



I-074 - MINIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE LODO NO TRATAMENTO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO MEDIANTE O USO DO CLORETO DE POLIALUMÍNIO E SUA DISPOSIÇÃO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Sidney Seckler Ferreira Filho⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela EPUSP (1988). Professor Associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Bárbara Elisabeth Waelkens

Engenheira Ambiental pela EPUSP (2006). Pós-Graduada do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Av. Prof. Almeida Prado, travessa 2, n.271 – Prédio de Engenharia Civil - Cidade Universitária – São Paulo – SP - CEP: 05508-900 Tel: (11) 3091-5220 - e-mail: ssffilho@usp.br

RESUMO

Uma das possibilidades para a redução da produção de lodo em estações de tratamento de água (ETAs) é o uso do cloreto de polialumínio (CPA) como coagulante, podendo este ser aplicado de forma isolada ou em conjunto com sais de ferro. O objetivo deste trabalho foi estudar o uso do CPA com respeito à produção de lodo, bem como avaliar o impacto do lançamento de lodos de ETAs em ETEs do tipo lodos ativados convencional. Observou-se que produção de lodo do CPA apresentou valores próximos quando comparado com o sulfato de alumínio, em torno de 4,75 mg de massa seca para cada 1 mg de Al, e o seu eventual lançamento para posterior processamento em ETEs deverá alterar a qualidade físico-química do lodo desidratado, sendo esta função do tipo e dosagem de coagulante e suas impurezas.

PALAVRAS-CHAVE: Produção de lodo, tratamento de água, coagulação, cloreto de polialumínio, tratamento de esgotos.

INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, o tratamento convencional de águas de abastecimento tem empregado sais de alumínio e ferro como coagulantes, sendo que os mais comumente disponíveis no mercado são o sulfato de alumínio, sulfato férrico e cloreto férrico. Uma das maiores preocupações existentes com respeito à operação de estações de tratamento de água (ETAs) tem sido a necessidade de compatibilização da otimização do processo de coagulação e a minimização da formação de resíduos oriundos da precipitação de sais metálicos na forma de hidróxidos de alumínio ou ferro. De acordo com Januário et al. (2007), os custos de transporte e disposição final de lodos de ETAs em regiões metropolitanas tem situado-se em torno de R\$ 100,00 a R\$ 150,00 por tonelada, o que tem justificado a conduções de pesquisas e estudos experimentais que permitam a redução dos custos de tratamento com produtos químicos, bem como na geração de lodo. Considerando-se a necessidade de que as ETAs existentes ou em fase de concepção tenham que ser dotadas de sistemas de tratamento da fase sólida, quanto maiores forem os esforços no sentido de minimizar a geração de lodo, menores tenderão a serem os custos associados à implantação de seus sistemas de adensamento e desidratação. De acordo com Roth et al. (2008), os custos de implantação de sistemas de tratamento de lodos em estações de tratamento de água podem variar de 30% a 40% do custo total do sistema de tratamento, o que justifica a investigação de técnicas de tratamento de água que permitam a redução na massa de sólidos gerada no processo de tratamento.

A avaliação da produção de lodo em ETAs pode ser efetuada de modo distinto, sendo que, para ETAs já existentes, a sua determinação pode ser estimada “in loco” fazendo-se o monitoramento dos seus diversos processos e operações unitárias durante um intervalo de tempo em que sejam contempladas as variações da água bruta e das características do tratamento (tipo e dosagem de coagulante, pH de coagulação, etc.).

A obtenção de dados que tenham por propósito permitir o cálculo da produção de lodo para ETAs em fase de projeto é mais difícil, podendo esta ser estimada por meio de execução de ensaios de tratabilidade ou mediante a utilização de equações empíricas. Assumindo que o residual de alumínio e ferro seja desprezível na água



tratada, a produção de lodo para coagulantes a base de alumínio (sulfato de alumínio) e ferro (sulfato férrico e cloreto férrico) pode ser estimada através das seguintes expressões (AWWA (1987), ASCE (1996)):

$$P_L = Q.(4,89.D_{Al} + SST + CAP + OA).10^{-3} \quad (1)$$

$$P_L = Q.(0,805.D_{Fe} + SST + CAP + OA).10^{-3} \quad (2)$$

Nas quais:

P_L = produção de lodo seco em kg/dia (MT^{-1}),

Q = vazão de água bruta em m^3 /dia (L^3T^{-1}),

D_{Al} = dosagem de sais de alumínio, expresso como Al em mg/L, (ML^{-3}),

D_{Fe} = dosagem de sais de ferro, expresso como sulfato férrico em mg/l (ML^{-3}),

SST = concentração de sólidos em suspensão totais na água bruta em mg/L (ML^{-3}),

CAP = concentração de carvão ativado em pó em mg/l (ML^{-3}).

OA = outros aditivos em mg/l (sílica ativada, polímeros, etc...) (ML^{-3}).

Os coeficientes 4,89 e 0,805 presentes nas equações 1 e 2 foram obtidos partindo-se do pressuposto de que todo o alumínio ou ferro adicionado na água bruta precipita-se como hidróxido metálico e que a cada molécula de $Fe(OH)_3$ ou $Al(OH)_3$ são incorporadas cerca de três a quatro moléculas de água.

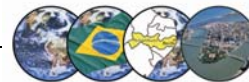
Mais recentemente, tem sido pesquisada a aplicação de coagulantes poliméricos orgânicos e inorgânicos, em substituição parcial ou total aos coagulantes inorgânicos mais comumente empregados no tratamento convencional de águas de abastecimento (Barbosa et al, 2003; Ferreira Filho et al, 2003; Dalsasso et al, 2006). Dentre estes, os coagulantes do tipo cloretos de polialumínio (CPA) são os mais comuns e disponíveis no mercado nacional, sendo que, em face de suas características físico-químicas, a sua aplicação tem possibilitado o seu emprego em ETAs que apresentam limitações operacionais em seus sistemas de pré-alcalinização.

Os coagulantes inorgânicos poliméricos a base de alumínio são produzidos a partir da bauxita, sendo que, durante o seu processo de produção, a solução de Al é parcialmente neutralizada por meio da adição de uma base forte, tipicamente NaOH (AWWA, 1989). Deste modo, quando ocorre a adição de íons OH^- na solução de coagulante, as reações de hidrólise da espécie Al^{+3} vão sendo favorecidas e, desta forma, a formação das espécies monoméricas e poliméricas passam a ocorrer diretamente na solução de coagulante ao invés de ocorrerem na fase líquida, diferentemente do que ocorre quando da aplicação do sulfato de alumínio.

Uma vez que podem ser adicionadas diferentes concentrações molares de OH^- em relação à concentração molar de Al^{+3} , a produção de soluções de CPA podem permitir a fabricação de diferentes tipos de coagulantes e que tendem a apresentar distintas características de composição e comportamento com respeito ao processo de coagulação (Pernitski et al, 2003).

Em face do comportamento químico distinto dos CPAs em relação ao sulfato de alumínio, uma das maiores dúvidas com respeito ao seu emprego como coagulante no tratamento de águas de abastecimento está associada ao seu potencial de formação de lodo, uma vez que a existência das espécies poliméricas formadas anteriormente à sua adição na fase líquida tenderiam a ficar na forma solúvel, possibilitando, desta forma, a redução da carga das partículas coloidais, bem como reduzindo a formação de espécies insolúveis. A possibilidade de que os coagulantes do tipo CPA apresentem uma menor capacidade de produção de lodo quando comparado com os coagulantes tradicionalmente empregados no tratamento de águas de abastecimento tem oferecido uma alternativa para a sua minimização. Ainda que algumas ETAs não possam fazer o uso unicamente do CPA como agente coagulante, a sua aplicação pode ocorrer de forma conjunta com sais de ferro, possibilitando, deste modo, uma redução global na produção de lodo, sem que haja prejuízo à qualidade da água tratada.

A redução da produção de lodo em ETAs torna-se importante não somente pela minimização dos custos operacionais com produtos químicos mas, também, por possibilitar que os mesmos possam ser encaminhados via rede coletora de esgotos sanitários para fins de processamento em ETEs. A maior vantagem desta alternativa reside no fato de poderem ser concentradas em uma única instalação física todas as unidades de processamento da fase sólida (unidades de adensamento e desidratação), o que reduz consideravelmente os seus custos de operação e manutenção. Atualmente, algumas concessionárias têm optado por esta solução,



podendo-se citar a Sabesp que dispõem o lodo da ETA Rio Grande na ETE ABC, sendo que estas possuem vazões da ordem de $5,0 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e, da mesma forma, encontra-se em fase de construção um sistema de envio de lodo via rede coletora de esgotos sanitários da ETA Alto da Boa Vista ($14 \text{ m}^3/\text{s}$) para a ETE Barueri ($9,5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Deste modo, a viabilidade do lançamento de lodos de ETAs na rede coletora de esgotos sanitários e seu processamento em ETEs torna-se dependente da massa de sólidos gerada na ETA e o impacto que esta possa ocasionar nas operações unitárias que compõem a ETE, sendo que esta alternativa tem que ser avaliada em função da concepção da ETE. Assim sendo, objetivando permitir o lançamento de lodos de ETAs e seu posterior processamento em ETEs se faz necessário avaliar a produção de lodo gerado no processo de tratamento de água, bem como estudar alternativas técnicas para a sua minimização e avaliar os impactos oriundos desta prática na qualidade do lodo final gerado no processo de tratamento de esgotos, particularmente quando do emprego de CPA isoladamente ou em conjunto com sais de ferro como agentes coagulantes.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do CPA como agente coagulante no tratamento de águas de abastecimento com vistas a estudar a sua capacidade de produção de lodo. Deste modo, pretendeu-se mais especificamente:

- Avaliar o comportamento do CPA com respeito à produção de lodo, quando empregado de forma isolada ou em conjunta com sais de ferro.
- Estudar o impacto do lançamento de lodos gerados em ETAs que empregam CPA como coagulante em ETEs do tipo lodos ativados convencional.

Estudar a composição do lodo final produzido em ETEs que recebam lodos de ETAs gerados a partir do uso do CPA como coagulante em seus sistemas de coleta de esgotos sanitários.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida tendo-se empregado água bruta proveniente do Reservatório do Guarapiranga, sendo este um manancial superficial localizado na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e que abastece a ETA Alto da Boa Vista (ETA ABV). A ETA ABV é do tipo convencional de ciclo completo, com capacidade de tratamento igual a $15 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo composta por 8 decantadores do tipo convencional de fluxo horizontal e 32 filtros rápidos por gravidade do tipo dupla camada areia e antracito.

Atualmente, a água de lavagem dos filtros é encaminhada a dois tanques de equalização e posteriormente recalcados para o início do processo de tratamento, possibilitando, deste modo, a sua integral recuperação. Os decantadores, por serem de concepção antiga, são operados em batelada, isto é, após um tempo de operação de 30 dias, os mesmos são isolados e lavados. Considerando-se que os lodos serão futuramente encaminhados para a ETE Barueri, com vistas a minimizar o impacto do seu lançamento em batelada na rede coletora de esgotos sanitários, o volume do decantador deverá ser enviado a um tanque de equalização de lodos para posterior disposição via rede coletora de esgotos sanitários.

Uma vez que a ETA ABV possui um total de 8 decantadores e que o seu tempo de operação médio situa-se em torno de 30 dias, tem-se que a cada 3 dias é efetuado o esgotamento de uma unidade. Desta forma, a operação do tanque de equalização de lodo deverá considerar a sua operação de enchimento e esvaziamento em um período de 3 dias, o que irá conferir a regularização da carga de sólidos enviada a ETE Barueri.

As principais características físico-químicas da água bruta empregada nos ensaios experimentais estão apresentadas na Tabela 1, sendo que todas as análises e determinações foram realizadas de acordo com APHA (2005).

**Tabela 1 – Caracterização físico-química da água bruta proveniente do Reservatório do Guarapiranga**

Parâmetros	Reservatório do Guarapiranga
pH	7,0 a 7,4
Turbidez (UNT)	3,0 a 6,0
Cor real (UC)	10 a 15
Cor aparente (UC)	25 a 60
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	130 a 140
Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3/\text{L}$)	20 a 35
Fosfato total ($\text{mg PO}_4^{-3}/\text{L}$)	0,20 a 0,63
Ferro total (mg/L)	0,1 a 0,5
Manganês total (mg Mn/L)	0,06 a 0,1
Ferro solúvel (mg/L)	0,05 a 0,40
Manganês solúvel (mg Mn/L)	0,04 a 0,08
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	80 a 90
Sólidos em Suspensão Totais (mg/L)	8 a 12

Uma vez tendo sido coletada, a mesma foi acondicionada em bombonas de 20 litros de capacidade e imediatamente transportadas ao Laboratório de Saneamento “Prof. Lucas Nogueira Garcez” para a execução dos ensaios experimentais. Os ensaios conduzidos tendo por finalidade avaliar produção de lodo mediante o emprego de sais de ferro e CPA como coagulantes isoladamente ou em conjunto foram executados em escala de “jar-test”, tendo-se empregado um CPA com basicidade igual a 63%. A Tabela 2 apresenta as principais características de todos os produtos químicos empregados na investigação experimental.

Os procedimentos adotados na execução dos ensaios de “jar-test” para fins de quantificação da produção de lodo foram inicialmente a transferência de um volume de 2 litros de amostra para cada um dos jarros do equipamento de “jar-test”. A seguir, a rotação do sistema de agitação era acertada para cerca de 200 rpm e, imediatamente o seu ajuste, era efetuada a adição do coagulante (CPA e ou sulfato férrico) e base para a correção do seu pH de coagulação. As dosagens de sulfato férrico e CPA variaram de 0 mg $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$ a 60 mg $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$ e 0 mg Al/L a 15 mg Al/L , respectivamente.

Tabela 2 – Características das soluções empregadas na investigação experimental

Solução	Fórmula	Concentração	Propriedades
Hidróxido de Sódio	NaOH	0,1 M	Solução
Sulfato Férrico	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	43% como $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	Solução Densidade: 1.550 g/L
CPA-63	Diversas fórmulas	11% como Al_2O_3	Basicidade: 63% Densidade: 1.000 g/L

Os ensaios experimentais contemplaram a avaliação da produção de lodo tendo-se empregado o CPA e o sulfato férrico como coagulante, de forma isolada e em conjunto. Em caso de aplicação conjunta de ambos os coagulantes, foram contempladas diferentes dosagens de sulfato férrico combinadas com diferentes dosagens de CPA.

A correção do pH de coagulação foi efetuada mediante a adição de volumes pré-determinados de NaOH 0,1 M com base na execução de curvas de titulação específicas para cada água bruta em questão. Tendo por finalidade possibilitar que ambos os coagulantes operem em regiões de mínima solubilidade, definiu-se que para todos os ensaios de geração de lodo o pH de coagulação seria mantido em torno de 6,0 a 6,5.

Após 60 segundos de mistura rápida, a rotação era reduzida para 80 rpm, 50 rpm e 25 rpm e procedia-se a etapa de floculação considerando-se um tempo de mistura lenta igual a 3 minutos, 3 minutos e 4 minutos para cada respectiva rotação. Imediatamente após o início da etapa de floculação, eram efetuadas a coleta de amostras de água coagulada para fins de determinação da concentração de sólidos em suspensão (SST) na água coagulada. Uma vez sendo conhecida a concentração de SST na água bruta, a produção de lodo associada a uma respectiva dosagem de coagulante foi calculada de acordo com a seguinte expressão:



$$PL_C = \frac{SST_{AC} - SST_{AB}}{DC} \quad (3)$$

Em que:

PLC= produção de lodo associado ao coagulante (MM^{-1}),
 SST_{AC} = sólidos em suspensão totais na água coagulada (ML^{-3}),
 SST_{AB} = sólidos em suspensão totais na água bruta (ML^{-3}),
 DC= dosagem de coagulante (ML^{-3}).

Após 10 minutos de floculação, o equipamento era desligado e permitia-se a sedimentação dos flocos previamente formados por cerca de 60 minutos. Após este período de tempo, descartava-se o sobrenadante e efetuava-se a coleta do lodo, de modo que o mesmo pudesse ser empregado nos ensaios posteriores de combinação com lodo digerido proveniente de uma ETE do tipo lodos ativados convencional. Foi escolhida a ETE Barueri operada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) e localizada na região metropolitana de São Paulo (RMSP). A sua vazão afluyente atual situa-se em torno de $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$, estando a mesma sendo ampliada para $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os balanços de massa conduzidos para avaliação dos impactos do emprego do CPA como coagulante e da potencialidade do recebimento de lodos de ETAs em ETEs foram efetuados simulando-se ambas as ETA ABV e ETE Barueri, uma vez que está previsto o futuro lançamento do lodo descarregado pelos decantadores da ETA ABV no sistema de coleta de esgotos sanitários para posterior processamento na ETE Barueri. Os balanços de massa foram efetuados em Excel, tendo-se considerado diferentes cenários de geração de lodo e dosagens de coagulante empregadas na ETA ABV. Para a execução dos balanços de massa da ETE Barueri e ETA ABV foram adotado os parâmetros clássicos sugeridos por Metcalf & Eddy (2003) e Montgomery (2005).

Uma vez tendo sido efetuados e computados os seus valores de produção de lodo, os ensaios possibilitaram a quantificação do acréscimo de SST no esgoto afluyente a ETE Barueri, conforme calculado pela Equação 4.

$$C_{afl} \text{ (mg / L)} = \left[\frac{M_{ETA} \text{ (kg / d)} + 12,5 \text{ m}^3 / \text{s} \cdot 0,3 \text{ kg / m}^3 \cdot 86.400 \text{ s / dia}}{12,5 \text{ m}^3 / \text{s} \cdot 86.400 \text{ s / dia}} \right] \cdot 1000 \quad (4)$$

Na qual:

C_{afl} = concentração de SST afluyente a ETE Barueri (ML^{-3}),
 M_{ETA} = massa de sólidos gerada na ETA ABV e enviada a ETE Barueri (ML^{-3}).

O cálculo da concentração de SST afluyente a ETE Barueri considerou que a produção de lodo gerada na ETA ABV e descarregada pelos seus decantadores foi equalizada anteriormente ao seu lançamento na rede coletora de esgotos sanitários. A execução do balanço de massa para a ETE Barueri admitiu uma concentração de SST no afluyente igual a 300 mg/L para a sua condição padrão de operação, isto é, sem o encaminhamento do lodo gerado na ETA ABV. A Tabela 3 apresenta um quadro resumo dos balanços de massa efetuados para ambas as ETA ABV e ETE Barueri.

Tabela 3 – Quadro resumo dos balanços de massa executados para a ETA ABV e ETE Barueri

Balanço de massa	ETA ABV Vazão (m^3/s)	SST da água bruta (mg/L)	Sulfato Férrico ($\text{mg Fe}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$)	CPA (mg Al/L)	ETE Barueri Vazão (m^3/s)	SST afluyente (mg/L)
1	15,0	5,0	0,0	0,0	12,5	300
2	15,0	5,0	30,0	0,0	12,5	327
3	15,0	5,0	22,0	0,91	12,5	326
4	15,0	5,0	16,0	0,91	12,5	322
5	15,0	5,0	12,0	0,91	12,5	319
6	15,0	5,0	8,0	0,91	12,5	317

Com base nos resultados dos balanços de massa, foram efetuados ensaios experimentais de combinação de diferentes proporções mássicas de lodo de ETA e lodo digerido da ETE, com vistas a possibilitar o estudo do impacto do lançamento de lodos produzidos a partir do emprego de sais de ferro e CPA como coagulantes no tratamento de águas de abastecimento. Deste modo, foram efetuadas análises da composição dos metais alumínio, ferro, manganês, cobre, cromo e chumbo do lodo gerado durante o processo de tratamento de esgotos na ETE Barueri, para ambos os casos de lançamento e não lançamento do lodo produzido na ETA - ABV na rede coletora de esgotos sanitários.

As amostras de lodo geradas para determinação dos metais foram obtidas a partir de ensaios em laboratório, sendo do tipo úmida. A amostra de lodo gerada na ETE Barueri foi obtida diretamente após a digestão anaeróbia, tendo sido a mesma coletada diretamente nos digestores secundários de lodo digerido. Por sua vez, a amostra de lodo de ETA foi gerada em ensaios de “jar-test” com as respectivas dosagens de sulfato férrico e CPA nas proporções desejadas, conforme descrito anteriormente.

Os balanços de massa apresentados na Tabela 4 permitiram definir a proporção em que ambos os lodos da ETA e da ETE deveriam ser compostos para simulação de sua composição final. Com base nas informações da carga de SST produzida nos digestores e enviada ao sistema de desidratação (kg/dia) e a massa de sólidos secos gerada pela ETA ABV e disposta no sistema de esgotos sanitários (kg/dia) foi possível calcular a proporção mássica desejada.

Uma vez tendo sido estes lodos compostos volumetricamente, os mesmos foram secos em estufa a uma temperatura igual a 103 °C por 24 horas e, após este período de tempo o resíduo seco foi coletado e acondicionado em frascos de polietileno e posteriormente enviado ao IPEN -CQMA (Centro de Química e Meio Ambiente), para a execução das análises dos metais ferro, alumínio, manganês, cobre, cromo e chumbo pelo método de espectrometria de fluorescência de raios X (WDXRF).

APRESENTAÇÃO E ANALISE DOS RESULTADOS

As Figuras 1 e 2 apresentam os valores de produção de sólidos gerada quando da aplicação unicamente do sulfato férrico e do CPA como coagulante, respectivamente.

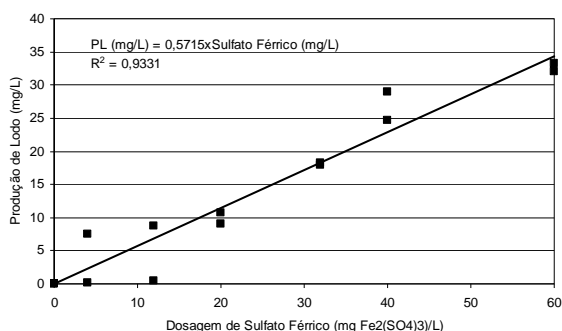


Figura 1 – Avaliação da produção de lodo quando da aplicação do sulfato férrico como coagulante

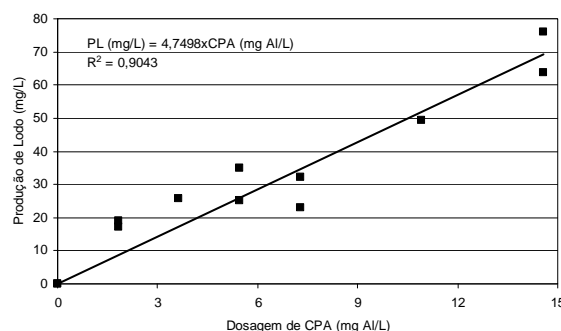
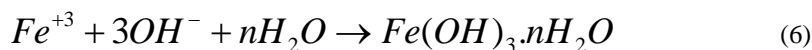
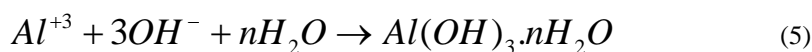


Figura 2 – Avaliação da produção de lodo quando da aplicação do CPA como coagulante

A produção de sólidos foi avaliada mediante a determinação da concentração de SST na água coagulada, subtraindo-se o valor de SST na água bruta. Assim sendo, para diferentes dosagens aplicadas de sulfato férrico, pode-se avaliar a sua produção de lodo inerente a sua aplicação. Com respeito a sais de ferro e alumínio, considerando-se a incorporação de águas de hidratação do respectivo hidróxido precipitado, pode-se escrever que:





Portanto, 1 mol de alumínio e 1 mol de ferro ao precipitarem permitem a formação de também 1 mol de hidróxido férrico ou hidróxido de alumínio associado a suas respectivas águas de hidratação. Geralmente, o valor de n situa-se entre 2 a 4, sendo este dependente do mecanismo de coagulação empregado. Caso este seja por varredura, o valor de n situa-se mais próximo de 4, sendo menor caso o mecanismo seja por adsorção-neutralização ou uma combinação de ambos.

Deste modo, partindo-se das equações 5 e 6 e assumindo que os valores de n situem-se entre 2 e 4, tem-se que para cada 1 mg Al/L são formados aproximadamente 4,22 a 5,56 mg de massa seca de sólidos por litro, ao passo que para cada 1 mg Fe/L são formados algo como 2,55 mg a 3,20 mg de massa seca por litro. Com o objetivo de comparar as dosagens tipicamente empregadas no tratamento de águas de abastecimento, tem-se que cada 1 mg Al/L corresponde a 11 mg $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O/L$ e que 1 mg Fe/L corresponde a 3,57 mg $Fe_2(SO_4)_3/L$. Deste modo, para cada 1 mg $Fe_2(SO_4)_3/L$, espera-se a produção de 0,71 mg a 0,90 mg de massa seca por litro. Portanto, observando-se os resultados experimentais relativos à produção de lodo quando do emprego do sulfato férrico como coagulante, obteve-se uma produção de lodo estimada em 0,57 mg de massa seca por mg de $Fe_2(SO_4)_3$ aplicado por litro, um valor menor do que quando comparado com o esperado. Ainda assim, observa-se uma excelente correlação entre a produção de lodo e a dosagem de sulfato férrico aplicado na fase líquida.

Com respeito ao CPA, obteve-se uma boa correlação entre a produção de lodo e dosagem de CPA, sendo que para cada 1 mg de Al/L obteve-se uma produção de lodo de aproximadamente 4,75 mg de massa seca por litro, valor este mais próximo do teoricamente esperado. Um aspecto que merece ser observado é que, assumindo iguais dosagens de CPA e sulfato de alumínio expressos como Al, a produção de lodo de ambos é bastante semelhante, não se podendo afirmar que o uso do CPA como coagulante proporcione uma redução na geração de lodo no processo de tratamento.

Deste modo, considerando o uso do CPA como agente coagulante e assumindo que o mesmo seja constituído preferencialmente de espécies monoméricas e poliméricas de alumínio, a sua adição na fase líquida tende a proporcionar a polimerização das espécies de alumínio, levando a formação do hidróxido metálico, processo semelhante quando comparado quando do emprego do sulfato de alumínio. Com base nos ensaios de “jar-test” uma vez tendo-se empregado diferentes dosagens de CPA e sulfato férrico, para cada um destes, foi calculada a sua produção de lodo teórica em função dos coagulantes empregados a partir dos resultados experimentais apresentados nas figuras 1 e 2. Portanto, tem-se que:

$$PLC = 0,5715.SF + 4,7498.CPA \quad (7)$$

Em que:

PLC=produção de lodo calculada (mg/L)

SF=dosagem de sulfato férrico como mg $Fe_2(SO_4)_3/L$

CPA=dosagem de cloreto de polialumínio em mg Al/L

Os valores de produção de lodo calculados foram posteriormente confrontados com os valores observados, estando os seus resultados apresentados na figura 3.

Observando-se a figura 3 e comparando-se os valores calculados confrontados com os valores experimentais pode-se notar que a aderência entre estes é muito boa, o que reforça a validade da equação 7 no cálculo da estimativa da produção de lodo quando do uso de ambos os coagulantes sulfato férrico e CPA. Com base nos valores experimentais obtidos, puderam ser efetuados diferentes cenários de produção de lodo a ser gerada na ETA ABV e posterior disposição na rede coletora de esgotos sanitários para envio a ETE Barueri. A tabela 4 apresenta um quadro resumo dos valores obtidos de produção de lodo gerada na ETA ABV para os diferentes cenários de dosagem de coagulantes dispostos na tabela 3.

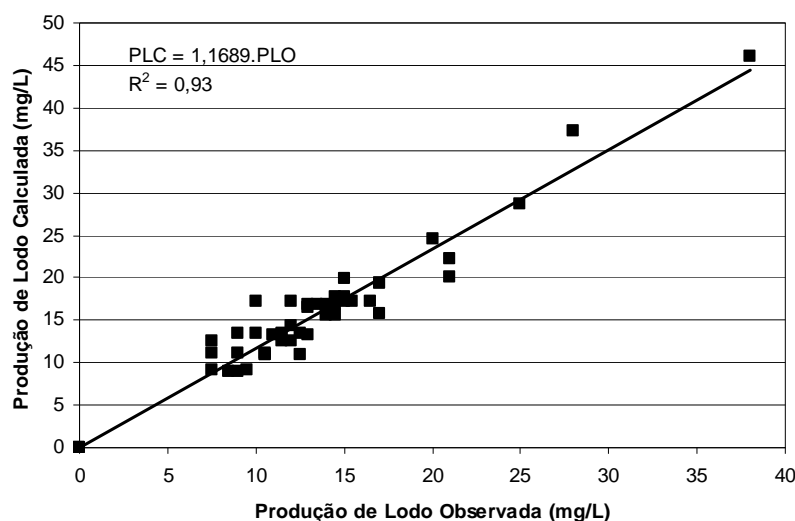


Figura 3 – Avaliação da produção de lodo calculada e observada quando da aplicação do cloreto de polialumínio e sulfato férrico conjuntamente como coagulantes

Tabela 4 – Quadro resumo dos valores obtidos de produção de lodo para os balanços de massa executados para a ETA ABV

Balanço de massa	Vazão (m ³ /s)	Dosagem de Sulfato Férrico (mg Fe ₂ (SO ₄) ₃ /L)	Dosagem de CPA (mg Al/L)	Produção de lodo (ton/dia)
1	15,0	30,0	0,0	28,70
2	15,0	22,0	0,91	28,38
3	15,0	16,0	0,91	23,93
4	15,0	12,0	0,91	20,97
5	15,0	8,0	0,91	18,01

Os balanços de massa efetuados para a ETA ABV consideraram dosagens máximas de CPA iguais a 1,0 mg Al/L, uma vez que, quando combinadas com o sulfato férrico como coagulante, estas apresentaram as melhores condições de otimização da qualidade da água decantada (Ferreira Filho et al, 2007).

Analisando-se os valores de produção de lodo apresentados na Tabela 4, pode-se observar que na condição normal de operação da ETA ABV, isto é, com uma dosagem de coagulante igual a 30 mg Fe₂(SO₄)₃/L, a sua produção diária é da ordem de 28,70 t/dia.

A dosagem de sulfato férrico que permite a mesma produção de lodo quando combinado com uma dosagem de CPA igual a 0,91 mg Al/L é da ordem de 22 mg Fe₂(SO₄)₃/L. Portanto, o emprego do CPA como agente coagulante combinado com o sulfato férrico apenas torna-se atrativo em termos de redução na geração de lodo quando a dosagem de sulfato férrico for inferior a 22 mg Fe₂(SO₄)₃/L. Pode-se observar que a aplicação de sulfato férrico com dosagens iguais a 16, 12 e 8 mg Fe₂(SO₄)₃/L e combinados com uma dosagem de CPA igual a 0,91 mg Al/L permitiram uma redução na geração de lodo de 16,6%, 26,9% e 37,3%, respectivamente. Deste modo, estes valores foram empregados para a execução do balanço de massa da ETE Barueri, analisando-se o seu incremento nos valores de SST, ferro e alumínio na vazão afluyente a ETE, sendo que os valores de SST afluentes a ETE Barueri foram calculados mediante o emprego da Equação 4.

Assumindo que toda a carga de coagulantes aplicada na ETA ABV e expressa como Fe⁺³ e Al⁺³ seja convertida a hidróxidos metálicos precipitados e esteja presente no afluyente a ETE Barueri, tem-se que as suas concentrações podem ser calculadas pelas Equações 8 e 9, a saber:



$$C_{Fe\text{ afl}} \text{ (mg / L)} = \left[\frac{M_{Fe} \text{ (kg / d)}}{12,5 \text{ m}^3 / \text{s} \cdot 86.400 \text{ s / dia}} \right] \cdot 1000 \quad (8)$$

$$C_{Al\text{ afl}} \text{ (mg / L)} = \left[\frac{M_{Al} \text{ (kg / d)}}{12,5 \text{ m}^3 / \text{s} \cdot 86.400 \text{ s / dia}} \right] \cdot 1000 \quad (9)$$

Nas quais:

$C_{Fe\text{ afl}}$ = concentração de ferro total afluyente a ETE Barueri (ML^{-3}),

$C_{Al\text{ afl}}$ = concentração de alumínio total afluyente a ETE Barueri (ML^{-3}),

A importância de se considerar a carga de Fe e Al no balanço de massa da ETE Barueri deve-se ao fato de que, por serem ambos os elementos conservativos e estarem presentes na fase sólida na forma de hidróxidos precipitados, estes tenderão a ser incorporado no lodo desidratado, o que acarretará a alteração das suas características físico-químicas. Assim sendo, com o objetivo de avaliar o impacto da disposição da carga de ferro e alumínio oriundo dos coagulantes empregados na ETA ABV nas características do lodo desidratado, ambos os elementos serão tratados como conservativos e deverão ser integralmente incorporados na fase sólida. A Tabela 5 apresenta um quadro resumo das principais características dos balanços de massa efetuados para a ETE Barueri.

Tabela 5 – Quadro resumo dos balanços de massa executados para a ETE Barueri

Balanço de massa	Vazão (m^3/s)	Dosagem de Sulfato Férrico ($\text{mg Fe}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$)	Dosagem de CPA (mg Al/L)	Lodo oriundo da ETA ABV (t/dia)	SST afluyente (mg/L)	Fe (mg/L)	Al (mg/L)
1	12,5	0,0	0,0	0,0	300	0,0	0,0
2	12,5	30,0	0,0	28,70	327	10,08	0,0
3	12,5	22,0	0,91	28,38	326	7,39	1,09
4	12,5	16,0	0,91	23,93	322	5,38	1,09
5	12,5	12,0	0,91	20,97	319	4,03	1,09
6	12,5	8,0	0,91	18,01	317	2,69	1,09

Com o objetivo de permitir uma melhor comparação entre os resultados obtidos quando da execução dos balanços de massa para a ETE Barueri, a Tabela 6 apresenta um quadro resumo das principais grandezas calculadas.

Tabela 6 – Quadro resumo dos resultados obtidos para os balanços de massa executados para a ETE Barueri com respeito à produção de lodo

Balanço de massa	Vazão (m^3/s)	Dosagem de Sulfato Férrico ($\text{mg Fe}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$)	Dosagem de CPA (mg Al/L)	Lodo oriundo da ETA ABV (t/dia)	Produção de lodo (t/dia)	Volume de lodo “úmido” (m^3/dia)
1	12,5	0,0	0,0	0,0	144,9	455,9
2	12,5	30,0	0,0	28,70	171,3	538,5
3	12,5	22,0	0,91	28,38	170,9	537,6
4	12,5	16,0	0,91	23,93	166,9	524,8
5	12,5	12,0	0,91	20,97	164,2	516,3
6	12,5	8,0	0,91	18,01	161,5	507,8

A ETE Barueri em suas condições normais de operação, admitindo concentrações de $\text{DBO}_{5,20}$ e SST iguais a 300 mg/L no afluyente, deverá produzir uma quantidade de lodo seco em torno de 145 t/dia . Assumindo as atuais condições de operação da ETA ABV, com a utilização somente do sulfato férrico como coagulante com uma dosagem igual a 30 $\text{mg Fe}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$, o incremento na concentração de SST no afluyente a ETE será de 27 mg/L e, portanto, o seu valor aumentará de 300 mg/L para 327 mg/L .

Deste modo, em ocorrendo a sua disposição na rede coletora de esgotos sanitários, a produção de lodo na ETE Barueri aumentará de 145 t/dia para 171,3 t/dia, o que corresponderá a um aumento de, aproximadamente, 18,1%. Do mesmo modo, o volume de lodo “úmido” a ser transportado também deverá aumentar de 456 m³/dia para 539 m³/dia. Embora o incremento na concentração de SST afluente a ETE Barueri resultante da disposição dos resíduos gerados na ETA ABV no sistema de coleta e afastamento de esgotos sanitários seja relativamente pequeno, de 300 mg/L para 327 mg/L, o impacto na produção de lodo seco e volume “úmido” desidratado é significativo, o que deverá proporcionar maiores custos em seu transporte e disposição final.

Conforme pode ser observado na Tabela 5, do ponto de vista de diminuição da geração de lodo na ETA ABV mediante o emprego de uma dosagem de CPA igual a 0,91 mg/L, as dosagens de sulfato férrico empregadas no processo de coagulação deverão ser iguais ou menores a 22 mg Fe₂(SO₄)₃/L. Para dosagens de sulfato férrico iguais a 16 e 12 mg Fe₂(SO₄)₃/L, tem-se que as concentrações de SST no afluente à ETE Barueri deverão ser iguais a 322 mg/L e 319 mg/L, respectivamente. Assim sendo, a produção de lodo na respectiva ETE deverá ser de 166,9 t/dia e 164,2 t/dia, gerando incrementos de geração de lodo de 15,2% e 13,3%, respectivamente.

Embora tecnicamente possível, certas questões devem ser analisadas, mais especificamente com respeito à qualidade do lodo que deverá ser gerado na ETE Barueri. Com base nos resultados obtidos quando da execução do balanço de massa para a ETE Barueri, assumiu-se que a carga de Fe e Al empregados como coagulantes na ETA ABV deveriam estar na forma de hidróxidos metálicos precipitados na forma sólida e, conseqüentemente, seriam posteriormente incorporados ao lodo desidratado. A Tabela 7 apresenta os valores de concentração de Fe e Al esperados para o lodo desidratado, bem como seus valores de relação SSV/SST para o lodo desidratado.

Tabela 7 – Quadro resumo dos resultados obtidos para os balanços de massa executados para a ETE BARUERI com respeito à qualidade do lodo desidratado

Balanço de massa	Vazão (m ³ /s)	Dosagem de Sulfato Férrico (mg Fe ₂ (SO ₄) ₃ /L)	Dosagem de CPA (mg Al/L)	Lodo oriundo da ETA ABV (ton/dia)	Fe (g/kg)	Al (g/kg)
1	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	12,5	30,0	0,0	28,70	63,6	0,0
3	12,5	22,0	0,91	28,38	46,7	6,89
4	12,5	16,0	0,91	23,93	34,8	7,07
5	12,5	12,0	0,91	20,97	26,5	7,18
6	12,5	8,0	0,91	18,01	17,9	7,30

Observando-se a Tabela 7, pode-se notar que, com a disposição do lodo da ETA ABV na ETE Barueri, as concentrações de Fe e Al no lodo desidratado deverão ser bastante elevadas, o que deverá impor restrições com relação a sua disposição final, tipicamente o uso agrícola. Os valores de concentração de ambos os metais no lodo desidratado podem ser confrontados com os valores calculados a partir da execução do balanço de massa da ETE Barueri, sendo que os mesmos encontram-se apresentados nas figuras 4 e 5.

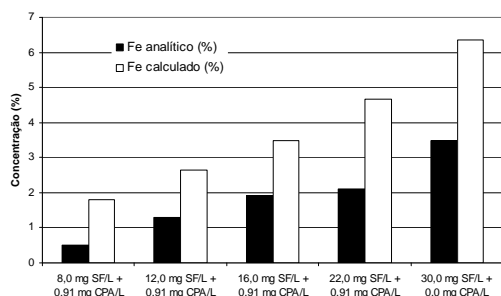


Figura 4 – Concentrações de Fe observadas e calculadas para o lodo digerido da ETE Barueri combinado com o lodo da ETA ABV.

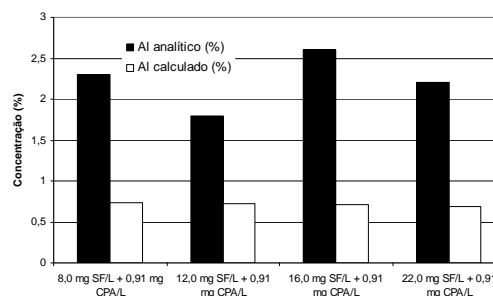


Figura 5 – Concentrações de Al observadas e calculadas para o lodo digerido da ETE Barueri combinado com o lodo da ETA ABV.



Com base na Figura 4, verifica-se que há uma similaridade de comportamento entre as concentrações de Fe calculadas por meio do balanço de massa da ETE Barueri e as observadas quando da composição de ambos os lodos de ETA e ETE. Embora as concentrações calculadas tenham sido ligeiramente maiores do que as observadas, a sua tendência de aumento em função das maiores dosagens aplicadas de sulfato férrico como coagulante na ETA ABV ficou muito bem caracterizado.

Assim sendo, conforme já comentado anteriormente, a eventual disposição dos lodos gerados em ETAs em rede coletora de esgotos sanitários para posterior processamento em ETEs tenderá a ocasionar uma modificação na qualidade do lodo desidratado, o que poderá restringir o seu uso posterior. Em caso de disposição em aterros sanitários, esta mudança em sua composição físico-química não deverá ser um problema significativo.

A figura 5 apresenta o valor de concentração de Al observado e calculado por intermédio do balanço de massa para os lodos compostos e, de acordo com os resultados experimentais, pode-se notar que o seu acréscimo foi bastante reduzido, não tendo sido o mesmo significativo. Isto se justifica pelo fato de a máxima concentração aplicada de CPA como coagulante não ter sido superior a 1,0 mg Al/L. As figuras 6 e 7 apresentam as concentrações de Cu, Cr, Mn e Pb observadas para os lodos gerados mediante a composição do lodo da ETA ABV e ETE Barueri.

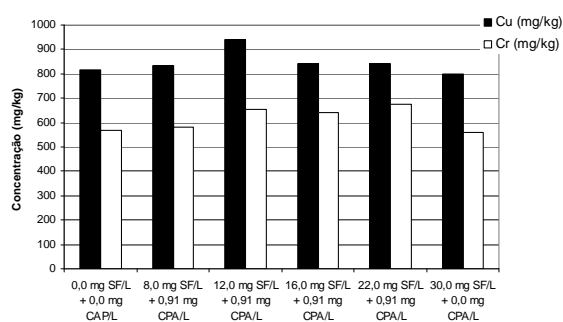


Figura 6 – Concentrações de Cu e Cr observadas para o lodo digerido da ETE Barueri combinado com o lodo da ETA ABV.

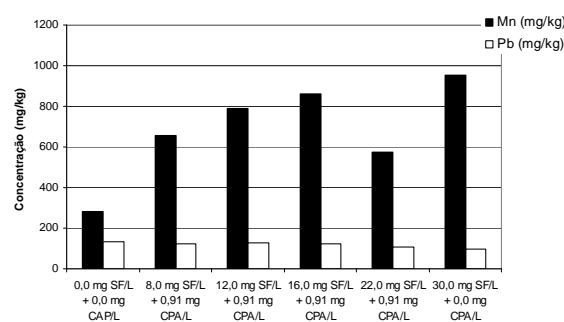


Figura 7 – Concentrações de Mn e Pb observadas para o lodo digerido da ETE Barueri combinado com o lodo da ETA ABV.

Observando-se as figuras 6 e 7, pode-se notar que para os metais Cu, Cr e Pb, não foram observadas alterações em suas concentrações no lodo composto em função da adição de lodo de ETA gerado sob diferentes concentrações de agentes coagulantes. Deste modo, independentemente das condições em que foram gerados os lodos da ETA, as concentrações de Cu, Cr e Pb situaram-se em torno de 800 mg/kg, 600 mg/kg e 100 mg/kg, respectivamente, o que justifica a sua origem mediante a sua incorporação à fase sólida por processos de remoção físico-química dos mesmos quanto presentes no esgoto bruto. Uma vez que a ETE Barueri localiza-se em uma região com elevada intensidade industrial, justifica-se a sua presença no esgoto bruto por serem estes oriundos da implantação de um programa de recebimento de efluentes não domésticos na rede coletora de esgotos sanitários.

O único elemento que apresentou comportamento diferenciado foi o manganês, sendo que, com a introdução do lodo gerado na ETA ABV e respectivo aumento da dosagem de sulfato férrico, observou-se um nítido aumento na sua concentração no lodo composto, de 280 mg/kg para quase 1.000 mg/kg. A razão pelo qual ocorreu este incremento está, portanto, associado a sua presença no coagulante que, quanto maiores forem as suas dosagens aplicadas na ETA, também maiores tenderão a serem as concentrações de manganês introduzido na água coagulada e, em função de sua precipitação na forma de dióxido de manganês, também maiores serão as suas concentrações incorporadas na fase sólida.



CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais, pode-se concluir que:

A produção de lodo oriunda da aplicação do sulfato férrico como coagulante situou-se em torno de 0,57 mg de massa seca para cada mg de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, sendo este ligeiramente inferior ao valor teórico esperado de 0,71 mg/mg.

Com respeito ao CPA, obtiveram-se valores de produção de lodo iguais a 4,75 mg de massa seca para cada 1 mg de Al, sendo este mais próximo do valor teórico de 4,22 mg/mg.

Observou-se que a produção de lodo do CPA apresentou valores próximos quando comparado com o sulfato de alumínio e, desta forma, se pode afirmar que ambos os coagulantes apresentam comportamento semelhante com respeito a produção de lodo.

Uma vez sendo possível a disposição de lodos de ETAs via rede coletora de esgotos sanitários para posterior processamento em ETEs, espera-se que a qualidade do lodo desidratado sofra significativas alterações em sua qualidade físico-química, sendo estas função do tipo e dosagem de coagulante, bem como de suas principais impurezas, notadamente, metais pesados.

A eventual disposição dos lodos da ETA ABV para posterior processamento na ETE Barueri deverá elevar as concentrações de Fe e Al no lodo desidratado, esperando-se que estas situem-se em torno de 64 g/kg e 7 g/kg, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro concedido (Processo 2004/03178-6) e Bolsa de Iniciação Científica (Processo 2004/03177-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21º ed. Washington, D.C., USA, 2005
2. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Management of water treatment plant residuals*. American Society of Civil Engineers, New York, 294 p. 1996.
3. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. *Water treatment plant waste management*. American Water Works Association Research Foundation, Denver, 459 p. 1987.
4. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. *Polymeric inorganic coagulants*. American Water Works Association Research Foundation, Denver, 91 p. 1989.
5. BARBOSA, A.B.D., MENDES, M.J., BAYLÃO, T.W.S. *Emprego do policloreto de alumínio em uma estação de filtração direta com água proveniente de manancial em processo de eutrofização*. In: 22 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1., JOINVILLE, 2003.
6. DALSSASSO, R.L., SENS, M.L. Filtração direta com pré-Floculação e coagulação com sulfato de alumínio e hidroxiclreto de alumínio: estudo com água de manancial eutrofizado. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n.3, p. 241-249, 2006
7. FERREIRA FILHO, S.S., MENDES, R.L., SINELLI, P.H., CIPRIANI, M.J.I., FERNANDES, A.N. *Aplicação de polímeros catiônicos em conjunto com coagulantes inorgânicos como auxiliares de coagulação para a otimização de estações de tratamento de água*. In: 22 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1., JOINVILLE, 2003.
8. FERREIRA FILHO, S.S., WAELEKENS, B.E. Aspectos químicos do cloreto de polialumínio como coagulante no tratamento de águas de abastecimento. *Submetido a publicação à Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2007.
9. JANUÁRIO, G.F., FERREIRA FILHO, S.S. Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da Região Metropolitana de São Paulo. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.12, n.2, p.117-126, Abril/Junho, 2007.



10. METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. McGraw-Hill, 4ª edição, 2005.
11. MONTGOMERY, J. *Water treatment: principles and design*. New York, John Wiley & Sons, 2ª Edição, 1.948 p., 2005.
12. PERNITSKY, D.J., EDZWALD, J.K. Solubility of polyaluminium coagulants. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, v.52, n.3, p. 395-406, 2003.
13. ROTH, D.K., CORNWELL, D.A., RUSSEL, J.S., GROSS, M., MALMROSE, P.E., WANCHU, L. Implementing residuals management: costs implication for coagulation and softening plants. *Journal American Water Works Association*, p.81-93, March, 2008.