

I-361 - ENSAIOS DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ DA ÁGUA BRUTA DO RIBEIRÃO PIANCÓ, ANÁPOLIS, GOIÁS, EM PERÍODO CHUVOSO**Patrícia Freitas Góis⁽¹⁾**

Química Industrial pela Universidade Estadual de Goiás (UEG). Mestranda do Programa de Mestrado em Engenharia Agrícola na área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas (UnUCET/UEG). Técnica em Saneamento atuando na Estação de Tratamento de Água de Anápolis na empresa de Saneamento de Goiás (SANEAGO).

Laís Simões de Moura

Química Industrial pela Universidade Estadual de Goiás (UnUCET/UEG).

Orlene Silva da Costa

Engenheira Química pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Doutora em Engenharia Civil, na área de Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Professora da Química Industrial e do Programa de Mestrado em Engenharia Agrícola (UnUCET/UEG). Professora da Especialização em Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG). Consultora na área de meio ambiente.

Endereço⁽¹⁾: Rua Venezuela nº 155 – Jardim das Américas - Anápolis - GO - CEP: 75070-310 - Brasil - Tel: +55 (62) 3318-1849 - Fax: +55 (62) 3318-1849 - e-mail: patriciafreitas@saneago.com.br.

RESUMO

A estação de tratamento de água para abastecimento da cidade de Anápolis, Goiás (ETA de Anápolis-GO), opera em ciclo completo (pré-tratamento, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoreação e correção de pH), na sua capacidade limite, tratando uma vazão de água de 890 L.s⁻¹, e atualmente está em fase de projeto de ampliação para atender uma vazão máxima de 1.200 L.s⁻¹. A inexistência de diagramas de coagulação na ETA de Anápolis motivou o desenvolvimento de uma série de ensaios em escala de bancada para remoção de turbidez da água de captação do Ribeirão Piancó. Deste modo, ensaios de coagulação, floculação e sedimentação em *jar test*, simulando as condições da planta de tratamento de água de Anápolis, foram realizados em novembro de 2010, mês climatológico caracterizado como chuvoso. Os meses de outubro a abril são considerados como época das chuvas no cerrado goiano, cujos valores de turbidez da água bruta do Ribeirão Piancó são normalmente superiores a 20 uT. Este trabalho teve por objetivo determinar as melhores dosagens de sulfato de alumínio a ser utilizada na ETA de Anápolis, em período chuvoso, por meio do diagrama de coagulação/floculação/sedimentação. Os ensaios de *jar test* forneceram os valores de dosagem de sulfato de alumínio, pH de coagulação e turbidez remanescente necessárias à construção do diagrama de coagulação/floculação/sedimentação, onde foi previsto para uma turbidez média de água bruta do Ribeirão Piancó de 33,2 uT, uma dosagem na faixa de 10 - 22 mg.L⁻¹ e pH de coagulação de 6,5 - 7,0 para tratar a água afluyente à ETA de Anápolis, com grau de eficiência acima de 83 %. Seguindo os prognósticos do diagrama de coagulação/floculação/sedimentação, obtidos dos ensaios em escala de bancada, uma dosagem constante de 16,0 mg.L⁻¹ foi testada na planta de tratamento de água de Anápolis, para uma água com turbidez que oscilou entre 35,1 e 39,7 uT. A dosagem teste resultou numa turbidez remanescente de 0,51 - 0,64 uT na saída de água dos filtros, atendendo as exigências da Portaria do Ministério da Saúde 518/2004, cujo grau de eficiência do tratamento da água bruta alcançou patamares acima de 98 %.

PALAVRAS-CHAVE: água, turbidez, coagulação, Ribeirão Piancó, Anápolis.

INTRODUÇÃO

A estação de tratamento de água para abastecimento público da cidade de Anápolis, Goiás (ETA de Anápolis/GO), opera em ciclo completo ou convencional, com as seguintes etapas de tratamento: pré-tratamento, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoreação e correção de pH. Atualmente a ETA de Anápolis/GO está operando na sua capacidade limite de 890 L.s⁻¹, e está em fase de projeto de ampliação para atender uma capacidade máxima de 1.200 L.s⁻¹. A concepção do projeto de ampliação prevê a inclusão de uma tecnologia de tratamento alternativa, a filtração direta, além da tecnologia de ciclo completo, pois a finalidade é atender à variabilidade sazonal das impurezas na água nos períodos de seca e chuva, uma vez

que, nos períodos de seca a turbidez normalmente se encontra com valores abaixo de 20 unidades de turbidez (uT), e nos períodos chuvosos a turbidez aumenta para valores acima de 20 uT. Esta variabilidade sazonal influencia a eficiência do tratamento de ciclo completo, bem como seus custos operacionais.

Em fase da concepção do projeto de ampliação da ETA de Anápolis/GO, incitou-se o desenvolvimento de estudos relacionados à tratabilidade da água bruta do Ribeirão Piancó, sendo a primeira delas relativa ao tratamento químico de coagulação no período chuvoso. Época do ano em que, supostamente, tem-se a condição de tratabilidade mais propícia ao tratamento por ciclo completo.

A prática operacional da ETA de Anápolis/GO tem revelado que a variabilidade sazonal das impurezas na água bruta do Ribeirão Piancó, o manancial superficial de captação da estação de tratamento, nas formas de cor e turbidez, nos períodos de seca e chuva interferem nos processos de tratabilidade da água em ciclo completo. O que implica no aumento da dosagem de coagulante quando a cor e turbidez aumentam. Apesar disso, a eficiência na remoção da turbidez da água de bruta por esta tecnologia de tratamento não varia nas épocas de seca e chuva. Entretanto, Di Bernardo e Sabogal (2008) entre outros pesquisadores, recomendam a tecnologia de filtração direta nos casos de turbidez abaixo de 20 uT, ocorrência mais comumente observada no período de estiagem. A adoção desta alternativa de tecnologia de tratamento, além do tratamento convencional, geraria uma economia de processo.

Sistema de abastecimento público de água de Anápolis

O abastecimento público de água da cidade de Anápolis é realizado pela empresa Saneamento de Goiás (SANEAGO), atendendo uma população de aproximadamente 302.290 habitantes, cerca de 92,5 % da população urbana. O sistema de abastecimento de água (SAA) de Anápolis é composto de quatro sistemas de produção de água denominados: 1) Sistema Piancó I, sendo que o principal manancial de captação é o Ribeirão Piancó, cuja vazão de adução atualmente está na ordem de 890 L.s^{-1} ; 2) Sistema Piancó II, manancial de captação suporte, de onde se retira água do Rio Anicuns; 3) Sistema de poços profundos, contribuindo com 25 a 30 L.s^{-1} ; e 4) Sistema Distrito Agroindustrial de Anápolis (DAIA), participando com até 130 L.s^{-1} , sendo esta parcela de água comprada pela concessionária de tratamento de água de Anápolis (Prefeitura Municipal de Anápolis, 2011).

Diagrama de coagulação

Os diagramas de coagulação, desenvolvidos por Amirtharajah e Mills (1982), são ferramentas úteis para determinar as condições físico-químicas em que ocorre a coagulação. Esta ferramenta é geralmente empregada para os seguintes fins: 1) Determinar as dosagens de coagulante em escala de bancada ou piloto para comparação entre tecnologias de tratamento que envolva o processo de coagulação; 2) Avaliar e interpretar estudos em escala de bancada ou real; e 3) Prever as melhores dosagens de coagulante obtidas na escala de bancada ou piloto para transposição para escala real (Silva, 2008; Campos, Di Bernardo, Vieira, 2005; Pavanelli, 2001; Saron, 2000).

Os diagramas de coagulação são, em geral, desenvolvidos por meio de ensaios em *jar test* para execução do processo de coagulação, seguido das operações de: 1) Floculação e sedimentação; 2) Floculação e flotação; 3) Floculação e Filtração; ou 4) Filtração. A partir desses ensaios se obtêm as variações das dosagens de coagulante em função do pH de coagulação, onde são delimitadas as regiões dos valores remanescentes de cor e turbidez. Estas regiões irão predizer as condições de menores dosagens de coagulante e melhores faixas de pH de coagulação para se obter os menores valores remanescente de cor e turbidez.

Este trabalho teve como objetivo principal, a determinação da melhor dosagem de sulfato de alumínio a ser utilizada na ETA de Anápolis em período chuvoso. As metas alcançadas foram: 1) Construção do diagrama de coagulação, para identificação da região de maior remoção de turbidez; 2) Determinação da melhor dosagem de coagulante, para faixa de pH de melhor remoção de turbidez obtida no diagrama de coagulação; e 3) Avaliação da eficiência da remoção de turbidez da água bruta do Ribeirão Piancó na planta de tratamento de água, para melhor dosagem de coagulante.

MATERIAL E MÉTODOS

A água bruta do manancial de captação da ETA de Anápolis, Ribeirão Piancó, foi submetida aos ensaios de *jar test* no mês de novembro de 2010, mês climatológico considerado como início do período chuvoso no município de Anápolis – Goiás, como ilustrado na Figura 1. Segundo o histórico de turbidez para o ano de 2010, dados gentilmente fornecidos pela Saneago, observa-se que os valores médios mensais de turbidez da água bruta do Ribeirão Piancó, identificaram cinco meses (maio, junho, julho, agosto e setembro) com valores de turbidez menores que 20 uT, correspondendo ao período de estiagem, enquanto que, sete meses (outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril) equivaleram aos valores médios de turbidez acima de 20 uT.

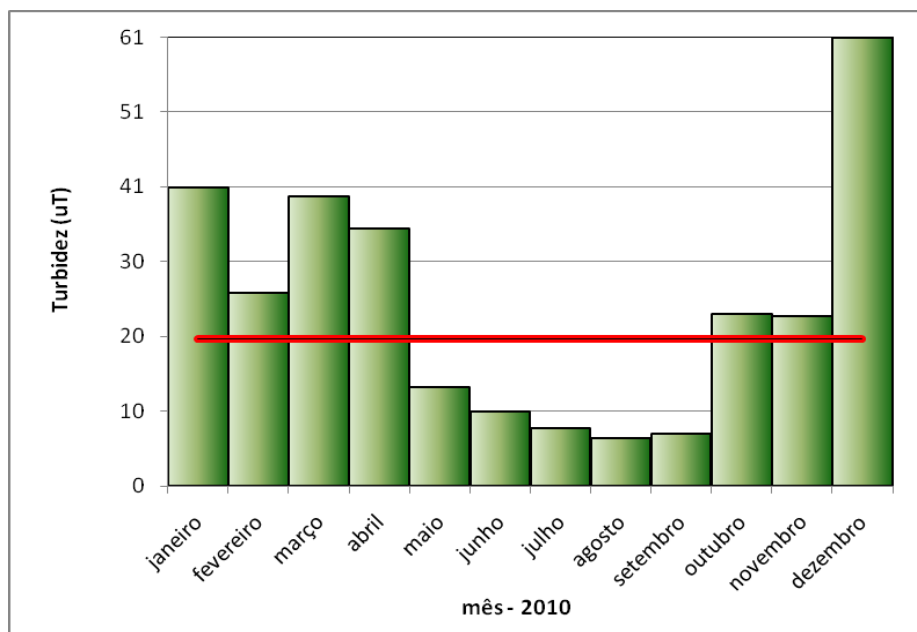


Figura 1: Turbidez média mensal da água bruta do Ribeirão Piancó, Anápolis, no ano de 2010.

Coleta e armazenamento da água bruta e preparo das soluções reagentes

A água bruta do Ribeirão Piancó utilizada nos ensaios de *jar test* foi coletada na linha da adutora, mesmo ponto de amostragem para caracterização da água bruta em análises rotineiras da estação, localizado antes da caixa de recepção da ETA de Anápolis. Aproximadamente 50 L de água bruta foram coletados e armazenados em uma bombona de polietileno, a fim de ser transportada para o laboratório de ensaios, sendo que o tempo de armazenamento não excedeu 24 horas.

As soluções reagentes de hidróxido de cálcio, utilizada na alcalinização da água bruta nos ensaios de *jar test*, e de sulfato de alumínio, empregada na coagulação, foram preparadas com as concentrações de 10,0 g.L⁻¹ e 1 % (m/v), respectivamente. Esses reagentes químicos foram os mesmos empregados na estação de tratamento de água de Anápolis/GO.

Ensaios de *jar test*

Os ensaios em equipamento de *jar test* foram conduzidos fundamentados na metodologia prescrita por Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002). A sequência de fenômenos transcorridos nos ensaios de *jar test* foi desenvolvida similarmente as transformações da água bruta na planta de tratamento de água de Anápolis, onde a coagulação ocorre na calha Parshall; a floculação se desenvolve na série de floculadores devido ao gradiente de velocidade de rotação decrescente das palhetas verticais; e a sedimentação dos flocos acontece nos decantadores de fluxo ascendente de alta taxa. Deste modo, estabeleceram-se as condições de operação do equipamento *jar test* como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de operação do *jar test* empregadas nos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação em escala de bancada.

Tipo de agitação	Processo	Gradiente de velocidade (s^{-1})	Tempo (min)
Mistura rápida	Coagulação	100	1
Mistura rápida	Floculação rápida	60	5
Mistura média	Floculação média	40	5
Mistura lenta	Floculação lenta	30	10
Sem agitação	Sedimentação ($V_s^* = 3,5 \text{ cm.min}^{-1}$)	0	2

* V_s = velocidade de sedimentação

Após o estabelecimento das condições de operação do *jar test*, os parâmetros de temperatura, pH e turbidez da água bruta do Ribeirão Piancó foram medidos, equivalendo aos valores de 22,5 °C, 7,03 e 33,2 uT, respectivamente. Tanto a turbidez média mensal do ano de 2010 para o início do período chuvoso (> 20 uT), como ilustrado na Figura 1, quanto a turbidez da água bruta do dia a ser analisada (33,2 uT), foram os critérios adotados para a escolha da faixa de dosagem de sulfato de alumínio a ser testada na bateria de ensaios de *jar test*. Além disso, adotaram-se as faixas de dosagem de sulfato de alumínio recomendadas pelo manual da CETESB (1973) para ensaios de *jar test*. Desta forma, foi utilizada a faixa de turbidez de 15 a 40 uT, correspondente as dosagens de 8,0 a 25,0 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio (Tabela 2).

Tabela 2: Dosagem do coagulante sulfato de alumínio recomendada em função da turbidez da água nos ensaios de *jar test*.

Turbidez (uT)	Dosagem em mg.L ⁻¹		
	Mínima	Média	Máxima
10	5,0	10,0	17,0
15	8,0	14,0	20,0
20	11,0	17,0	22,0
30	12,0	18,0	23,5
40	13,0	19,0	25,0
50	13,5	20,0	26,5
60	14,0	21,0	28,0
70	14,5	21,5	29,0
80	15,0	22,0	30,0
90	15,5	23,0	31,0

Fonte: CETESB (1973).

Todavia, este binômio turbidez da água e dosagem de sulfato de alumínio apresentado na Tabela 2, teve sua origem em São Paulo, onde as condições operacionais e características da água bruta de captação das ETA do estado de São Paulo são bastante distintas da ETA de Anápolis. Este foi mais um motivo para escolha da amplitude da faixa de turbidez e dosagem de coagulante.

Sete ensaios de *jar test* foram conduzidos mantendo-se constante as dosagens de sulfato de alumínio [Al₂(SO₄)₃], o coagulante, e variando os volumes de hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂], a cal. As dosagens constantes de coagulante foram: 8,0 mg.L⁻¹; 10,0 mg.L⁻¹; 12,5 mg.L⁻¹; 16,0 mg.L⁻¹; 18,0 mg.L⁻¹; 21,5 mg.L⁻¹ e 25,0 mg.L⁻¹ e os volumes variados da cal foram: 0 mL; 1 mL; 2 mL; 3 mL; 4 mL e 5 mL. Seis ensaios de *jar test* corresponderam a um conjunto de seis jarros de diferentes condições de tratabilidade da água, e um ensaio de *jar test* foi realizado com apenas 5 jarros, perfazendo um total de 41 condições experimentais (Tabela 3).

Tabela 3: Condições químicas dos ensaios em *jar test*, especificando as dosagens do coagulante sulfato de alumínio (1%) e os volumes do alcalinizante hidróxido de cálcio (10 g.L⁻¹).

	1º Ensaio		2º Ensaio		3º Ensaio		4º Ensaio	
	Coagulante (mg.L ⁻¹)	Cal (mL)	Coagulante (mg.L ⁻¹)	Cal (mL)	Coagulante (mg.L ⁻¹)	Cal (mL)	Coagulante (mg.L ⁻¹)	Cal (mL)
1º Jarro	8,0	0,0	10,0	0,0	12,5	0,0	16,0	0,0
2º Jarro	8,0	1,0	10,0	0,5	12,5	1,0	16,0	1,0
3º Jarro	8,0	2,0	10,0	1,0	12,5	2,0	16,0	2,0
4º Jarro	8,0	3,0	10,0	1,5	12,5	3,0	16,0	3,0
5º Jarro	8,0	4,0	10,0	2,0	12,5	4,0	16,0	4,0
6º Jarro	8,0	5,0	10,0	2,5	12,5	5,0	16,0	5,0

	5º Ensaio		6º Ensaio		7º Ensaio	
	Coagulante (mg.L ⁻¹)	Cal (mL)	Coagulante (mg.L ⁻¹)	Cal (mL)	Coagulante (mg.L ⁻¹)	Cal (mL)
1º Jarro	18,0	0,0	21,5	0,0	25,0	0,0
2º Jarro	18,0	1,0	21,5	1,0	25,0	1,0
3º Jarro	18,0	2,0	21,5	2,0	25,0	2,0
4º Jarro	18,0	3,0	21,5	3,0	25,0	3,0
5º Jarro	18,0	4,0	21,5	4,0	25,0	4,0
6º Jarro	18,0	5,0	21,5	5,0	-	-

Após dois minutos de sedimentação, as amostras de cada jarro foram coletadas em cada uma das sete baterias de ensaios. As amostras coletadas foram submetidas às análises físico-químicas de pH e turbidez, conforme a metodologia estabelecida pelo *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (AWWA, APHA, WPCI, 1998).

Elaboração do diagrama de coagulação/floculação/sedimentação

À medida que os tríplices parâmetros: 1) Dosagem de coagulante; 2) pH de coagulação; e 3) Turbidez remanescente, eram determinados, um gráfico bidimensional da dosagem de coagulante em função do pH de coagulação e turbidez remanescente, denominado de diagrama de coagulação, era gerado por um meio do *software 3D Field* versão 3.3.8. O gráfico elaborado pelo *software 3D Field* delimitou as regiões de menor turbidez remanescente para as melhores dosagens do coagulante de sulfato de alumínio, bem como a faixa de pH de coagulação.

Ensaios de *jar test* com base nas informações do diagrama de coagulação de sulfato de alumínio

Fundamentado no diagrama de coagulação, foram realizados dois novos ensaios de *jar test* para a mesma amostra de água bruta. Desta vez o objetivo foi testar valores intermediários de dosagens de coagulante utilizados na elaboração do diagrama base, dentro da faixa de pH de melhor remoção de turbidez. Assim, as dosagens de 9,0 mg.L⁻¹; 11,0 mg.L⁻¹; 14,0 mg.L⁻¹; 20,0 mg.L⁻¹ e 23,0 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio foram escolhidas como valores intermediários. Em seguida foram adicionados os volumes de 0,5 mL a 1,0 mL de cal, a fim de manter o pH na faixa de melhor remoção de turbidez, possibilitando a comparação entre a remoção de turbidez prevista no diagrama de coagulação/floculação/ sedimentação e os dados dos novos ensaios (Tabela 4).

Tabela 4: Condições químicas de dosagens de coagulante e pH em função do diagrama de coagulação.

	8º Ensaio		9º Ensaio	
	Coagulante (mg.L ⁻¹)	Cal (mL)	Coagulante (mg.L ⁻¹)	Cal (mL)
1º Jarro	9,0	0,5	13,0	1,0
2º Jarro	9,0	1,0	14,0	1,0
3º Jarro	11,5	1,0	20,0	1,0
4º Jarro	-	-	23,0	1,0

Transposição dos ensaios de *jar test* para ETA de Anápolis/GO

A transposição da similaridade dos fenômenos físico-químicos ensaiados em *jar test*, em nível de bancada, foi testada na planta da estação de tratamento de água, em escala real, a partir do diagrama de coagulação/floculação/sedimentação, de acordo com o seguinte procedimento: 1) Identificação das regiões iguais ou maiores a 90 % de eficiência na remoção de turbidez da água bruta; e 2) Avaliação das condições químicas dessas regiões, quanto à escolha da melhor opção relativa ao custo/benefício no uso dos produtos químicos.

Após a definição das dosagens de cal e sulfato de alumínio, com base no diagrama de coagulação/floculação/sedimentação, comparou-se a dosagem escolhida com a faixa de dosagem de coagulante recomendadas pela SANEAGO. Como por exemplo, na rotina operacional da ETA de Anápolis, quando a água bruta chega à estação com uma turbidez de 30 uT é utilizada uma faixa de dosagem de 8,0 a 21,5 mg.L⁻¹, sendo permitida uma dosagem mínima de 8 mg.L⁻¹, uma dosagem média de 16,0 mg.L⁻¹ e finalmente uma dosagem máxima de 21,5 mg.L⁻¹.

Com base nessas informações, aguardou-se então, o dia em que a turbidez da água bruta do Ribeirão Piancó chegasse à ETA de Anápolis, acima de 30 uT. Assim, em 29 de abril de 2011, ainda em período chuvoso, quando a turbidez chegou a 35,1 uT, testou-se a dosagem de sulfato de alumínio predita pelo diagrama de coagulação/floculação/sedimentação dos ensaios de bancada, dando-se início à dosagem teste exatamente às 07:50 h. Durante o período de aplicação da dosagem de sulfato de alumínio na calha Parshall da ETA de Anápolis, local de mistura rápida na etapa de coagulação, a ETA foi monitorada para eliminar quaisquer riscos de comprometimento da qualidade da água tratada. Este controle foi realizado por meio de um turbidímetro a cada 30 minutos de operação nos seguintes pontos: 1) Linha da adutora, na chegada da água bruta; 2) Saída de água tratada dos quatro decantadores; e 3) Saída de água filtrada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sete primeiros ensaios de *jar test* produziram o primeiro diagrama de coagulação/floculação/sedimentação, com emprego de sulfato de alumínio, para tratabilidade da água bruta do Ribeirão Piancó, Anápolis/GO, a uma turbidez média de 33,2 uT, em período chuvoso. A partir deste diagrama, foram previstos outros dois ensaios de *jar test* para complementar as informações de dosagem de coagulante e pH de coagulação na região de menor turbidez remanescente.

Primeiro diagrama de coagulação/floculação/sedimentação para sulfato de alumínio

O diagrama de coagulação/floculação/sedimentação, ilustrado na Figura 2, apresenta as dosagens de sulfato de alumínio, em mg.L⁻¹, em função do pH de coagulação e da turbidez remanescente. Sendo o eixo x correspondente ao pH de coagulação, o eixo y equivalente às dosagens de sulfato de alumínio e a escala na lateral direita do diagrama, a turbidez remanescente. As cores da escala lateral representam as curvas de turbidez remanescente que delimitam as faixas do pH de coagulação.

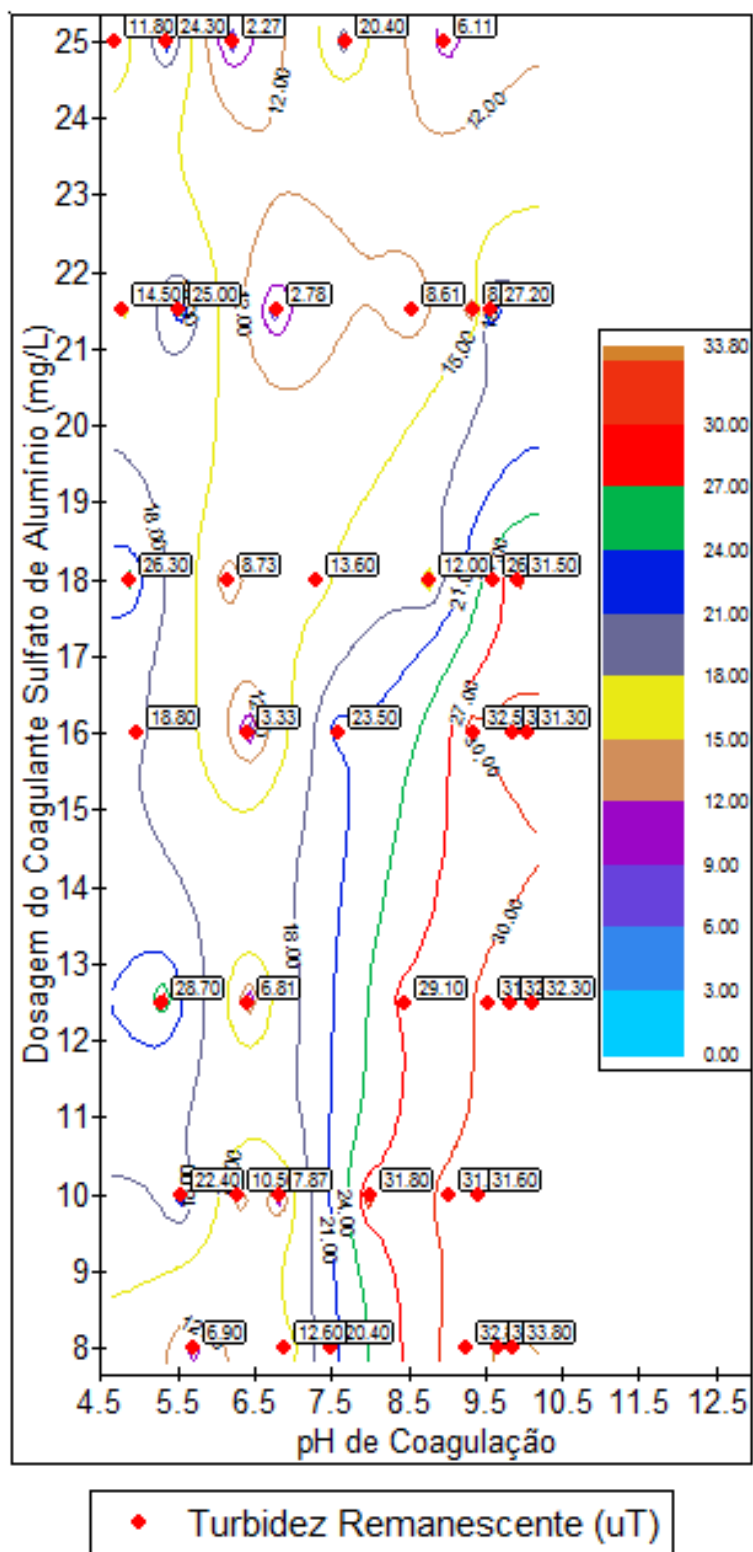


Figura 2 – Diagrama base de coagulação/floculação/sedimentação para sulfato de alumínio dosado na água bruta do Ribeirão Piancó, Anápolis/GO.

As curvas que delimitaram a faixa de remoção de pelo menos 50 % de turbidez da água bruta, representada pela região interna às linhas amarelas do diagrama (Figura 2), igual a 15 uT, indicaram também a faixa de pH de coagulação compreendida entre 5,5 a 7,0 aproximadamente. Sendo esta uma ampla faixa de pH que poderá ser trabalhada em futuros ensaios realizados com a água bruta do Ribeirão Piancó. Entretanto, a informação isolada do pH, não é garantia de elevada eficiência para remoção de turbidez, conforme pode ser observado no ponto

de pH 5,5 e dosagem de coagulante igual a 25,0 mg.L⁻¹, cuja turbidez é 24,3 uT. Neste caso, pode-se presumir que a elevada dosagem de coagulante conferiu turbidez à água.

Novos ensaios de *jar test* para complementação do diagrama de coagulação/floculação/sedimentação

Os resultados dos novos ensaios adicionais, para complementação do diagrama de coagulação/floculação/sedimentação, foram obtidos utilizando-se as concentrações intermediárias de sulfato de alumínio daquelas empregadas na elaboração do primeiro diagrama de coagulação/floculação/sedimentação da Figura 2. As concentrações intermediárias de Al₂(SO₄)₃ foram: 9,0; 11,5; 13,0; 14,0; 20,0 e 23,0 mg.L⁻¹ para uma faixa de pH de 5,5 a 7,0, de eficiência na remoção da turbidez acima de 50 %.

Os novos ensaios produziram sete condições experimentais de tratabilidade de água cujos pares (dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação) foram utilizados na construção do segundo diagrama de coagulação/floculação/sedimentação. A partir desses pontos, foi possível supor a faixa de eficiência de remoção de turbidez da água em função das regiões delimitadas no diagrama, como demonstrado na 6ª coluna da Tabela 5.

Tabela 5: Novos ensaios de *jar test* com base nas informações do primeiro diagrama de coagulação/floculação/sedimentação para sulfato de alumínio.

Ensaio / Nº do jarro	Turbidez z inicial (uT)	Dosagem de Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg.L ⁻¹)	pH de coagulação	Turbidez final (uT)	Faixa de eficiência de remoção da turbidez esperada (%)	Eficiência de remoção de turbidez obtida (%)
8º / 1º	33,2	9,0	6,74	5,5	45,8 – 54,8	83,4
8º / 2º**	33,2	9,0	5,71	16,2	45,8 – 54,8	51,2
8º / 3º	33,2	11,5	6,55	5,6	45,8 – 54,8	83,0
9º / 1º*	33,2	13,0	6,67	4,1	63,9 – 72,9	87,6
9º / 2º	33,2	14,0	6,84	5,5	54,8 – 63,9	83,5
9º / 3º	33,2	20,0	6,71	2,9	54,8 – 63,9	91,1
9º / 4º	33,2	23,0	6,93	5,1	54,8 – 63,9	84,8

Das sete dosagens realizadas, seis condições experimentais apresentaram eficiência na remoção da turbidez da água acima do esperado; sendo que, a faixa esperada como a de maior remoção (63,9 a 72,9 %) para o ensaio 9º / 1º*, foi obtida uma remoção de turbidez efetiva de aproximadamente 87,6 %, equivalente a segunda maior eficiência.

O único ensaio onde se obteve uma eficiência de remoção de turbidez dentro da faixa esperada foi o ensaio 8º / 2º**, para o qual era esperada uma eficiência de remoção de turbidez entre 45,8 e 54,8 %, cuja eficiência de remoção obtida foi 51,2 %. Este ensaio também merece destaque por apresentar uma eficiência de remoção de turbidez inferior aos demais, que apresentaram eficiência entre 83,0 e 91,1 %. Uma importante característica nesta condição experimental, foi um valor de pH de coagulação abaixo de 6,0.

Entretanto, quando se comparam os ensaios de números 8º / 1º e 8º / 2º, cujas dosagens de sulfato de alumínio foram iguais a 9,0 mg.L⁻¹, verifica-se que tanto os pH de coagulação, quanto as eficiências de remoção de turbidez foram 6,74 e 5,71, e 83,4 e 51,2 %, respectivamente. Sugerindo que, para um pH de coagulação menor do que 6,0, existe o favorecimento das partículas coloidais se tornarem positivas devido à re-estabilização das cargas. Esta condição ocorreria porque a presença dos íons sulfatos (SO₄²⁻) e de alumínio promoveriam o aprisionamento dos colóides da água (H₂O), formando os complexos positivos de Al(H₂O)SO₄⁺ (Di Bernardo, 1993, *apud* Pavanelli, 2001).

As condições químicas experimentais de bancada parecem informar que os melhores intervalos para a tratabilidade da água do Ribeirão Piancó com uma turbidez em torno de 30 uT, são as seguintes: pH de 6,5 – 7,0 e dosagem de sulfato de alumínio de 12 – 20 mg.L⁻¹.

Segundo diagrama de coagulação/floculação/sedimentação para sulfato de alumínio

Os dados de dosagem de sulfato de alumínio, pH de coagulação e turbidez remanescente da Tabela 5 foram adicionados ao primeiro diagrama de coagulação/floculação/sedimentação, resultando num segundo diagrama de coagulação/floculação/sedimentação (Figura 3).

Comparando-se as Figuras 2 e 3, verifica-se que dos seis pontos equivalentes às eficiências de remoção de turbidez superiores a 80 %, proporcionou o aparecimento de nova curva delimitadora de turbidez, desta vez de cor marrom, cujo valor foi igual a 12 uT. Esta curva de turbidez 12 uT também delimitou uma faixa de pH entre 5,5 a 7,0, encerrando uma região de turbidez remanescentes abaixo de 9 uT.

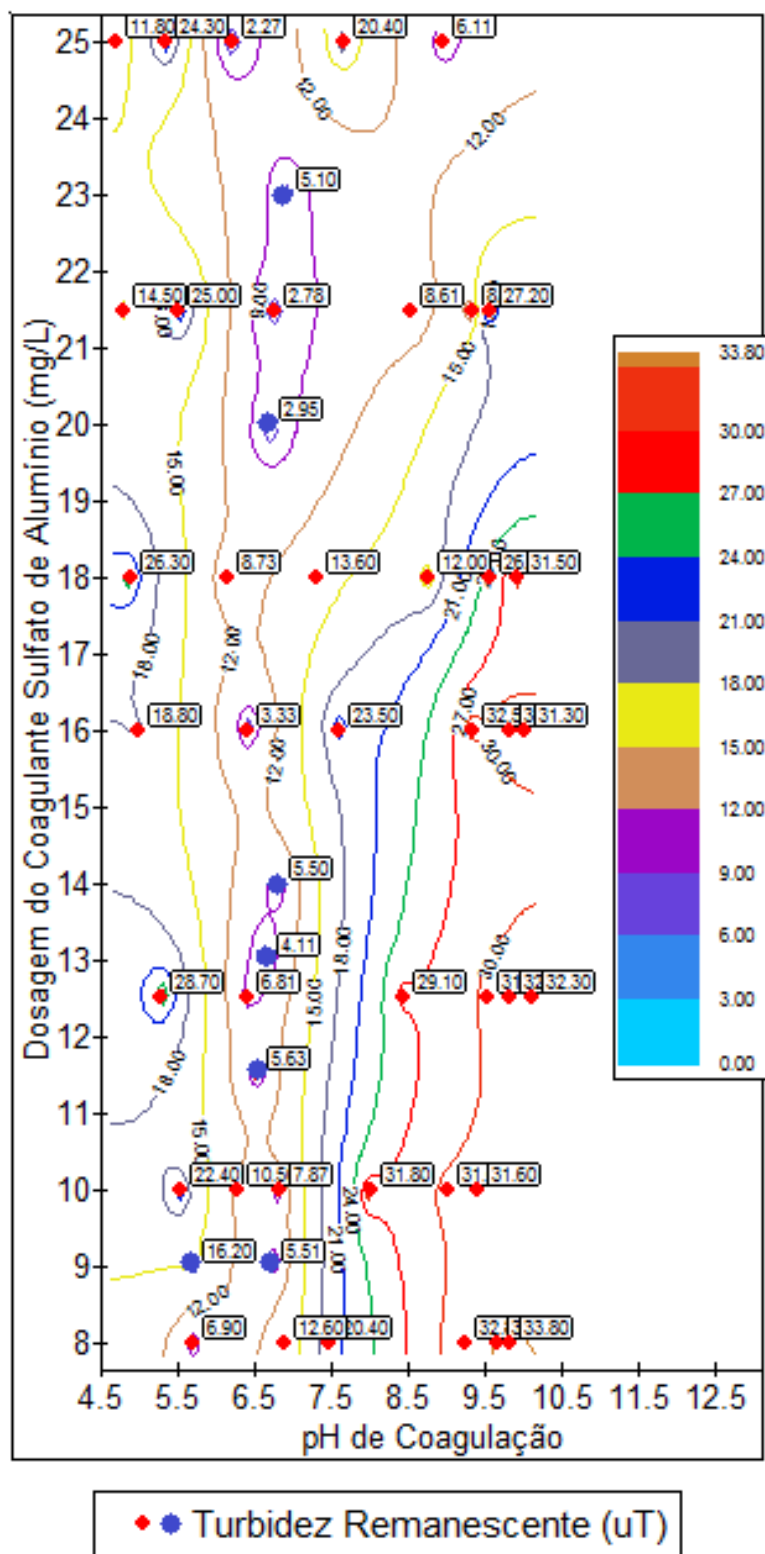


Figura 3: Diagrama final de coagulação/floculação/sedimentação para sulfato de alumínio dosado na água bruta do Ribeirão Piancó, Anápolis/GO.

Emprego do diagrama de coagulação/floculação/sedimentação na ETA de Anápolis/GO

Os valores de turbidez remanescente menores ou iguais a 3,3 uT foram selecionadas no diagrama de coagulação/floculação/sedimentação da Figura 3, onde foram estimadas as dosagens de sulfato de alumínio para uma eficiência de remoção de turbidez da água bruta superior a 90 %, como demonstrado na Tabela 6. A partir desta seleção, adotou-se o critério da dosagem que representasse maior economia à planta de tratamento de água, equivalendo à dosagem de 16,0 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio e pH de coagulação de 6,51.

Tabela 6: Dosagens de sulfato de alumínio previstas no diagrama de coagulação/floculação/sedimentação com eficiência acima de 90 % de remoção da turbidez da água bruta.

Coagulante (mg.L ⁻¹)	pH de coagulação	Turbidez remanescente (uT)
16,0	6,51	3,3
20,0	6,71	3,0
21,5	6,78	2,8
25,0	6,21	2,3

A dosagem de 16,0 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio começou a ser aplicada quando a turbidez inicial da água bruta estava a 35,1 uT e sua temperatura era de 21 °C. Esta dosagem de sulfato de alumínio permaneceu por aproximadamente 1 hora, enquanto a variação da turbidez da água bruta não excedeu ± 5 uT, ficando dentro da faixa de 28,2 a 38,2 uT. Esta condição operacional da estação possibilitou a realização de três coletas de monitoramento do processo de tratamento de água, cujo critério de permanência da dosagem de 16,0 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio na ETA foi previsto nos ensaios de *jar test*. As análises de monitoramento da água durante o período da dosagem teste estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Monitoramento do processo de tratamento de água da ETA Anápolis com uma dosagem de sulfato de alumínio de 16 mg.L⁻¹ e pH de coagulação 6,51.

Hora da coleta	Tipo de amostra	Turbidez da água bruta (uT)	Média da turbidez de saída dos quatro decantadores (uT)	Eficiência de remoção de turbidez nos decantadores (%)	Turbidez da água filtrada (uT)
07:50	Início da dosagem	35,1	4,5	87,3	1,02
08:20	Após 30 min	37,2	5,3	85,9	0,64
08:55	Final da dosagem	39,7	4,7	88,3	0,51

Observa-se que, a eficiência na remoção da turbidez da água bruta na saída dos decantadores abrangeu uma faixa de 85,9 – 88,3 %, compatível com a previsão do diagrama da Figura 3. Verifica-se também que a turbidez da água filtrada antes da dosagem teste ser efetivada, estava a 1,02 uT; após 30 minutos de dosagem teste, passou para 0,64 uT; e no final do teste, encontrava-se com uma turbidez de 0,51 uT. Portanto, as condições operacionais adotada na ETA de Anápolis/GO a partir do diagrama de coagulação/floculação/sedimentação atenderam ao padrão de turbidez exigido pela Portaria do Ministério da Saúde 518 de março de 2004.

CONCLUSÕES

A construção do diagrama de coagulação com sulfato de alumínio, seguida de floculação e sedimentação para o tratamento da água do Ribeirão Piancó, Anápolis/GO, confirmou ser uma importante ferramenta para identificação das condições químicas de melhor coagulação, informando as faixas de dosagem de coagulante sulfato de alumínio, pH de coagulação e turbidez remanescente.

As faixas de pH de coagulação e dosagem de sulfato de alumínio obtidas do diagrama de coagulação/floculação/ sedimentação para uma água bruta do Ribeirão Piancó com cerca de 30 uT, caracterizado como período chuvoso, foram 6,5 – 7,0 e 10 – 22 mg.L⁻¹, respectivamente. Essas faixas garantiriam uma eficiência de remoção de turbidez da água bruta captada na ETA de Anápolis, acima de 83 %, para a sequência de tratabilidade coagulação com sulfato de alumínio, seguida de floculação e sedimentação.

As condições químicas de tratabilidade da água previstas no diagrama de coagulação/floculação/sedimentação foram testadas na planta de tratamento de água de Anápolis com sucesso para as seguintes condições: a turbidez da água bruta oscilou na faixa de 35,1 a 39,7 uT, a dosagem de sulfato de alumínio permaneceu constante em 16,0 mg.L⁻¹, e o pH de mistura se manteve em 6,51. Por fim, a dosagem teste na ETA alcançou uma eficiência de remoção de turbidez já na saída dos decantadores acima de 85 %, e acima de 98 % na saída dos filtros, atendendo as exigências da Portaria do Ministério da Saúde 518/2004.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AWWA, APHA, WPCI. Standard methods for examination of water and wastewater. 20thed. Washington D. C. 1998.
2. CAMPOS, S. X., DI BERNARDO, L., VIEIRA, E. M. Influência das características das substâncias húmicas na eficiência da coagulação com sulfato de alumínio. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.10, n.3, p.194-199 jul/set. 2005.
3. CETESB. Operação e manutenção de ETA. São Paulo: BNH/ABES/CETESB, 1973.
4. DI BERNARDO, L., DI BERNARDO, A. S., CENTURIONE FILHO, P. L. Ensaios de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. RiMa. São Carlos, 2002.
5. DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. Seleção de tecnologias de tratamento de água. São Carlos: LDiBe, 2008. 1538p.
6. PAVANELLI, G. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação da água com cor ou turbidez elevada. São Carlos, 2001. Tese de doutorado - Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade Estadual de São Paulo, 2001.
7. PREFEITURA MUNICIPAL DE ANÁPOLIS. Memorial descritivo: Ampliação do SAA Anápolis, v.1. Abr. 2009. 120f. Disponível em: <<http://www.a.anapolis.go.gov.br/licitacao/adm/baixar/210410115617.pdf>>. Acessado em março 2011.
8. SARON, A. Sistema Cantareira: estudo da potencialidade do uso da filtração direta descendente. Campinas, 2000. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia Civil - Departamento de Saneamento e Ambiente - Universidade Estadual de Campinas, 2000.
9. SILVA, C. F. Remoção de oocistos e de indicadores físicos de *Cryptosporidium parvum* em águas de abastecimento por meio da decantação – estudo em escala piloto. Belo Horizonte, 2008. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.