

II-060 – OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO NA ETE ICARAÍ, NITERÓI - RJ

Maria José de Araújo Caldeira Ramalho⁽¹⁾

Mestre em Engenharia do Ambiente pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Dario de Andrade Prata Filho

Professor do Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Universidade Federal Fluminense.

André Lermontov

Doutor em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Gerente de Tecnologia do Grupo Águas do Brasil S/A com mais de 16 anos de experiência em saneamento, tratamento de água e efluentes.

Rodrigo Alves dos Santos Pereira

Engenheiro Ambiental pela Escola de Engenharia da UFF. Analista de Pesquisa e Tecnologia do Grupo Águas do Brasil S/A. Mestrando em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ.

Philippe Lopes da Silva Araújo

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP). Coordenador Operacional de Esgotos da Águas de Niterói.

Endereço⁽¹⁾: Rua Doutor Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal- Tel: (+351)225081400- e-mail: halfeld@sc.usp.br

RESUMO

O estudo de otimização do processo de coagulação-floculação da estação de tratamento de esgoto de Icaraí, foi iniciado com uma pesquisa dos principais coagulantes disponíveis no mercado brasileiro e utilizado em investigações experimentais, sendo consultadas empresas e diversas bases de pesquisa e indexação científica. Dessa pesquisa comparativa foram selecionados os quatro mais citados e disponíveis para compra: Cloreto Férrico; Policloreto de alumínio (PAC); Sulfato de Alumínio e Tanino. Devido aos resultados significativamente diferentes de DQO, entre as coletas de água bruta, as dosagens aplicadas foram normalizadas por tratamento de DQO (mg/L). Em Jar-Test, foram adotadas velocidades de 116 rpm, durante 27 s e 80 rpm durante 20 min, seguidos de uma sedimentação de 30 min. As doses ótimas determinadas, para a DQO média de entrada na ETE de Icaraí (350 mg/L), foram de 201 mg/L para o cloreto férrico; 139 mg/L para o Tanino Tanfloc SL; 439 mg/L para o sulfato de alumínio; 116 mg/L para o Tanino COARG100; 111 mg/L na experiência com PAC. Tendo em conta o preço por quilograma (R\$/Kg) de cada coagulante, o custo de tratamento com Cloreto Férrico é de, por 7,70 R\$/dose; COARG100 - 31,75 R\$/dose; Sulfato de Alumínio – 19,0 R\$/dose, PAC – 5,71 R\$/dose e Tanfloc SL 9,75 R\$/dose. O coagulante que apresentou melhor custo-benefício foi o cloreto férrico, que é atualmente utilizado na ETE Icaraí.

PALAVRAS-CHAVE: Coagulantes, eficiência, coagulação-floculação, custo.

INTRODUÇÃO

Existem vários tipos de tratamento possíveis para clarificar e limpar o efluente de acordo com os padrões legislativos de descarga. Desde o tipo biológico ao quimicamente assistido, existem diferentes opções que são selecionadas para cada estação de tratamento, de acordo com a área disponível e a necessária ao tratamento, vazão de esgoto recebido, necessidades de tratamento dependendo das características iniciais de entrada do efluente bruto, e orçamento econômico disponível.

Com a evolução do processo de tratamento químico de coagulação/floculação e a necessidade crescente de novos coagulantes, surgidos pela necessidade de uma demanda mais econômica, eficiente e o mais natural possível para o meio ambiente, o número de coagulantes utilizados no mercado tem vindo a aumentar de forma progressiva. Por muitos anos que o único coagulante utilizado era o sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$), até que na década dos anos 60 entraram também em cena os polímeros orgânicos [1].

Nesse sentido, o presente trabalho apresenta os resultados de aplicação de cinco coagulantes (três inorgânicos e dois orgânicos) num efluente de origem doméstica. O seu objetivo é concluir sobre qual o melhor coagulante a ser aplicado na ETE com base na dose ótima e custo econômico de aplicação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Num processo de investigação das opções mais modernas que existem para uso, importa saber quais os coagulantes mais investigados e publicados na literatura para serem analisados posteriormente em laboratório. Nesse seguimento, foi realizada uma pesquisa online nas bases científicas de publicação indexadas ao portal CAPES (246 bases indexadas), mais 14 bases de indexação mundiais como Science Direct, IEEE Explore, Taylor and Francis ou Index Copernicus International, somando um total de 260. Os resultados foram filtrados por % de nomeações, num total de 54 artigos recolhidos, referentes a testes de coagulação-floculação com coagulantes tradicionais e outros novos, potencialmente emergentes no mercado para venda e aplicação. Os coagulantes foram escalonados por ordem de maior para menor citação percentual (%) [2].

Atualmente os coagulantes mais utilizados, em indústria na Europa e América do Norte, nomeiam-se por sais de ferro e de alumínio [3,4], hidróxido de cálcio. [5] e os sulfatos e/ou cloretos de alumínio e/ou ferro. No Brasil os principais coagulantes químicos usados são o cloreto férrico, sulfato ferroso (a mistura dos dois reagentes), eventualmente sulfato de alumínio e começa-se atualmente a testar a aplicação do policloreto de alumínio.

Por uma questão econômica, para teste em laboratório, foi definido selecionar quatro coagulantes para análise e a escolha foi feita de acordo com o maior número de artigos e publicações referidas. Comparando e sublinhando nas tabelas respectivas os coagulantes mencionados em literatura (Tabela 1) com os fornecidos no mercado do Brasil (Tabela 2), reduzimos os coagulantes para um conjunto eventualmente mais interessante para testar em laboratório – ver Tabela 3.

Tabela 1 - Coagulantes mais citados na literatura

Inorgânicos	% de Citações	Orgânicos	% de Citações
Hidróxido de Cálcio	1,89%	Quitosano	3,77%
Sulfato Ferroso	3,77%		
Sulfato Férrico	7,55%		
Cloreto Férrico	15,09%	Tanino	7,55%
Sulfato de Alumínio	15,09%		
Policloreto de Alumínio (PAC)	22,64%		

Tabela 2 - Coagulantes Fornecidos no mercado Brasileiro

Orgânicos	Inorgânicos
Tanato Quartenário de Amônio (Taninos)	Aluminato de Sódio Líquido
	Cloreto Férrico líquido a 40%
Poliamina	Cloreto de Alumínio
	Cloreto Ferroso
	Silicato de Sódio
	Sulfato férrico
	Sulfato Ferroso
	Policloreto de Alumínio
	Policloreto silicato de Alumínio
	Sulfato de Alumínio

Tabela 3 – Coagulantes Seleccionados para o estudo

Cloreto Férrico
Policloreto de Alumínio (PAC)
Sulfato de Alumínio
Tanino

Os coagulantes resultantes para teste foram o Cloreto Férrico, PAC, Sulfato de Alumínio e Tanino. Adicionalmente foi testado novamente um tanino, mas de um segundo fornecedor.

Entre o Sulfato férrico e o Tanino foi seleccionado o tanino por ser um coagulante de base orgânica que poderá ser eventualmente interessante para a empresa, quer pela área natural em que se encontra inserida, quer pela sua política de proteção ambiental. A semelhança química entre o cloreto e o sulfato férrico descarta a necessidade de teste a ambos, quimicamente tão semelhantes.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas cinco amostras pontuais na ETE para análise. No laboratório os ensaios foram realizados em Jar-Test: foi adotada uma velocidade de 116 RPM durante 27 s para a mistura rápida; uma velocidade de 15 RPM durante 20 min. (mistura lenta) e um tempo de sedimentação de 30 min. Os tempos adotados correspondem aos tempos verificados na ETE de Icarai, afim de obter uma simulação próxima a realidade.

O clarificado foi analisado segundo os parâmetros de turbidez, sólidos suspensos totais (SST) e demanda química de oxigênio (DQO). Os resultados são apresentados sob a forma de gráficos para cada parâmetro analisado, com séries a incluir todos os coagulantes apresentados.

RESULTADOS OBTIDOS

Após os testes em bancada foi possível avaliar o comportamento dos coagulantes aplicados conforme a dosagem no efluente da estação. As análises para turbidez, SST e DQO, podem ser observadas nos tópicos a seguir.

TURBIDEZ

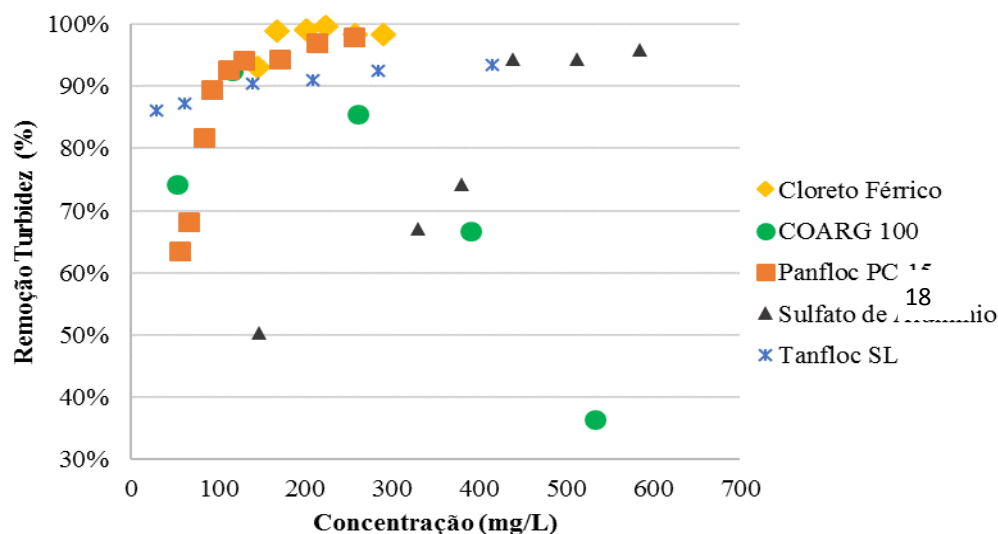


Figura 1 - Turbidez: Representação Gráfica do comportamento do efluente com o aumento da concentração aplicada de diferentes coagulantes

Na análise da turbidez o Tanino Tanfloc SL apresenta uma evolução quase linear, distinguindo-se juntamente com o cloreto férrico, pela pouca variação ao longo da adição de produto, o que se revela uma vantagem em relação aos outros coagulantes por não necessitar de uma vigilância constante e muito ajuste à dosagem aplicada.

Existe uma diferença visível entre os coagulantes orgânicos: o Tanino COARG 100 apenas apresentar um resultado com eficiência equivalente ao Tanino Tanfloc e todos os outros resultados apresentam eficiências muito inferiores às do Tanfloc.

Em termos de eficiência, o cloreto férrico apresenta os melhores resultados, chegando próximo a 100% de remoção de turbidez, superior a todos os outros coagulantes testados. Se for considerado desejável a maior remoção possível deste parâmetro, a dosagem de cloreto férrico deve ser vista como melhor opção. O Panfloc pode ser entendido com alternativa nesse caso, uma vez que atinge rapidamente eficiência da ordem de 90%.

SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS

Em relação à evolução dos SST existem algumas diferenças a realçar, face aos resultados da turbidez, e a maior diferença é o caso do sulfato de alumínio, que apresenta eficiência em torno dos 80 a 85%, e é inferior ao observado para os outros coagulantes, mas ao mesmo tempo apresenta-se com uma estabilidade bastante diferente da evolução verificada durante a turbidez.

Na Figura 2, o Tanfloc apresenta-se relativamente estável com uma faixa de remoção entre 80 e 90% e apresenta eficiência inferior ao Panfloc e ao Cloreto férrico.

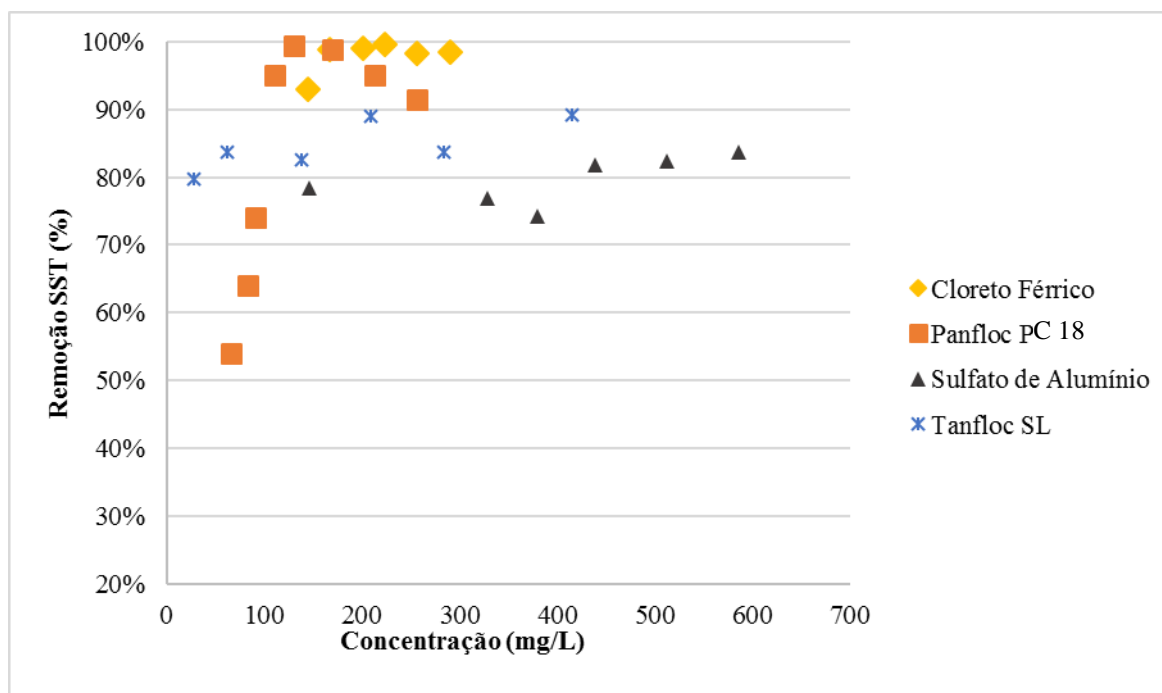


Figura 2 - SST: Representação Gráfica do comportamento do efluente com o aumento da concentração aplicada de diferentes coagulantes.

DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO – DQO

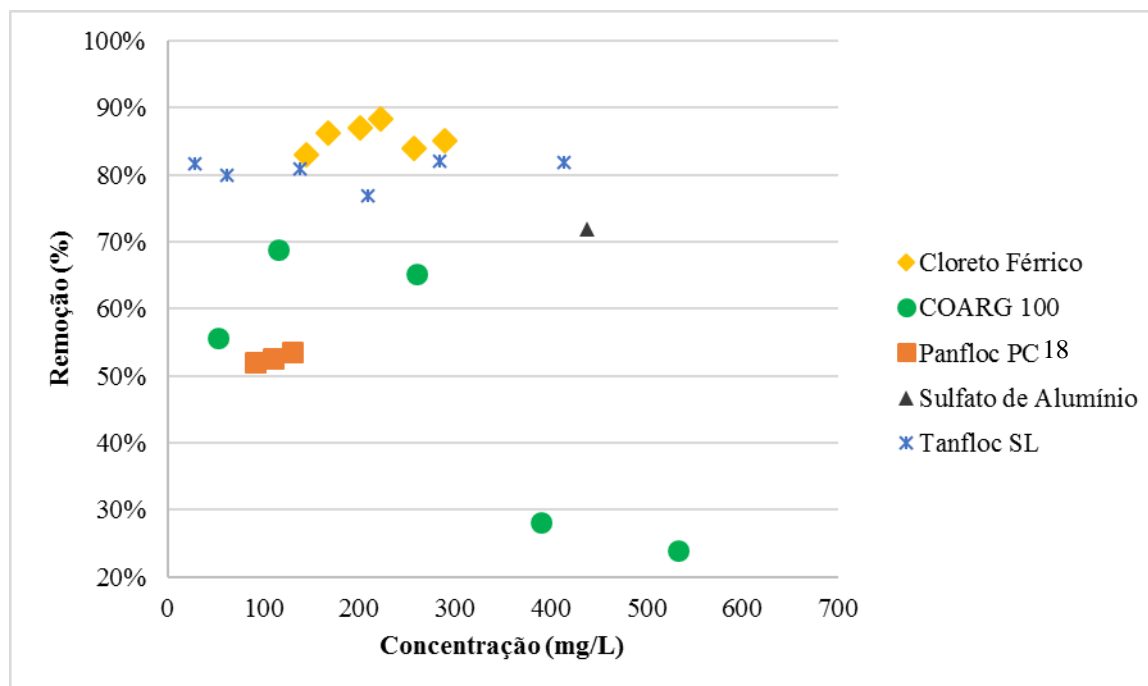


Figura 3 - DQO: Representação Gráfica do comportamento do efluente com o aumento da concentração aplicada de diferentes coagulantes

Durante análise da remoção de DQO, foram observados problemas para o coagulante sulfato de alumínio, que não foram consistentes, em virtude dessa ocorrência, foi determinada a remoção de DQO somente para a dose considerada ótima.

De maneira que todos os coagulantes apresentam ao menos uma dose ótima representada no gráfico é possível afirmar que o Panfloc continua a ser o coagulante com um resultado menos eficiente, seguido do sulfato de alumínio; o cloreto é o coagulante que apresenta maior eficiência de remoção, seguido do tanfloc.

O Tanfloc mantém a eficiência à volta de 80% de remoção ao longo de toda a gama testada e em todas as concentrações testadas, verifica-se que o Tanfloc obteve resultados de eficiência de remoção sempre superiores aos do COARG 100.

DOSE ÓTIMA DE COAGULANTES

Para uma concentração de 150 mg/L (~6 L/min) de coagulante as melhores eficiências de remoção correspondem, respectivamente e por ordem, ao Cloreto Férrico, Tanfloc, COARG 100 e Panfloc.

Tabela 4 – Doses selecionadas como Ótimas para os coagulantes testados

Coagulante	Dose Ótima (L/min)
Cloreto Férrico	8,2
COARG 100	6
Panfloc SL	4,8
Sulfato de Alumínio	19,29
Tanfloc SL	7

A Tabela 4 apresenta as doses ótimas selecionadas, com base nos resultados dos parâmetros anteriores, para cada coagulante testado.

ANÁLISE ECONÔMICA

Para comparação econômica foi realizado o seguinte cálculo:

$$\text{Custo (R\$)} = \text{Dose Ótima} \left(\frac{\text{L}}{\text{min}} \right) * \text{Preço de Dose} \left(\frac{\text{R\$}}{\text{Kg}} \right) * \rho_{\text{coagulante}} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) * 10^{-3} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{L}} \right) * 1 \text{min}$$

Tabela 5 – Custo Econômico (R\$/Dose) para todos os coagulantes

Coagulante	Custo (R\$/dose)
Cloreto Férrico	7,70
COARG 100	31,4
Panfloc SL	5,71
Sulfato de Alumínio	19,0
Tanfloc SL	9,75

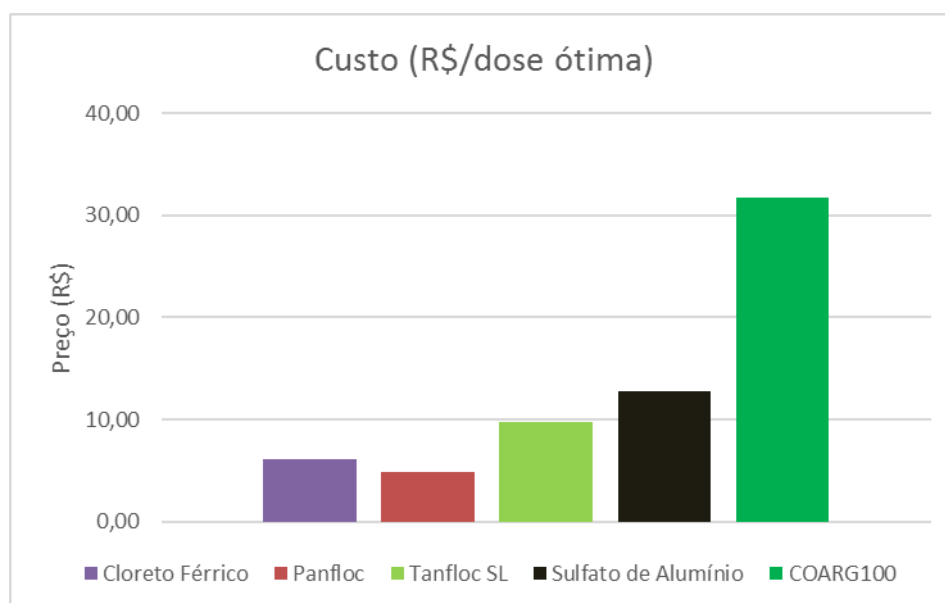


Figura 4 – Representação Gráfica do Custo Econômico (R\$/Dose), para todos os coagulantes.

Pelos resultados obtidos verifica-se que o Panfloc SL é o coagulante de mais custo para o tratamento de esgoto, no entanto em função da baixa eficiência apresentada para remoção de DQO, o que não é desejável em um sistema somente físico-químico como o avaliado, não deve ser a opção final para uso.

O cloreto férrico apresenta o segundo custo mais baixo, e o que apresenta melhor eficiência de remoção para todos os parâmetros. Seguido pelo Tanfloc SL que também apresentou resultados satisfatórios nos testes realizados.

O sulfato de alumínio mostrou um elevado custo para uso, além de baixas eficiências para remoção de turbidez, SST e DQO, o que torna essa escolha inviável para um processo somente físico-químico.

O outro tanino testado, o COARG 100, possui um custo muito elevado ao ser comparado com as outras opções apresentadas nesse estudo, e não apresentou resultados de tratamento do efluente superiores aos outros coagulantes testados.

CONCLUSÕES FINAIS

O Cloreto Férrico e o Panfloc foram os que apresentaram melhores resultados em relação às eficiências apresentadas e destacaram-se por uma rápida aumento de eficiência até à dose ótima; ambos mostraram pouca variação de eficiência após atingirem a dose ótima. O Sulfato de Alumínio foi o coagulante com eficiências de remoção mais baixas (e com dosagens de aplicação mais altas), ficando aquém de todos os outros coagulantes testados.

O COARG 100 apresentou os maiores flocos formados, seguido do Tanfloc SL, Cloreto, Sulfato de alumínio e por último, o Panfloc. Os flocos formados do Panfloc apresentaram, a olho nu, mais fragilidade do que os flocos formados por outros coagulantes, sugerindo uma maior sensibilidade às condições de mistura e sedimentação.

Ambos os coagulantes orgânicos à base de tanino apresentaram eficiências elevadas, mesmo para as doses mais baixas, o que consiste na sua maior vantagem de aplicação, relativo aos coagulantes inorgânicos. O COARG 100 apresenta uma elevada variação de eficiência com a dose acrescentada o que sugere que necessita de uma vigilância apertada no diário operacional; o Tanfloc SL por outro lado apresenta bastante estabilidade ao longo de todas as doses aplicadas.

A estabilidade apresentada pelo Tanfloc é bastante relevante para aplicação na estação de tratamento face às diferenças verificadas entre testes laboratoriais e processos reais e pode também permitir utilização de uma dose inferior à ótima e por isso reduzir o custo de tratamento associado, impulsionando como bom coagulante para tratamento (coagulante mais econômico se forem utilizados 4L/min como vazão de dosagem).

No geral, o Cloreto Férrico e o Panfloc apresentam-se como coagulantes de resultados e comportamentos gráficos eficiência/dose semelhantes mas a dose ótima do Panfloc é relativamente inferior à dose ótima do Cloreto Férrico, traduzindo-se numa economia de 1,26R\$/min de aplicação, face à vazão de cloreto férrico aplicada atualmente na ETE (média de 8L/min). No entanto, por se tratar de um sistema físico-químico, sem outros processos unitários de tratamento, o Panfloc não apresentou eficiência suficiente para remoção de DQO, o que pode impactar a região onde o efluente é lançado.

Concluindo, ao aliar a necessidade de tratamento com o custo inerente ao produto químico, o cloreto férrico ainda é o coagulante com melhor custo-benefício, uma vez que proporciona o melhor tratamento do esgoto, em relação aos parâmetros testados, e possui um custo ainda atrativo dentre os exibidos no trabalho.

RECOMENDAÇÕES

Seria interessante testar novamente o Tanfloc SL entre uma faixa de dosagens 3-7L/min (para DQO=350mg/L), pois se a dose ótima do Tanfloc for de 77 mg/L (dosagem de 4 L/min), este passa a ser o coagulante com melhor custo dentre todos os outros coagulantes. Na faixa 77 a 104 mg/L (dosagem de 5,4 L/min), o tanino é considerado mais econômico do que a aplicação do que o cloreto férrico, uma vez que 5,5 L/min de Tanfloc SL igualam o preço de aplicação de 8 L/min de cloreto férrico.

Os testes realizados não abrangeram a otimização de pH, velocidade e tempo de mistura pelo que é interessante verificar, especialmente para o Tanfloc SL que é um coagulante relativamente novo em mercado, influência da variação de dose obtida com a otimização destes parâmetros.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Association, A.W.W., *Coagulation and Flocculation, in Water Quality & Treatment*, I. McGraw- Hill, Editor. 1999: United States of America.
2. Ramalho, M. J. A. C., *Otimização de um processo de coagulação-floculação na ETE de Icaraí*, Niterói, 2013, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
3. Zhou, Z. Liang, and Y. Wang, *Decolorization and COD removal of secondary yeast wastewater effluents by coagulation using aluminium sulfate*. Desalination, 2008. 225: p. 301-311
4. M. Karthik, et al., *Biodegradability enhancement of purified terephthalic acid wastewater by coagulation-flocculation process as pretreatment*. J. Hazard Matter, 2008. 154: p. 721-730.
5. A. Ginos, T. Manios, and D. Mantzavinos, *Treatment of olive mill effluents by coagulation-flocculation-hydrogen peroxide oxidation and effect on phytotoxicity*. J. Hazard Matter, 2006. 133: p. 135-142.