



## I-331 - ESTUDO COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO POR SULFATO DE ALUMÍNIO NA ETA “ENGENHO DAS LAJES”

**Davi Rodrigues da Silva<sup>(1)</sup>**

Químico pela Universidade de Brasília(UNB). Pós-graduado em química pela Universidade Federal de Lavras(UFLA). Mestre em Biologia Molecular pela Universidade de Brasília(UNB). Químico da Companhia de Saneamento Ambiental de Brasília (Caesb).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** QNN 22 CONJUNTO I CASA 41 - Guariroba - Ceilândia - DF - CEP: 72220-220 - Brasil - Tel: (61) 3376-4631 - e-mail: [drs1\\_rodrigues\\_76@yahoo.com.br](mailto:drs1_rodrigues_76@yahoo.com.br)

### RESUMO

A pesquisa objetivou avaliar uma metodologia de transposição de resultados de ensaios de laboratório para escala real, representados pela menor dosagem do agente coagulante. A partir desta premissa básica, o estudo foi dividido em três fases gerais e distintas, a saber: (i) determinação dos tempos de detenção hidráulicos para a ETA Engenho das Lajes; (ii) obtenção da dosagem ótima do agente coagulante testado, por meio do teste de jarros para redução do residual de alumínio; (iii) aplicação em escala real das dosagens obtidas, para verificação da validade da metodologia proposta. Assim, foi considerado como fator determinante para que a estação participasse do trabalho proposto, a possibilidade da determinação dos tempos reais de detenção hidráulica e gradientes de velocidade da mistura rápida e da floculação, de forma que os ensaios de bancada pudessem melhor representar as condições de operação em escala real.

**PALAVRAS-CHAVE:** Agente coagulante, detenção hidráulica, teste de jarros.

### INTRODUÇÃO

Uma das grandes dificuldades na operação de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) é o controle da coagulação-floculação e sedimentação das partículas. Devido ao grande número de variáveis envolvidas no processo causador da sedimentação destas partículas, o teste de jarros mostrou ser uma alternativa mais rápida e simples de avaliação das condições de sedimentação do que os medidores de potenciais zeta e outras análises físico-químicas da água.

Este ensaio vem sendo empregado para a determinação de parâmetro básico na elaboração do projeto de uma Estação de Tratamento de Água (ETA), assim como para a determinação das dosagens ótimas dos coagulantes a serem empregados. Por meio deste ensaio, determina-se a condição ótima para floculação de uma água caracterizada pelo tempo e agitação necessária, sendo que uma vez determinada a dosagem ótima dos coagulantes, deve-se verificar qual o tempo e qual o gradiente de velocidade ótimo para se flocular a água em estudo. Além disso, deve-se verificar se a floculação obtida fornece uma água que após a sedimentação apresentará uma grande redução de turbidez.

As fases deste ensaio correspondem na prática a três etapas: dispersão rápida do coagulante (coagulação), floculação e decantação. A quantidade exata de coagulante a ser determinada e o pH ótimo para que ocorra esta sedimentação será determinada pela adição de quantidades crescentes do coagulante num pH predeterminado segundo Edzwald et al (1999).

A coagulação consiste no conjunto de ações físicas e reações químicas, com duração de poucos segundos, entre o coagulante, usualmente um sal de alumínio ou de ferro, a água e as impurezas presentes. Apresenta-se em três fases: (i) formação das espécies hidrolisadas do sal quando disperso na água, (ii) desestabilização das partículas coloidais e suspensas dispersas na massa líquida e (iii) agregação dessas partículas para formação dos flocos. Diversos fatores interferem no processo de coagulação, destacando-se o pH e a alcalinidade da água bruta, a natureza das partículas coloidais, o tamanho das partículas e o tipo e a dosagem dos produtos químicos aplicados. Também influem, em menor grau, a concentração e a idade da solução de coagulante, a temperatura e, dependendo do mecanismo de coagulação predominante, o gradiente de velocidade e o tempo de agitação na unidade de mistura rápida.



As partículas de suspensões têm tamanhos que variam de  $10^{-3}$  mm a  $10^{-1}$  mm, sendo que, por meio de sedimentação ou flotação, consegue-se a separação das fases líquido/sólido. A ação de coagulantes tais como sais de ferro e alumínio, podem promover a união destas partículas, adicionando estes em água bruta, e procurando rapidamente sua homogeneização. Após a coagulação, a água percorre uma série de reatores, cada um deles dotado de um gradiente médio de velocidade, fazendo com que as partículas presentes na água bruta unam-se formando os “flocos”; esta operação é denominada “floculação” de acordo com Exall et al (2000).

Em face disto, este trabalho tem como objetivos a determinação dos tempos de detenção no coágulo-floco-decantador para a ETA Engenho das Lajes, bem como a obtenção da dosagem ótima do agente coagulante testado, por meio do teste de jarros e aplicação em escala real das dosagens obtidas, para verificação da validade da metodologia proposta.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios em reatores estáticos foram efetuados com aparelho para teste de jarros, equipado com tacômetro digital, permitindo a variação e controle da rotação dos agitadores, e apto a conferir gradientes de velocidade na faixa de 10 a  $320 \text{ s}^{-1}$ . O mesmo era dotado de seis jarros com capacidade individual de 2 (dois) litros cada, de dispositivo para aplicação simultânea de produtos químicos, bem como para coleta simultânea de amostras de água a 7cm de profundidade a partir da superfície líquida, permitindo ensaios com diferentes velocidades de sedimentação.

As análises para determinação da concentração do íon flúor e alumínio na água foram realizadas com auxílio de um espectrofotômetro DR 2000/HACH– necessárias aos ensaios com traçadores e residual conforme metodologia do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater de acordo com APHA et al (1998). Um turbidímetro 2100P/HACH e um pHmetro/ORION, previamente calibrado foi utilizado para ensaios de turbidez e pH respectivamente.

A Tabela 1 contém as características da água bruta estudada. O Tipo A é para água em tempo de estiagem e o tipo B é para tempo chuvoso.

**Tabela 1: Características da água estudadas na ETA-Engenho das Lajes.**

Tipo	Turbidez NTU	Cor Aparente uH	Cor Verdadeira uH	Dureza total mg/L Ca CO <sub>3</sub>	Alcalinidade Total mg/L Ca CO <sub>3</sub>	Condutância Específica µmho/cm	pH	T °C
A	10 a 20	10 a 25	5 a 10	1 a 4	4 a 10	3 a 4	6,5 a 7,5	25
B	60 a 100	150 a 200	30 a 55	10 a 30	25 a 45	7 a 12		

Para a confecção dos diagramas de coagulação foi variada a dosagem do coagulante sulfato de alumínio líquido que possuía concentração de 7,28 % em massa de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e massa específica igual a  $1,304 \text{ g.L}^{-1}$  em relação a diferentes valores de pH, para todas as águas de estudo. Para alterar o pH de coagulação foram utilizadas soluções 0,1 M de ácido clorídrico (HCl) e/ou de hidróxido de sódio (NaOH). Todos os ensaios foram realizados em equipamento de teste de jarros, adotando-se os parâmetros físicos dos ensaios, apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Parâmetros hidráulicos utilizados nos ensaios para ETA Engenho das Lajes.**

Gradiente de Velocidade da mistura rápida ( $s^{-1}$ )	Tempo mistura rápida (s)	Gradiente de Velocidade floculação ( $s^{-1}$ )	Tempo floculação (min)	Sedimentação (min)
150	30	100	15	5

### Descrição da estação de tratamento de água

Na Estação de Tratamento de Água “Engenho das Lajes” utiliza-se um clarificador de contato por manto de lodo suspenso. Esta estação compacta de tratamento de água metálica, de funcionamento sob pressão, decantação acelerada, lodos suspensos, compreende um dispersor hidráulico, destinado a proporcionar a mistura rápida dos reagentes com a água bruta. O coágulo-floco-decantador tubular sob pressão é destinado à coagulação e à remoção dos flocos pelo processo de lodos suspensos. A fim de controlar o processo de coágulo-floco-decantação, lateralmente há três coletores de amostras: câmara de lodos (inferior), câmara de água clarificada (posição superior) e saída para os filtros (parte média superior). Logo após esta etapa a água é dirigida para um filtro de areia dupla ação. Este filtro dispõe frontalmente de distribuidor constituído por tubos, conexões e registros, destinados às operações de filtragem, lavagem e pré-funcionamento do filtro. A dosagem de produtos químicos (sulfato de alumínio, cal, hipoclorito de sódio e polieletrólito) é executada por meio de tanques de preparação, bombas dosadoras e tubulação de adução.

### Determinação dos tempos hidráulicos

Para obtenção do tempo real de detenção hidráulica, utilizou-se a técnica do traçador, a qual, em síntese, constitui-se em alimentar a unidade com massa conhecida de um produto químico selecionado, medindo-se sua concentração na saída da unidade em intervalos regulares de tempo. O tempo médio de detenção hidráulica corresponderá ao tempo de coleta para o qual houve um pico na concentração do traçador.

Di Bernardo (1993) classifica em dois tipos distintos as formas de aplicação do traçador na entrada da unidade de floculação. O primeiro é definido pela aplicação instantânea de uma quantidade pré-determinada do produto químico selecionado, denominado como do tipo pulso. O segundo tipo é caracterizado pela aplicação contínua de uma dosagem definida da solução do traçador. Ressalte-se que o produto químico utilizado deve ser de fácil determinação na água, não tóxico, não adsorvível e conservativo. Em função do exposto, o ácido fluorsilícico foi utilizado com aplicação do tipo pulso. As amostras foram coletadas na saída das unidades de floculação em intervalos regulares de 2 min até que a água floculada apresentasse concentração nula do produto, sendo o início de coleta concomitante com o momento da dosagem do produto selecionado. Ressalte-se ainda que, para evitar distorções, foi determinada, para cada campanha, a concentração do íon flúor na água bruta afluente à estação e na saída dos floculadores, antes da dispersão do produto.

A ETA foi alvo de campanhas de estudo, sendo que, para determinação dos gradientes de velocidade, foram realizados vários ensaios, em que se compararam resultados do pH de coagulação do teste de jarros, concomitante com os dados da ETA. A melhor aproximação destes resultados definiu os gradientes de velocidade para a coagulação-floculação, bem como a velocidade de sedimentação (VS).

### Definição das dosagens ótimas

Definidos os tempos hidráulicos balizadores do trabalho, passaram-se à obtenção da dosagem ótima. A água bruta utilizada nos ensaios foi coletada por meio de uma torneira próxima ao aparelho do teste de jarros, não sendo necessário o seu armazenamento. Os ensaios realizados permitiram a observação do pH ótimo de coagulação, obtendo assim a menor dosagem capaz de produzir a maior eficiência na remoção dos parâmetros de controle, que são turbidez, cor e alumínio.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a unidade de floculação desta estação, os tempos reais médios de detenção hidráulica foram obtidos por meio dos ensaios com traçadores apresentados nas figuras 1 e 2. Admitiu-se para os ensaios conduzidos posteriormente nos reatores estáticos o tempo de detenção hidráulica de 15 minutos para o floculador e 5 minutos para o decantador, determinado pela identificação do pico da concentração do íon fluoreto. A determinação do tempo real médio de detenção hidráulica empregada nesta pesquisa, a partir da simples identificação do ponto de concentração máxima do traçador, é fundamentada em um modelo matemático proposto por CEPIS (1992).

**Figura 1: Ensaio com traçador para tempo de floculação**

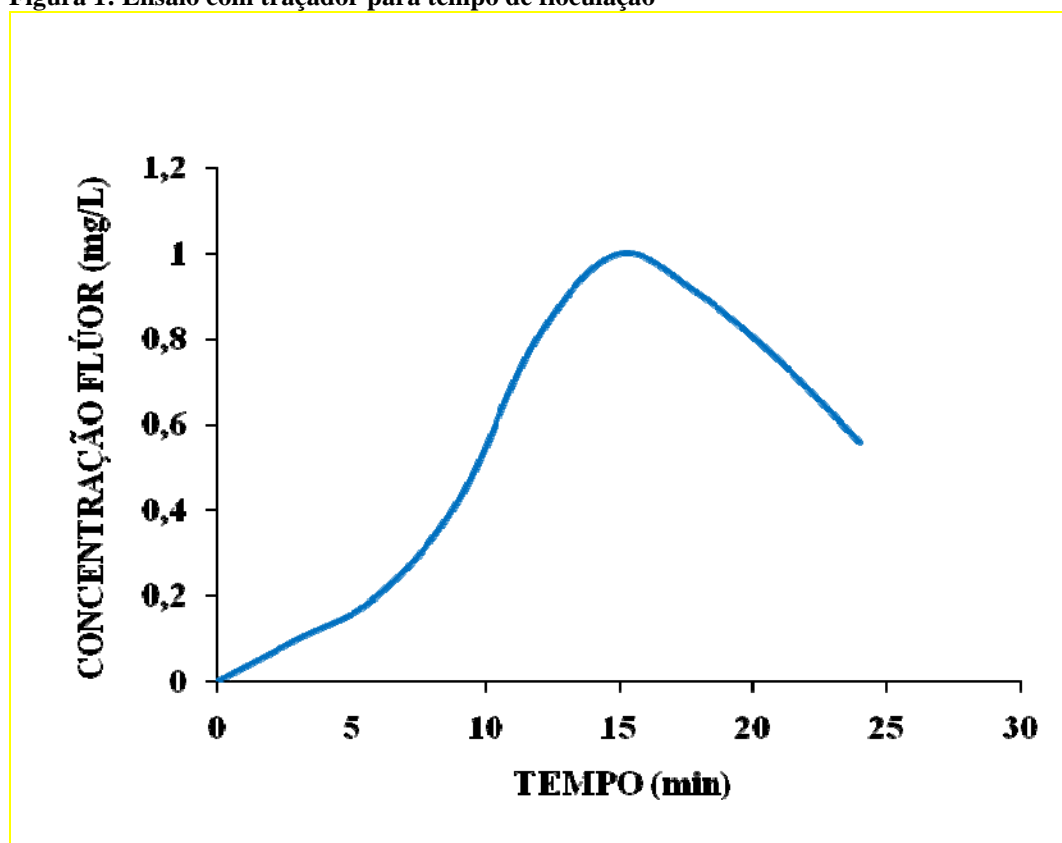
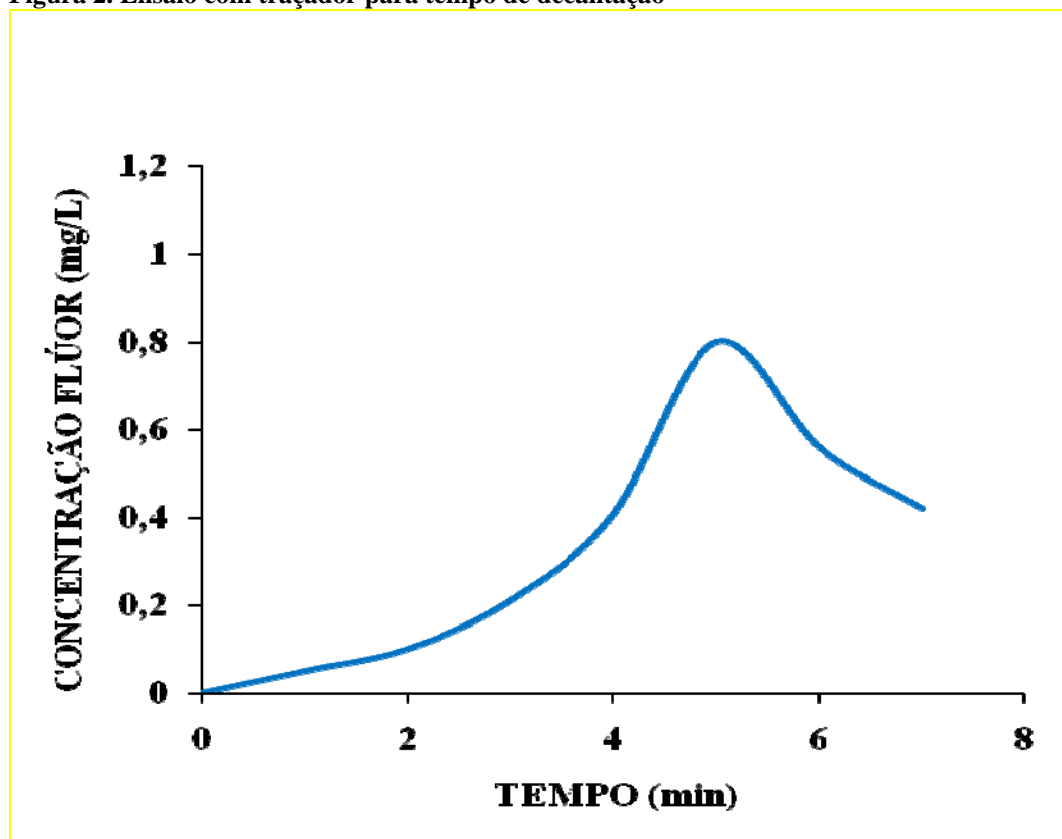




Figura 2. Ensaio com traçador para tempo de decantação



As figuras 3 e 4 apresentam a dosagem de sulfato de alumínio em função do pH de coagulação, em tempo de estiagem (baixa turbidez) e tempo chuvoso (alta turbidez) respectivamente. Bolhas com menor volume representam baixa turbidez. Bolhas azuis são dados coletados dos ensaios com teste de jarros e as vermelhas são dados coletados do processo da própria ETA. À baixa turbidez, o estado de agregação é limitado, pois há um número insuficiente de partículas, no entanto com o aumento da turbidez a eficiência das colisões aumentará, melhorando assim a agregação induzida pela neutralização de carga ou via eletrostática de acordo com Gregory (1973). Sabe-se que a eficiência da coagulação é fortemente dependente das espécies de alumínio na água, sendo que o pH pode afetar significativamente a superfície carregada das partículas e as espécies de alumínio durante a hidrólise. Para valores de pH inferiores a 5 os poli-hidroxocomplexos catiônicos de alumínio constituem as espécies predominantes; para valores de pH compreendidos entre 5 e 8 observa-se a formação preferencial do hidróxido de alumínio, pois estudos sugerem que na presença de matéria orgânica, o  $Al^{3+}$  não hidrolisa a  $Al_13$  em pH neutro de acordo com Gao et al (2005), entretanto transforma-se em  $Al(OH)_3$  segundo Smith (1971), que então remove a matéria orgânica por adsorção e precipitação conforme Huang and Shiu (1996). Valores de pH superiores a 9 haverá um enriquecimento do meio em hidroxocomplexos de  $Al(III)$  de carga negativa conforme DiBernardo (1993).

Figura 3. Dosagem de Sulfato de Alumínio em função do pH de coagulação para tempo de estiagem(baixa turbidez da água bruta)

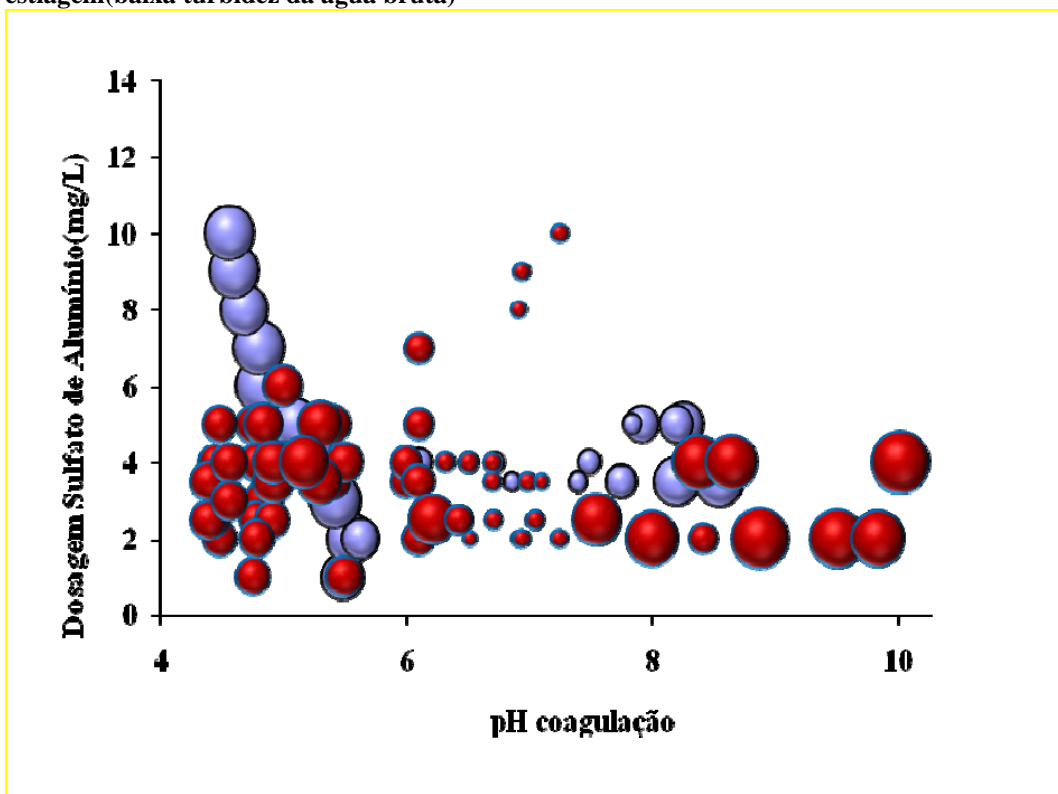
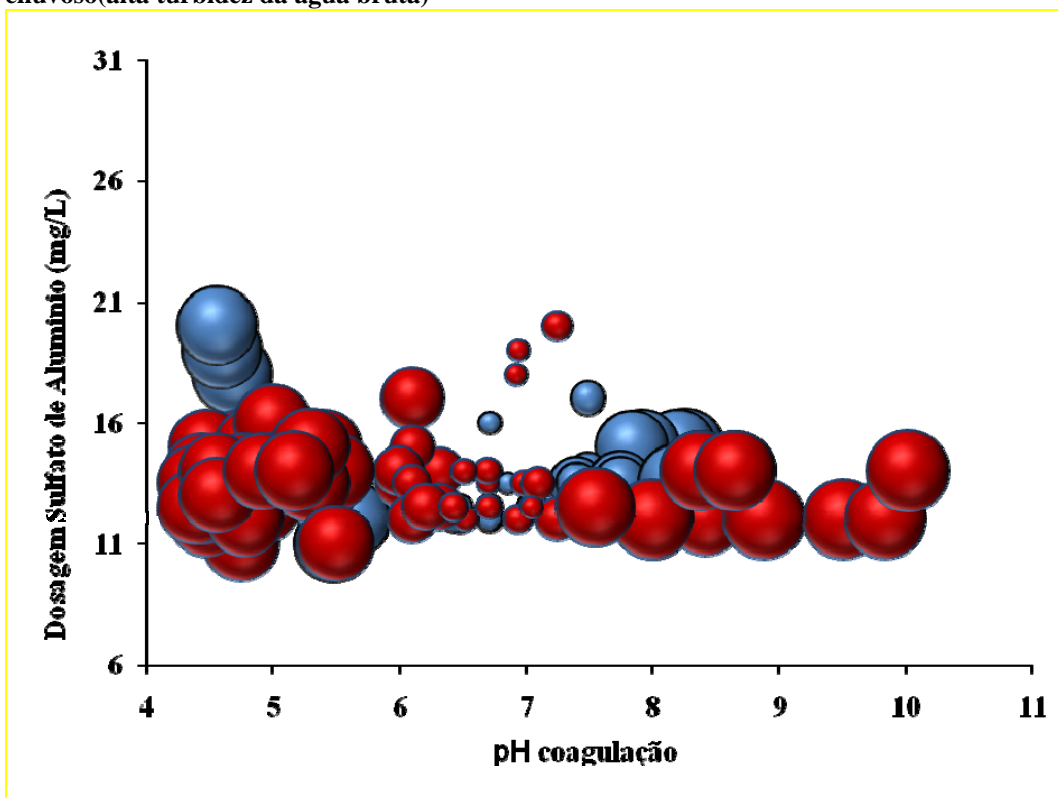


Figura 4. Dosagem de Sulfato de Alumínio em função do pH de coagulação para tempo de chuvoso(alta turbidez da água bruta)

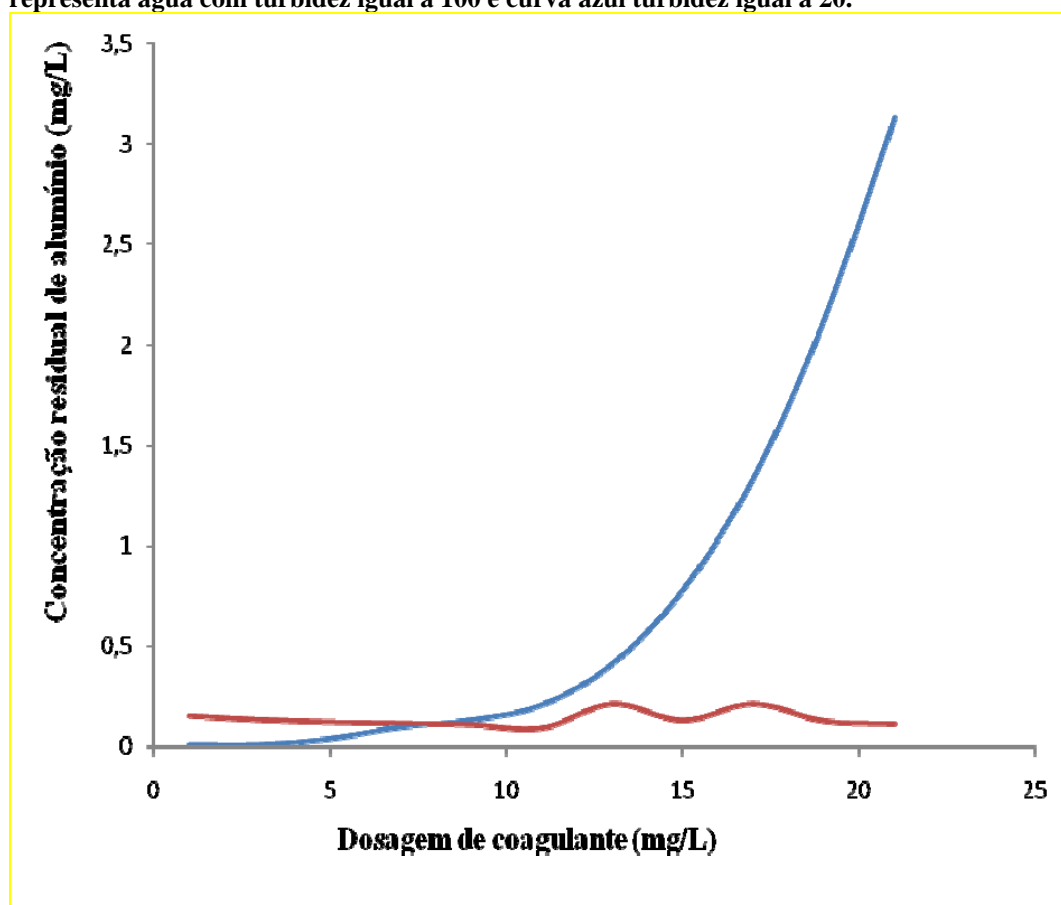




Segundo Amirtharajah (1989) empiricamente é provado que quando se trabalha com água que possua cor alta e turbidez baixa, o pH de coagulação ideal é menor (5,0 a 6,0) do que quando se tem uma água com turbidez alta (7,0 a 8,2), utilizando-se sulfato de alumínio como coagulante. Por meio dos resultados apresentados nas Figuras 3 e 4 observa-se que independente da dosagem de coagulante, a melhor faixa de pH de remoção de turbidez ficou entre 6,5 e 7,2. Verifica-se que nesta região o mecanismo que impera é o de varredura, como proposto por Amirtharajah (1989). Nota-se nos diagramas de coagulação que a melhor região de remoção situou-se na faixa de pH entre 6,5 a 7, independente da turbidez. Pode ser observado nos seus respectivos diagramas de coagulação (Figuras 3 e 4) que a turbidez teve influência nas curvas dos diagramas de coagulação. Para a água da chuva com turbidez maior foi obtido uma curva com bolhas e valores das dosagens de coagulante maiores.

A figura 5 ilustra a concentração de alumínio em função da dosagem de coagulante. Em água com alta turbidez, o aumento da dosagem de coagulante diminui levemente a concentração residual de alumínio, pelo fato que altas dosagens facilitam a formação de grandes flocos podendo adsorver espécies de alumínio com partículas de ácido húmico, formando assim o precipitado. Contudo, como evidenciado na figura 5, curva vermelha, o residual de alumínio flutua bastante, reforçando que o aspecto da remoção de alumínio não é um fenômeno simples e provavelmente procede-se via uma combinação de diferentes mecanismos, incluindo mecanismos de adsorção e precipitação, principalmente para altas dosagens. A curva azul, com turbidez baixa, reforça que para altas dosagens de coagulante, não haverá partículas suficientes para serem adsorvidas causando um excedente de residual de alumínio na solução.

**Figura 5. Residual de alumínio em função da dosagem de coagulante. Curva em vermelho representa água com turbidez igual a 100 e curva azul turbidez igual a 20.**

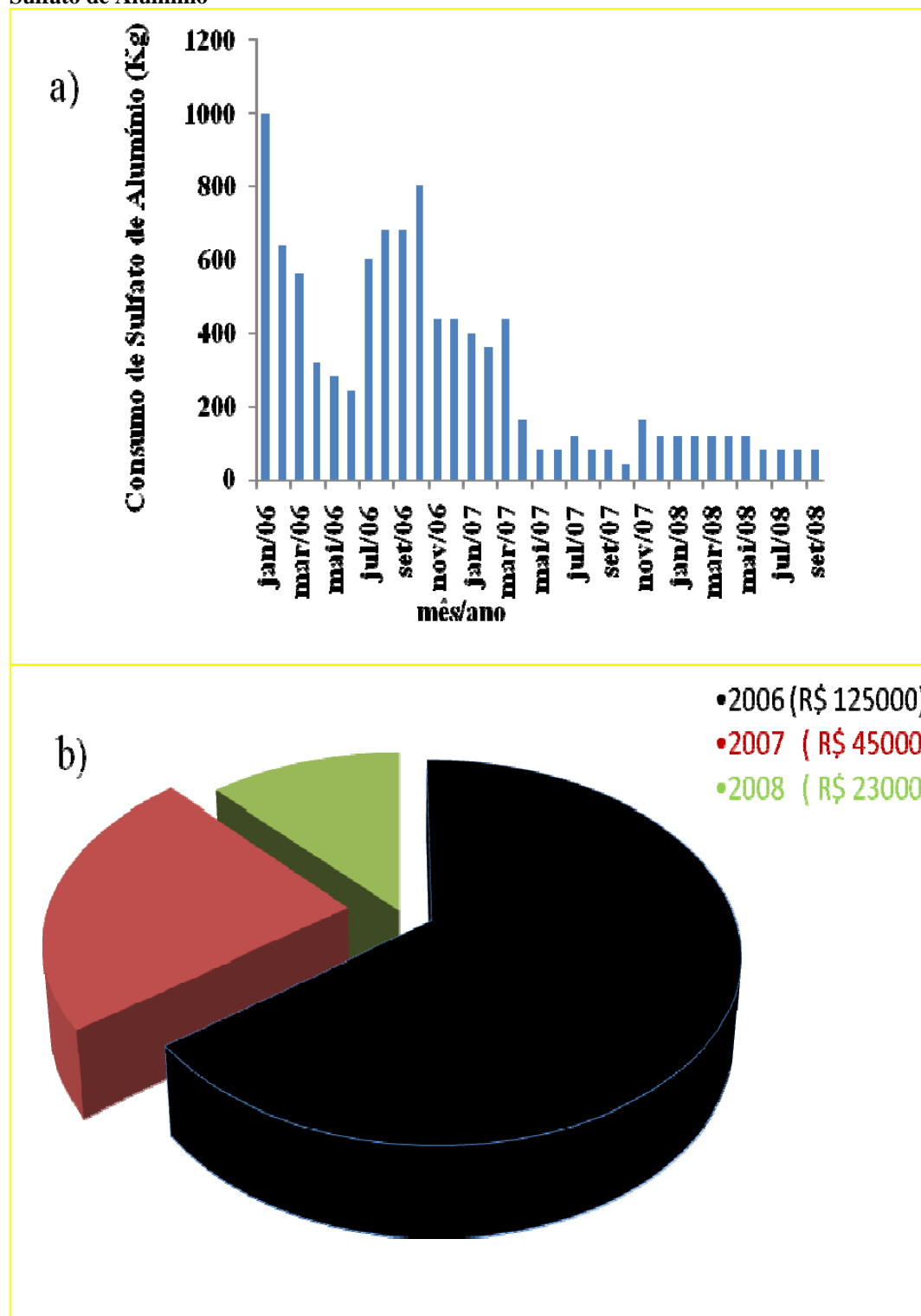


O consumo de coagulante foi rastreado de janeiro 2006 a setembro de 2008. Como observado pela figura 6a há picos e vales intensos no gráfico até março de 2007, sendo estes ocasionados pelas mudanças climáticas do período. De abril de 2007 a setembro de 2008 o consumo de coagulante e conseqüentemente de alcalinizante e polieletrólito diminuíram substancialmente, pois o pH de coagulação foi monitorado diretamente na estação com auxílio do teste de jarros. A figura 6b demonstra o consumo



em reais de 2006 a 2008, considerando apenas os nove primeiros meses de cada ano, evidenciando que o consumo em 2007 e 2008 diminuiu 64 e 81,6% respectivamente em relação a 2006.

Figura 6. a) Consumo de Sulfato de Alumínio de 2006 a 2008; b) Consumo em reais de Sulfato de Alumínio







## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

O tempo de detenção hidráulica real e os gradientes de velocidade médios na unidade de coagulação e floculação mostram a importância na eficiência do tratamento.

A técnica do traçador na avaliação dos tempos reais de detenção hidráulica nos floculadores mostrou-se eficiente e precisa, auxiliando no melhoramento do processo de tratamento da ETA.

O êxito da coagulação trouxe uma diminuição na dosagem do coagulante, assegurando a qualidade do efluente e demonstrando a importância dos ensaios de laboratório na ampliação destes limites.

O monitoramento diário da coagulação contribuiu significativamente para redução de custos, além da redução de residual de alumínio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA & WEF – Standard methods for examination of water and wastewater, 20<sup>th</sup> Edition, 1998.
2. AMITHARAJAH, A. The mechanisms of coagulation. In: TECNOLOGIAS PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS DE BASTECIMENTO, São Carlos, 1989.
3. Programa regional de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano, manual IV, 116 p., Enero, 1992.
4. DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de tratamento de Água - V. I e II. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, Brasil, 1993.
5. EXALL, K.N., VANLOON, G.W., 2000. Using coagulants to remove organic matter. J. Am. Water Works Assoc. 92 (11), 93-102.
6. EDZWALD, J.K., TOBIASON, J.E., 1999. Enhanced coagulation: US requirements and a broader view. Water Sci. Technol. 40 (9), 63-70.
7. GAO, B.Y., CHU, Y.B., YUE, Q.Y., WANG, B.J., WANG, S.G., 2005. Characterization and coagulation of a polyaluminium chloride (PAC) coagulant with high Al13 content. J. Environ. Manage. 76, 143-147.
8. GREGORY, J., 1973. Rates of flocculation of latex particles by cationic polymers. J. Colloid Interf. Sci. 42, 448-456.
9. HUANG, C.P., SHIU, H.L., 1996. Interactions between alum and organics in coagulation. Colloid Surface A 113, 155-163.
10. SMITH, R.W., 1971. Relations among equilibrium and nonequilibrium aqueous species of aluminium hydroxy complexes. Am. Chem. Soc. Adv. Chem. Ser. 106, 250-279.