

I-307 - AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE OPERACIONAL NO EQUIPAMENTO JAR TEST UTILIZANDO O COAGULANTE POLICLORETO DE ALUMÍNIO

Paulo Sérgio Scalize⁽¹⁾

Engenheiro Civil e Biomédico. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). Professor do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária (PPGEAS) e do programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB) na Universidade Federal de Goiás (UFG).

Débora de Lima Braga⁽²⁾

Engenheira Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC). Mestranda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela UFG.

Débora Pereira da Silva⁽³⁾

Engenheira Civil pelo Instituto Federal de Goiás (IFG) – Câmpus Goiânia. Mestranda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela UFG.

Patricia Paulla Oliveira⁽⁴⁾

Engenheira Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC). Mestranda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela UFG.

Rafaella Oliveira Baracho⁽⁵⁾

Engenheira Ambiental e Sanitária pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília (UNB). Doutoranda em Ciências ambiental pela UFG.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Universitária, 1488 – Lote Área – Bloco A – Sala 14 - Goiânia - GO - CEP: 74605-220 - Brasil - Tel: +55 (62) 98110-3030- e-mail: pscalize.ufg@gmail.com

RESUMO

Os métodos utilizados para a otimização da operação, aprimoramento da qualidade da água tratada, redução dos custos do coagulante e a obtenção dos parâmetros de projeto mais eficazes em Estações de Tratamento de Água (ETA) são os ensaios de tratabilidade em equipamentos *Jar Test*. O presente estudo objetivou avaliar a reproduzibilidade dos resultados nos diferentes jarros do equipamento *Jar Test*. Foi coletada água bruta do ribeirão João Leite, localizado em Goiânia/GO e análises foram conduzidas para determinar a dosagem ótima do coagulante Policloreto de Alumínio (PAC). Em um segundo momento, ensaios operacionais em triplicata foram realizados empregando a dosagem ótima pré-definida. Os parâmetros pH, turbidez, cor aparente e temperatura da água foram monitorados. Conclui-se que para as características da água bruta e os parâmetros operacionais utilizados, a dosagem ótima do coagulante PAC foi de 7,5 mg/L, tendo apresentado remoções acima de 91% para turbidez e acima de 88% para cor aparente. Com relação a uniformidade dos parâmetros, verificou-se no geral média e baixa variabilidade dos resultados obtidos para turbidez e cor aparente, respectivamente. Observou-se que o jarro nº 3 apresentou discrepantes valores de turbidez em todo o experimento e os jarros nº 1 e 6 elevados valores da média de cor aparente em algumas amostras. Esses resultados demonstram a necessidade de manutenção corretiva dos jarros. Verificou-se também que para o tempo de sedimentação de 30 minutos o coeficiente de variação foi menor, podendo ser justificado pela estabilização do processo de sedimentação dos flocos.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de água, clarificação, *Jar Test*, reproduzibilidade, uniformidade operacional.

INTRODUÇÃO

O tratamento das águas naturais para fins de consumo humano, tem como finalidade de adequar a água bruta aos limites físicos, químicos, biológicos e radioativos estabelecidos na Portaria de Consolidação nº 5 (BRASIL, 2017). As tecnologias de tratamento englobam três fases, sendo elas, clarificação, filtração e desinfecção, nas quais, abrangem processos e operações unitárias. A fase de clarificação é composta pela coagulação, floculação e decantação/flotação e tem por finalidade a remoção dos sólidos suspensos e parcela dos sólidos dissolvidos.

A etapa de filtração é responsável, essencialmente, pela remoção de sólidos dissolvidos, microrganismos, como bactérias, cistos e oocistos de protozoários e a desinfecção assegura a inativação dos microrganismos ainda presentes no escoamento, como bactérias e vírus (LIBÂNIO, 2010). Segundo Knevitz (2017), o processo de clarificação integra o tratamento do tipo convencional de água bruta.

Os métodos utilizados para a otimização da operação, aprimoramento da qualidade da água tratada, redução dos custos do coagulante e a obtenção dos parâmetros de projeto mais eficazes em Estações de Tratamento de Água (ETA) são os ensaios de tratabilidade em equipamentos *Jar Test*. A otimização das etapas de coagulação, floculação e sedimentação ocasionam uma maior eficiência global da ETA, determinando a dosagem ótima do coagulante (BARTIKO e JULIO, 2015).

O ensaio de jarros ou *Jar Test* funciona, comumente, por meio de motores elétricos que permitem a variação da velocidade de rotação dos agitadores, no qual possuem entre si o mesmo número de rotação. A agitação pode ocorrer através de hastes ou palhetas ou por meio magnético. Normalmente, são empregados equipamentos com 3 ou 6 jarros com volume útil de 2,0 L.

Nesses ensaios, parte-se do pressuposto que todos os jarros proporcionam as mesmas condições operacionais, sem levar em consideração possíveis diferenças que podem ocorrer nos resultados obtidos em cada um dos jarros, ou seja, uma avaliação da reprodutibilidade em cada um dos jarros empregando a mesma dosagem. Isso pode-se tornar mais agravante ao longo dos anos de utilização dos equipamentos *Jar Test* e torna-se especialmente relevante visto que é um dos equipamentos mais utilizados nas operações diárias de uma ETA, independente do seu porte.

OBJETIVO

O objetivo desse trabalho consiste em avaliar a operação do equipamento *Jar Test*, a partir do estudo da reprodutibilidade dos resultados nos diferentes jarros do equipamento, empregando a mesma dosagem.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi desenvolvida em quatro etapas, sendo que na Etapa 1 realizou-se a coleta de água bruta (72,0 L) pertencente ao ribeirão João Leite e do coagulante utilizado na ETA Jaime Câmara localizada em Goiânia-GO, responsável pelo abastecimento de grande parcela da população goiana e cuja a vazão nominal corresponde a 2,2 m³/s. O coagulante utilizado para o tratamento da água bruta na ETA corresponde ao Policloreto de Alumínio (PAC) e possui as características apresentadas na Tabela 1.

Na Etapa 2 realizou-se o preparo do material em laboratório para execução do ensaio de tratabilidade e análise dos parâmetros pH, turbidez, cor aparente e temperatura da água de acordo com os métodos preconizados no Standard Methods (APHA; AWWA; WEF, 2012). Procedeu-se também a diluição do coagulante PAC para 0,3% de maneira que se obteve as dosagens para a determinação da dosagem ótima de coagulante.

Na Etapa 3 executou-se o ensaio de *Jar Test* no equipamento HX 218LBT-06 220V do fabricante Nova Ética em dois momentos: i) Ensaio Preliminar: onde se realizou a determinação da dosagem ótima do coagulante a partir das dosagens de 0,0; 1,5; 3,0; 4,5; 6,0; 7,5; 10,5; 12,0; 13,5; 15,0; 16,5 mg/L e ii) 1º, 2º e 3º Ensaios: onde foram realizados ensaios em triplicata em todos os 6 jarros do equipamento *Jar Test*, empregando a dosagem ótima obtida no ensaio preliminar. Os ensaios em *Jar Test* foram realizados sob as condições operacionais descritas na Tabela 1 e procedeu-se a análise da turbidez e cor aparente remanescente.

Conforme estabelecido no manual do equipamento, posicionou-se os tubos de fundo abaulado para despejo do coagulante e os tubos com fundo chato para a coleta de amostras. Em seguida, procedeu-se a homogeneização da água bruta e ajuste da temperatura da água coletada na ETA em um balde e preencheu-se os seis jarros com água como ilustrado na Figura 1.

Tabela 1: Parâmetros operacionais do ensaio de *Jar Test* e dados técnicos do coagulante empregado no estudo

Etapa	Condições Operacionais		Coagulante	
	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Mistura Rápida	Gradiante de velocidade	900 s ⁻¹	Produto	Policloreto de Alumínio (PAC)
	RPM	440	Teor de Alumínio	10,57 % Al ₂ O ₃
	Tempo de detenção	60 s	Basicidade Livre	62,51 % Al ₂ O ₃
Mistura Lenta	Gradiante de velocidade	40 s ⁻¹	Densidade a 20° C	1,261 g/cm ³
	RPM	54	Turbidez	9,90 NTU
	Tempo de floculação	15 min	Insolúvel em água	0,01%
Sedimentação	Tempo de sedimentação (T _{S1})	15 min	pH	4,00
	Tempo de sedimentação (T _{S2})	30 min		

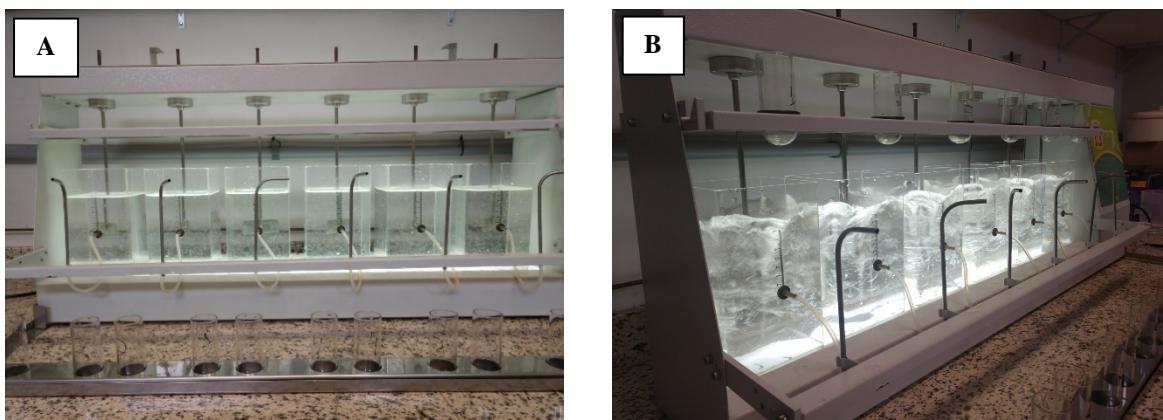


Figura 1: Ensaio de tratabilidade em equipamento de *Jar Test*: Jarros preenchidos com água bruta (A) e agitação da água bruta (B).

Por fim, na Etapa 4 realizou-se a compilação e análise dos dados. Foram produzidos gráficos para os parâmetros turbidez e cor aparente e realizou-se a análise estatística descritiva, por intermédio do cálculo da média, o desvio padrão (σ) e o Coeficiente de Variação (CV) dos resultados obtidos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras 2 e 3 estão apresentados, respectivamente, os valores de turbidez e cor aparente remanescentes obtidos no Ensaio Preliminar para a obtenção da dosagem ótima no intervalo de 0 a 16,5 mg/L de PAC. Constatou-se que a dosagem de 7,5 mg/L propiciou a melhor qualidade final da água, com base nas características da água bruta contida na Tabela 2, no qual verificou-se a remoção de 91% de turbidez e 88,8% de cor aparente para o T_{S1} e remoção de 95% de turbidez e 93,4% de cor aparente para o T_{S2}.

A pesquisa realizada por Santos (2011) na ETA do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro constatou que a melhor dosagem do coagulante PAC foi de 50 e 60 mg/L para amostras de água bruta com turbidez na faixa de 46 NTU e cor de 324 uC, após a adição da cal para atingir o pH ótimo e com o tempo de sedimentação de 20 min. O resultado de dosagem ótima do coagulante PAC foi superior ao valor encontrado na pesquisa em questão devido as características da água bruta apresentarem concentração elevadas dos parâmetros físicos, podendo indicar assim elevada deterioração da qualidade da água.

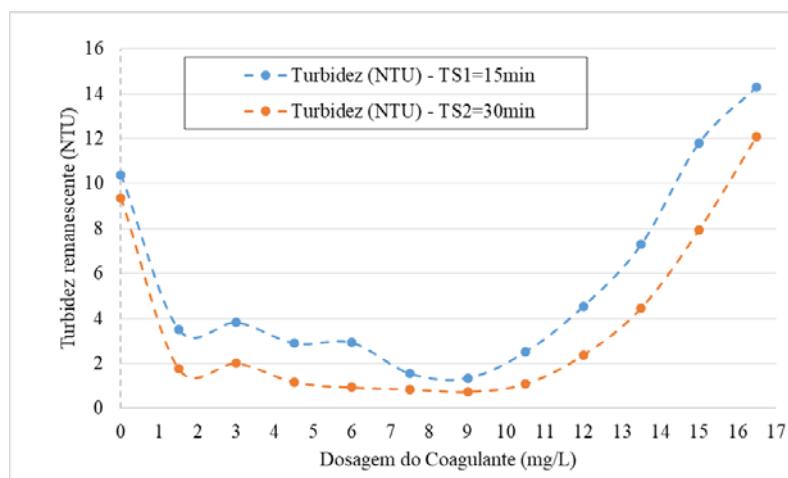


Figura 2: Resultados obtidos no ensaio preliminar que determinou a dosagem ótima do coagulante para remoção de turbidez.

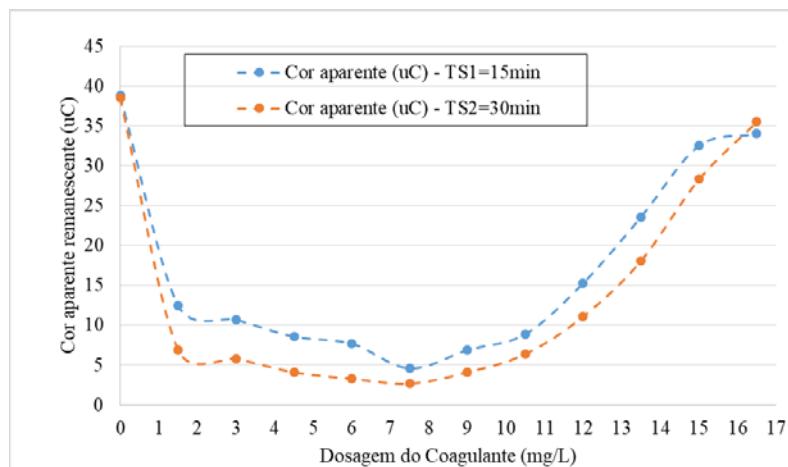


Figura 3: Resultados obtidos no ensaio preliminar que determinou a dosagem ótima do coagulante para remoção de cor aparente.

Na Tabela 2 verifica-se que os valores da turbidez apresentaram elevada variação na 1^a parte do ensaio com relação à 2^a parte, sendo que os intervalos de dosagem do coagulante PAC analisados foram entre 0 e 7,5 mg/L e 9,0 e 16,5 mg/L, respectivamente, esse comportamento pode ser associado a alteração natural das características da água bruta no momento da coleta (VON SPERLING, 2014).

Tabela 2: Resultados dos parâmetros da água bruta do Ribeirão João Leite utilizados no ensaio preliminar de dosagem ótima no equipamento de Jar Test.

Parâmetro	Ensaio preliminar – 1 ^a parte	Ensaio preliminar – 2 ^a parte
Temperatura da água	25,4 °C	24,8 °C
pH	7,33	7,29
Turbidez	17,4	10,8
Cor aparente	40,9	40,2

Após determinação da dosagem ótima de coagulante no Ensaio Preliminar, foram realizados ensaios em triplicata, com dosagem de 7,5 mg/L, para verificar a operação do equipamento *Jar Test*. A Tabela 3 apresenta as características da água bruta nos ensaios em triplicata, verifica-se que o parâmetro pH apresentou menor variabilidade (0,28%), em contrapartida o parâmetro turbidez apresentou a maior variabilidade (9,23%), seguido da cor aparente (1,80%).

Tabela 3: Resultados dos parâmetros da água bruta do Ribeirão João Leite utilizados nos ensaios em triplicata no equipamento de *Jar Test*.

Equipamento Nova Ética						
Parâmetro	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	Média	σ	CV (%)
Temperatura da água	24,4	24,8	24,7	24,63	0,21	0,85
pH	7,22	7,26	7,24	7,24	0,02	0,28
Turbidez	11,5	9,71	10	10,40	0,96	9,23
Cor aparente	39,3	40,6	40,5	40,13	0,72	1,80

Verifica-se na Tabela 4 que a variação do pH ficou entre 6,82 e 7,03 e o CV entre 0,24% e 0,61% para $T_{S1}=15$ min e entre 6,86 e 7,00 e o CV variou de 0,37% a 0,62% para $T_{S2}=30$ min, logo houve baixa variabilidade dos valores de pH estando próximo da neutralidade, sendo de baixa dispersão ($CV \leq 15\%$) e homogêneos.

Tabela 4: Resultados do parâmetro pH, obtidos no 1º, 2º e 3º ensaio para o tempo de sedimentação de 15 (T_{S1}) e 30 minutos (T_{S2}).

Ts (min)	Ensaio	Jarros						CV (%)
		1	2	3	4	5	6	
15	1º	6,82	6,87	6,90	6,92	6,93	6,92	0,61
	2º	6,91	6,97	6,97	6,95	6,97	7,00	0,43
	3º	7,00	7,00	7,03	7,00	6,99	6,98	0,24
30	1º	6,86	6,89	6,92	6,91	6,93	6,92	0,37
	2º	6,88	6,94	7,00	6,98	6,97	6,98	0,62
	3º	6,91	6,97	6,99	7,00	6,98	7,00	0,49

Com relação aos valores de turbidez remanescente, é possível verificar na Tabela 5 que para $T_{S1}= 15$ min que os CV no 1º, 2º e 3º ensaio foram de 16,43%, 11,52% e 15,98% respectivamente, sendo assim, a menor variabilidade entre os jarros no 2º ensaio pode ser evidenciada pelos menores valores de turbidez entre 1,21 NTU e 1,66 NTU. No $T_{S2}=30$ min observa-se os CV de 18,25%, 30,92% e 24,02% referente ao 1º, 2º e 3º ensaio, no qual constata-se a menor variabilidade no 1º ensaio, no entanto, os valores de turbidez remanescente foram elevados com relação aos demais ensaios e variaram entre 0,70 NTU e 1,08 NTU. Portanto, verifica-se que 66,67% apresentaram média dispersão dos dados ($15\% < CV \leq 30\%$), com exceção do 2º ensaio ($T_{S1}= 15$ min) que apresentou baixa dispersão e o 2º ensaio ($T_{S2}=30$ min) com alta dispersão ($CV \geq 30\%$).

Tabela 5: Resultados de turbidez remanescente no 1º, 2º e 3º ensaios para o tempo de sedimentação 15 (T_{S1}) e 30 minutos (T_{S2}), juntamente com média, desvio padrão e CV.

Ts (min)	Ensaio	Jarros						CV (%)
		1	2	3	4	5	6	
15	1º Ensaio	1,86	1,62	2,04	2,54	2,15	1,76	16,43
	2º Ensaio	1,66	1,34	1,54	1,39	1,21	1,57	11,52
	3º Ensaio	1,64	1,27	1,93	1,73	1,99	1,51	15,98
	Média	1,72	1,41	1,84	1,89	1,78	1,61	-
	Σ	0,12	0,19	0,26	0,59	0,50	0,13	-
	CV (%)	7,07	13,13	14,31	31,31	28,20	8,09	-
30	1º Ensaio	1,08	0,73	0,81	0,97	0,70	0,74	18,25
	2º Ensaio	0,66	0,55	1,00	0,83	0,51	0,47	30,92
	3º Ensaio	0,66	0,46	0,81	0,79	0,83	1,00	24,02
	Média	0,80	0,58	0,87	0,86	0,68	0,74	-
	Σ	0,24	0,14	0,11	0,09	0,16	0,27	-
	CV (%)	30,31	23,70	12,56	10,95	23,67	35,97	-

Figura 4: Gráfico *box plot* dos valores de turbidez em cada jarro do equipamento *Jar Test* para o tempo de sedimentação 15 (A) e 30 minutos (B).

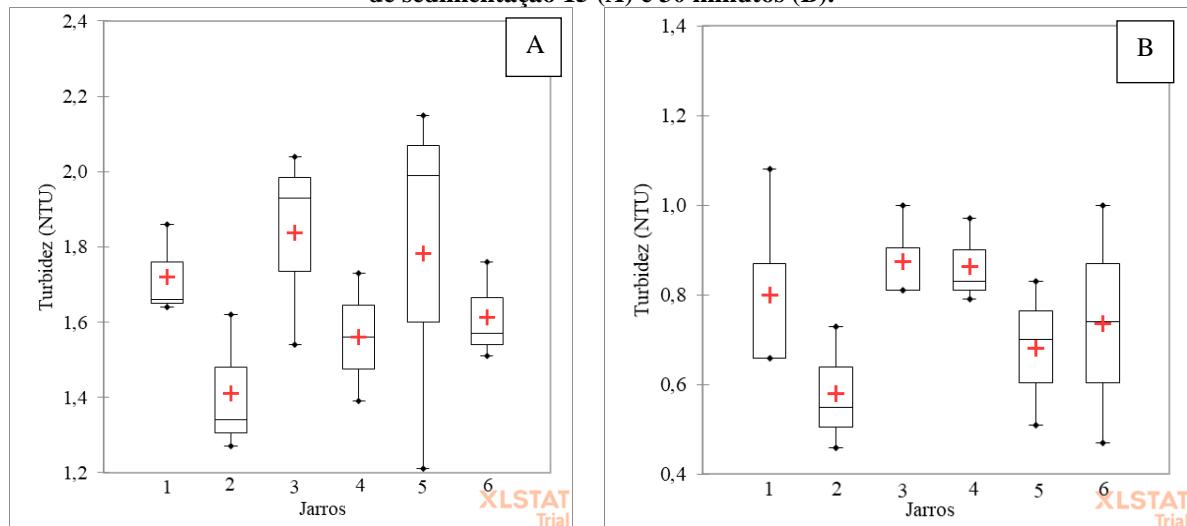
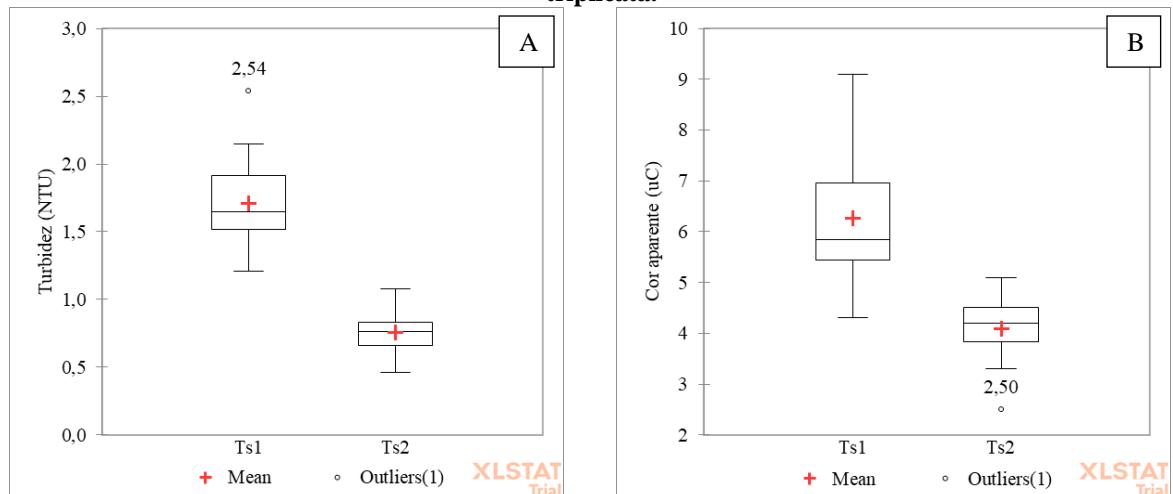


Figura 5: Gráfico *box plot* com outliers dos valores de turbidez (A) e cor aparente (B) dos ensaios em triplicata.



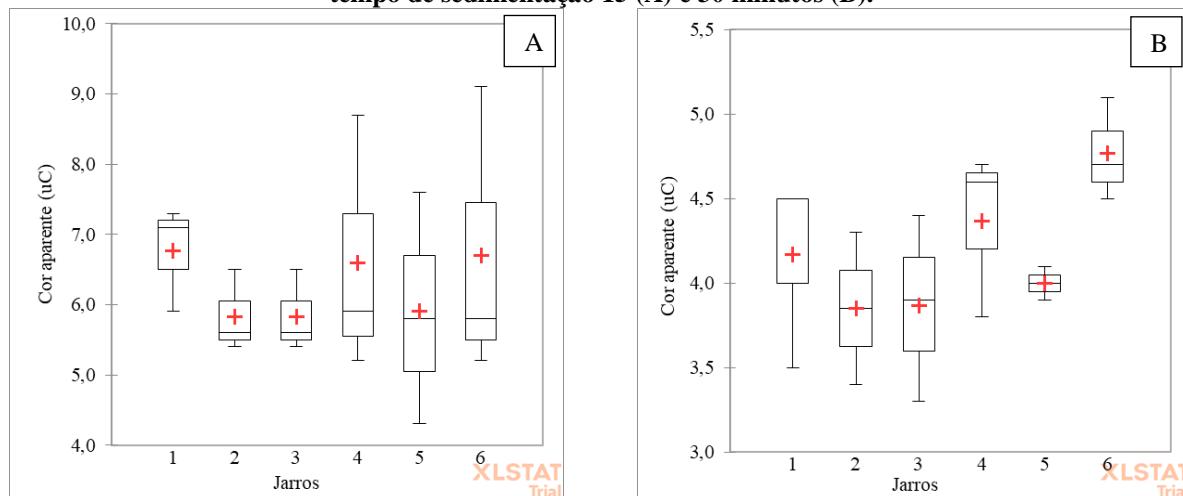
Os valores de cor aparente podem ser observados na Tabela 6. Observa-se no 1º ensaio uma variação de 6,50 uC a 9,10 uC, no 2º ensaio uma variação de 5,60 uC a 7,40 uC e no 3º ensaio uma variação de 4,30 uC a 5,90 uC, considerando $T_{S1} = 15$ min. Para essa condição, o CV no 1º, 2º e 3º ensaio foram de 12,05%, 12,35% e 10,33% respectivamente.

Quanto aos ensaios com $T_{S2}=30$ min, foi observada uma variação de 3,90 uC a 4,70 uC, 3,40 uC a 4,70 uC e 2,50 uC a 5,10 uC, no 1º, 2º e 3º ensaio respectivamente, de modo que os CV foram de 6,19%, 12,04% e 23,36%. Logo, verifica-se 83,33% dos ensaios apresentaram baixa dispersão e 16,67 % média dispersão. Com o objetivo de auxiliar na análise da variação dos dados de cor aparente em cada jarro, elaborou-se a Figura 6 contendo o gráfico do tipo *box plot* para os diferentes tempos de sedimentação, enquanto que o gráfico da Figura 5B desconsiderou o valor extremo. Com relação ao desempenho dos agitadores em cada jarro, verifica-se para $T_{S1}= 15$ min que os CV variaram entre 10,04% e 31,34%, sendo que, a menor média foi de 5,83 uC no jarro nº 2 e a maior de 6,77 uC no jarro nº 1 conforme ilustrado na Figura 6A. No $T_{S2}=30$ min observa-se que os CV estão compreendidos entre 2,50% e 26,47%, a menor média corresponde a 3,40 uC nos jarros nº 2 e a maior média de 4,77 uC no jarro nº 6 conforme ilustrado na Figura 6B. O valor extremo de 2,50 foi observado no jarro nº 2. Após a sua exclusão, a média do jarro nº 2 tornou-se 3,85 uC permanecendo o menor valor. Constatase que o agitador do jarro nº 2, no geral, apresentou a melhor eficiência e o pior desempenho foi constatado no jarro nº 1 $T_{S1}= 15$ min e no jarro nº 6 para $T_{S2}=30$ min.

Tabela 6: Resultados de cor aparente remanescente no 1º, 2º e 3º ensaios para o tempo de 15 (T_{S1}) e 30 minutos (T_{S2}), juntamente com média, desvio padrão e CV.

T_S (min)	Ensaio	Jarros						CV (%)
		1	2	3	4	5	6	
15	1º Ensaio	7,30	6,50	7,90	8,70	7,60	9,10	12,05
	2º Ensaio	7,10	5,60	7,40	5,90	5,80	5,80	12,35
	3º Ensaio	5,90	5,40	4,90	5,20	4,30	5,20	10,33
	Média	6,77	5,83	6,73	6,60	5,90	6,70	-
	σ	0,76	0,59	1,61	1,85	1,65	2,10	-
30	CV (%)	11,19	10,04	23,87	28,06	28,00	31,34	-
	1º Ensaio	4,50	4,30	4,40	4,70	3,90	4,50	6,19
	2º Ensaio	4,50	3,40	3,90	4,60	4,00	4,70	12,04
	3º Ensaio	3,50	2,50	3,30	3,80	4,10	5,10	23,36
	Média	4,17	3,40	3,87	4,37	4,00	4,77	-
	σ	0,58	0,90	0,55	0,49	0,10	0,31	-
	CV (%)	13,86	26,47	14,24	11,30	2,50	6,41	-

Figura 6: Gráfico box plot dos valores de cor aparente em cada jarro do equipamento Jar Test para o tempo de sedimentação 15 (A) e 30 minutos (B).



CONCLUSÕES

Conclui-se que para as características da água bruta e os parâmetros operacionais utilizados no ensaio em equipamento *Jar Test*, a dosagem ótima do coagulante PAC foi de 7,5 mg/L, tendo apresentado remoções acima de 91% para turbidez e acima de 88% para cor aparente.

Com relação a uniformidade dos parâmetros, no geral houve média variabilidade dos resultados obtidos para turbidez, no qual 16,67% apresentou baixa dispersão e 66,67% média dispersão. Quanto ao parâmetro cor aparente, os dados foram homogêneos, no qual 83,33% apresentou baixa dispersão e 16,67% média dispersão. Logo, ocorreu maior uniformidade dos dados no ensaio de tratabilidade para o parâmetro cor aparente.

Em virtude da importância do equipamento *Jar Test* nas operações diárias de uma ETA, analisou-se o desempenho dos agitadores em cada jarro, no qual, nota-se que o jarro nº 3 necessita de manutenção corretiva, devido aos elevados valores de turbidez média em todo o experimento. Verificou-se também que no $T_{S2}=30$ min o CV (12,56%) foi menor que o CV (14,31%) para $T_{S1}= 15$ min, esse comportamento pode ser justificado pela estabilização do processo de sedimentação dos flocos. Quanto ao parâmetro cor aparente, o jarro nº 1 e 6 necessitam de manutenção corretiva, devido aos elevados valores da média para T_{S1} e T_{S2} respectivamente.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION-APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater.** American Water Works Association, Water Environmental Federation, 22st ed. Washington, 2012.
2. BARTIKO, D; JULIO, M. Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 1, 2015.
3. BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5**, de 28 de setembro de 2017. Brasília, 2017
4. SANTOS, N. A. P dos. **Avaliação do desempenho de produtos químicos na coagulação da água produzida na ETA do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro com vistas à redução dos seus custos.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
5. KNEVITZ, L. A. **Avaliação da eficiência de remoção de turbidez de um sistema de clarificação.** 2017. Trabalho de Diplomação (Bacharelado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
6. LIBÂNO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** 3. ed. Editora Átomo: Campinas, 2010.
7. VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 4. ed. Editora UFMG: Belo Horizonte, 2014.