AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS E OPERACIONAIS NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE BAIXA TURBIDEZ POR NEUTRALIZAÇÃO DE CARGAS

Diego Gouveia Marques[(1)]
Engenheiro Químico, mestre em Ciências Ambientais, técnico em sistemas de saneamento pela Sabesp.
Valquíria Campos[(2)]
Professora Associada pela UNESP, Doutora em Geociências.

Endereço[(1)]**:** Estrada Mineração Ouro Branco, 660 – Retiro Paulista – Vargem Grande Paulista - São Paulo - SP - CEP: 06741-204 Brasil - Tel: +55 (11) 4159-5102 - e-mail: dgmarques@sabesp.com.br.

RESUMO

O tratamento de água para abastecimento compreende diversos processos físico-químicos, empregados na remoção de compostos de interesse sanitário. Dentre os processos, destaca-se a etapa de coagulação como essencial, para o tratamento efetivo, sendo que um dos principais mecanismos de coagulação envolve a neutralização de cargas. A etapa subsequente é denominada floculação, responsável pela formação de flocos de maior peso e tamanho, os quais são separados por sedimentação. Dentre as variáveis hidráulicas e operacionais que influenciam o tratamento, destacam-se a presença de mistura rápida e a adoção de gradientes decrescentes, na etapa da floculação. Este trabalho teve como objetivo verificar a influência da presença de mistura rápida e da adoção de gradientes de floculação decrescentes no tratamento de água bruta natural de baixa turbidez, baseado no mecanismo de neutralização de cargas com potencial Zeta zero e formação de Al insolúvel, utilizando experimento fatorial 2^2. Os resultados revelam que ambas as variáveis apresentaram efeito significativo a 5% a partir da ANOVA, sendo esse comportamento coerente com a teoria para o mecanismo de neutralização de cargas, devido à dependência de dispersão rápida do reagente.

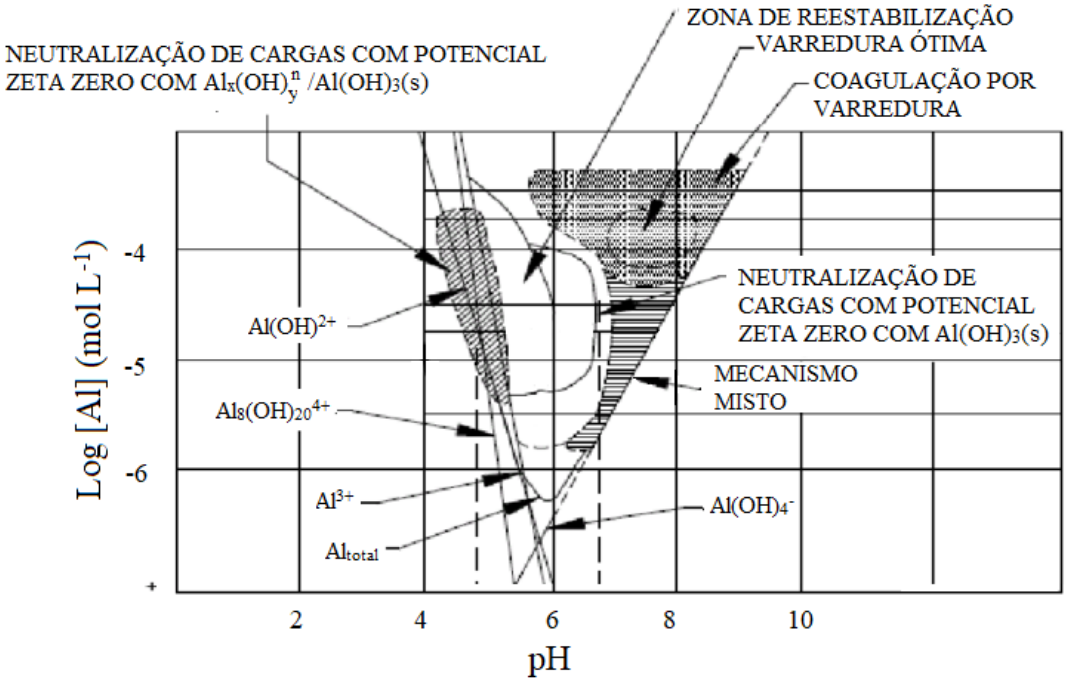
PALAVRAS-CHAVE: Floculação, gradiente de agitação, mistura rápida.

INTRODUÇÃO

O tratamento de águas superficiais ou subterrâneas para abastecimento é composto por um conjunto de processos e operações unitárias que visam à remoção de componentes de interesse sanitário, garantindo a adequação da água tratada aos parâmetros de potabilidade definidos na legislação e propiciando o consumo seguro (MARQUES e CAMPOS, 2024). Existem diversas tecnologias que podem ser aplicadas para esse fim; entretanto, a tecnologia mais consagrada no país e no mundo é denominada de convencional ou ciclo completo. Trata-se da tecnologia que possui a adição de coagulante em uma unidade de mistura rápida, floculação, sedimentação e filtração (LACERDA et al., 2019).

Uma das etapas de maior importância no tratamento de água refere-se a coagulação-floculação, uma vez que, se não ocorrer de forma efetiva, todas as etapas subsequentes serão prejudicadas, reforçando a necessidade de estudos para melhor entendimento do processo (CORDEIRO et al., 2016). A coagulação consiste, normalmente, do emprego de um ou mais produtos químicos que desestabilizam os poluentes aquosos coloidais, permitindo a agregação das partículas e formação de flocos de maior dimensão, possibilitando, assim, a remoção por filtração, sedimentação, centrifugação ou flotação (CUI et al., 2020). Dentre os mecanismos de coagulação relacionados ao tratamento, destacam-se os mecanismos de adsorção e neutralização de cargas e varredura, os mais estudados e abordados, sendo que cada mecanismo tem sua característica operacional, e vantagens associadas (WEI et al., 2015) Existem ainda, mecanismos em faixas intermediárias que agregam mais de um dos mecanismo principais, como a zona de neutralização de cargas em potencial Zeta zero e Al insolúvel, e o mecanismo misto (BENSON, 2006). Os mecanismos são descritos na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama de mecanismos de coagulação para coagulantes à base de alumínio



Fonte: Adaptado de Benson (2006).

A floculação é a etapa subsequente da coagulação e visa a formação de aglomerados de maior tamanho e massa, denominados flocos, permitindo a posterior remoção por sedimentação, flotação ou filtração rápida. Nessa etapa são empregados gradientes de agitação mais baixos em comparação à etapa de mistura rápida, sendo denominada também "mistura lenta". Diversos fatores podem influenciar a floculação, como temperatura da água, pH de coagulação, gradiente de mistura rápida e mistura lenta e geometria da unidade de mistura (MANETTA, 2014). Como mecanismos de floculação, destacam-se (1) floculação pericinética, na qual as partículas se agregam pelo movimento aleatório, também chamado de movimento Browniano; (2) floculação ortocinética, que, a partir da indução de gradientes de agitação, as partículas desestabilizadas se chocam e formam os flocos (SHEWA e DAGNEW, 2020). Logo depois de desestabilizadas, as partículas agregam-se entre si pela floculação pericinética e à medida que os flocos crescem, o mecanismo de transporte e agregação de partículas será, majoritariamente, de floculação ortocinética, com imposição de gradientes de velocidade à mistura (HESPANHOL, 2018).

Os módulos de floculação podem ser do tipo hidráulico (chicanas, meio granular, helicoidal) e mecanizado (com o emprego de agitadores). Enquanto os módulos hidráulicos são mais sustentáveis, com menor gasto com energia elétrica e manutenção, os módulos mecanizados possuem como grande vantagem a flexibilidade no ajuste de gradientes de velocidade (PENNOCK, 2019). Em termos das câmaras de floculação, a normativa NBR 12216 (ABNT, 1992) define o mínimo de três câmaras, enquanto o máximo não é estipulado.

A escolha dos gradientes de agitação lenta e do tempo de floculação é de grande importância, o encontro das partículas deve ser favorecido, ao mesmo tempo em que a ruptura dos flocos deve ser evitada. Agitações muito intensas podem gerar ruptura, e longo tempo de floculação pode gerar a erosão dos flocos (NAN et al., 2016). No início da etapa de floculação, maiores gradientes de agitação são, normalmente, empregados, visando atender a necessidade de energia para o encontro dos flocos. Em momentos posteriores, indica-se que a energia do sistema seja menor, evitando a ruptura das partículas (MANETTA, 2014). Desse modo, os módulos mecanizados de floculação permitem a aplicação de gradientes de velocidade médio, maiores nas primeiras câmaras, considerando-se uma floculação em série, seguida da diminuição nas câmaras subsequentes. Essa prática operacional mostrou-se uma alternativa, para priorizar o aumento do contato entre as partículas desestabilizadas e evitar o rompimento acentuado dos flocos. Em geral, empregam-se gradientes de agitação na mistura lenta de 10 a 70 s^{-1} (REIS et al., 2017). Reforça-se que o impacto da operação com gradientes de agitação decrescentes na etapa de floculação é dependente de

características da água bruta, do coagulante empregado, hidrodinâmica dos tanques, entre outros fatores (MORUZZI e OLIVEIRA, 2013).

OBJETIVOS

O presente trabalho buscou avaliar o impacto da presença da mistura rápida e da adoção de gradientes decrescentes na etapa de mistura lenta, no tratamento de água bruta natural superficial, por meio de ensaios de *jar test*, empregando o mecanismo de neutralização de cargas em potencial Zeta zero com formação de Al insolúvel.

MATERIAL E MÉTODOS

A água bruta empregada foi obtida da represa Cachoeira do França, Juquitiba, São Paulo, utilizada no abastecimento da Região Metropolitana de SP (ALVES, 2019). O valor de turbidez da água bruta enquadra-se em águas de baixa turbidez (Cruz et al., 2019), visto que foi realizada a coleta em época de estiagem. O manancial classifica-se como Classe 1 e o Índice de Qualidade das Águas (IQA), indica classificação "boa" para a qualidade dessas águas, segundo aferições periódicas da CETESB (ENCIBRA e PRIME ENGENHARIA, 2011). O coagulante empregado foi o policloreto de alumínio (PAC Floc 120 HT), da Bauminas, com teor de Al_2O_3 de 9,8 %, teor de 5% de Al e basicidade de 57 a 67 %, referenciado neste trabalho como PAC Bauminas.

Para a série experimental utilizou-se de *jar test* (PoliControl), contendo seis jarros com capacidade de 2 L cada um, que apresenta agitação máxima de pá em 300 rpm, gerando gradiente de agitação de 600 s^{-1}, como estimado por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011). Os valores de potencial Zeta foram aferidos por meio de zetâmetro Malvern Zetasizer Nano ZS90. Para as análises da água bruta e da água decantada, posterior ao ensaio de *jar test* foram utilizados turbidímetro HACH TU5200 e um potenciômetro Thermo Union Dual Star.
A partir da água bruta natural superficial, obteve-se o ponto isoelétrico sem adição de alcalinizante, visando à abordagem do mecanismo de neutralização de cargas com potencial Zeta zero. No Quadro 1 tem-se a dosagem de coagulante obtida, realizou-se um experimento baseado em planejamento experimental fatorial 2^2, com variáveis "presença de mistura rápida" e "presença de gradientes decrescentes de floculação", além de avaliar o efeito de cada variável e da interação entre elas, análise de variância (ANOVA).

Quadro 1 – Descrição de variável e nível empregado no planejamento fatorial 2^2

Variável	Nível baixo (-)	Nível alto (+)
1 - Mistura rápida	Ausência de mistura rápida	Presença de mistura rápida
2 - Gradiente decrescente na floculação	Mesmo gradiente de floculação em toda a etapa de mistura lenta	Emprego de gradientes decrescentes na etapa de mistura lenta

Fonte: Autoria própria

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi efetuada a avaliação hidráulica e operacional para mecanismo de neutralização de cargas em potencial Zeta 0 e Al insolúvel. Primeiramente, a avaliação do ponto isoelétrico foi conduzida em um ensaio preliminar, utilizando béquer de 200 mL com água bruta e adicionando-se coagulante, com o acompanhamento do potencial Zeta, até a obtenção do ponto isoelétrico. As características da água bruta são expressas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características da água bruta empregada nos ensaios de *jar test*

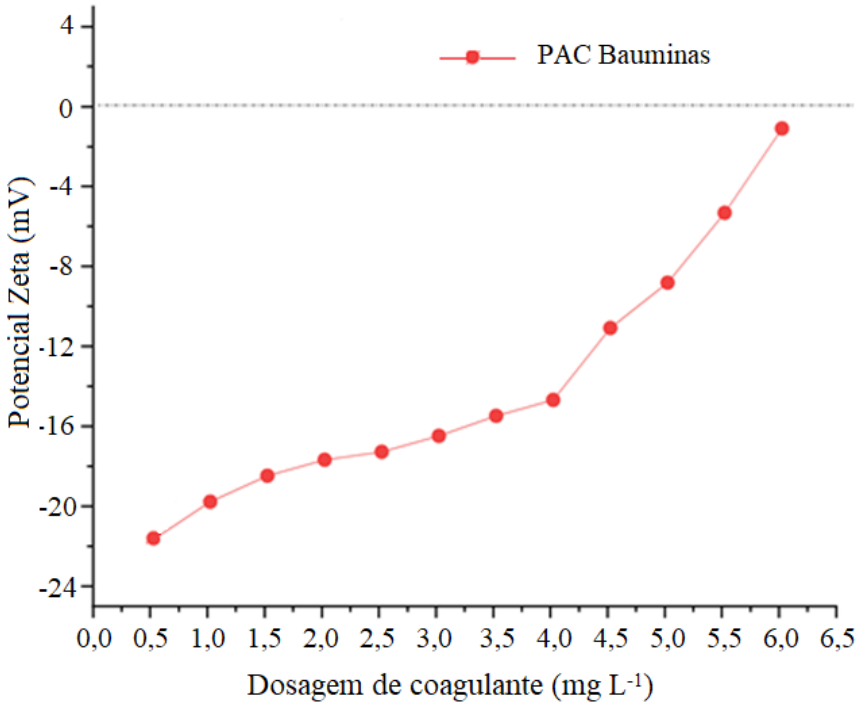
Parâmetro	Valor
Turbidez (NTU)	8,5
pH	6,4
Potencial Zeta (mV)	-22,13

A variação do potencial Zeta da amostra em relação à dosagem de PAC é descrita na Tabela 2 e Figura 1. A dosagem 6 mg L^{-1} foi observada até a obtenção de condição próxima a do ponto isoelétrico.

Tabela 2 - Avaliação da influência da dosagem do PAC Bauminas, no potencial Zeta para os ensaios de avaliações hidráulicas e operacionais

Dosagem de PAC (mg L^{-1})	Potencial Zeta (mV)
0,5	-21,7
1,0	-19,8
1,5	-18,5
2,0	-17,7
2,5	-17,3
3,0	-16,5
3,5	-15,5
4,0	-14,7
4,5	-11,1
5,0	-8,84
5,5	-5,34
6,0	-1,12

Figura 2 - Influência da dosagem de PAC Bauminas no potencial Zeta das amostras de água bruta, nos ensaios de *jar test* de avaliações hidráulicas e operacionais



A Tabela 2 descreve os parâmetros hidráulicos empregados nos ensaios de *jar test*. Os valores foram adaptados do sugerido por Di Bernardo e Paz (2008), em coerência com a NBR 12216 (ABNT, 1992) para estações de tratamento de água. A velocidade de sedimentação escolhida foi a de valor médio, dentro da faixa sugerida de 1 a 5 cm min^{-1}. Empregou-se, ainda, o delineamento fatorial completo 2^2, com dois fatores em dois níveis, descrito no Quadro 1 com três repetições e os resultados são apresentados na Tabela 3 e Figuras 3 e 4.

Tabela 2 – Tempos e gradientes hidráulicos empregados nos ensaios de *jar test* de avaliações hidráulicas e operacionais

Parâmetros hidráulicos	Valor
Gradiente de agitação da mistura rápida	600 s^{-1}
Tempo de mistura rápida	20 s
Gradiente de agitação da mistura lenta (1)	40 s^{-1}
Gradientes de agitação da mistura lenta (2)	70; 40 e 10 s^{-1}
Tempo de floculação total	15 min
Velocidade de sedimentação	2,5 cm min^{-1}

Floculação sem gradiente decrescente; (2) floculação com gradiente decrescente

Tabela 3 – Resultados de turbidez remanescente obtidos no experimento fatorial 2^2 para avaliação de parâmetros hidráulicos e operacionais

Experimento	Variável		Repetição			Média	S^2
	Nível		Turbidez (NTU)				
	1	2	1	2	3		
1	+	+	5,76	5,91	6,04	5,90	0,140
2	+	-	7,01	6,86	6,94	6,93	0,075
3	-	+	6,87	6,65	6,41	6,64	0,230
4	-	-	7,62	7,37	6,97	7,32	0,180

S^2 = Desvio padrão

Figura 3 – Valores de turbidez remanescente para cada experimento em *jar test*

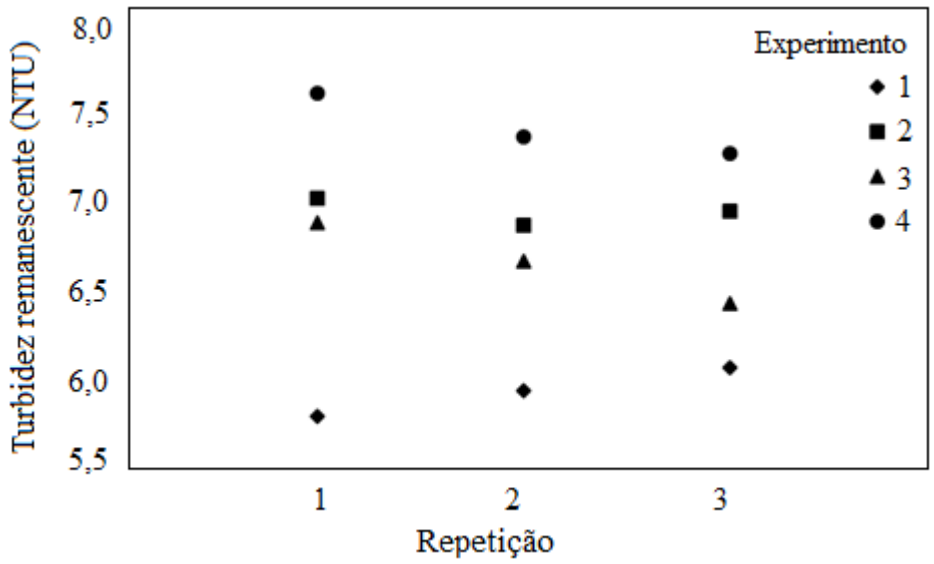
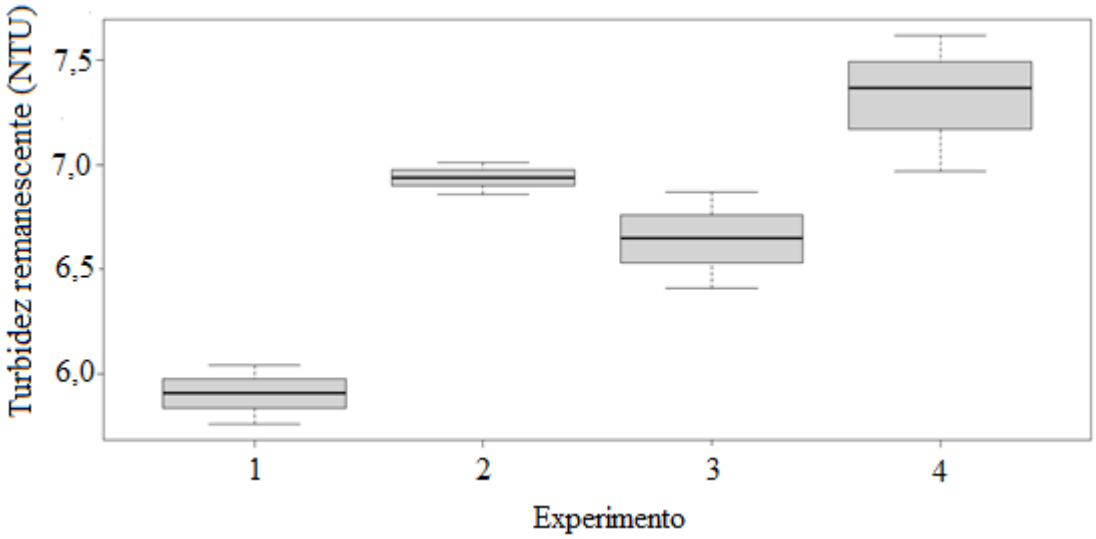


Figura 3 - Boxplot dos resultados obtidos no experimento fatorial 2^2



Nota-se, pelo gráfico *boxplot* (Figura 3), que o experimento 1 resultou em menores valores de turbidez remanescente e o experimento 4, foi o que apresentou maior turbidez remanescente. Observa-se, ainda, que o experimento 1 conta com duas variáveis em nível "+", ou seja, com a presença de agitação rápida e a presença de gradientes decrescentes na mistura lenta, enquanto no experimento 4 ocorre o oposto, a ausência das medidas operacionais. O gráfico indica, portanto, grande potencial de significância das variáveis, por meio dessa diferença entre os experimentos 1 e 4. Calculou-se, em seguida, efeitos dos fatores principais e da interação entre os fatores (Figuras 4, 5, 6 e 7).

4 - Efeito do fator da variável 1 no experimento fatorial

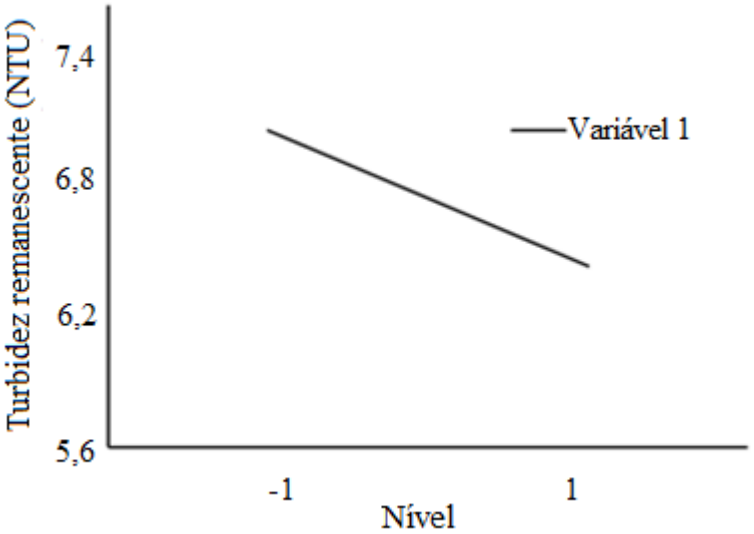
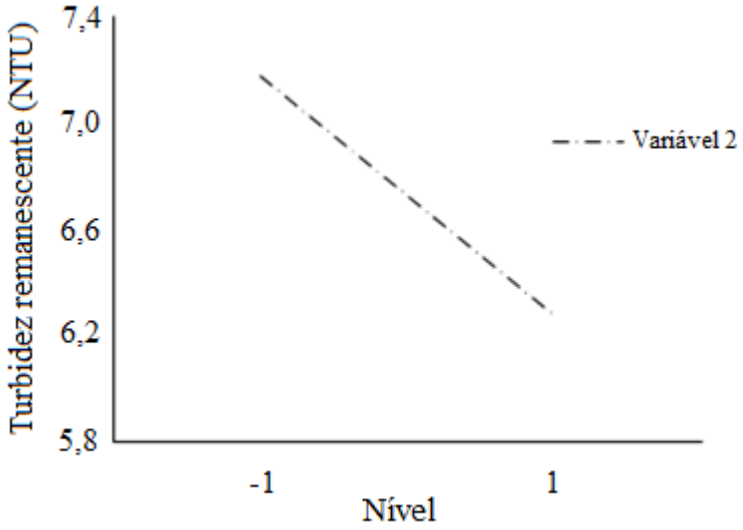


Figura 5 - Efeito do fator da variável 2 no experimento fatorial



Nota-se na comparação das Figuras 4 e 5 que, visualmente, o ângulo da reta dos efeitos da variável 2 é mais acentuado, sugerindo maior influência.

Figura 6 – Interação da variável 1 com variável 2 no experimento fatorial

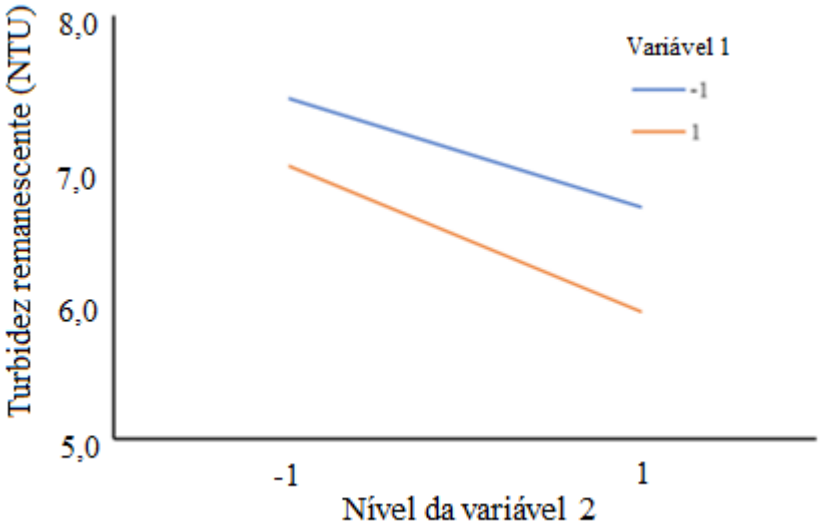
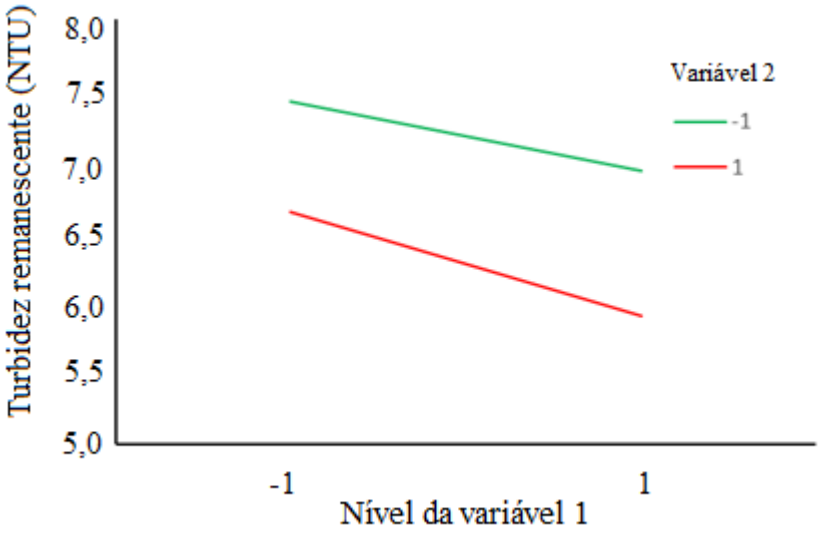


Figura 7 – Interação da variável 2 com a variável 1 no experimento fatorial



As retas não se cruzam nos gráficos de interação das Figuras 6 e 7, sem efeitos inversamente proporcionais. Calculou-se, então, a ANOVA para o experimento, como expresso na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise de variância com experimento fatorial 2^2

Componentes	G_l	SQ	QM	Valor-F	Valor-p
Variável 1	1	1,1224	1,1224	40,557	0,000216 *
Variável 2	1	2,4571	2,4571	88,783	$1{,}32 \times 10^{-5}$ *
Interação entre V_1 e V_2	1	0,0494	0,0494	1,785	0,2182
Resíduos	8	0,2214	0,0227		

* significante a 5%; G_l = Graus de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; QM = Quadrados médios

Observa-se que a influência das variáveis principais foi significativa, confirmando a tendência mostrada pelo boxplot na Figura 3 onde a interação entre elas não foi significativa. Em termos da variável 1, a presença da mistura rápida, era esperada a significância, visto que a reação de adsorção e neutralização ocorre de 0 a 1 s, sendo necessária grande dispersão, enquanto a formação dos insolúveis ocorre de maneira mais lenta (Amirtharajah e Mills, 1982). Já Allerdings et al. (2015) relatam que esse mecanismo é restrito a situações em que há baixa concentração de carbono orgânico total e baixa matéria orgânica dissolvida, além de condições operacionais de pH mais ácidos e dosagens baixas de coagulante. Hessam e Mehdinejad (2021), por sua vez, observaram para água de baixa turbidez, que a presença de mistura rápida proporciona a remoção de 86,7% de turbidez, em comparação com 73,8% de remoção na ausência da mistura rápida, reforçando a pertinência da etapa.

Relacionado à influência dos gradientes decrescentes na etapa da floculação, a verificação torna-se importante, por trata-se de variável de influência condicionada a características da água bruta e ao tratamento (MORUZZI e OLIVEIRA, 2013). Nikoonahad et al. (2017) observaram melhor remoção de turbidez, sólidos suspensos totais, e carbono orgânico dissolvido, em arranjo de gradientes de floculação de 40 s^{-1} inicial e 10 s^{-1} posterior, em comparação com gradientes únicos de 20, 30 e 40 s^{-1}. Segundo Polazek (2007), agitações mais intensas no início da floculação, garantem maior densidade na agregação dos microflocos e a segunda etapa de agitação, com gradientes de agitação mais baixos, garantem a formação dos macroflocos, com maior capacidade de sedimentação.

CONCLUSÃO

Verifica-se que para a amostra de água bruta de baixa turbidez da represa Cachoeira do França, com coagulação pelo mecanismo de neutralização de cargas com Zeta zero e formação de Al insolúvel, o emprego do nível "+" das variáveis "presença de mistura rápida" e "adoção de gradientes de floculação decrescentes" resultou em diferença significativa das médias a 5%, sendo obtidas melhores reduções de turbidez. O efeito benéfico da presença da mistura rápida é coerente com a teoria referente aos mecanismos de carga, por conta da dependência da rápida dispersão do reagente e da rápida reação de adsorção e neutralização, enquanto a verificação do efeito da adoção de gradientes decrescentes foi atestada. A verificação da abordagem operacional dos floculadores em série com gradientes decrescentes é sugerida, visto que a influência positiva da abordagem varia para águas brutas e reagentes diferentes. Por meio da avaliação de efeito, estima-se que o impacto positivo da presença de gradientes decrescentes na mistura lenta foi maior em intensidade para a amostra tratada. A adoção do experimento fatorial favorece a verificação de mais de uma variável ao mesmo tempo, com a menor necessidade de ensaios, minimizando gastos com reagentes e tempo do experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. Associação Brasileira de normais técnicas. Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. NBR 12216, 1992.

2. ALLERDINGS, D.; FÖSTER, G.; VASYUKOVA, E.; UHL, W. The practical influence of rapid mixing on coagulation in a full-scale water treatment plant. *Water Science & Technology*, v. 71, 2015.

3. ALVES, F. J. L. Escassez, Segurança Hídrica e os negócios com a água na região metropolitana de São Paulo. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciência Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Acesso em: 10 dez. 2023.

4. AMIRTHARAJAH, A., MILLS, K. M. Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation. *Journal of American Water Work association*, v.74, n.4, p.210-216, 1982.

5. BENSON, Y. A. Effect of raw water quality on coagulant dosage and optimum pH. Dissertação de mestrado – Universidade tecnológica da Malásia, 2006.

6. CORDEIRO, J. S. E. S.; MOREIRA, F. N. C.; MONTEIRO, J. C. M.; JUNIOR, D. J. P. C.; CUNHA, M. V. P. O. Análise comparativa de coagulantes com auxiliar de coagulação para tratamento de água para abastecimento público em jar-test. 10º simpósio internacional de qualidade ambiental. Porto Alegre, 2016

7. CRUZ, M. A. S.; GONÇALVES, A. A.; ARAGÃO, R.; AMORIM, J. R. A.; MOTA, P.V. M.; SRINIVASAN, V. S.; GARCIA, C. A. B.; FIGUEIREDO, E. E. Spatial and seasonal variability of the water quality characteristics of a river in Northeast Brazil. *Environmental Earth Sciences*. p. 68-78, 2019.

8. CUI, H.; HUANG, X.; YU, Z.; CHEN, P.; CAO, X. Application progress of enhanced coagulation in water treatment. *RSC Advances*, v.10, p. 20231-20244, 2020. DOI: https://doi.org/10.1039/D0RA02979C

9. DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L.P. Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água Volume 1. Editora LDIBE LTDA, São Carlos, São Paulo, 2008.

10. DI BERNARDO, L; DANTAS, A. B; VOLTAN, P. E. N. Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**.** Ed. LDiBe, São Carlos, São Paulo, 2011.

11. ENCIBRA S. A; PRIME ENGENHARIA. Estudo de Concepção – Sistema Produtor São Lourenço – Relatório Síntese. São Paulo, 2011. Disponível em <http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/ppp_sao_lourenco/estudo_concep%C3%A7%C3%A3o_SPSL.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2023.

12. HESPANHOL, K. M. H. Cinética de floculação de suspensões coloidais: Influência da dosagem de coagulante metálico e da concentração de partículas primárias nas constantes de agregação e ruptura. Tese de doutorado (Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

13. HESSAM, A.; MEHDINEJAD, M. H. Investigating the feasibility of removing the rapid mix unit in conventional surface water treatment and its effects on turbidity removal. *Water Practice and Technology*, v. 16, n. 4, pp. 1173-1182, 2021. doi: 10.2166/wpt.2021.070

14. LACERDA, A. B.; RÄDER, A. S.; LOPES, E. S. A eficiência da remoção de coliformes em uma estação de tratamento de água convencional. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 6, 2019. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv5n6-2104

15. MANETTA, L. S. Determinação dos gradientes de velocidade médios em sistemas de câmaras em série visando atender ao critério do menor tempo de floculação total**.** Dissertação de mestrado (Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, 2014.

16. MARQUES, D. G.; CAMPOS, V. Estatística experimental aplicada para determinar o par ideal da dosagem de coagulante e nível de pH de coagulação para tratamento de água de abastecimento público. *Revista DAE*, v. 72, n. 243, p. 44-54, 2024. https://doi.org/10.36659/dae.2024.004

17. MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, S. C. Mathematic modeling and flocculation process analysis. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 36, p. 305-363, 2013.

18. NAN, J.; YAO, M.; CHEN, T.; LI, S.; WANG, Z.; FENG, G. Breakage and regrowth of flocs formed by sweep coagulation using additional coagulant of poly aluminum chloride and non-ionic polyacrylamide. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, pp. 16336-16348, 2016. https://doi.org/10.1007/s11356-016-6805-z

19. NIKOONAHAD, A.; EHRAMPOUSH, M. H.; GHANEIAN, M. T. GHOLIZADEH, A.; GHELMANI, S. Effects of intensity and mixing speed on the efficiency of coagulation and flocculation processes and improving effluent quality from Yazd SBR wastewater treatment plant. *Journal of Water and Wastewater*, v. 28, n. 2, pp. 29-36, 2017

20. PENNOCK, W. Theoretical and practical considerations for hydraulic flocculation. Tese de doutorado (Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Cornell, Nova York, EUA, 2019.

21. POLAZEK, P. Differentiation between different kinds of mixing in water purification – Back to basics. *Water SA*, v. 33, n. 2, 2007.

22. REIS, A. C. A.; FINZER, J. R. D.; BEGNINI, M. L. *Tratamento de água: gradiente de velocidade na coagulação-floculação*. In: XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringá, PR, 2017. Disponível em: <https://repositorio.uniube.br/bitstream/123456789/512/1/TRATAMENTO%20DE%20AGUA%20GRADIENTE%20DE%20VELOCIDADE.pdf.> Acesso em: 12 mai 2023.

23. SHEWA, W. A.; DAGNEW, M. Revisiting Chemically Enhanced Primary Treatment of Wastewater: A Review. *Sustainability*, v. 12, 2020. doi:10.3390/su12155928

24. WEI, N.; ZHANG, Z.; LIU, D.; WU, Y.; WANG, J.; WANG, Q. Coagulation behavior of polyaluminum chloride: Effects of pH and coagulant dosage. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 23, n. 6, p. 1041-1046, 2015.