

EMPREGO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO NA CLARIFICAÇÃO
DE ÁGUAS PARA ABASTECIMENTO: INFLUÊNCIA DA TAXA DE
APLICAÇÃO SUPERFICIAL.

Edumar Ramos Cabral Coelho (*)
Marco Antonio Penalva Reali (**)
José Roberto Campos (***)

CURRÍCULO

- (*) Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - EESC/USP.
- (**) Doutorando em Hidráulica e Saneamento e professor no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- (***) Professor livre docente junto ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP.

RESUMO

A flotação por ar dissolvido por pressurização pode ser vista como processo alternativo à sedimentação para clarificação de águas para abastecimento.

Este artigo apresenta os principais resultados da avaliação de uma instalação piloto de flotação por ar dissolvido, através da taxa de aplicação superficial, utilizando-se água do Ribeirão Feijão, um dos mananciais abastecedores da cidade de São Carlos, São Paulo, Brasil.

A instalação piloto operada trata-se de uma unidade compacta que engloba flocação, flotação e filtração. Algumas condições operacionais foram consideradas não variáveis: a pressão na câmara de saturação (4,0 kgf/cm²), a porcentagem de recirculação (13 %), a flocação (mechanizada) e o dispositivo de liberação de ar (registro de agulha). As variáveis foram: a água bruta (turbidez: 12 a 17 UT; pH: 6,5 a 6,8; cor aparente: 30 a 100 mg/l PtCo; cor verdadeira: 29 a 85,9 mg/l PtCo; sólidos suspensos totais: 19,5 a 49,5 mg/l; temperatura: 19 a 24 °C; alcalinidade: 4,9 a 11,03 mg/l CaCO₃), o tempo de detenção na unidade de flocação/flotação (15 a 30 minutos); a taxa de aplicação superficial (120 a 300 m³/m².dia) e as condições de coagulação.

Os resultados encontrados, para as condições operacionais estabelecidas, com relação à porcentagem de remoção de turbidez (56 a 74%), de cor verdadeira (88 a 97%), de cor aparente (75 a 92%) e de sólidos suspensos totais (73 a 85%), podem ser considerados satisfatórios, apesar das variações na qualidade da água bruta.

ENDERECO: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CAMPUS DE SÃO CARLOS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Av. DR. CARLOS BÓTELBRO, 1465
13560 SÃO CARLOS - SP

0818807

215

SYSNO	0919964
PROD	001221
ACERVO EESC	

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia convencional do tratamento de água para abastecimento normalmente utiliza as operações de coagulação, floculação, sedimentação e filtração para a separação de impurezas presentes na água.

Diversos processos alternativos para o tratamento de água têm sido pesquisados. Para a clarificação da água podem-se citar a flotação, filtro de fluxo ascendente, pré-filtração em pedregulho, entre outros.

No presente trabalho é estudado o processo de flotação por ar dissolvido como alternativa à sedimentação para clarificação de águas para abastecimento.

A flotação pode ser entendida como um processo de separação de fases, no qual bolhas de ar ou de outro gás se unem a partículas sólidas ou líquidas em suspensão, resultando em um aglomerado bolha-partícula de densidade menor que a do líquido. A densidade diferencial causa ascensão do aglomerado bolha-partícula que se acumula na superfície da unidade de flotação na forma de lodo para posterior remoção (LONGHURST, 1987).

Inicialmente foi aplicada na indústria de minério, posteriormente ao tratamento de águas residuárias e ultimamente, a partir de 1960, na África do Sul, ao tratamento de águas de abastecimento.

Na América, a primeira unidade de flotação por ar dissolvido aplicada ao tratamento de água de abastecimento foi construída em Lenox, em 1982 (KROFTA & WANG, 1985).

No Brasil não se tem notícia, até o presente, da aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento de cidades.

O Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, desde 1982 vem desenvolvendo pesquisas sobre a flotação por ar dissolvido aplicada à clarificação de águas para abastecimento. Dentro deste objetivo pode-se citar o trabalho de dissertação de mestrado de REALI (1984).

A flotação por ar dissolvido aplicada ao tratamento de águas de abastecimento, como estágio de clarificação, é particularmente efetiva para águas que apresentam as seguintes características: (REES et alii, 1979 e ZABEL, 1982):

- águas com partículas de baixa densidade, que possuem tendência natural para flotar e que causam problemas no estágio de sedimentação;

- águas de represas, ricas em nutrientes e com grande quantidade de algas, que podem passar através do tanque de sedimentação, penetrar nos filtros e causar colmatação do leito;

- águas com cor elevada, que ao serem submetidas ao tratamento químico produzem flocos com baixa velocidade de sedimentação.

O processo de flotação por ar dissolvido surge como alternativa para

o tratamento de águas que apresentam dificuldades de serem tratadas pelo processo convencional de clarifício-pão, como as citadas acima.

Alguns autores estudaram diversos tipos de águas que apresentavam características similares às citadas, entre outras, e apresentaram as seguintes vantagens da flotação sobre a sedimentação (ZABEL & HYDE, 1978; REES et alii, 1979 e MOUCHET, 1983):

- o processo de flotação pode operar a altas taxas, independente do tipo de água a ser tratada;

- é possível a partida rápida, e o sistema pode atingir o equilíbrio em aproximadamente 15 minutos;

- as unidades de clarificação são relativamente menores, com menor profundidade, não sendo necessário grande volume de escavação;

- a concentração de sólidos presente no lodo é geralmente maior, não havendo, em muitos casos, necessidade de unidade especial para o espessamento do lodo.

A taxa de aplicação superficial, que é objeto deste estudo, foi definida por BRATBY & MARAIS (1978 b) como sendo a razão entre a vazão total que entra na unidade de flotação e a área onde ocorre o fluxo descendente. Este é um dos parâmetros mais importantes no dimensionamento da unidade de flotação, tendo em vista que uma de suas maiores vantagens é poder operar a altas taxas. É de vital importância o conhecimento deste parâmetro, pois a escolha de uma taxa, ou de um intervalo de taxas adequado, irá implicar em uma maior eficiência do processo.

As pesquisas mais recentes de flotação por ar dissolvido aplicadas à clarificação de águas para abastecimento têm se desenvolvido no sentido de obter unidades compactas de flotação e filtração. Podem-se citar entre outros trabalhos de VAN VUREEN et alii (1983) e VOSLOO et alii (1986).

O presente trabalho apresenta os resultados obtidos por COELHO (1990) em instalação piloto do tipo compacta de flotação e filtração, utilizando-se da taxa de aplicação superficial como parâmetro de avaliação do desempenho desta, na clarificação da água do Ribeirão Feijão, um dos principais abastecedores da cidade de São Carlos, SP, Brasil.

2. FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

A flotação por ar dissolvido consiste na dissolução de gás na massa líquida que posteriormente é submetida a um abaixamento de pressão, liberando bolhas de ar, com diâmetro em torno de 20 a 100 μm .

Segundo ZABEL (1982), os três principais tipos conhecidos do processo de flotação por ar dissolvido são:

- flotação a "vácuo";
- micro-flotação;
- flotação por pressurização.

No tratamento de águas para abastecimento a flotação por ar dissolvido por pressurização tem sido mais utilizada devido à sua maior simplicidade de operação.

Na flotação por pressurização o gás sob pressão é dissolvido na água em uma câmara de saturação. Na unidade de flotação, a água saturada é submetida a pressão próxima à atmosférica, ocorrendo a formação de bolhas de gás, de dimensões em torno de 20 a 100 μm de diâmetro.

A grande vantagem deste método, em relação à flotação a "vácuo" é que o mesmo permite maior diferença de pressão, possibilitando que uma maior quantidade de gás seja liberada da solução saturada.

A pressurização pode ser realizada por três métodos:

- flotação com pressurização total do afluente;
- flotação com pressurização parcial do afluente;
- flotação com recirculação pressurizada.

A representação esquemática dos três modos pode ser vista na Figura 1.

Durante o tratamento de água para abastecimento, geralmente são formados flocos frágeis que não suportam grande esforço de cisalhamento. Para que se evite a quebra dos flocos formados, o método mais indicado é o de flotação por ar dissolvido com recirculação pressurizada, que proporciona menor nível de turbulência na água floculada. Neste processo parte da água clarificada é recirculada, pressurizada e saturada com ar, seguindo após para a unidade de flotação.

De acordo com HYDE et alii (1977) os três processos básicos envolvidos na flotação são:

- processo de geração de bolhas de tamanho adequado;
- processo de agregação das bolhas ao material a ser flotado
- processo de separação dos sólidos.

HANN (1982) citou como fatores mais importantes no processo de geração de bolhas na flotação por ar dissolvido por pressurização, a pressão no saturador e a vazão de recirculação em relação à vazão de água a ser tratada.

Muitos trabalhos publicados consideram que a colisão devida à turbulência é o principal mecanismo de agregação entre bolhas e partículas, e salientam que todos os mecanismos de contato que necessitem de uma ligação estável bolha-partícula requerem grau de hidrofobicidade adequado.

A frequência e o grau em que ocorrem cada um dos mecanismos de agregação dependerão da suspensão a ser estudada e da operação do sistema de tratamento.

A medida quantitativa da hidrofobicidade pode ser obtida através da magnitude do ângulo de contato θ , como se pode ver no estudo das condições termodinâmicas para a flotação proposto por SHERGOLD (1982).

3. FLOTAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO

3.1. Considerações Gerais

O sistema de flotação por ar dissolvido, usualmente empregado na clarificação de águas para abastecimento, consiste basicamente de unidade de coagulação, unidade de flocação, unidade de pressurização e unidade de flotação.

Os sistemas de flotação por ar dissolvido por recirculação pressurizada funcionam de maneira geral da seguinte forma: na entrada do sistema a água bruta recebe a adição de produtos químicos, efetua-se a mistura rápida, e promove-se, assim, a coagulação. Em seguida, a água é conduzida para a unidade de flocação, seguindo daí para a unidade de flotação. Parte da água tratada é recirculada, pressurizada e saturada com ar. A água recirculada pressurizada é introduzida na unidade de flotação, através de um dispositivo de liberação de ar, onde a pressão é reduzida a valor próximo a pressão atmosférica e o ar é liberado na forma de pequenas bolhas. O ar adere aos flocos e a densidade deste é diminuída, conferindo ao aglomerado bolha/foco uma velocidade ascensional, ocorrendo então a flotação. O aglomerado atinge a superfície da unidade de flotação e forma uma camada de lodo que deverá ser removida.

Na Figura 2 tem-se um esquema de um sistema de flotação por ar dissolvido.

3.2. Coagulação e Flocação

No estudo da flotação por ar dissolvido para avaliar a condição adequada de produtos químicos, alguns autores utilizam equipamentos específicos, normalmente denominados "*flotatestes*" de fluxo contínuo ou não, que, muitas vezes, permitem também a avaliação de parâmetros tais como o abastecimento de ar e a taxa de flotação (ZABEL & HYDE, 1976; HYDE et alii, 1977; MOUCHET, 1983 e MHATRE & BHOLE, 1986).

ZABEL & HYDE (1976) fizeram comparações entre o efeito da variação na dosagem do coagulante em uma instalação piloto de flotação e um ensaio de flocação convencional, "*jar test*", e concluíram que a melhor dosagem no "*jar test*" foi também a melhor dosagem para a instalação piloto.

Algumas técnicas usuais para testes e ensaios de coagulação e flocação podem ser encontradas em CAMPOS & POVINELLI (1987), AMIRTHARAJAH (1989) e DI BERNARDO & MENDES (1989).

KROFTA & WANG (1985) compararam resultados da utilização de polímeros na flotação e na sedimentação. O resultado foi que a dosagem necessária à flotação foi menor que a requerida para a sedimentação.

O tempo de flocação e o grauiente de velocidade, G, devem ser estudados e adequados para cada tipo de água a ser tratada.

Segundo ZABEL (1982), para águas contendo algas, o tempo suficiente para a flocação adequada foi de 12 minutos, enquanto que para águas altamente coloridas foi necessário um tempo de 20 minutos.

Os valores de tempo de detenção encontrados por VAN VUREN et alii (1983a) foram aproximadamente os mesmos, 8, 12 e 16 min, para o gradiente de velocidade que variou de 50 a 70 s^{-1} em um floculador de dois estágios do tipo mecanizado.

Os pesquisadores que estudam a flotação são unânimes ao afirmar que a realização de coagulação e flocação adequadas é um requisito essencial para flotação eficiente.

3.3. Fornecimento de Ar

A parte fundamental do processo de flotação por ar dissolvido é a geração de bolhas de ar por liberação de pressão após a saturação da água com ar sobre pressão. O abastecimento de ar compreende dois estágios principais: (LONGHURST & GRAHAM, 1987)

- o de saturação, em que ocorre a dissolução do ar na água em uma câmara de saturação;

- o de liberação de ar, que ocorre na unidade de flotação, através de um dispositivo.

A combinação destes compreende o sistema que deverá fornecer a quantidade de ar necessária e o tamanho de bolhas adequado para que ocorra a flotação.

BRATBY & MARAIS (1975a), testaram e compararam a eficiência dos seguintes métodos de dissolução de ar na massa líquida: injeção de ar na sucção da bomba de pressurização, com posterior entrada em câmara simples de saturação; borbulhamento de ar no interior da câmara de saturação e a passagem de água e ar em câmara de saturação com enchimento, composto de uma coluna com elementos de grande superfície específica. O último método apresentou maior eficiência de dissolução do ar na massa líquida, promovendo a saturação completa a uma taxa de $2500 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$, não sendo recomendado que se trabalhe com pressão inferior a 350 KPa.

A água saturada com ar, efluente do saturador, é conduzida à unidade de flotação e, através de um dispositivo, ocorre a liberação de ar necessária à flotação.

O dispositivo a ser utilizado na liberação do ar é de fundamental importância no sistema de abastecimento de ar. Este deve permitir que o ar, ao ser liberado, forme uma dispersão de bolhas, de tamanho adequado à flotação, com o mínimo de turbulência possível.

Como dispositivos de liberação de ar podem ser utilizados: bocal especial patenteado, registros de agulha e até simples registros de gaveta, sendo que o último é de difícil regulagem. No interior desses dispositivos a pressão deve ser reduzida repentinamente para que ocorra uma liberação de ar

eficiente. A liberação de ar deve ocorrer bem próximo do ponto onde a água recirculada é misturada com a água floculada ou coagulada, para que seja minimizado o efeito de coalescência, que implica em perda de bolhas de ar.

Existem duas variáveis que podem controlar o fornecimento de ar: a pressão de saturação e a porcentagem de recirculação.

ZABEL (1986), operou uma câmara de saturação com enchimento na faixa de pressão de 350 a 420 KPa e porcentagem de recirculação de 7 a 8 %, correspondendo a uma taxa de 8 a 10 (g) ar / (m³) de água bruta.

3.4. Unidade de Flotação

É na unidade de flotação que ocorre a separação de fases, ou seja, o aglomerado bolha/partícula é removido da suspensão, ocorrendo a clarificação da água.

É importante o projeto adequado desta unidade, que funciona como fase final de todo o processo de flotação. Uma unidade mal projetada tornaria sem efeito todas as etapas anteriores.

As unidades de flotação normalmente apresentam seção circular ou retangular. ZABEL (1982) apresentou as seguintes vantagens da unidade retangular: a quebra dos flocos é amenizada, a mistura da água floculada com a água recirculada pode ser melhor distribuída na unidade. As unidades de flotação são normalmente projetadas com profundidade entre 1,2 e 2,0 m e com taxa de aplicação superficial entre 8 e 12 m/h. O tempo de detenção na unidade de flotação deve estar em torno de 5 a 15 minutos.

A separação dos sólidos da massa líquida, através da flotação, conduz a formação de uma camada de lodo na parte superior da unidade de flotação, que deve ser removida para assegurar a qualidade da água clarificada.

Segundo HYDE et alii (1977), a flotação apresenta vantagem particular sobre a sedimentação no que diz respeito ao teor de sólidos presentes no lodo flotado. Em suas pesquisas o lodo apresentou alto teor de sólidos, ou seja, em torno de 2 a 10%, dependendo da qualidade da água a ser tratada e do processo utilizado em sua remoção.

A remoção do lodo formado durante o processo de flotação, pode ser feita utilizando-se de raspadores superficiais mecanizados ou por inundação da unidade de flotação. A remoção pode ser realizada de maneira contínua ou intermitente.

Para preservar a vantagem de produção de um lodo com alto teor de sólidos recomenda-se a utilização de dispositivos mecânicos para sua remoção.

4. ABORDAGEM SOBRE TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL EM UNIDADES DE FLOTAÇÃO

Segundo RICHARD (1981), as leis que definem a separação de fases em flotação são as mesmas aplicadas à sedimentação. A lei de Stokes pode ser

aplicada desde que o escoamento das partículas seja considerado laminar. Daí, BRATBY & MARAIS (1975b) fizeram também menção à relação existente entre os processos de sedimentação e flotação. Segundo os autores, a taxa de sedimentação de partículas é dependente principalmente de suas propriedades físicas. Consequentemente, no projeto da unidade de sedimentação, o movimento ascendente do líquido deve ser sempre menor que a velocidade de sedimentação da partícula crítica. Ao contrário, no projeto de unidades de flotação a velocidade descendente do líquido não é fixada e depende da velocidade de ascensão do aglomerado bolha/partícula, o qual, por sua vez, depende da massa de ar adsorvida pelas partículas. A velocidade descendente do líquido na unidade de flotação será referida como taxa de aplicação superficial. Será definida como a vazão total que entra na unidade de flotação pela área onde ocorre o fluxo descendente e terá unidade de velocidade, ou seja, $m^3/m^2 dia$, ou $m dia^{-1}$.

ZABEL (1982) sugere que os valores de taxa de aplicação superficial devem estar entre 8 e 12 m/h . O tempo de detenção na unidade de flotação deve estar em torno de 5 a 15 minutos.

REALI (1984) constatou, em sua experiências que, de maneira geral, houve ligeira tendência em se verificar diminuição nas porcentagens de remoção de turbidez, de cor e de sólidos suspensos à medida que se aumentou a taxa de aplicação superficial. O autor trabalhou com taxas de 5,0, 7,5 e 10,0 m/h e observou que, com a pressão no saturador igual a 343 KPa, a taxa de 5 m/h mostrou ser a melhor em termos de remoção de cor, turbidez e de sólidos suspensos em relação as taxas de 7,5 e 10 m/h .

5. METODOLOGIA

5.1. Instalação Piloto

A Figura 3 apresenta o fluxograma da instalação piloto. A água bruta após receber a adição de barrilha e sulfato de alumínio era encaminhada à unidade de floculação/flotação onde ocorria a mistura com a parcela de água recirculada.

5.2. Metodologia dos Ensaios

Os ensaios consistiam basicamente de duas etapas. Na primeira etapa efetuavam-se ensaios de floculação "jar test" com o objetivo de se determinar a dosagem apropriada de produtos químicos. A segunda etapa envolvia o ensaio para se efetuar a avaliação da eficiência da flotação, através da taxa de aplicação superficial.

5.2.1. Ensaio de Floculação

Os ensaios de floculação foram realizados em aparelho de "jar test" do tipo convencional obedecendo especificações descritas em ROSSIN (1987), com as seguintes características:

- volume dos becker: 2,0 l;
- reatores com estatores;
- gradiente de velocidade na mistura rápida: $\approx 500 \text{ s}^{-1}$
- tempo de mistura rápida: 1,0 min;
- gradiente de velocidade na flocação: $\approx 41 \text{ s}^{-1}$;
- tempo de flocação: 15,0 min;
- tempo de sedimentação: 30,0 min.

5.2.2. Ensaio de Flotação

A água bruta após receber os produtos químicos, sulfato de alumínio e barrilha (dosagens determinadas no ensaio de flocação), era encaminhada à unidade de flocação/flotação.

Nestes ensaios permaneceram fixos os seguintes parâmetros:

- gradiente de velocidade na mistura rápida: 3000 a 9000 s^{-1}
- tipo de misturador rápido: "in line"
- tipo de flocação: mecanizada
- gradiente de velocidade na flocação: $\approx 45 \text{ s}^{-1}$
- dispositivo de mistura da água pressurizada: registro de agulha
- pressão na câmara de saturação: $4,0 \pm 4\% \text{ kgf/cm}^2$
- porcentagem de recirculação: $13 \pm 0,3\%$
- quantidade de ar/m^3 de água bruta: $\approx 10,0 \pm 4,0\% \text{ (g/m}^3)$

O parâmetros variáveis foram:

- água bruta;
- dosagem de produto químico;
- tempo de detenção na unidade de flocação/flotação
- taxa de aplicação superficial.

As taxas médias de aplicação superficial estudadas estão apresentadas na Tabela 1.

5.2.3. Análises

As análises das amostras coletadas durante os ensaios permitiram avaliar a eficiência do sistema, e de certa forma avaliar a resposta do sistema às condições operacionais pré-estabelecidas.

As amostras de água bruta foram coletadas na tubulação de recalque e informaram as condições de entrada do sistema através de medida dos parâmetros: cor, turbidez, pH, alcalinidade e temperatura.

As amostras de água coagulada foram coletadas na tubulação a jusante do dispositivo de mistura rápida. Com esta amostragem foi possível o controle da coagulação quando da medida do pH.

As amostras de água flotada foram coletadas na saída geral da unidade de flotação. Esta coleta indicou as condições do produto final, ou seja, avaliou a eficiência do sistema para as condições operacionais

pré-estabelecidas. A avaliação da eficiência foi feita através da medida dos parâmetros: cor, turbidez, pH e sólidos suspensos (totais, fixos e voláteis).

Após o encerramento de cada ensaio, que durava cerca de 1 a 2 horas após a estabilização do sistema, foram preparadas amostras compostas com as amostras coletadas durante o ensaio. Estas últimas foram misturadas em quantidades iguais e feitas as seguintes determinações: para água bruta, cor, turbidez e pH para água floculada, turbidez, pH e sólidos suspensos (fixos, voláteis e total), e, para água flotada, cor, turbidez, pH e sólidos suspensos (fixos, voláteis e totais).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo dos principais resultados encontra-se na Tabela 2.

Os resultados obtidos foram analisados e discutidos sob dois pontos de vista: operacional, e pela análise estatística dos dados. COELHO (1991).

Neste trabalho a análise e discussão de resultados serão feitas sob o segundo ponto de vista, ou seja, análise estatística dos dados, no sentido de se obter alguma informação quantitativa acerca das tendências observadas para a faixa de valores de taxa de aplicação superficial estudada. Como não foi objeto deste estudo definir a forma da função que exprime a variação dos parâmetros de qualidade da água para com a taxa de aplicação superficial, fez-se uso de aproximações lineares, isto é, procurou-se ajustar equações de retas aos dados experimentais e verificar o comportamento dos coeficientes envolvidos.

Com esta análise procurou-se verificar a possibilidade de dependência entre as variáveis, taxa de aplicação superficial e porcentagem de remoção de (turbidez, de cor aparente e verdadeira e de sólidos suspensos totais) considerando a totalidade dos pontos experimentais. Os resultados são apresentados nas Figuras 4, 5, 6 e 7.

As curvas de regressão linear traçadas com a taxa de aplicação superficial e porcentagem de remoção, apresentaram tendência diversa (Figuras 4, 5, 6 e 7). Apesar desta constatação, analizando-se o intervalo de confiança para o coeficiente angular de cada curva com relação a X, pode-se observar que todas admitem inclinação nula para o intervalo de confiança de 99%. Isto significa que é válido admitir a não dependência da porcentagem de remoção com a taxa de aplicação superficial, dentro dos limites estudados.

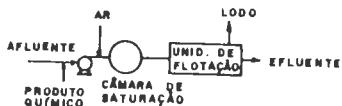
Nas Figuras 4, 5, 6 e 7, pode-se notar curvas hiperbólicas, em torno das retas de regressão linear que definem o intervalo de confiança de 95 e 99% para valores esperados de Y, para um determinado X. Isto significa que, se forem realizados ensaios sob as mesmas condições operacionais, dentro dos limites de X, para os quais foi traçada a curva de regressão linear, em 95 ou 99% dos casos, a nova curva pertencerá a este intervalo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

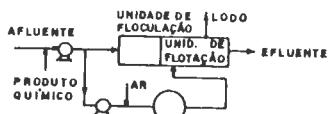
Dentro da literatura estudada para o desenvolvimento deste trabalho, dois conceitos de taxa de aplicação superficial foram considerados. O primeiro, que foi utilizado na apresentação dos resultados, considera a área contribuinte como sendo a área onde ocorre o fluxo descendente, conduzindo ao intervalo de taxas de aplicação superficial de 120 a 300 $m^3/m^2\text{dia}$. O segundo conceito considera a área contribuinte como sendo a área interfacial entre a camada de lodo formada e a água clarificada, conduzindo a intervalo de taxas de aplicação superficial de 67 a 167 $m^3/m^2\text{dia}$. Acredita-se que o intervalo real de taxas de aplicação superficial esteja entre os limites definidos pelos dois conceitos, aproximando-se assim dos valores encontrados na literatura consultada.

A flocação adequada é um pré-requisito fundamental para obter-se bons resultados na flotação.

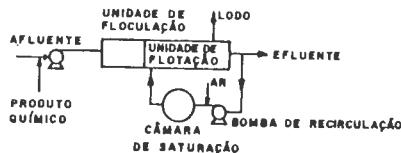
A grande maioria das análises mostrou que a independência entre os parâmetros de qualidade da água bruta (turbidez, cor verdadeira, cor aparente e sólidos suspensos totais) e a taxa de aplicação superficial para variações entre 120 a 300 $m^3/m^2\text{dia}$ é uma possibilidade que não pode ser descartada no conjunto de dados utilizados, para intervalos de confiança de 95% e 99%. A exceção para esta tendência geral pode ser vista, quando se fez análise conjunta dos dados, para a porcentagem de remoção de cor verdadeira e sólidos suspensos totais, quando ocorreram decréscimo destas com aumento na taxa de aplicação superficial. Contudo esta tendência desapareceu quando o intervalo de confiança considerado foi 99%.



PRESSURIZAÇÃO TOTAL DO AFLUENTE



CÂMARA DE SATURAÇÃO
PRESSURIZAÇÃO PARCIAL DO AFLUENTE



RECIRCULAÇÃO PRESSURIZADA

FIGURA 1 - Variações do método de flotação por ar dissolvido.

FONTE: Zabel e Melbourne citado por ZABEL (1982).

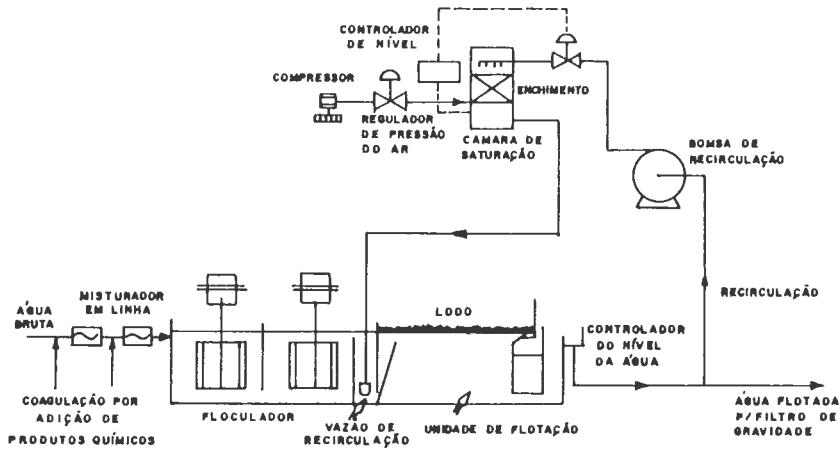
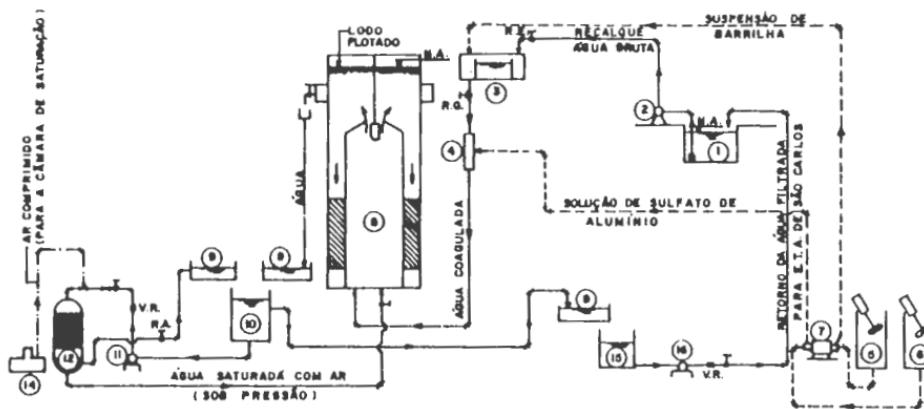


FIGURA 2 - Esquema de um sistema de flotação por ar dissolvido

FONTE: ZABEL (1982)



1. Canal de água bruta da ETA de São Carlos
2. Bomba centrífuga para recalque de água bruta
3. Caixa com veredores para controle da vazão afluente
4. Dispositivo de mistura (reactor tubular)
5. Tanque contendo suspensão de barrilha
6. Tanque contendo sulfato de alumínio
7. Bomba dosadora
8. Unidade de flotação
9. Caixas com veredores triangulares para controle de vazão
10. Foco de sucção da bomba de recirculação
11. Bomba centrífuga para pressurização da vazão de recirculação
12. Câmara de saturação
13. Compressor de ar
14. Foco de sucção da bomba de retorno
15. Bomba centrífuga para retorno do esfluente à ETA

FIGURA 8 - Fluxograma da instalação piloto

FONTE: Plano de Pesquisa de Doutoramento Marco A. P. REALI

TABELA 1 - ENSAIOS REALIZADOS

TEMPO DETENÇÃO MÉDIO NA UNIDADE DE FLOCULAÇÃO/ FLOTACAO (min)	TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL MÉDIA (m ³ /m ² dia)
15	240 300
20	180 225 300
25	140 180 240
30	120 150 200 300

TABELA 2 - AGRUPAMENTO DOS ENSAIOS PARA CADA TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL ESTUDADA - ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR DE TEMPO E PORCENTAGEM DE REMOÇÃO

ENSAIOS	TEMPO DE DETENÇÃO UNIDADE (FLOC/FLOT) (min)	TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL (m^3/m^2 dia)	N. DE REMOÇÃO			
			TURB. (UT)	SST (mg/l)	COR VER. (mg/l)	COR APA. (mg/l PtCo)
E - 13	30	120	68	--	97	80
E - 8	25	145	73	82	96	90
E - 11	25	145	58	76	97	75
E - 14	30	150	68	80	96	80
E - 1	20	180	74	79	92	80
E - 2	20	180	70	81	88	92
E - 9	25	180	67	73	96	90
E - 10	25	180	59	76	95	75
E - 5	30	180	67	73	91	88
E - 15	30	200	68	77	96	80
E - 3	20	225	69	82	86	92
E - 18	20	225	64	75	91	80
E - 6	15	240	58	73	95	83
E - 17	15	240	65	78	91	80
E - 12	25	240	56	73	96	75
E - 19	25	240	65	77	92	80
E - 7	15	300	55	73	93	83
E - 4	20	300	70	83	88	92
E - 16	30	300	66	77	96	80

TURB. = TURBIDEZ

COR VER. = COR VERDADEIRA

SST = SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS

COR APA. = COR APARENTE

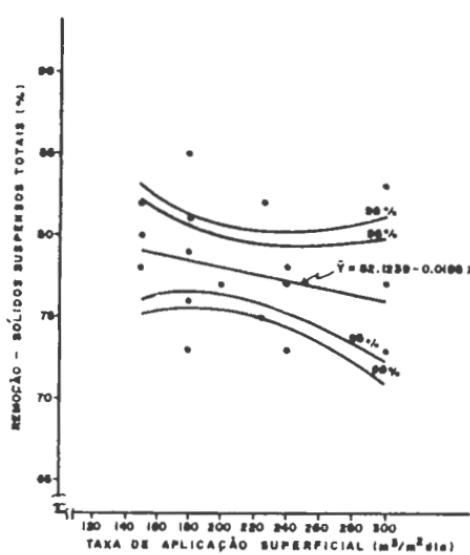


FIGURA 4 - Curva de regressão linear para remoção de turbidez

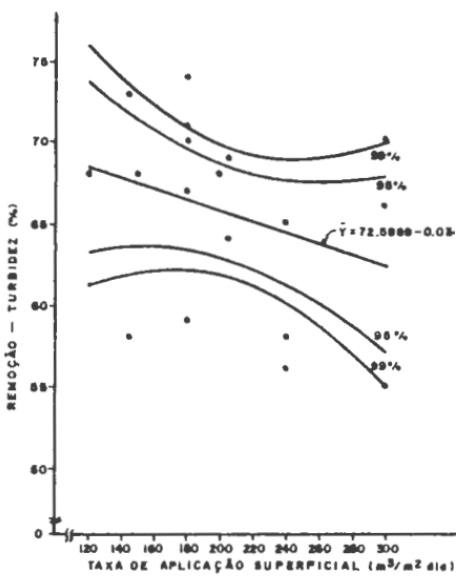


FIGURA 5 - Curva de regressão linear para sólidos suspensos totais

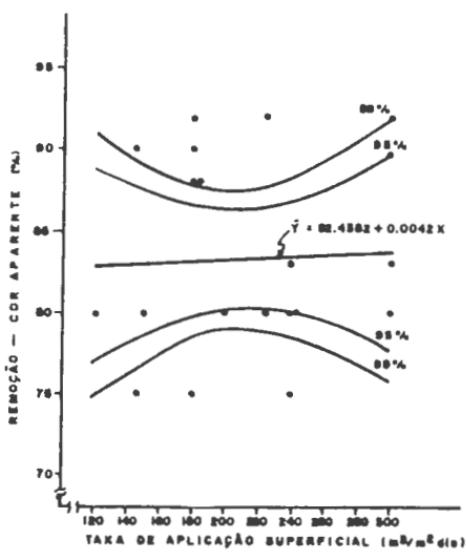


FIGURA 6 - Curva de regressão linear para cor aparente

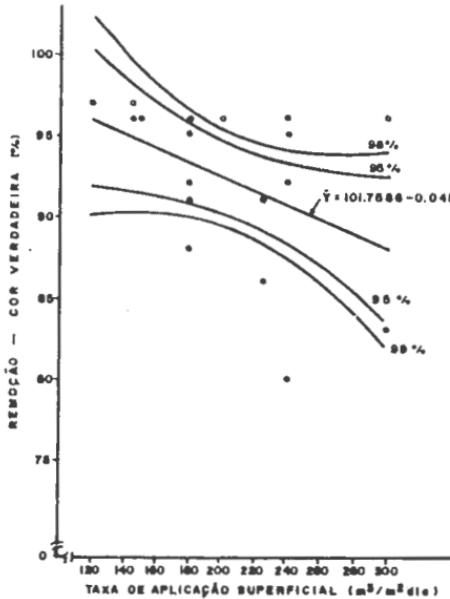


FIGURA 7 - Curva de regressão linear para cor verdadeira

8. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq.

Ao Prof. Dr. Harry Edmar Shulz pela ajuda prestada na análise estatística dos dados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIRTHARAJAH, A. The mechanisms of coagulation. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE COAGULAÇÃO E FILTRAÇÃO DIRETA, São Carlos, 18-27 de julho de 1989. São Carlos, DIREA-EESC-USP, 1989. p 1-20.
- BRATBY, J. & MARAIS, G.V.R. Dissolved air (pressure) flotation—an evaluation on inter-relationships between variables and their optimisation for design. *Water S.A.*, Pretoria, 1(2): 57-69, Jul. 1975b.
- _____ & _____ Saturator performance in dissolved-air (pressure) flotation. *Water Research*, New York, 9: 929-36, Feb. 1975a.
- CAMPOS, J.R. & PONTELLI, J. Coagulação e flocação. In: AZEVEDO NETO, J.M., ed. *Técnicas de abastecimento e tratamento de água*. 2.ed. São Paulo, CETESB/ACETESB, 1987.
- COELHO, E.R.C. Estudo da Taxa de Aplicação Superficial em uma Instalação Piloto de Flotação por Ar Dissolvido Aplicada ao Tratamento de Água para Abastecimento. São Carlos, 1990. 181p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos-USP, Departamento de Hidráulica e Saneamento.
- DI BERNARDO, L. & MENDES, C.G.N. Coagulação-Flocação de Águas Superficiais - Estudo de Caso. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE COAGULAÇÃO E FILTRAÇÃO DIRETA, São Carlos, 18-27 de julho de 1989. São Carlos, DIREA-EESC-USP, 1989, p. 14-38.
- HANN, H.H. Wastewater treatment. In: NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE ON THE SCIENTIFIC BASIS OF FLOTATION, Cambridge, England, July 5-6, 1982. Proceeding. Ed. by Kennedy J. Ives. The Hague, Martinus Nijhoff, 1984. p 379-415. (NATO ASI Series).
- HYDE, R.A. et alii. Water clarification by flotation. *Journal of the American Water Works Association*; Denver, 69(7): 343-406, Jul. 1977.
- KROFTA, Milos & WANG, Laurence, K. Application of dissolved air flotation to the Lenox, Massachusetts water supply: Water purification by flotation. *Journal of New England Water Works Association*, Boston, 99(3): 249-64, sept. 1985.
- LONGHURST, S.J. & GRAHAM, N.J.D. Dissolved air flotation for potable water treatment: a survey of operational units in Great Britain. *The Public Health Engineer*; London, 14(6): 71-6, Apr. 1987.
- MHATRE, S.W. & BHOLE, A.G. Comparison of dissolved air flotation and direct air flotation. *Asian Environment*, Makati, 8(2): 25-9, 1986.
- MOUCHET, P. La flotação à ar dissolvida: point de vue sur son développement et sur la diversification de ses applications dans le traitement des eaux. *L'Eau, L'Industry, Les Nuissances*, Paris, 76:25-30, 1983.

- REALI, M.A.P. Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento. São Carlos, 1984. 186p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos-USP, Departamento de Hidráulica e Saneamento.
- REES, A.J. RODMAN, D.J.; ZABEL, T.F.—. Water clarification by flotation-5: results from five 95 m³/h plants operating on different raw waters. Technical Report. Water Research Centre, (114); 1-55, Apr. 1979.
- RICHARD, Y. La flotação: un cas d'application à l'installation de traitement d'eau potable de Mouille. Techniques et Sciences Municipales et Revue L'Eau. Paris, 76(10): 501-10, Oct. 1981.
- SHERGOLD, H.L. Flotation in mineral processing. In: NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE ON THE SCIENTIFIC BASIS OF FLOTATION, Cambridge, England, July 5-16, 1982. Proceedings. Ed. by Kennedy J. Ives. The Hague, Martinus Nijhoff, 1984. p. 229-87. (NATO ASI Series).
- VAN VULREN, L.R.J.; PRINGLOO, J.; DE WET, E.J. Pilot-scale studies for the treatment of eutrophied water by dissolved air flotation filtration. In: FEDERAL CONVENTION OF AUSTRALIAN WATER AND WASTEWATER ASSOCIATION, 10, Sidney, Austrália, 1983a. Proceeding. p. 14.1-14.10.
- VOSLOO, P.B.V.; WILLIAMS, P.G.; RADEMAR, R.G. Pilot and full-scale investigation on the use of combined dissolved-air flotation and filtration (DAFF) for water treatment. Water and Pollution Control, Toronto, 124; 114.21, 1986.
- ZABEL, T.F. Flotation in water treatment. In: NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE ON THE SCIENTIFIC BASIS OF FLOTATION, Cambridge, England, July, 5-16, 1982. Proceedings. Ed. by Kennedy J. Ives. The Hague, Martinus Nijhoff, 1984. p. 349-77. (NATO ASI Series).
-
- & HYDE, R.A. Factors influencing dissolved air flotation as applied to water clarification. In: WATER RESEARCH CENTER CONFERENCE ON FLOTATION FOR WATER AND WASTE TREATMENT, Henley, England, 1976. Proceedings. p. 181-217.