

AValiação em Jar Teste e em Planta de Diferentes Coagulantes na Clarificação da Água para Uso Industrial

T. D. K. N. SANTOS¹ e V. S. MADEIRA²

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Química

² Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato: tarcisio_david@hotmail.com

RESUMO – O presente trabalho foi realizado em uma usina de cana-de-açúcar localizada no Estado da Paraíba e teve como principal finalidade a otimização das etapas de coagulação e floculação da estação de tratamento de águas da empresa. A estação de tratamento de águas (ETA) é destinada a clarificar água bruta que é utilizada no processamento industrial da usina, principalmente nas etapas de fermentação, geração de vapor e embebição do bagaço de cana (durante a extração do caldo). Além disso, a ETA destina-se a obter água potável para o abastecimento da comunidade de trabalhadores da vila. A vazão da ETA é de 150 à 200 m³/h na safra e de 50 m³/h na entressafra. O estudo da coagulação/floculação foi realizado no laboratório da empresa e posteriormente replicado para a planta. Três tipos de coagulantes foram utilizados: o sulfato de alumínio em pó isento de ferro; o sulfato de alumínio férrico e o policloreto de alumínio (PAC). Os parâmetros ótimos da coagulação, definidos em laboratório via Jar Teste, foram repassados para a planta obtendo-se ao final do trabalho o produto de melhor custo benefício.

1. INTRODUÇÃO

A idéia de realizar um estudo da coagulação/floculação no tratamento de águas da empresa partiu da necessidade de adquirir informações sobre o gradiente de velocidade e o tempo de processo dos equipamentos existentes na planta, (misturador hidráulico e flocculador), além da má operação realizada pelos operadores do sistema. A opção por testar outros coagulantes teve por objetivo avaliar uma possível redução de custos para a empresa e de melhor manuseio pelos operadores que se queixavam muito da dificuldade de preparar as soluções químicas.

A necessidade de coagular a água bruta corre pelo fato de as impurezas presentes na água, partículas coloidais, não decantarem simplesmente pelo efeito da gravidade; essas partículas podem carregar vírus e micromoléculas patogênicas prejudicando sobremaneira a qualidade da água. A coagulação, que tem como função desestabilizar as partículas coloidais, geralmente carregadas negativamente, é seguida pelo processo de floculação que visa aumentar o tamanho e o peso dos flocos, possibilitando a decantação por gravidade. A equação simplificada de Stokes mais conhecida como velocidade terminal da partícula em escoamento laminar, da uma idéia do quão fácil será a

decantação, pois quanto maior o tamanho e o peso das partículas maior a velocidade de decantação.

A portaria 2.914 de 12/12/2011 do Ministério da Saúde estabelece os parâmetros para a qualidade da água para consumo humano, são vários os itens a serem acompanhados, porém neste estudo, em função da disponibilidade de equipamentos na empresa, apenas dois parâmetros da portaria foram analisados: Cor aparente e Turbidez.

Outro parâmetro analisado neste trabalho foi a quantidade de sílica residual presente na água tratada. Isso se justifica, porque boa parte da água tratada é destinada a uma planta de desmineralização para posteriormente ser encaminhada para a caldeira, que gera vapor para o consumo interno. A geração de vapor é muito sensível a sílica, a mesma, em altas quantidades, gera incrustações e possíveis rompimentos de tubos.

1.1. Tecnologia de Tratamento de Água Utilizada

Há várias alternativas para o tratamento de águas para consumo humano, elas dependem basicamente da qualidade da água bruta, e também do resultado esperado para o tratamento. No Brasil o tipo de tratamento conhecido como ciclo completo (ou tratamento completo) que consiste de coagulação, floculação, decantação ou flotação, filtração e desinfecção, é o mais utilizado em ETAs convencionais (ou robustas).

Na empresa onde o estudo foi realizado, a coagulação (mistura rápida do coagulante com a água bruta) é feita em um misturador hidráulico, preenchido com anéis PALL. Neste misturador, são adicionados o coagulante, o hidróxido de sódio (alcalinizante) para corrigir o pH e o auxiliar de floculação (polímero catiônico). A Figura 1 mostra o misturador hidráulico da estação.



Figura 1 - Misturador Hidráulico da unidade estudada.

Os anéis PALL colocados no misturador têm a função de gerar a turbulência necessária para atingir um alto grau de mistura dentro do tubo, porém dependendo da vazão e da quantidade de anéis poderá causar uma grande perda de carga para o escoamento. Após a coagulação a água escoar até o

interior do floccodecantador do tipo fechado sob pressão. A Figura 2 mostra o floccodecantador utilizado no processo.



Figura 2 - Floccodecantador da unidade estudada.

1.2. O Gradiente de Velocidade

O grau de agitação ou intensidade da mistura na coagulação e na floculação é avaliado pelo gradiente médio de velocidade, G ($1/s$), é um parâmetro de suma importância tanto na coagulação quanto na floculação. O gradiente de velocidade é o agente físico da coagulação e da floculação.

Segundo DI BERNARDO (2000) para o sulfato de alumínio os melhores valores do gradiente de velocidade para a coagulação e floculação (quando não utilizado o escalonamento), são respectivamente: $G=1000 \text{ s}^{-1}$ durante 10 s e $G=25 \text{ s}^{-1}$ durante 24 min.. Neste trabalho, estes valores foram tomados como referência para a metodologia experimental utilizada no laboratório. Cabe lembrar que os valores ideais dos gradientes de velocidade e dos tempos de coagulação e floculação devem ser determinados em Jar Teste para cada água bruta a ser tratada. Portanto os parâmetros acima mencionados foram adotados porque o projeto da ETA (disponibilizado pela empresa) não fornecia nenhum dado em relação aos valores de G e dos tempos, desta forma esta otimização foi considerada para posteriormente ser confrontada com a planta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nos ensaios de laboratório estão descritos abaixo:

- Jar Teste (Figura 3)

- pHgâmetro da marca Techal (Figura 4)
- Espectrofotômetro da marca HACH modelo DR/2010
- Vidrarias diversas (pipetas, provetas, béquers e etc.)
- Garrafões de 20 L (adequadamente higienizados), para coleta e armazenamento da água bruta
- Soluções dos coagulantes a serem utilizados
- Polímero catiônico
- Solução de NaOH a 10% (m/m)



Figura 3 - Jar Teste da marca Nova Ética de 3 jarros.



Figura 4 - pHgâmetro de bancada da marca Techal.

A metodologia utilizada nos ensaios em Jar Teste seguiu exatamente o que está descrito na referência, DI BERNARDO, et al, 2011. Já nos ensaios realizados na planta a seguinte metodologia foi utilizada:

Nos tanques dosadores de coagulante foram preparadas soluções com concentrações diferentes, de acordo com o tipo de embalagem fornecida pelo fornecedor. Para o ajuste da dosagem específica do coagulante em teste, optou-se pela regulagem da bomba dosadora. Duas vezes ao dia foram coletadas amostras, tanto da água bruta quanto da água tratada, e enviadas para o laboratório. No laboratório foram realizadas as análises de cor, turbidez, sílica e condutividade.

Durante o tratamento, o valor do pH foi controlado manualmente pelo operador da ETA. Neste caso, a cada 20 min, este operador coletava uma amostra de água coagulada, realizava a leitura do pH

e ajustava, se necessário, a dosagem da bomba dosadora de NaOH.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises em Jar Teste (laboratório) determinaram os valores ótimos da dosagem de cada coagulante, bem como os pHs ótimos para coagulação e floculação. Para os coagulantes testados neste trabalho, os valores ótimos encontrados para a dosagem e pH foram:

- 10 mg/L e pH 6,5 para o policloreto de alumínio (PAC)
- 15 mg/L e pH 6,7 para o sulfato de alumínio isento de ferro (SA)
- 8 mg/L e pH 6,8 para o sulfato de alumínio ferroso (SAF)

Estes parâmetros otimizados foram os menores valores de dosagem para os quais se obtiveram uma remoção na cor aparente e na turbidez superiores a 90%, na água floculada e decantada, com velocidade média de partículas de 3,5 cm/min.

Para compararmos o desempenho da planta com os valores obtidos em laboratório, a metodologia anterior foi aplicada a fim de que a água obtida na saída do floccodecantador também obtivesse uma remoção superior a 90% na cor e na turbidez, desta forma pode-se comparar quais os valores de dosagem nos darão o mesmo resultado, mantendo o pH encontrado no Jar Teste como sendo o pH ótimo. A Tabela 1 mostra os valores obtidos na planta e uma análise de custo para cada coagulante.

Tabela 1 - Resultado final dos testes de coagulação/floco-decantação.

Coagulante	Quantidade de coagulante Jar Teste (mgAl ₂ O ₃ /L)	pH ótimo para a coagulação	Quantidade de coagulante em Planta (mgAl ₂ O ₃ /L)	R\$/m ³ coagulante	R\$/m ³ de hidróxido sódio	R\$/m ³ total
PAC ⁽¹⁾	10,0	6,5	18,3	0,027	0,36	0,38
SA ⁽¹⁾	15,0	6,7	14,7	0,015	0,42	0,43
SAF ⁽¹⁾	8,0	6,8	13,0	0,010	0,28	0,29

⁽¹⁾ PAC = policloreto de alumínio; SA = sulfato de alumínio em pó isento de ferro; SAF = sulfato de alumínio ferroso.

De acordo com a Tabela 1 pode-se observar que o coagulante de melhor custo foi o sulfato de alumínio ferroso. Isto pode ser explicado pelo fato de que o ferro presente neste coagulante também

atua na desestabilização e coagulação das partículas coloidais, portanto apresentando melhor resultado quando comparado com os coagulantes que contém somente o alumínio.

No entanto, o sulfato de alumínio ferroso apresentou uma grande desvantagem frente aos outros coagulantes quando foi avaliada a sua eficiência na remoção de sílica da água tratada. A Tabela 2 mostra os resultados dos ensaios de coagulação, floculação e decantação, realizados em planta, com o uso dos três coagulantes (vide remoção de sílica).

Tabela 2 - - Resultado final dos testes de coagulação/floco-decantação com análise de sílica.

Coagular	COR			TURBIDEZ			SÍLICA		
	Água	Água	% rem.	Água	Água	% rem.	Água	Água	% rem.
	Bruta	Tratada		Bruta	Tratada		Bruta	Tratada	
SA	218,0	48,0	77,5	24,0	0,0	100,0	11,1	0,8	92,7
PAC	230,0	49,8	78,3	32,3	0,5	98,4	11,7	1,7	85,4
SAF	224,6	52,1	76,8	31,0	3,1	90,0	12,1	9,8	19,0

Ainda na Tabela 1, é possível observar que as dosagens dos coagulantes quando foram utilizados na planta são, em geral, maiores do que os seus respectivos valores em laboratório (18 contra 10 mg/L para o PAC; e 13 contra 8 mg/L para o SAF). Haja vista que a qualidade da água bruta era a mesma quando foram realizados estes experimentos (laboratório versus planta), este fato pode ser explicado por uma diferença entre os gradientes de velocidade adotados para os ensaios no Jar Teste (laboratório) versus os gradientes de velocidade que são obtidos nos equipamentos da planta.

Na ETA da empresa onde foi realizado o estudo, nem no misturador e nem no flocodencatador tem agitação mecânica, em função disso a equação utilizada para o cálculo do gradiente de velocidade ficou em função da perda de carga que acontece em cada um destes equipamentos, conforme descrito na Equação (1).

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot h_p}{\mu \cdot Vol}} \quad (1)$$

Onde ρ = massa específica do fluido (Kg/m^3); g = aceleração da gravidade (m/s^2); h_p = perda de carga no equipamento (m); μ = viscosidade do fluido (Kg/m.s); Q = vazão de água no equipamento (m^3/s); Vol = volume onde ocorre o processo (volume do misturador ou da câmara de floculação, m^3).

Avaliando-se o projeto do floccodcantador, concluiu-se que a floculação acontece em um tubo concêntrico de 1m de diâmetro, portanto, a perda de carga neste equipamento foi calculada como a perda por atrito em um tubo liso (Equação 2). Já a perda de carga no misturador hidráulico, leva em consideração que o meio de escoamento é granular (em função dos anéis “PALL”), e a equação de Ergun, (modificada para o valor de hp em metros), foi utilizada (Equação 3)

$$hp = \frac{\hat{E}_F \left(\frac{J}{kg} \right)}{g} = \underbrace{4 * f_F}_{f_D} * \frac{L}{D} * \frac{\bar{v}^2}{2} * \frac{1}{g} \quad (2)$$

$$\frac{hp}{L} = 150 * \frac{\mu * \bar{v} * (1 - \varepsilon)^2}{g * \rho * \varepsilon^3} * \frac{1}{(D_{esf} * \Psi_p)^2} + 1,75 * \frac{\bar{v}^2}{g} * \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} * \frac{1}{(D_{esf} * \Psi_p)} \quad (3)$$

Onde L = comprimento do tubo (m); D = diâmetro do tubo (m); v = velocidade média de escoamento (m/s) = $\frac{Q}{A}$; g = aceleração da gravidade (m/s²); f_F = fator de Fanning (Gráfico de Moody); μ = viscosidade do fluido (Kg/m.s); ρ = massa específica do fluido (kg/m³); v = velocidade média de escoamento do fluido (m/s); ε = porosidade do leito (adimensional); D_{esf} = diâmetro da esfera de mesmo volume do anel (m); Ψ_p = esfericidade do anel de Pall (adimensional).

O tempo de coagulação ou floculação é calculado como o quociente entre o volume útil de cada equipamento sobre a vazão. Os valores encontrados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 3 - Valores do gradiente de velocidade e tempo de processo utilizados no laboratório e na planta da empresa.

COAGULAÇÃO		FLOCULAÇÃO	
Laboratório	Planta (ETA empresa)	Laboratório	Planta (ETA empresa)
- Gradiente de velocidade = 1000 1/s;	- Gradiente de velocidade = 895 1/s;	- Gradiente de velocidade = 10 1/s;	- Gradiente de velocidade = 0,38 1/s;
- Tempo de mistura rápida = 15s.	- Tempo de mistura rápida = 2,8s.	- Tempo de floculação = 25 min.	Tempo floculação = 2,28 min.

Na coagulação realizada na planta, observa-se que tanto o tempo de mistura rápida quanto o gradiente de velocidade do processo são inferiores aos respectivos valores tomados como referência e utilizados no laboratório (Tabela 3). Principalmente o tempo de mistura rápida onde 2,8 segundos são disponibilizados na planta, para a mistura adequada do coagulante com a água ao passo que 15

segundos é a referência utilizada no laboratório. Isto pode explicar em partes, o maior consumo de coagulantes, ou seja, a ineficiência da planta. Também o tempo de floculação da estação é muito menor do que o requerido para uma boa floculação (BI BERNARDO, 2011).

Por fim sugeriu-se que o coagulante atualmente utilizado (sulfato de alumínio em pó) fosse substituído pelo policloreto de alumínio (PAC) visto que simples troca do coagulante resultará em uma economia de aproximadamente R\$ 10.400,00 por safra. Também foi sugerida uma alteração/modificação dos equipamentos do processo de modo a otimizar os tempos e gradientes de velocidade das etapas de coagulação e floculação.

4. CONCLUSÃO

O coagulante que apresentou melhor clarificar a água foi o SAF, com dosagem ótima de 8 mg/L, e pH ótimo de 6,8 e um custo de 0,29 R\$/m³. Porém este coagulante não foi indicado em função da baixa eficiência na remoção de sílica O coagulante sugerido foi o PAC que apresentou um dosagem ótima de 10 mg/L e um custo de R\$ 0,38. O total de economia por safra será de R\$ 10.400,00.

5. REFERÊNCIAS

ANDRADE, S. I. E. (2012). *Um analisador Fluxo-Batelada baseada em imagem digital para determinação de Al(III) e Cr(III) em águas*. Dissertação (Mestrado em Química) - Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal da paraíba, Paraíba.

DI BERNARDO, L. & D. (2005). *Métodos e técnicas de tratamento de água* – vol. I. 1º Ed.. São Carlos. Editora RIMA.

PAVANELLI, G. (2001). *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

PERRY E CHILTON (1980). *Manual de engenharia Química*, 5º ed.. São Paulo. Editora Guanabara dois.

RICHTER, C. A. *et al* (1991). *Tratamento de água, tecnologia atualizada*, 1º ed.. São Paulo. Editora Edgard Blücher.

STANDARD METHODS (1998). *For examination of water and wastewater 20th*.