações iniciais para evitar a generalização de conclusões da presente pesquisa.

Visando facilitar a análise e a discussão dos resultados, foram construídas as tabelas 5.1 e 5.2, que mostram, de maneira sintética, a maioria dos dados levantados durante a operação da instalação-piloto.

Na tabela 5.1 são apresentados os valores de sólidos suspensos no afluente e no efluente, assim como a concentração de sólidos no lodo flotado.

Na tabela 5.2 são mostrados basicamente os resultados relativos à remoção de cor, de turbidez e de sólidos suspensos. O ensaio cujo número se encontra inscrito em um círculo corresponde àquele que ofereceu melhor resultado para o grupo considerado.

Os valores apresentados nas tabelas correspondem à média dos valores determinados durante os ensaios de campo.

Na análise dos resultados é muito importante levar em consideração que, de maneira geral (com exceção do ensaio n.º 1, que foi repetido), tanto a cor como a turbidez apresentam valores relativamente baixos, caracterizando uma água que geralmente oferece dificuldades para se obter eficiência na clarificação, através do emprego de tratamento convencional.

5.2 Discussão

5.2.1 Ensaios realizados com pressão de 3,5 kgf/cm²

Para a taxa de escoamento superficial igual a 120 m³/m²/dia e pres-

Tabela 5.1 — Sólidos suspensos no afluente e no efluente e teor de sólidos no lodo flotado

Ensaio nº	Taxa (m ³ /m ² dia)	Pressão relativa (kgf/cm ²)	% de Recirculação	A/S	% de Sólidos no Lodo Flotado	Sólidos Suspensos Totais (mg/l)		Sólidos Suspensos Fixos (mg/l)		Sólidos Suspensos Voláteis (mg/l)	
						Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
1	120	3,5	7	0,0311	3,6	112,4	26,4	85,7	18,8	26,7	7,6
2	120	3,5	7	0,1795	1,1	19,5	8,9	14,9	6,8	4,6	2,1
3	120	3,5	11	0,1165	2,4	47,2	11,7	33,2	6,5	14,0	5,2
④	120	3,5	15	0,1880	5,1	39,9	9,3	27,7	4,4	12,2	4,9
5	180	3,5	7	0,0819	3,4	42,0	14,7	28,3	8,0	13,7	6,7
⑥	180	3,5	11	0,1558	4,6	35,3	9,4	23,5	4,1	11,8	5,3
7	180	3,5	15	0,0992	7,2	75,6	23,5	56,3	14,0	19,3	9,5
8	180	3,5	25	0,2774	5,8	44,3	19,3	32,5	12,5	11,8	6,8
9	240	3,5	7	0,0862	0,4	39,9	17,4	28,0	10,8	11,9	6,6
⑩	240	3,5	11	0,1913	4,0	27,6	8,6	25,3	7,4	2,3	1,2
11	240	3,5	15	0,2259	3,3	33,2	24,4	28,5	20,8	4,7	3,6
12	180	2,5	7	0,1740	3,5	16,7	9,9	9,6	4,5	7,1	5,4
⑬	180	2,5	11	0,2594	4,5	17,6	7,6	11,4	3,3	6,2	4,3
14	180	2,5	15	0,3347	3,0	18,6	13,1	14,1	10,2	4,5	2,9
15	180	4,5	5	0,1993	1,7	14,7	10,9	9,3	6,0	5,4	4,9
⑯	180	4,5	7	0,2717	2,3	15,1	9,5	8,4	4,4	6,7	2,1
17	180	4,5	11	0,4508	2,2	14,3	12,4	9,7	7,9	4,6	4,5
18	180	4,5	15	0,7387	2,4	11,9	9,2	6,2	4,0	5,7	2,2

Tabela 5.2 — Remoção de cor, de turbidez e de sólidos suspensos

Ensaio n°	Taxa ($m^3/m^2/dia$)	Pressão Relativa (kgf/cm^2)	% de Recirculação	A/S	Turbidez Média de Água Bruta (U.T.)	Cor Média da Água Bruta (mg/l em Pt.Co)	Porcentagem Média de Remoção (%)				
							Turbidez	Cor	Sólidos Suspensos Totais	Sólidos Suspensos Fixos	Sólidos Suspensos Voláteis
1	120	3,5	7	0,0311	120	314	71	79	77	78	72
2	120	3,5	7	0,1795	16	53	44	58	54	54	54
3	120	3,5	11	0,1165	40	133	63	75	75	80	63
④	120	3,5	15	0,1880	35	117	74	84	77	84	60
5	180	3,5	7	0,0819	37	113	58	72	65	72	51
⑥	180	3,5	11	0,0819	23	80	72	78	73	83	55
7	180	3,5	15	0,0992	72	193	64	78	69	75	51
8	180	3,5	25	0,2774	43	139	57	75	56	62	42
9	240	3,5	7	0,0862	42	123	54	63	56	61	45
⑩	240	3,5	11	0,1913	20	83	62	73	69	71	48
11	240	3,5	15	0,2259	20	88	30	43	27	27	23
12	180	2,5	7	0,1740	12	45	43	63	41	53	24
⑬	180	2,5	11	0,2594	14	55	48	66	57	71	31
14	180	2,5	15	0,3347	12	50	23	41	30	28	36
15	180	4,5	5	0,1993	9	35	33	58	26	36	9
⑯	180	4,5	7	0,2717	9	39	40	67	37	48	24
17	180	4,5	11	0,4508	9	40	17	54	13	19	2
18	180	4,5	15	0,7387	9	34	26	58	23	36	9

são 3,5 kgf/cm² os melhores resultados foram verificados quando a recirculação foi de 15% em relação à vazão afluente. Nestas condições, a turbidez inicial, que era igual a 35 UT, sofreu redução de 74%, ao passo que a cor inicial, 117 mg/l em Pt-Co, sofreu redução de 84%. Esse foi o ensaio que promoveu maior redução nos sólidos suspensos totais, redução esta que atingiu o valor de 77%.

Para a taxa de escoamento superficial de 180 m³/m²/dia e pressão 3,5 kgf/cm², as melhores condições de remoção de cor, turbidez e também de sólidos suspensos ocorreram para a vazão de recirculação igual a 11% da vazão afluente.

Neste caso, foram obtidos os seguintes valores de porcentagem de remoção de cor, turbidez e sólidos suspensos: 78%, 72% e 73%, respectivamente.

A turbidez da água "in natura", por ocasião deste ensaio, era igual a 23 UT e a cor, 80 mg/l em Pt-Co.

Para a taxa de escoamento superficial igual a 240 m³/m²/dia também a recirculação igual a 11% foi aquela para a qual obteve-se efluente de melhor qualidade.

A turbidez inicial, que era igual a 20 UT, sofreu redução de 62%, e a cor inicial, por sua vez, igual a 83 mg/l em Pt-Co, foi reduzida de 73%.

Neste ensaio, a redução da concentração de sólidos suspensos foi igual a 69%.

5.2.2 Ensaios com pressão de 2,5 kgf/cm²

Os ensaios realizados com pressão igual a 2,5 kgf/cm² ofereceram, de maneira geral, resultados que permitem concluir, pelo menos em caráter preliminar, que a eficiência na remoção de cor, de turbidez e de sólidos suspensos, sofre certo prejuízo em relação à eficiência obtida no caso dos ensaios com pressão igual a 3,5 kgf/cm².

Para os ensaios efetuados com taxa igual a 180 m³/m²/dia e pressão igual a 2,5 kgf/cm², a melhor eficiência na remoção de cor, de turbidez e de sólidos suspensos ocorreu para a recirculação igual a 11%. Neste caso, foram obtidas as seguintes reduções nos valores iniciais de cor, turbidez e sólidos suspensos: 66%, 48% e 57%, respectivamente. A cor inicial era igual a 55 mg/l em Pt-Co e a turbidez inicial igual a 14 UT.

5.2.3 Ensaios com pressão de 4,5 kgf/cm²

O melhor resultado verificado entre os ensaios com taxa de escoamento superficial igual a 180 m³/m²/dia e a pressão de 4,5 kgf/cm² ocorreu para

recirculação igual a 11%. Nessa situação, a remoção de turbidez foi igual a 40% e de cor foi igual a 67%.

A remoção de cor foi comparável àquela obtida quando foi empregada pressão igual a 2,5 kgf/cm² (para a mesma taxa de escoamento superficial), porém a remoção de turbidez foi inferior que naquele caso.

Esse fato, analisado isoladamente, não permite, no entanto, que se conclua que a pressão de 2,5 kgf/cm² pode oferecer melhores resultados para uma mesma água, porque, tanto a turbidez, como a cor, durante os ensaios a 4,5 kgf/cm², estavam sensivelmente menores do que os valores que ocorreram durante o ensaio a 2,5 kgf/cm², oferecendo, assim, maior dificuldade na obtenção de porcentagens elevadas de remoção pela própria natureza da água.

5.2.4 Influência da taxa de escoamento superficial

Comparando-se entre si as porcentagens de remoção obtidas, correspondentes ao melhor resultado de cada taxa de escoamento superficial, nota-se que, de maneira geral, houve ligeira tendência em se verificar diminuição na porcentagem de remoção nos valores dos parâmetros estudados à medida que ocorre aumento dessa taxa, ou seja, no caso de turbidez, a redução para a taxa de 120 m³/m²/

dia, resultou igual a 74%, para a taxa de 180 m³/m²/dia, 72% e para 240 m³/m²/dia, 62%; no caso da cor, a maior remoção ocorreu para a taxa de escoamento superficial igual a 120 m³/m²/dia (84%) e a menor remoção verificou-se para a taxa igual a 240 m³/m²/dia (73%). Também no que se refere à remoção de sólidos suspensos foi verificada a mesma situação, ou seja, para a menor taxa (120 m³/m²/dia) ocorreu remoção igual a 77% e para a maior taxa ocorreu remoção de 69%.

Todas essas considerações anteriores são válidas para a pressão de 3,5 kgf/cm². Vale chamar atenção para o fato de que a qualidade da água "in natura" não foi exatamente a mesma em todos os ensaios, portanto, as informações anteriores não assumem caráter de generalização.

Nota-se que a turbidez inicial no ensaio referente à taxa de escoamento superficial igual a 120 m³/m²/dia era igual a 35 UT (e a cor 117 mg/l em Pt-Co), ao passo que a turbidez da água "in natura", no ensaio com taxa igual a 240 m³/m²/dia, era igual a 20 UT (e a cor, 83 mg/l em Pt-Co). Com base nesses valores e na experiência com tratamento de água, sabe-se que é muito mais fácil obter-se maior redução percentual de cor ou turbidez presentes em uma água com valores mais elevados relativos a esses parâmetros do que com uma água que apresente baixos valores de cor e de turbidez.

5.2.5 Relação A/S

Os valores de A/S, mencionados na bibliografia geralmente se encontram entre 0,005 e 0,06, porém, esses valores referem-se a casos em que o afluente é uma água residuária, portanto, com elevado teor de sólidos suspensos.

Na pesquisa em questão, esses valores sempre foram superiores a 0,0311, e, para esse referido valor, que foi o mínimo verificado, a água "in natura" foi justamente aquela que apresentou maior valor de sólidos suspensos (85,7 mg/l). Ao passo que, quando o valor da relação A/S foi igual a 0,2717 (ensaio n.º 16) a concentração de sólidos suspensos na água bruta era da ordem de 8,4 mg/l, apenas.

Com base nos dados obtidos nos ensaios, de maneira geral, pode-se afirmar que houve tendência de se verificar aumento do valor de A/S, à medida que ocorre redução do teor de sólidos suspensos (tomando-se como base os ensaios que ofereceram as condições ótimas de remoção de cor e de turbidez).

Além disso, vale destacar que os valores de A/S encontrados são sensi-

velmente superiores àqueles recomendados usualmente para despejos líquidos.

5.2.6 Teor de sólidos no lodo flotado

Em todos os ensaios considerados "ótimos" para cada taxa estudada, para as pressões de 3,5 e 2,5 kgf/cm² (ensaios n.ºs 4, 6, 10, 13), atingiu-se sempre uma concentração de sólidos no lodo flotado maior ou igual a 4,0%. Tal concentração pode ser considerada bastante elevada, quando comparada com as concentrações de lodo obtidas em sedimentadores.

Apenas no caso do melhor resultado para a pressão 4,5 kgf/cm, é que houve menor concentração de sólidos no material flutuante (2,3%), porém, mesmo assim, essa concentração é superior à verificada na quase totalidade dos decantadores em funcionamento.

5.2.7 Comparação da eficiência da flotação com o da decantação

A unidade de floculação, apesar de ter sido projetada para um tempo de detenção sensivelmente menor do que o utilizado na maioria das estações de tratamento (12,1 minutos, em contraposição a 30 minutos) apresentou desempenho razoável, tendo em vista o sistema de agitação adotado, no qual as paletas foram substituídas por placas perfuradas. Certamente, essas placas ofereceram melhor distribuição de velocidades no interior das câmaras de floculação, ocasionando maior número de choques entre as partículas e, conseqüentemente, melhor floculação.

Em princípio, esse reator demonstrou que pode funcionar com tempo de detenção menor que os convencionalmente utilizados, porém, chegou-se à mesma conclusão que autores citados no presente trabalho, ou seja, a qualidade dos flocos e a qualidade do "líquido" interflocos influenciam de maneira decisiva na eficiência do sistema de flotação.

As falhas na dosagem de produtos químicos, assim como deficiência no processo de floculação propriamente dito, interferem no desempenho do sistema, pois pode ser observado através da comparação da remoção de cor e de turbidez através de sedimentação da água floculada, com a remoção de cor e de turbidez na unidade de flotação, que, de maneira geral, houve um comportamento semelhante no que se refere à eficiência dos processos. Isto é, sempre que havia alguma redução de eficiência na remoção de cor e de turbidez através da sedimentação, também ocorria redução de eficiência na remoção de cor e de turbi-

dez através da flotação. Esse fato é indiscutível.

Para viabilizar uma comparação, mesmo que grosseira, entre o desempenho da flotação em relação ao da decantação da água floculada, foram obtidos dados de sedimentabilidade de acordo com o critério descrito anteriormente.

De acordo com Hudson, H. E. (9), é possível fazer-se comparações aproximadas de resultados de laboratório e resultados de campo, quando são obedecidas certas condições na realização desses ensaios.

Apenas a título de se dispor de uma comparação aproximada entre o desempenho da unidade de flotação com o de uma possível unidade de decantação que recebesse a mesma água floculada, foram feitas determinações das porcentagens de remoção de cor de turbidez em função da velocidade de sedimentação (taxa de escoamento superficial), através da análise dos dados obtidos em ensaios de sedimentação — segundo Hudson, H. E. (9) — da água floculada efluente da unidade de floculação da instalação-piloto.

Foram tomadas como termo de comparação as remoções que ocorreram para as taxas de escoamento superficial iguais a 28,8 m³/m²/dia e 16 m³/m²/dia. É importante lembrar que o maior desses valores está próximo aos valores utilizados para projeto da maioria dos decantadores convencionais, ao passo que o menor é bastante conservador e, portanto, qualquer comparação com o mesmo pressupõe um decantador com "folga". Portanto, essas taxas foram adotadas com vistas a não serem obtidas conclusões tendenciosas, e, sim, conclusões consistentes.

A tabela 5.3 permite a comparação dos valores de remoção de cor e de turbidez considerados "ótimos" para cada taxa de escoamento superficial estudada com os valores de remoção de cor e de turbidez obtidas para taxas de escoamento superficial de decantação iguais a 28,8 m³/m²/dia e 16 m³/m²/dia.

Para os ensaios com pressão igual a 3,5 kgf/cm², os resultados obtidos com a flotação para as taxas de escoamento superficial 120 e 180 m³/m²/dia foram melhores, porém, quando a taxa foi de 240 m³/m²/dia, os resultados da flotação só foram melhores se comparados com os da decantação para taxa de 28,8 m³/m²/dia, contudo, foram piores, quando comparados com os da decantação para taxa de escoamento superficial igual a 16 m³/m²/dia.

A flotação também ofereceu melhores resultados que a decantação quando foi utilizada pressão de 4,5 kgf/cm², porém, ocorreu o inverso quando

Tabela 5.3 — Comparação entre os resultados dos ensaios de flotação e os de decantação, no que se refere à remoção de cor e de turbidez

Características do ensaio de Flotação	Porcentagem de remoção verificada no ensaio de flotação.		Porcentagem de remoção verificada no ensaio de decantação (%)			
	%		Taxa: 28,8 m ³ /m ² dia		Taxa: 16,0 m ³ /m ² dia	
	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez
Pressão: 3,5 kgf/cm ² Taxa de escoamento superficial: 120 m ³ /m ² dia Recirculação: 15%	84	74	64	54	73	72
Pressão: 3,5 kgf/cm ² Taxa de escoamento superficial: 180 m ³ /m ² dia Recirculação: 11%	78	72	51	45	67	69
Pressão: 3,5 kgf/cm ² Taxa de escoamento superficial: 240 m ³ /m ² dia Recirculação: 11%	73	62	60	65	75	72
Pressão: 2,5 kgf/cm ² Taxa de escoamento superficial: 180 m ³ /m ² dia Recirculação: 11%	66	48	50	39	75	51
Pressão: 1,5 kgf/cm ² Taxa de escoamento superficial: 180 m ³ /m ² dia Recirculação: 7%	67	40	42	25	58	45

a pressão empregada no ensaio foi de 2.5 kgf/cm².

6 Conclusões

Os resultados desse trabalho mostram que o emprego de flotação por ar dissolvido no tratamento de águas para abastecimento, a exemplo do que afirmam outros pesquisadores, apresenta viabilidade técnica que justifica maior investimento no estudo das diferenças fundamentais que devem ser consideradas em projetos para esse fim, em relação aos conceitos e práticas já conhecidas e utilizadas no projeto de sistemas de flotação no tratamento de despejos.

A necessidade de vazão de recirculação relativamente pequena (de 7% a 15%, no caso) para se obter relação A/S aceitável, assim como a possibilidade de uso de taxas de escoamento superficial elevadas, são fatores favoráveis ao uso desse tipo de sistema para clarificação de águas.

Outro fator que deve ser levado em consideração trata-se da facilidade com que o lodo é retirado do processo, evitando, também, desperdícios de água, tendo em vista o elevado teor de sólidos do mesmo.

Durante a operação da instalação-piloto ficou constatado que a eficiência

da mesma poderá ser melhorada significativamente em função de algumas pequenas modificações que serão introduzidas para pesquisas futuras nesse campo, principalmente no que se refere à mistura de água floculada com a pressurizada.

Até o momento, no entanto, não se dispõe de experiência acumulada que permita a elaboração de projetos com a facilidade que existe para os decantadores convencionais ou laminares, portanto, tendo em vista a influência de muitos fatores no processo de flotação, sugere-se que a concepção de projeto de sistema de flotação por ar dissolvido para tratamento de água para abastecimento seja sempre precedido da operação de estação-piloto para obtenção das condições com as quais a instalação definitiva possa ser melhor adequada à água em questão.

7 Referências bibliográficas

- 1 — Bratby, J. — "Treatment of Raw Wastewater Overflows by Dissolved Air Flotation". *Journal Water Pollution Control Federation*, V. 54, n.º 12, 15-58, December 1982.
- 2 — Di Bernardo, L. et alii — "Emprego de Flotação por Ar Dissolvido para Tratamento de Despejos Líquidos

Industriais Provenientes de Laticínios". Apresentado no XVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental — Panamá, 1982.

- 3 — Campos J. R. et alii — "Águas Residuais de Indústrias de Óleos Vegetais. Origem, Caracterização e Tratamento". Apresentado no 9.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1977.
- 4 — Hyde, R. A. et alii — "Water Clarification by Flotation", *Journal American Water Works Association*, 369-374, July, 1977.
- 5 — Zabel, T. F. & Hyde, R. A. — "Factors Influencing Dissolved Air Flotation as Applied to Water Clarification". Presented at Water Research Center Conference on Flotation for Water and Waste Treatment, Henley, England, 1976.
- 6 — Krofta, M. et al — "Potable Water Treatment by Dissolved Air Flotation and Filtration", *Journal American Water Works Association*, V. 74, n.º 6, p. 305, June, 1982.
- 7 — Richard, Y. — "La Flottation: Un Cas d'Application a L'Installation de Traitement de L'Eau Potable de Moule", *Techniques & Sciences Municipales*, pp. 501-510, Octobre, 1981.
- 8 — Bratby, J. & Marais, G. V. R. — "Thickening of Brown Water Sludges by Dissolved — Air (Pressure) Flotation", *Water S. A.*, V. 3, n.º 4, p. 202, October, 1977.
- 9 — Hudson, H. E. Jr. — "Water Clarification Processes: Practical Design and Evaluation". Van Nostrand Reinhold Company, 1981, 353 p.