



## TRATAMENTO DE ÁGUA: GRADIENTE DE VELOCIDADE NA COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO

A.C.A. REIS<sup>1\*</sup>, J.R.D. FINZER<sup>1</sup>, M.L. BEGNINI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química

\*e-mail: carol\_a\_reis@hotmail.com; jrdfinzer@pq.cnpq.br; gestor.engenhariaquimica@uniube.br

**RESUMO** O presente trabalho consiste em um estudo da coagulação e floculação usando sulfato de alumínio no tratamento de água. Na etapa da floculação, discute-se sobre coaguladores - floculadores e os gradientes de velocidades. O gradiente de velocidade em estações de tratamento de água devem situar-se entre O gradiente de velocidade em estações de tratamento de água, deve situa-se entre  $10s^{-1}$  a  $700s^{-1}$  e constitui-se em um parâmetro de controle. O objetivo deste trabalho foi avaliar pH, turbidez e alcalinidade da água floculada, tanto no início como no fim do experimento, e calcular os gradientes de velocidades da coagulação e da floculação em experimento de tratamento de água. Durante o estudo foi realizado ensaios no *Jar-Test* na Estação de Tratamento de Água na região de Uberaba do Triângulo Mineiro, sendo testadas diferentes dosagens do coagulante. Os resultados deste estudo permitiram concluir qual o pH de operação da água e verificar os valores obtidos de gradientes de velocidade por comparação com padrões da literatura.

**Palavras-chaves:** Coagulação. Floculação. Turbidez. pH. Gradientes de velocidade.

### INTRODUÇÃO

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), embora seja indispensável ao organismo humano, a água pode conter determinadas substâncias como elementos químicos e microrganismos, que devem ser eliminados ou reduzidos para concentrações que não sejam prejudiciais à saúde humana. Com isso areia, argila e microrganismos presentes em forma de partículas suspensas, atribuem turbidez a água enquanto que substâncias húmicas conferem cor.

A coagulação é um processo que consiste na desestabilização das partículas coloidais ou neutralização das moléculas de substâncias húmicas que apresentam carga residual negativa na água. Quando duas partículas coloidais se aproximam, devido ao movimento browniano que as mantém em constante movimento, atuam sobre elas forças de atração

(Forças de Van der Waals) e forças de repulsão (devido à força eletrostática ou da dupla camada elétrica), impedindo a agregação entre as partículas e a consequente formação de flocos (GEWEHR, 2012).

A escolha correta do coagulante é de fundamental importância no tratamento de águas. Os coagulantes podem ser classificados em polieletrólitos ou auxiliares de coagulação e coagulantes metálicos (MAGNAN, 2010), sendo os mais empregados os inorgânicos (sais de alumínio e ferro – sulfato de alumínio, cloreto e sulfato férrico).

A floculação corresponde à etapa em que são fornecidas as condições para facilitar o contato e a agregação das partículas previamente desestabilizadas pelo processo de coagulação, visando à formação de flocos com tamanho e massa específica que favoreçam sua remoção por sedimentação, flotação ou filtração direta. A energia fornecida para a operação de floculação pode ser oriunda de

floculadores mecanizados ou hidráulicos (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

O ensaio usando o Jar-test é um ponto de partida do trabalho, pois deve ser realizado para a verificação da concentração ótima do floculante, alcalinidade, turbidez e pH.

O pH é um fator importante para a etapa de coagulação-floculação. A coagulação com sais de alumínio ou de ferro só se realiza satisfatoriamente a um determinado pH, denominado pH ótimo de coagulação, e em ocorrência de alcalinidade para que aconteçam as reações químicas. A faixa ótima de pH de coagulação pode variar para cada tipo de coagulante utilizado (GEWEHR, 2012).

O gradiente de velocidade e tempo de agitação, tanto da coagulação como da floculação, também influenciam a etapa global de coagulação-floculação. Para melhores eficiências do processo, deve haver uma otimização do gradiente de velocidade e do tempo de operação. Para velocidades e tempos de contato pequenos pode haver a diminuição do tamanho dos flocos formados, dificultando a sedimentação. Para velocidades e tempos de operação muito elevados, após a formação dos flocos, pode haver a quebra parcial desses, resultando em partículas menores e retardando a sedimentação (GEWEHR, 2012).

### Coagulação-Floculação

De acordo com (RICHTER e AZEVEDO NETTO, 2009) coagulação é a alteração físico-química de partículas coloidais de uma água, caracterizada principalmente por cor e turbidez. Os coagulantes reagem em presença de água, formando espécies hidrolisadas com carga positiva ou precipitado de metal do coagulante usado. Com isso, estas espécies formadas anteriormente se chocam com as impurezas da água, tornando-as desestabilizadas, sendo importante a etapa de mistura rápida, onde há o fornecimento de energia e agitação (BERNARDO E PAZ, 2010; LIBÂNIO, 2010; VIANNA, 1992).

A coagulação se inicia assim que o coagulante é adicionado na água e leva frações de segundos. Consiste basicamente numa série de interações físicas e químicas envolvendo o coagulante, a superfície das partículas e

algumas substâncias químicas presentes na água, especialmente as que lhe conferem alcalinidade, e a própria água (VIANNA, 1997).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a floculação deve ser efetuada com agitação relativamente suave, para que ocorram choques entre as partículas e que elas se aglomerem formando partículas maiores, os flocos. A floculação se caracteriza por uma etapa de clarificação, constituída por um conjunto de atividades físicas, nas quais se objetiva reduzir o número de partículas suspensas e coloidais presentes na massa líquida, buscando a formação de flocos mais robustos que serão extraídos com mais facilidade posteriormente (LIBÂNIO, 2010).

A floculação consiste em impor um período de agitação lenta a água, procurando maximizar a agregação e minimizar a ruptura dos flocos. As variáveis mais importantes são: concentração de coagulante, pH, número e características das partículas primárias presentes na água, gradiente de velocidade e tempo de agitação (TEIXEIRA, 2003).

### Gradiente de velocidade

Segundo Camp e Stein (1943), os gradientes de velocidades variam consideravelmente no interior de uma câmara de mistura. Na mistura a tensão de cisalhamento é dada pela Equação (1).

$P =$  tensão de cisalhamento ( $\tau$ )  $\times$  área ( $\Delta X \Delta Z$ )  
 $\times$  velocidade ( $\Delta V$ )

$$P = \tau \cdot \Delta X \cdot \Delta Z \cdot \Delta v \quad (1)$$

$$P = \tau \cdot \Delta X \cdot \Delta Z \cdot \Delta v \cdot C = \tau \cdot V \cdot \left( \frac{\Delta v}{\Delta Y} \right) \quad (2)$$

Sendo  $\tau$ , aplicado para fluídos newtonianos:

$$\tau = \mu \cdot \left( \frac{\Delta v}{\Delta Y} \right)$$

$$\tau = +\tau = \mu \cdot \left( \frac{\Delta v}{\Delta Y} \right) \quad (3)$$

Substituindo:

$$P = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right) \cdot V \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right)$$

$$P \cdot V = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right)^2$$

Considerando,  $\left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right) = G$ , tem-se:

Sob condições estáveis de trabalho fornecido por unidade de volume na água da câmara e por unidade de tempo, definiu-se o parâmetro gradiente de velocidade, “G” substituindo a Equação (3) na Equação (2) tem-se a Equação 4.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (4)$$

A Equação (5) é utilizada para o cálculo da potência:

$$P = Np \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5 \quad (5)$$

Essa modelagem passou a ser adotada como usual no projeto de unidades de floculação e mistura rápida sendo a parte fundamental de uma unidade de tratamento de água. No sistema de tratamento de água são aplicados dois diferentes tipos de agitação: na floculação, cujo objetivo é promover o contato entre as partículas e a agitação para misturar uniformemente os produtos químicos na água que ocorre na etapa de coagulação, operação que requer uma agitação intensa (MWH,2005). Segundo a NBR 12216 (norma que define os projetos de tratamento de água para abastecimento), os gradientes de velocidade da coagulação são compreendidos entre  $10 \text{ s}^{-1}$  e  $700 \text{ s}^{-1}$  e da floculação deve estar entre  $10 \text{ s}^{-1}$  e  $70 \text{ s}^{-1}$ .

## MATERIAL E MÉTODOS

O primeiro passo após a coleta da amostra é a verificação de sua qualidade através das análises iniciais de pH, alcalinidade, turbidez e cor, que servem de parâmetros para posterior comparação e conclusão do ensaio.

A proporção utilizada de coagulante e alcalinizante são de 2:1 respectivamente, conforme mostra-se na Tabela1.

Como cada jarro contém tem capacidade efetiva para volume de 2 L, colocou-se concentrações diferentes de reagentes em cada jarro conforme apresentado na Tabela 1.

Após colocar 2 litros de água em cada jarro do Jar Test como mostra a Figura 1, foram adicionados o alcalinizante e o coagulante simultaneamente, submetendo a mistura a uma rotação máxima de 100 rpm durante 60 s, que

Tabela 1: Concentrações de alcalinizante e coagulante em cada jarro do Jar Test.

Amostra Alc/Coag.	Concentração de $\text{Ca(OH)}_2$ (mg/L)	Concentração de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}$ (mg/L)
1	0,03 mL	0,06 mL
2	0,06 mL	0,12mL
3	0,09 mL	0,18 mL
4	0,13 mL	0,26 mL
5	0,15 mL	0,30 mL
6	0,19 mL	0,38 mL

Fonte: Autor, 2017.

Figura 1: Aparelho de Jar Test

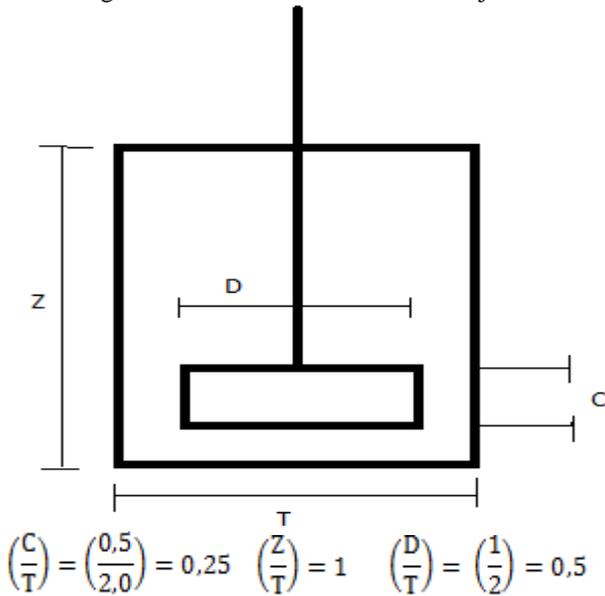


Fonte: Autor, 2017

caracteriza a simulação de mistura rápida da Calha de Parshall (dispositivo de medição de vazão na forma de um canal aberto com dimensões padronizadas). Em seguida, reduziu-se a rotação para 30 rpm durante um intervalo de 30 minutos, o que se refere a etapa de floculação. Após o intervalo de 15 minutos analisou-se a turbidez e o pH.

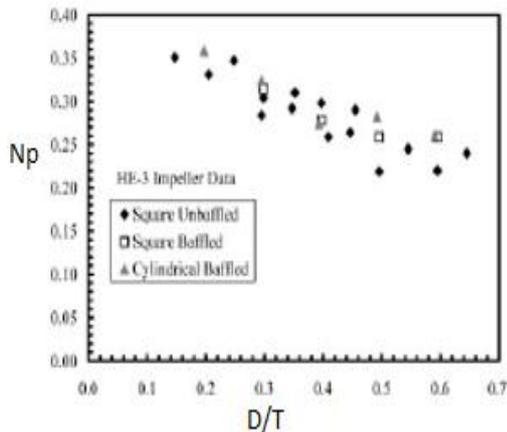
A Figura 2 corresponde as proporções do jarro de seção transversal quadrada, iguais as dos frascos *Jar-Test* usados neste estudo.

Figura 2: Geometria e dimensões do jarro



A Figura 3, fornece o número de Potência utilizado para quantificar o valor da potência dissipada pela Equação (5) e o gradiente de velocidade pela Equação (4), obtendo-se:  $67s^{-1}$  na coagulação e de  $7 s^{-1}$  na floculação.

Figura 3: Número de potência



Fonte: MITCHELL e MYERS (2008).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teste de Jar-test foi realizado com a água cujos valores dos parâmetros analisados na água bruta estão apresentados na Tabela 2.

Pode-se perceber que a turbidez está muito baixa, o que se explica pela água apresentar-se bem clara, quase incolor. Ao final do experimento a alcalinidade encontrada foi de 12,75 ppm.

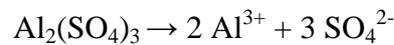
Tabela 2: Valores dos parâmetros analisados na água bruta

Alcalinidade (ppm)	pH	Turbidez (NTU)
32,475	7,83	11,4

Pode-se perceber que a turbidez está muito baixa, o que se explica pela água apresentar-se bem clara, quase incolor. Ao final do experimento a alcalinidade encontrada foi de 12,75 ppm.

### Jar-Test

O sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ), é obtido por meio da reação química entre o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), o qual é adicionado à água com o óxido de cálcio (CaO). Quando essas duas substâncias misturam-se na água, ocorre uma transformação química que forma uma substância gelatinosa, o hidróxido de alumínio ( $Al(OH)_3$ ). Essa transformação química ocorre porque, em meio aquoso, o sulfato de alumínio gera os seguintes íons:



Os íons  $Al^{3+}$  passam a atuar de duas formas:

A minoria desses cátions neutraliza as cargas negativas das impurezas presentes na água; A maioria desses cátions interage com os íons hidroxila ( $OH^-$ ) da água, formando o hidróxido de alumínio.



O  $Al(OH)_3$  formado, se apresenta inicialmente primeiramente sob forma coloidal, em porções pequenas que se agregam formando os flocos. Há um pH em que melhor se dá essa união e consequente melhor floculação que é denominado de “pH ótimo de floculação”, que ocorre em torno de 6,8. Sendo assim dentro das concentrações utilizadas nos testes de Jar-Test, observou-se que a melhor faixa para aplicação do coagulante está entre 80 mg/L a 100 mg/L.

### Turbidez e pH

Com base nos procedimentos e análises realizados no laboratório, os valores de turbidez e pH obtidos no *Jar test* está apresentado na Tabela 3 e como mostra a Figura 4.

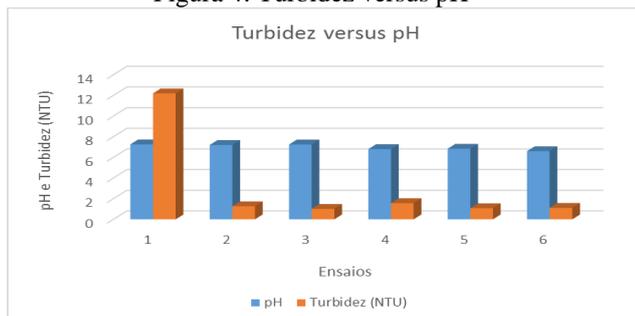
Ao observar os resultados da turbidez pode-se notar que com exceção da Amostra 1, todas as outras apresentam valores de turbidez adequados, pois são menores que 5 NTU

Tabela 3: Valores de turbidez e pH obtidos no Jar test

Amostra	Turbidez (NTU)	pH
1	12,2	7,26
2	1,27	7,2
3	1,01	7,25
4	1,57	6,8
5	1,08	6,84
6	1,11	6,6

Fonte: Autor, 2017.

Figura 4: Turbidez versus pH



Fonte: Autor, 2017.

(Nefelometric Turbidity Unit), como mostra a Figura 2. Em relação ao pH todos os valores obtidos apresentam valores perto da faixa de neutralidade, sendo as amostras 4 e 5 como mostra a Figura 4, as que mostram resultados mais eficientes devido estar na faixa do pH indicado como “ótimo” para o uso de sulfato de alumínio.

A Figura 3, fornece o número de Potência utilizado para quantificar o valor da potência dissipada pela Equação (5) e o gradiente de velocidade pela Equação (4), obtendo-se:  $67s^{-1}$  na coagulação e de  $7 s^{-1}$  na floculação.

Assim observa-se que o gradiente de velocidade calculado na coagulação apesar de baixo está dentro dos padrões da literatura, que é entre  $10 s^{-1}$  a  $700 s^{-1}$ . Já o da floculação ficou pouco abaixo do padrão, sendo o mínimo de

$10 s^{-1}$  e máximo de  $70 s^{-1}$ . Contudo, para baixa turbidez o grau de intensidade é menor, e são mais difíceis de flocular que em águas de turbidez mediana a elevada (RICHTER, 2009).

## CONCLUSÃO

Nas concentrações de sulfato de alumínio que foram empregadas nos experimentos, ocorreu a remoção da turbidez, situando-se dentro do padrão de potabilidade que é de  $< 5$  NTU. Os melhores resultados de pH foram com as amostras 4 e 5, com concentrações de coagulante entre 80 mg/L e 100 mg/L, respectivamente. Considerando que o “pH ótimo” tecnicamente se obteve na Amostra 4 no valor de 6,8. Comparando o gradiente de velocidade da coagulação na prática com os padrões da literatura que variam de  $10 s^{-1}$  a  $700 s^{-1}$ , tem-se um resultado de  $67 s^{-1}$ , que apesar de ser baixo para uma mistura rápida está dentro dos padrões. No gradiente de velocidade da floculação nota-se que está abaixo do padronizado, mas próximo do valor mínimo que é de  $10 s^{-1}$  e  $70 s^{-1}$ . Contudo, para baixa turbidez o grau de intensidade é menor, e são mais difíceis de flocular que em águas de turbidez mediana a elevada. O trabalho indica como calcular gradientes de concentração em função do número de geometria idêntica a deste trabalho.

## NOMENCLATURA

G: é o gradiente de velocidade ( $s^{-1}$ );  
P: é a potência útil introduzida no sistema (W; N m/s);  
V: é o volume útil ( $m^3$ );  
 $\mu$ : é a viscosidade absoluta do fluido (N.s/ $m^2$ ; Pa.s).  
C: medida a partir do vaso, base para o ponto mais baixo do impulsor, m;  
D: diâmetro, m;  
T: diâmetro do tanque, m;  
Z: altura do vaso, m.  
P: potência, W;  
Np: número de potência;  
 $\rho$ : densidade da água 25°C, Kg/ $m^3$   
N: número de rotações por segundo, rps;  
D: diâmetro do rotor do vaso do Jar-Test, m.

## REFERÊNCIAS

- BERNARDO, L. DI; PAZ, L. P. S. Seleção de tecnologias de tratamento de água. São Carlos: LDIBe, 2010. P. 868.
- CAMP, T. R., STEIN, P. C., Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion. *Journal of the Boston Society Of Civil Engineers*, v. 30, n. 4, p. 219-237, Oct, 1943.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. São Carlos: RIMA, 2ª ed., p.1565, 2005.
- GEWEHR, A. G. (2012), Tratamento por coagulação-floculação de lixiviado bruto de aterro sanitário com e sem pré-tratamento biológico em reator sequencial em batelada. Processamento de Urucum em Leite de Jorro - Estudos Fluidodinâmicos. PPGRH. Porto Alegre - RS, 163p. (dissertação de mestrado)
- LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3º Edição. Campinas: Editora Átomo, p. 444, 2010.
- MAGNAN, R. B. – “Análise da viabilidade técnica e financeira da substituição do coagulante cloreto férrico por policloreto de alumínio durante o processo físico-químico no tratamento de efluente de abatedouro avícola” - Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental - Universidade de Passo Fundo – Passo Fundo, MG, 2010.
- MITCHELL, E. T.; MYERS, K. J. “Solids suspension agitation in square tanks”: *The Canadian Journal of chemical engineering*. February 2008. Volume 86.
- MWH. *Water Treatment Principles and Design*. 2ª ed. New Jersey: Jonh Woley & Sons, 2005.
- NBR 12216/92. Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro – RJ. 1992. 18 p.
- RICHTER, C. A., AZEVEDO NETTO, J. M. (1991), *Tratamento de água: tecnologia atualizada*, Edgard Blücher., São Paulo.
- TEIXEIRA, P. C (2003), *Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de lavagem de veículos visando a reciclagem da água*. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. Campinas – SP. (dissertação de mestrado).
- VIANNA, M. R. *Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água*. Belo Horizonte: Instituto de Engenharia Aplicada, p. 344, 1992.
- VIANNA, M. R. *Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água*. 3ª ed. São Paulo: Imprimatur Artes Ltda 1997. Lv.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG pelo suporte dado à apresentação deste trabalho no ENEMP 2017.