

AVALIAÇÃO DA FLOCO-DECANTAÇÃO DE MANTA DE LODO ASSOCIADA À DECANTAÇÃO DE ALTA TAXA NO TRATAMENTO DE ÁGUAS DE CONSUMO HUMANO

EVALUATION OF SLUDGE BLANKET SETTLER FLOCCULATOR ASSOCIATED TO HIGH RATE SEDIMENTATION APPLIED ON WATER TREATMENT FOR HUMAN CONSUMPTION

TARSO LUÍS CAVAZZANA

Engenheiro Civil. Mestre em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp)

TSUNAO MATSUMOTO

Engenheiro Civil. Mestre. Doutor em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP). Livre-docente do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp

MARCELO LIBÂNIO

Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Sanitária (UFMG). Doutor em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP). Professor Associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG

Recebido: 24/01/07 Aceito: 08/03/08

RESUMO

O presente trabalho objetiva avaliar a eficiência de uma unidade-piloto de floco-decantação de manta de lodo associada à decantação de alta taxa na remoção de turbidez, utilizando polímero catiônico como coagulante primário. Avaliaram-se três taxas de aplicação superficial, para águas de estudo apresentando turbidez de 3 a 100 uT e cor verdadeira praticamente nula. As dosagens de polímero foram definidas em ensaios de jar test. O desempenho da unidade-piloto mostrou-se plenamente satisfatório, para as três taxas avaliadas, com resultados coerentes aos obtidos em escala de bancada. Esta performance abre a perspectiva do emprego da tecnologia em escala real para sistemas de abastecimento público, mesmo para a potabilização de águas naturais de baixa turbidez.

PALAVRAS-CHAVE: Floco-decantação de manta de lodo, decantação alta de taxa, tratamento de água.

ABSTRACT

This paper aims the efficiency evaluation, in pilot scale, of a sludge blanket flocculator associated to a high rate settler using a cationic polymer as the primary coagulant. Three surface loading rates and different synthetic waters, with variable turbidities (from 3 to 100 NTU), were evaluated. The polymer dosages applied on the pilot scale were set up after jar tests. This technology showed a good performance for all rates and the results for all synthetic waters were similar with those obtained in the bench scale. This performance provides a clear feasibility of its use in actual scale for water supply systems, even to treat natural waters with low turbidity.

KEYWORDS: Sludge blanket sedimentation, high rate sedimentation, water treatment.

INTRODUÇÃO E RELEVÂNCIA

As operações unitárias de floculação e decantação da água coagulada ocupam praticamente 75% da área total necessária às estações convencionais de tratamento. Embora por vezes empregados no tratamento de águas para fins industriais, os decantadores de manta de lodos ou floco-decantadores – nos quais a floculação e decantação ocorrem na mesma unidade – raramente encon-

tram aplicação nos sistemas públicos de abastecimento brasileiros. Constituem-se em alternativa para redução dos custos de implantação, via redução de área, pois, nestas unidades, a água coagulada aflui em escoamento ascendente na zona de lodo, favorecendo os choques entre as partículas desestabilizadas e a conseqüente formação dos flocos.

Os floco-decantadores de manto de lodos assumem a forma prismática ou, mais comumente, de tronco de pirâmide, operando com taxas de

escoamento superficial superiores aos decantadores de escoamento horizontal, atingindo 50 a 100 m³/m²/dia, dependendo das características da água bruta, da eficiência da coagulação e do eventual uso de polímeros como auxiliares de coagulação.

Em alguns países europeus (especialmente Alemanha), EUA, Canadá e, em menor monta, na América Latina, diversas estações de tratamento de água empregam esta tecnologia, destacando-se as duas instalações potabilizadoras da

cidade de Lima, cuja vazão total média afluente é da ordem de 18 m³/s.

Essa tecnologia teve início na Índia, por volta de 1932, com a construção pela empresa inglesa Candy Co de um tanque de sedimentação piramidal, semelhante ao denominado Tanque Imhoff, empregado a partir de 1906 para o tratamento de águas residuárias. Objetivando conferir melhor distribuição do afluente à unidade e reduzir os custos de construção, diversos modelos de decantadores de manta de lodo foram desenvolvidos após a 2ª Grande Guerra na Inglaterra, França e Hungria (Gregory, Zabel & Edzwald, 1999).

A floculação em manta de lodo apresenta como similaridade em relação às unidades de floculação de escoamento horizontal, mecanizadas ou hidráulicas, o regime turbulento concernente à trajetória das linhas de corrente. Por outro lado, a dessemelhança refere-se essencialmente à elevada concentração de sólidos que devem constituir o manto. Desta forma, a cinética dos choques entre as partículas desestabilizadas no interior do manto aproxima-se da floculação ortocinética, permitindo o emprego do modelo proposto por Smoluchowski em 1917 (Letterman, Amirtharajah & O'Melia, 1999).

Como são praticamente inexistentes estações de tratamento dotadas das duas alternativas – a primeira com floculação e sedimentação tradicionais, e uma segunda com floco-decantador de manta de lodos –, operando em paralelo, inviabiliza-se uma comparação mais acurada sobre as distintas eficiências de cada concepção na potabilização de águas naturais de mesmas características.

O projeto hidráulico dos floco-decantadores tende a reduzir a ocorrência de curtos-circuitos, a favorecer a dispersão uniforme da água coagulada e a remoção de lodo. Com relação às características da água bruta, a maior limitação reside na presença de algas, que usualmente flutam sobre o manto favorecendo o arraste de flocos no efluente.

O desempenho da floculação em manta de lodo relaciona intrinsecamente a velocidade ascensional e do fluxo à concentração de sólidos constituintes do manto. Com o aumento da concentração de sólidos, reduzem-se as distâncias entre as partículas maximizando a retenção das mesmas no interior do manto. Todavia, altas velo-

idades ascensionais poderão favorecer o arraste de os flocos, deteriorando a qualidade do efluente. Desta forma, diversas pesquisas relacionam a velocidade ascensional do fluxo na unidade à velocidade terminal de sedimentação dos flocos balizadora do dimensionamento dos decantadores de escoamento horizontal e de alta taxa (Gregory, Zabel & Edzwald, 1999).

A despeito das inequívocas vantagens referentes à redução de área, as unidades de floco-decantação apresentam limitações para água bruta de baixa turbidez pela dificuldade de formação do manto. Uma segunda limitação refere-se à significativa redução do tempo de detenção, usualmente inferior a 30 min, comparado ao que se verifica quando do emprego de unidades de floculação e decantadores de escoamento horizontal (2,5 h). Desta forma, eventual coagulação inadequada rapidamente manifesta-se no afluente às unidades filtrantes. Uma terceira, e menos relevante, limitação reporta-se à grande dificuldade para alteração dos gradientes de velocidade de floculação, que também vigora na quase totalidade das unidades de floculação hidráulica. Mesmo nas estações dotadas de floculação mecanizada – nas quais torna-se mais facilmente exequível a variação dos gradientes de velocidade –, são raríssimos os exemplos no País e no exterior deste tipo de adequação às variações das características da água bruta.

Em vertente semelhante, a relevância da eficiência da coagulação eleva-se com o emprego desta tecnologia, tanto pelo menor tempo de floculação, ou de detenção no floco-decantador, quanto pela menor probabilidade da ocorrência da sedimentação diferencial no interior das placas. Nas estações de tecnologia convencional, este fenômeno pode suceder tanto na entrada do decantador, próximo à cortina de distribuição, quanto no interior da própria unidade, e favorece a transposição dos resultados obtidos nos ensaios de *jar test* para escala real.

Visando a contornar a primeira limitação ao uso mais extensivo desta tecnologia, descortinou-se a alternativa da associação de tais unidades a módulos de alta taxa – comumente utilizando placas planas paralelas –, objetivando reduzir o aporte de partículas aos filtros durante o período de estiagem quando se reduz significativamente a concentração de partículas na água bruta. A

coleta de água decantada realiza-se por tubos perfurados ou calhas de seção retangular, e a extração de lodo por descarga hidráulica. Esta concepção, praticamente inédita no Brasil, foi implementada com êxito em algumas estações na França, Reino Unido e Argentina.

OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho consistiu em avaliar o desempenho de uma unidade-piloto de floco-decantação de manta de lodo associada à decantação de alta taxa. No mesmo contexto, como objetivos específicos o trabalho propõe-se a:

i) estabelecer correlações entre a dosagem de polímero catiônico, como coagulante primário, e a turbidez da água bruta – variando de 3 a 100 uT – para as taxas de escoamento superficial de 155, 194 e 233 m³/m²/dia;

ii) avaliar a influência da taxa de formação da manta para águas de baixa turbidez, em relação às características das águas decantada e filtrada.

REVISÃO DA LITERATURA

O emprego de polímeros como coagulantes primários

Com o objetivo de reduzir as dosagens do coagulante e conferir ao floco maior densidade são empregados polímeros orgânicos naturais ou sintéticos, usualmente como auxiliares de floculação. Tais substâncias podem ser definidas como compostos orgânicos de longas cadeias constituindo-se de uma série repetitiva de unidades químicas unidas por ligações covalentes formando moléculas denominadas *monômeros*, e o peso molecular do polímero é consequência da soma dos pesos dos diversos monômeros. Uma classe especial de polímeros denomina-se polieletrólitos, distintos dos polímeros ordinários por possuírem grupos funcionais ionizáveis capazes de serem adsorvidos na superfície dos colóides. Nos polímeros podem predominar sítios ionizáveis positivos (catiônicos) e negativos (aniônicos), ou nenhum destes (não-iônicos). Os polímeros sintéticos apresentam formulação variável em função do fabricante, freqüentemente desconhecida, e os naturais são constituídos a base de

amido, ambos empregados com dosagens usualmente inferiores a 0,5 mg/L quando auxiliares de floculação.

No inusual emprego de polímeros como coagulantes primários, a desestabilização pode se suceder de duas formas, ambas a partir da adsorção do polímero às partículas coloidais. Para a coagulação com polímeros catiônicos a adsorção neutraliza a carga negativa das partículas permitindo a agregação. Nestes casos o tamanho do polímero, vale afirmar o número de monômeros, adquire importância secundária, sendo comumente empregados polímeros de menor peso molecular (< 500 kilodaltons). Em outro contexto, para os polímeros aniônicos ou não-iônicos, há a referida formação das pontes químicas conectando as partículas coloidais de carga predominantemente negativas. Polímeros de maior peso molecular, em até 10 vezes aos utilizados como coagulantes primários, fazem-se necessários nesta situação (O'Melia *apud* Sanks, 1978).

A despeito do alto custo quando comparado aos sais de ferro e alumínio, os polímeros são com alguma frequência, especialmente nos EUA, utilizados como coagulantes primários para águas naturais de baixa cor verdadeira principalmente em estações de filtração direta. Nestas circunstâncias, predominam os polímeros catiônicos de menor peso molecular e seu uso tem apresentado algumas vantagens, tais como:

i) especificamente para estações de filtração direta, formação de microflocos mais resistentes à erosão nos interstícios do meio filtrante;

ii) redução do volume de lodo gerado como conseqüência, sobretudo, da magnitude das dosagens comumente aplicadas;

iii) redução dos gastos com alcalinizantes para correção do pH final, uma vez que menores dosagens de coagulante minimizam a queda mais acentuada do pH de coagulação;

iv) maior facilidade de desidratação do lodo gerado comparada aos sais de ferro e alumínio.

Características da floco-decantação de manta de lodo

Gradiente de velocidade

O dimensionamento das unidades de floco-decantação agrega conceitos inerentes às etapas de floculação, de-

cantação e filtração, devido à formação dos flocos se suceder em um manto mantido em suspensão no interior da unidade. Adicionalmente, a estimativa do gradiente de velocidade faz-se também necessária para balizar a realização dos ensaios de *jar test*. Para tal pode-se utilizar a Equação 1 estabelecida por Camp & Stein (1943):

$$G_m = \frac{\sqrt{CQH_f}}{\mu \times V} \quad (1)$$

na qual:

G_m : gradiente de velocidade médio (s⁻¹);

G : peso específico da água (N/m³);

Q : vazão (m³/s);

V : volume da unidade (m³);

μ : viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

H_f : perda de carga (m).

Há similaridade entre o comportamento entre o meio filtrante fluidizado durante a lavagem em escoamento ascendente e o manto de lodos. Todavia, pela dificuldade de correlação entre os parâmetros intervenientes nas duas operações, nesta pesquisa optou-se, por maior praticidade, pela estimativa da perda de carga no interior da manta (H_f) a partir da perda de carga do meio filtrante limpo por meio da Equação 2 (Di Bernardo & Dantas, 2005):

$$H_f = (L_r \times K_r) \times V_3 \quad (2)$$

na qual:

H_f : perda de carga (m);

L_r : espessura do meio filtrante (no caso, espessura da manta) (m);

V_3 : velocidade de aproximação (m/s);

K_r : coeficiente de resistividade (s/m).

Substituindo-se a potência, inserindo-se o coeficiente de resistividade, chega-se à Equação (3):

$$G_m \sqrt{\frac{(L_r \times K_r) \times C \times Q^2}{\mu \times A \times V}} \quad (3)$$

Na qual:

Q : vazão afluyente (m³/s);

A : área da seção em que se quer determinar o gradiente (m²).

Para determinação do volume, inicialmente faz-se analogia à premissa adotada para as cortinas de distribuição de água floculada no interior dos decantadores. Assim, considera-se a convergência de jatos sucessivos ocorra à distância da ordem de 2,5 vezes o espaçamento (E) entre os orifícios (2,5 E).

O diâmetro do cone pode ser estimado por meio da Equação 4:

$$b' = D(h) = \frac{h \times d}{h + 2,5 \times d - 2,5 \times b} \quad (4)$$

em que:

$D(h)$: diâmetro interno do cone (m);
 d , h e b' : dimensões (m) estabelecidas de acordo com a Figura 1.

Desta forma, o diâmetro médio do cone, considerando a seção quadrada da unidade e as dimensões constantes de b e d , será a média aritmética entre o diâmetro inscrito e o circunscrito, culminando com a Equação 5.

$$D_m(h) = \frac{h \times d \times 1 + \sqrt{2} \times i}{2 \times (h + 2,5 \times d - 2,5 \times b)} \quad (5)$$

em que:

$D_m(h)$: diâmetro médio do cone de entrada (m) em função da altura h ;

A altura correspondente a b' é h' é dada pela Equação 6.

$$h' = 2,5 \times b' \quad (6)$$

A área média da seção, para um determinado h' , conforme a Figura 2, é dada pela Equação 6.

$$A_s(h') = \frac{r \times D_m(h)^2}{4} \quad (7)$$

na qual:

$A_s(h')$: área média (m²) da seção transversal do floco-decantador

Formação da manta de lodo

Para estimativa da formação da manta do floco-decantador aplica-se a Equação 9 para balanço de massa.

$$N_m = N_{im} + N_{em} - N_{sm} \quad (8)$$

em que:

N_m : número total de partículas na manta;

N_{im} : número inicial de partículas na manta;

N_{em} : número de partículas que entram na manta;

N_{sm} : número de partículas que saem da manta.

Sendo que o último termo pode ser descrito conforme Equação 9.

$$N_{sm} = N_{sd} + N_{pi} \quad (9)$$

na qual:

N_{sd} : número de partículas que se desprendem da manta;

N_{pi} : número de partículas inertes.

Nesta pesquisa, optou-se pela quantificação da manta a partir da média entre os dados observados de volume da manta – calculado a partir da altura da mesma – e de remoção de turbidez, assumindo a mistura com características de um fluido Newtoniano. Admitindo-se as hipóteses de Smoluchowski estabelecidas em

1917 (Camp & Stein, 1943) – escoamento laminar, partículas esféricas de mesmo tamanho e monodispersas -, pôde-se calcular a espessura da manta em termos de balanço de massa. Como, no entanto, a manta apresentou-se mais ou menos densa, tornou-se importante quantificar o seu volume e a forma (mais ou menos densa) com que se apresenta, pois atingida a forma mais densa dificilmente a dispersão ocorreria.

METODOLOGIA

Descrição do aparato experimental e preparação das águas de estudo

Utilizaram-se dois tanques de polietileno, nos quais misturava-se argila à água proveniente da rede pública (turbidez da ordem de 0,3 uT), homogeneizada mecanicamente no tanque principal e de forma manual no tanque auxiliar. Este segundo tanque foi utilizado para que se pudesse manter um maior controle da turbidez da água bruta e obter-se água em quantidade suficiente para ensaios de maior duração. Ao longo dos ensaios no equipamento de *jar test* e no aparato experimental, a água bruta apresentou pH e temperatura da ordem de 7,5 e 24° C, respectivamente, cor verdadeira praticamente nula e turbidez de 3 uT a 100 uT.

A simulação da turbidez na água de estudo realizou-se pela dispersão de argila –ensaio granulométrico apontou densidade de 2,63 -, cuja concentração apresentou relação praticamente linear com a turbidez resultante e coeficiente de determinação (R^2) de 0,9881. Para a turbidez máxima, da ordem de 100 uT, a massa de argila dispersada foi de aproximadamente 500 g.

A mistura rápida sucedia-se por gotejamento na caixa na qual foi instalado um vertedor triangular, que conferia gradiente de velocidade da ordem de 600 s^{-1} (o mesmo empregado nos ensaios de *jar test*). Uma bomba centrífuga recalava água do tanque principal para uma caixa de nível constante que alimentava o aparato experimental conforme mostra a Figura 2.

As principais características do aparato experimental construído em acrílico transparente estão listadas a seguir.

i) Flocculador manta de lodo:

Volume do tronco de pirâmide = 27 L;

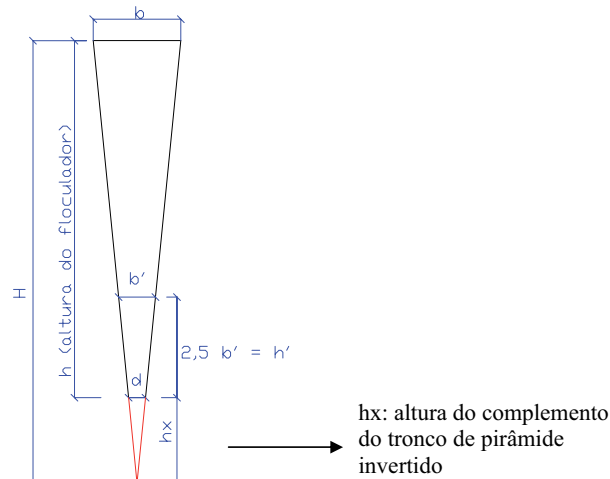


Figura 1 - Esquema para cálculo dos volumes na peça piramidal e da área média em h'

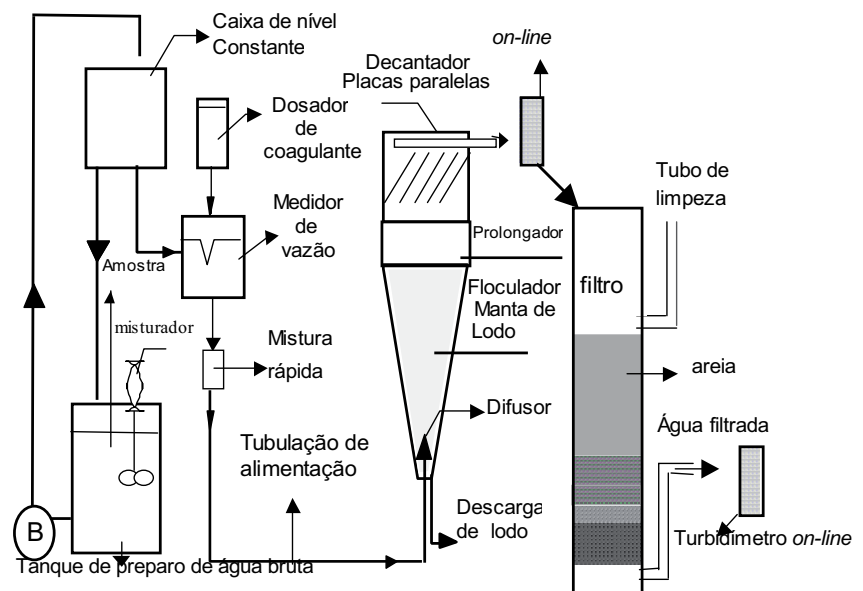


Figura 2 - Desenho esquemático do aparato experimental utilizado na pesquisa

Volume do prolongamento de $1,16 \text{ m} = 37,6 \text{ L}$;

ii) Decantador de alta taxa de placas paralelas:

Comprimento das seis placas = 1,10 m;

Espessura das placas = 3 mm.

Espaçamento entre placas = 24 mm;

Ângulo de inclinação das placas = 60°;

Largura das placas = 0,18 m;

Volume da unidade = 32 L;

Área em planta da unidade = $0,0324 \text{ m}^2$;

iii) Filtro de escoamento descendente de camada simples com granulometria do meio filtrante definida pela NBR 12216 (ABNT, 1989):

Diâmetro = 200 mm;

Espessura do meio filtrante de areia = 0,50 m;

Espessura da camada-suporte = 0,45 m;

Altura livre acima do meio filtrante = 1,85 m;

Altura total = 3,17 m.

Para a estimativa do gradiente de velocidade adotou-se o produto coeficiente de resistividade pela espessura do manto ($K_r \times L_f$ da Equação 3) igual a 0,15. Desta forma, a partir das características da unidade-piloto e estimando que a manta de lodo poderia se

estender até o prolongamento – o que de fato frequentemente ocorreu, conforme evidência a Figura 4(b) -, o gradiente de velocidade médio na unidade de floco-decantação –utilizado nos ensaios de *jar test* – pôde ser estimado pela Equação 10:

$$G_m = 9,5 Q \quad (10)$$

Realização de ensaios de *jar test*

Para realização de tais ensaios utilizou-se equipamento de *jar test* apto a permitir coleta de água decantada e aplicação de coagulante simultâneas nos seis jarros, e capaz de conferir gradientes de velocidade de até 1500 s^{-1} . Tanto em escala de bancada, quanto na unidade-piloto, os ensaios realizaram-se utilizando um polímero sintético catiônico como coagulante primário, sem ajuste do pH de coagulação. Embora de emprego quase inexistente no País, esta decisão fundamentou-se em estudo anterior no qual se evidenciou a supremacia deste coagulante, sem a necessidade de correção do pH de coagulação, obtendo para as dosagens ótimas do polímero água decantada com turbidez inferior a $2,0 \text{ uT}$ (Cavazzana & Matsumoto, 2003).

Utilizou-se solução de polímero, de massa específica de $1,415 \text{ kg/L}$, preparada a $0,5 \%$ (massa por volume). Os parâmetros para os ensaios de *jar test* balizaram-se em três distintos tempos de flocação e gradientes de velocidade, definidos em função das três taxas de escoamento superficial avaliadas. Na realidade, as três vazões afluentes, e os demais parâmetros hidráulicos, foram

conseqüência de três taxas de filtração estabelecidas por praticidade antes da realização do trabalho experimental.

Em função das três taxas de aplicação superficial avaliadas (155, 194 e $233 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$), definiram os tempos de detenção, os gradientes de velocidade de flocação e as velocidades de sedimentação empregadas nos ensaios de *jar test*, objetivando delimitar as dosagens de polímero utilizadas nos ensaios na unidade-piloto (Tabela 1).

Realização dos ensaios no floco-decantador

Com o objetivo de avaliar a influência da qualidade da água decantada na duração das carreiras de filtração, o efluente do decantador de alta taxa encaminhava-se a um filtro de escoamento descendente de camada simples. Em função das três taxas de filtração testadas para as distintas características da água bruta, em termos de turbidez, alguns parâmetros hidráulicos inerentes ao funcionamento do aparato experimental estão apresentados na Tabela 1.

A magnitude do gradiente de velocidade e do tempo de flocação utilizados nos ensaios de *jar test* permitiu minimizar a perspectiva de deposição precoce dos flocos, principalmente para água de estudo com turbidez mais significativa. Em relação ao tempo de flocação, a inexistência de curto-circuito nos ensaios de *jar test* motivou estimar esse parâmetro a partir apenas do volume do tronco de pirâmide (27 L), embora a manta em vários ensaios tenha se estendido pelo total da unidade ($63,6 \text{ L}$).

Os ensaios na unidade-piloto realizaram-se duração de 4, 16 e 24 h, dependendo do objetivo principal. Os ensaios realizados com 4 h enfatizaram a formação da manta de lodo e a turbidez da água decantada. Os de 16 h permitiram analisar o funcionamento do sistema frente a mudanças discretas e crescentes da turbidez do afluente. Os ensaios de 24 h visaram a avaliar o desempenho do sistema para maiores tempos de funcionamento.

Automação das dosagens de coagulante

A dosagem de coagulante no aparato experimental da Figura 3, controlada pela carga hidráulica, foi semi-automatizada a partir dos resultados obtidos nos ensaios de *jar test*. Com tais resultados, elaboraram-se por interpolação linear curvas de dosagem a partir da turbidez da água bruta.

As vazões para alimentação com solução de coagulante foram controladas por um sistema instalado acima do medidor de vazão. Esse sistema era alimentado com solução de polímero catiônico por uma bomba pequena, à bateria de 12 V , com dispositivo de nível semi-automático para seu acionamento, a qual ficava ligada a um reservatório. No entanto, era necessário fazer o ajuste de vazão conforme o ensaio pretendido para cada taxa de filtração e turbidez inicial. Esse ajuste norteou-se na dosagem de coagulante definida no ensaio de *jar test*, e foi possível estabelecer, para cada vazão afluente e turbidez da água bruta, a vazão de solução de coagulante.

Tabela 1 - Parâmetros hidráulicos vigentes no aparato experimental

Parâmetros	Vazão afluente (L/s)		
	0,058	0,072	0,087
Tempo de mistura rápida*(s)	7,5	6,0	5,0
Gradiente de velocidade de flocação (s^{-1})	33	41	50
Tempo de detenção no floco-decantador (min)	6,5	5,0	4,0
Taxa de escoamento superficial** ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)	155	194	233
Velocidade de escoamento entre as placas (cm/s)	0,19	0,24	0,29
Velocidade de sedimentação (cm/min)	0,80	1,00	1,20
Taxa virtual de aplicação superficial no decantador de alta taxa ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)	155	194	233
Tempo de detenção no decantador de alta taxa (min)	9,6	7,7	6,4
Taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)	160	200	240

*Para as três vazões afluentes, a mistura rápida ocorreu com gradiente de velocidade da ordem 600 s^{-1} .

**Calculada para seção de 00324 m^2 , correspondente à área em planta do prolongador.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Definição das dosagens ótimas de polímero

Conforme mencionado, a definição das dosagens ótimas de polímero efetuou-se nos ensaios de jar test a partir da turbidez da água bruta (variável de 3 a 100 uT) e dos três pares de valores de tempo de floculação e gradiente de velocidade, definidos por meio da vazão afluente (Tabela 1). Desta forma, as dosagens de polímero utilizadas nos ensaios na unidade-piloto estão apresentadas na Figura 3.

Os resultados da Figura 3 permitem identificar um progressivo aumento na dosagem ótima de polímero à medida que são utilizados gradientes de velocidade mais elevados associados a tempos de detenção de menor magnitude. Uma vez que a remoção de turbidez para as melhores dosagens apresentou-se de mesma magnitude, é possível supor maior tendência à ruptura dos flocos formados com o emprego de polímero como coagulante primário. Essa inferência fundamenta-se no crescimento da dosagem com o aumento do gradiente de velocidade de floculação. Por fim, vale mencionar o quão mais elevadas são as dosagens de polímero nestas condições, comparadas quando do seu emprego como auxiliares de coagulação – usualmente inferiores a 1,0 mg/L.

Desempenho da unidade de floco-decantação de manta lodo associada à decantação de alta taxa

Os ensaios na unidade-piloto apresentaram resultados coerentes aos obtidos em *jar-test*, a despeito da relativa imprecisão da estimativa do gradiente de velocidade para a unidade de floco-decantação, principalmente na determinação da perda de carga na manta de lodo. Esta imprecisão foi provavelmente compensada também pela determinação do gradiente de velocidade no aparelho de *jar test*, fundamentada na Equação 1, cuja premissa norteou-se no irreal regime laminar de escoamento.

Em semelhante contexto, a maior remoção de flocos de menor dimensão na unidade-piloto - à medida que evolui a formação da manta de lodo - guarda

semelhança na compensação pela sedimentação diferencial dos efeitos de curto-circuito e correntes ascensionais vigentes nos decantadores de escoamento horizontal. Este fenômeno tem favorecido a bem-sucedida transposição dos resultados de *jar test* para escala real nas estações de tratamento dotadas de decantadores de escoamento horizontal.

Esta similaridade entre os resultados obtidos entre a escala de bancada e piloto elevou-se após sanadas algumas falhas no ajuste da dosagem e direcionamento do gotejamento de coagulante para o vórtice de entrada da água bruta

na caixa medidora de vazão. Esta adequação da dosagem às alterações da turbidez da água bruta acarretou, em média, um tempo da ordem de 30 min para que o sistema apresentasse mesma eficiência. Tal constatação evidencia a importância da automação das dosagens de coagulante quando do emprego da floco-decantação de manta de lodo, ressaltada pela redução do tempo de detenção na estação de tratamento.

A eficiência da unidade de floco-decantação confirmou-se como consequência da consistência da manta de lodo, conforme mostra a Figura 4 (a e b).

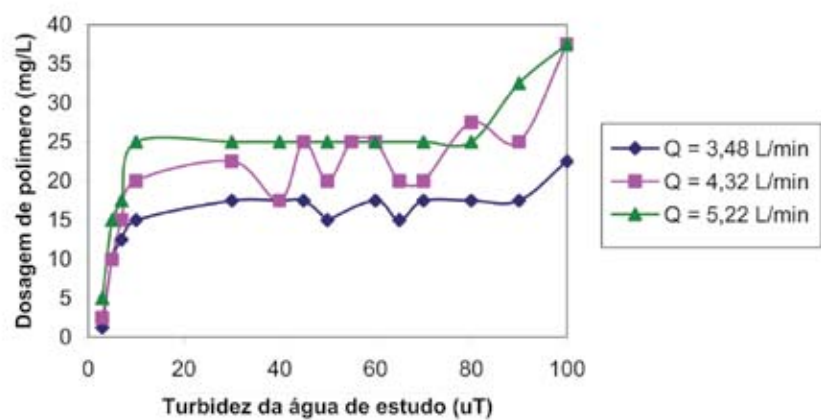


Figura 3 - Dosagens ótimas de polímero definidas nos ensaios de jar test em função da turbidez da água bruta e das vazões afluentes à unidade-piloto



(a)



(b)

Figura 4 - Estágios de formação da manta de lodo: dispersa (a) e densa (b)

Aliada à consistência da manta de lodo, as características do afluente – consoante às premissas da literatura – não de interferir na eficiência da flocodécantação. Esta afirmação confirma-se pelos resultados dos ensaios realizados para as condições mais desfavoráveis a tais operações unitárias apresentados na Figura 5. Nesta Figura, evidencia-se a menor turbidez da água decantada para afluente com turbidez máxima, principalmente após a formação da manta de lodo ocorrida em aproximadamente 2,5 h.

Para as demais vazões afluentes e os três valores de turbidez da água bruta, os tempos de ensaio necessários a partir dos quais o efluente da unidade-piloto apresentou turbidez inferior a 5,0 uT estão listados na Tabela 2.

Para avaliação mais acurada da influência das alterações das características da água bruta no desempenho da unidade-piloto, culminando com afluente de turbidez de 100 uT, realizaram-se três ensaios para as mencionadas vazões afluentes. Tais ensaios tiveram duração de 16 h, variando-se a turbidez afluente a cada 2 h e efetuando-se registros de turbidez do efluente da unidade-piloto em intervalos de 1,0 min. Na Figura 6 apresentam-se os resultados do ensaio realizado com vazão máxima, reportando-se à média dos valores de turbidez efluente a cada 2,0 h de ensaio.

No ensaio cujos resultados estão apresentados na Figura 6, a evolução da consistência da manta de lodo manifestou-se após decorridas 6,5 h (espessura de 0,60 m), estabilizando-se após 11 h com variação de 2,1 a 2,4 m. Esta estabilização, aliada à relativamente baixa velocidade de sedimentação no interior das placas (1,2 cm/min), concorreu para elevar a eficiência na remoção de turbidez da unidade-piloto, cujo efluente passou a apresentar consistentemente turbidez inferior a 2,0 uT. Dos 32 registros do efluente, vale mencionar apenas cinco resultados superiores a 5,0 uT – com máximo de 8,2 uT –, mesmo com a unidade-piloto operando com taxa de escoamento superficial significativamente superior à comumente preconizada na literatura (233 m³/m².dia).

Para as demais vazões afluentes, a turbidez efluente apresentou-se na quase totalidade dos registros inferior a 5,0 uT, mas com significativo menor número de registros abaixo de 2,0 uT quando comparada à vazão máxima.

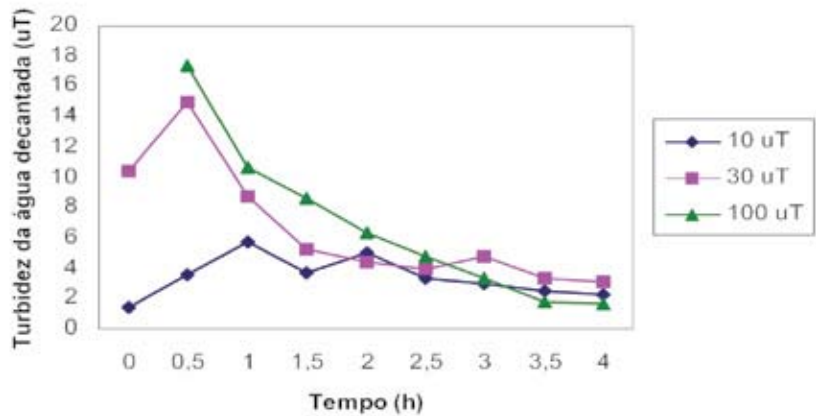


Figura 5 - Turbidez da água decantada efluente da unidade-piloto operando à vazão máxima

Tabela 2 - Tempo de duração do ensaio necessário à máxima eficiência da unidade-piloto

Vazão afluente (L/min)	Turbidez afluente (uT)	Tempo (h)
3,48	10	2,5
3,48	30	1,8
3,48	100	3,8
4,32	10	0,2
4,32	30	2,2*
4,32	100	2,5

*Neste ensaio a turbidez efluente mínima atingiu a 10 uT, devido aos problemas na dosagem de coagulante.

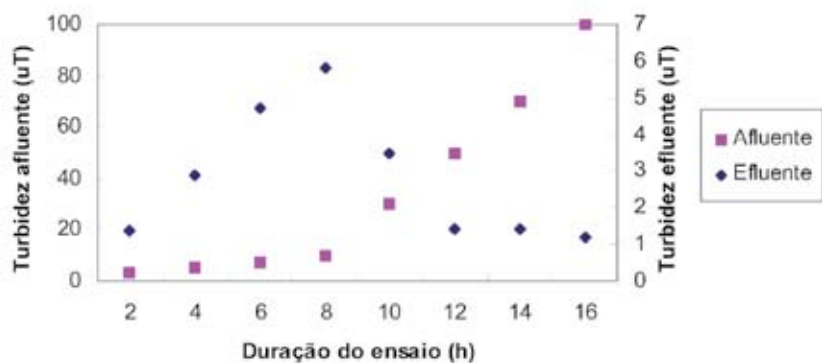


Figura 6 - Eficiência média da unidade-piloto para vazão afluente máxima

Em vista desta constatação, uma vez definida com maior exatidão a dosagem ótima de coagulante, pode-se inferir pela menor relevância – dentro da faixa de vazões afluentes avaliada – dos parâmetros inerentes à floculação (gradiente de velocidade e tempo de detenção) e à sedimentação nas placas planas paralelas (velocidade de sedimentação). Tais inferências tendem a reduzir o custo de implantação e

elevar o espectro de aplicação desta tecnologia.

Por fim, em relação ao efluente do filtro-piloto, em apenas três registros verificaram-se turbidez superior a 0,5 uT, da ordem de 0,7 uT, e em significativa maioria, para as três vazões afluentes, turbidez inferior a 0,1 uT. Tal constatação constitui indicativo de maior consistência dos flocos não retidos na unidade clarificadora.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos durante os ensaios, algumas conclusões podem ser delineadas.

i) Em relação a um dos objetivos específicos da pesquisa, pode-se afirmar que há uma tendência da dosagem ótima de polímero ser inversamente proporcional ao tempo de floculação, para efluente de mesma ordem de grandeza. Ou seja, floculação em manta de lodo realizada com tempos mais elevados tenderá a requerer menores dosagens de polímero e vice-versa.

ii) A eficiência da floco-decantação de manta de lodo não se relacionou às taxas de escoamento superficial, e o melhor desempenho em termos de turbidez do efluente ocorreu com maior constância para vazão máxima afluente. Em contexto semelhante, confirmou-se nos ensaios a evolução da performance à medida do aumento da consistência da manta de lodo.

iii) Após a definição das condições ótimas de coagulação, a tecnologia avaliada apresentou resultados plenamente satisfatórios, habilitando-a – como em vários países – ao tratamento de águas naturais de turbidez variável. O menor custo de implantação, quando comparada às unidades de floculação e decantação convencionais, e os bons resultados para turbidez da água bruta de menor magnitude credenciam-na

como alternativa para as estações de filtração direta que durante o período chuvoso apresentem efluente de qualidade inferior e/ou menor produção de água por carreira de filtração.

iv) Finalmente, a despeito dos bons resultados obtidos com o emprego de polímero catiônico como coagulante primário, esta alternativa poderá elevar o custo operacional da estação tratamento. Neste contexto, uma acurada análise econômica – incluindo a comparação com outros coagulantes metálicos e o dispêndio com água de lavagem, entre outros fatores – torna-se imprescindível à viabilização do emprego em escala real.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fapesp pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor (Proc. 03/10682-0) e à Fapemig pelo apoio ao terceiro autor no contexto do Programa Pesquisador Mineiro (Proc. 4754-6).

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - *Projeto de estações de tratamento de água para abastecimento público*, NBR 12216, Rio de Janeiro, junho 1989.
- CAMP, T. R. & STEIN, P.C. - *Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion*, Journal of the Boston Society of Civil Engineers, v.30, p:219-36, October 1943.

CAVAZZANA, T. L. & MATSUMOTO, T. - *Avaliação e Aplicação dos Resultados de Jar Test no Módulo Decanto-Floculador de Alta Taxa*. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Joinville, 2003.

DI BERNARDO, L. & DANTAS, A. D. - *Métodos e técnicas de tratamento de água*, Rima. 2ª Ed., São Carlos, São Paulo, 1565 p., 2005.

GREGORY, R.; ZABEL, T. F.; EDZWALD, J. K. - *Sedimentation and Flotation*. In: WATER QUALITY AND TREATMENT, 5ª Ed., AWWA, Denver, USA, 1999.

LETTERMAN, R. D.; AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C. R. - *Coagulation and Flocculation*. In: WATER QUALITY AND TREATMENT, 5ª Ed., AWWA, Denver, USA, 1999.

O'MELIA, C. R. - *Coagulation*. In: SANKS, R. L. (Ed.)- *Water Treatment Plant Design*, Ann Arbor Science Publisher, Michigan, USA, 845 p., 1978.

Endereço para correspondência:

Tsunao Matsumoto
Alameda Bahia 550
15385-000 – Ilha Solteira – SP
- Brasil
Tel.:(18) 3743-1125
E-mail: tsunao@dec.feis.unesp.br