

Avaliação da remoção de fósforo através da aplicação de lodos de tratamento de água formado por diferentes tipos de coagulantes

Evaluation of phosphorus removal through the application of water treatment sludge formed by different types of coagulants

DOI:10.34117/bjdv7n3-774

Recebimento dos originais: 08/02/2021

Aceitação para publicação: /03/2021

Gustavo Fachini Macluf

Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual Paulista
Instituição: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (PHA) da
Universidade de São Paulo (USP)
E-mail: gustavofmacluf@yahoo.com.br

Sidney Seckler Ferreira Filho

Livre Docente em Engenharia Hidráulica e Sanitária pela Universidade de São
Paulo
Instituição: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (PHA) da
Universidade de São Paulo (USP)
E-mail: ssfilho@usp.br

RESUMO

O excesso de fósforo nas águas é um dos responsáveis pela poluição ambiental dos reservatórios para abastecimento público e os diferentes lodos gerados em estações de tratamento de água – ETAs tem apresentado resultados positivos para a adsorção de fósforo. Neste contexto, a pesquisa tem por objetivo avaliar a capacidade de adsorção do fósforo dos lodos de ETAs formados a partir de diferentes coagulantes inorgânicos. A metodologia consistiu em comparar em escala de laboratório, a capacidade de adsorção do fósforo por diferentes concentrações de 3 tipos diferentes de lodo, através de ensaios de equilíbrio e cinéticos. Os 3 tipos de lodos, SA, CF e PAC foram formados em jar-test a partir do processo de coagulação, floculação e decantação utilizando os coagulantes sulfato de alumínio, cloreto férrico e policloreto de alumínio, respectivamente. Os resultados mostraram grande capacidade de adsorção do fósforo por todos os lodos, assim como, elucidou que o mecanismo de remoção é desempenhado pelos hidróxidos metálicos no lodo. Os menores valores da concentração de fósforo na água obtidos juntamente aos respectivos valores de q foram: $C_e = 0,1$ mg/L e $q = 42,75$ mg/g (SA); $C_e = 0,86$ mg/L e $q = 24,41$ mg/g (CF) e; $C_e = 0,1$ mg/L e $q = 36,38$ mg/g (PAC). Os lodos SA e PAC obtiveram os melhores resultados e muito semelhantes um ao outro. As reações de adsorção do fósforo são de ordem cinética alta, onde em torno de 90 % da reação ocorre em 2 minutos. Além dos resultados da pesquisa que corroboram para o desenvolvimento de aplicações deste processo na remoção do fósforo, a pesquisa contribui para estudos de reaproveitamento de resíduos gerados em estações de tratamento de água.

Palavras chave: adsorção de fósforo, lodo de ETA.

ABSTRACT

The excess of phosphorus in the waters is responsible for the environmental pollution of public supply reservoirs and the different sludge generated in water treatment plants - ETAs have positive results for phosphorus adsorption. In this context, a research aims to evaluate the phosphorus adsorption capacity of ETA sludge formed from different inorganic coagulants. The methodology consists of comparing, on a laboratory scale, an adsorption capacity of phosphorus by different types of 3 different types of sludge, through equilibrium and kinetic tests. The 3 types of sludge, SA, CF and PAC were formed in jar-test from the coagulation, flocculation and decantation process using the aluminum sulfate, ferric chloride and poly aluminum chloride coagulants, respectively. The results induced great phosphorus adsorption capacity by all the sludge, as well as, it elucidated that the removal mechanism is performed by the metallic hydroxides in the sludge. The lowest values between of the concentration of phosphorus in the water and the concentration with the appropriate values q were: $C_e = 0.1 \text{ mg / L}$ and $q = 42.75 \text{ mg / g}$ (SA); $C_e = 0.86 \text{ mg / L}$ and $q = 24.41 \text{ mg / g}$ (CF) e; $C_e = 0.1 \text{ mg / L}$ and $q = 36.38 \text{ mg / g}$ (PAC). The SA and PAC sludges obtained the best results and were very similar to each other. The phosphorus adsorption reactions are of high kinetic order, where around 90% of the reaction occurs in 2 minutes. In addition to the results of the research that support the development of applications of this process in the removal of phosphorus, the research contributes to studies on the reuse of waste generated in water treatment plants.

Keywords: phosphorus adsorption, WTP sludge.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade e consequente aumento da densidade populacional em centros urbanos trazem diversas consequências negativas para o meio aquático, como o aporte de nutrientes (principalmente fósforo) em reservatórios e lagos. Este aporte, por sua vez, propicia o crescimento massivo de algas, afetando diretamente os possíveis usos das águas, ente eles, o abastecimento público.

Dentre as fontes de liberação de fósforo para o meio ambiente, as mais relevantes estão ligadas às atividades humanas estando presente nos esgotos domésticos, efluentes industriais e drenagens de áreas agrícolas.

Neste âmbito, as estações de tratamento de esgoto – ETEs, podem ser vistas como a última barreira capaz de evitar que cargas elevadas de fósforo atinjam os cursos d'água e mananciais. Quando projetadas para tal finalidade, as ETEs contemplam unidades de tratamento terciário visando a remoção de nutrientes, dentre eles o fósforo.

As tecnologias para remoção do fósforo dos esgotos podem se basear no tratamento por via biológica ou no tratamento físico químico, sendo que o último é o

processo mais empregado quando os limites para emissão são mais restritivos, da ordem de 1 mg P/L ou menos.

O tratamento físico químico em ETEs emprega coagulantes químicos a base de metais trivalentes, normalmente sulfato de alumínio e cloreto férrico, para precipitação e adsorção do fósforo, acarretando em custos operacionais expressivos com produtos químicos e disposição de lodo adicional. No entanto, nem 10 % das ETEs existentes no Brasil contem tratamento a nível terciário (IBGE, 2008).

Por outro lado, as estações de tratamento de água – ETAs gera volumes consideráveis de lodos, sendo que a grande maioria das ETAs brasileiras não contemplam unidades de tratamento e desidratação dos lodos, fazendo com que os mesmos sejam descartados nos corpos d'água sem nenhum tipo de tratamento gerando problemas ambientais à jusante.

Em busca de alternativas adequadas para a disposição do lodo das ETAs, algumas companhias de saneamento começaram a descartá-los em ETEs. Estudos científicos avaliaram os impactos decorrentes do lançamento dos lodos de ETAs para tratamento em ETEs concluindo que trata-se de uma alternativa promissora. Além disso, puderam observar uma elevação substancial na eficiência de remoção de fósforo do esgoto relacionado a aplicação do lodo.

Desta forma, o objetivo deste estudo é avaliar em escala de laboratório a capacidade de adsorção de fósforo pelo lodo de ETA, formados a partir de três coagulantes diferentes; o sulfato de alumínio ($\text{Al}(\text{SO}_4)_3$), o cloreto férrico (FeCl_3) e o Policloreto de Alumínio (PAC).

2 METODOLOGIA

2.1 ÁGUA PADRÃO

Foram preparados volumes padronizados de água como matriz para a obtenção dos diferentes tipos de lodo. Foi utilizada a água ultra pura (milli-Q) e uma concentração do mineral caulinita de 50 mg/L que produz uma turbidez na água em torno de 30 UNT.

2.2 ÁGUA SINTÉTICA CONTENDO FÓSFORO

Elaborou-se uma água sintética padronizada para realização dos ensaios de adsorção. Foi utilizada a água ultra pura (milli-Q) e Fosfato de Potássio – KH_2PO_4 objetivando-se uma concentração de fósforo solúvel na faixa de 10 mgP/L.

2.3 PRODUÇÃO DOS LODOS

Neste estudo utilizaram-se três coagulantes diferentes para produção dos lodos:

- Sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) – “SA”
- Cloreto férrico (FeCl_3) – “CF”
- Policloreto de Alumínio – “PAC”

Tendo em vista que a concentração de caulinita na água padrão é constante, buscou-se produzir quantidades próximas dos hidróxidos metálicos para cada um dos coagulantes, visando manter uma relação próxima de proporcionalidade entre as massas de caulinita e de hidróxido em todos os lodos, assim, implicando em dosagens para cada coagulante não necessariamente iguais.

Tabela 1 – Dosagens e massas de lodo para cada coagulante

Coagulante	Dosagem	Massa de lodo
Sulfato de alumínio ¹	100 mg/L	44 mg/L
Cloreto Férrico ²	45 mg/L	45 mg/L
PAC ³	9,2 mgAl/L	45 mg/L

¹ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$: 594 g/mol; ² FeCl_3 : 162,2 g/mol; ³ PAC, dosagem expressa em Al

Os ensaios para produção de lodo foram realizados no equipamento Jar-test, e utilizado NaOH 0,1 N para realizar o ajuste do pH para a faixa de pH neutra, de 6,5 a 7,5 proporcionando a coagulação por varredura para todos os coagulantes. O equipamento foi ajustado com rotação de 200 rpm por 1 minuto para realizar a coagulação, seguido da etapa de floculação com 20 minutos com a rotação de em torno de 20 rpm. Na sequência o equipamento de agitação foi desligado e mantido por volta de 30 minutos em repouso para ocorrência da decantação da água.

Com o lodo depositado no fundo dos jarros, a água clarificada foi descartada por cima, o máximo possível sem perder o lodo. Na Figura 1 pode-se visualizar os diferentes lodos formados.



Figura 1. Lodo adensando para diferentes coagulantes. Da esquerda para direita, sulfato de alumínio, cloreto férrico e PAC.

Então, nesse lodo são realizadas as análises de sólidos suspensos totais (SST) e a análise da massa de caulinita, onde aplica-se ácido concentrado até atingir o pH 2, fazendo o hidróxido solubilizar e restar apenas a caulinita. Com as duas análises obtém-se a massa de hidróxidos metálicos no lodo por diferença.

2.4 ANÁLISE DE FÓSFORO

Para análise de fósforo foi utilizada a metodologia da 23^a edição do Standard Methods for Examination of Water and Wastewater da APHA/AWWA/WEF (2017), o método da colorimetria por método do ácido ascórbico, leitura em espectrofotômetro.

2.5 ENSAIO DE ADSORÇÃO EM EQUILÍBRIO

Em enlarmeyers foram adicionados 100 mL de água sintética e diferentes dosagens de cada tipo de lodo, com dosagens variando de 20 a 1.000 mg/L para realização do ensaio de adsorção. Os enlarmeyers foram colocados em mesa agitadora e mantidos em funcionamento ininterrupto durante 7 (sete) dias, com rotação de 150 rpm.

O lodo utilizado foi produzido no mesmo dia do ensaio, tendo que a idade do lodo altera sua estrutura morfológica e conseqüentemente podem alterar suas capacidades de adsorção. Antes do início do ensaio foi realizada a análise de P na água sintética.

Decorrido o tempo do ensaio de adsorção, foram retiradas alíquotas de cada uma das amostras, filtradas em membrana de 0.45 μm e analisadas as respectivas concentrações de fósforo solúvel.

2.6 ENSAIOS CINÉTICOS DE ADSORÇÃO

Com a intenção de obter o comportamento cinético da reação de adsorção de fósforo pelos diferentes lodos, foram realizadas análises de fósforo em diferentes tempos para diferentes concentrações de lodo e para cada lodo.

Foram utilizados enlarmeyers de 250 mL preenchidos com 100 mL de água sintética e colocados em mesa agitadora. Foram adicionadas em cada enlarmeyer concentrações diferentes de lodo e ligada a mesa agitadora para rotação de 150 rpm, começando a contar o tempo. Então, nos tempos desejados foram extraídas uma amostra, filtrada em membrana de 0,45 µm, separando-se o filtrado para posterior análise da concentração de fósforo. Os tempos utilizados foram de 2, 12, 30, 60 e 90 minutos e concentrações de lodo de 100, 250, 500 e 1.000 mg/L.

2.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

2.7.1 Ensaios de adsorção em condições de equilíbrio

A determinação das isotermas de adsorção proporciona uma avaliação da capacidade de adsorção de um sorvato na fase líquida, (fosfato - P) por um adsorvente sólido (lodo).

Utilizando-se a equação 1 e definindo-se C_0 (mg/L) como a concentração inicial de fósforo na fase líquida inicial, C_e (mg/L) como a concentração de fósforo na fase líquida no equilíbrio, V (L) como o volume da amostra e MS (mg) e como a massa de lodo (adsorvente), pode-se calcular a massa de fósforo adsorvida por massa de lodo q (mg/g), conforme apresentado na equação a seguir.

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{M_c} \quad \text{Equação 1}$$

A adsorção de P pelos lodos de ETAs tem apresentado bons ajustes às isotermas de Langmuir e de Freundlich. Para a análise dos resultados por essas isotermas são necessários utilizar as seguintes equações e linearizações (MWH, 2012):

Isoterma de Langmuir:

$$q_e = \frac{Q_M b C_e}{1 + b C_e} \quad \text{Equação 2}$$

onde,

q_e = concentração de fósforo em equilíbrio na fase sólida (calculado pela equação 1), mg adsorvato/g adsorvente;

Q_M = concentração máxima de fósforo quando os sítios da superfície estão saturados, mg fósforo/g sólido;

b = constante do adsorvato de Langmuir, L/mg

C_e = concentração de fósforo na fase líquida em equilíbrio, mg/L

Linearização:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_M} + \frac{1}{Q_M b} \quad \text{Equação 3}$$

Isoterma de Freundlich:

$$q_e = K C_e^{1/n} \quad \text{Equação 4}$$

onde,

q_e = concentração de fósforo em equilíbrio na fase sólida (calculado pela equação 1), mg adsorvato/g adsorvente;

C_e = concentração de fósforo na fase líquida em equilíbrio, mg/L

K = constante da capacidade de adsorção de Freundlich, (mg/g)(L/mg)^{1/n},

$1/n$ = constante de intensidade de adsorção de Freundlich, adimensional

Linearização:

$$\log q = \log K + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad \text{Equação 5}$$

2.7.2 Análise cinética

Com o intuito de avaliar o comportamento temporal da adsorção do fósforo pelo lodo, os dados serão analisados para reações de n ordem.

A equação global para cinética química de primeira ordem é apresentada na equação 6, onde tem-se que a concentração de fósforo (C_A) diminui proporcionalmente a uma constante K_1 . O desenvolvimento da equação 6 gera a equação 7. (LEVENSPIEL, 1972).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -K_1 C_A \quad \text{Equação 6}$$

$$C(t) = C_{A,0} e^{-k_1 t} \quad \text{Equação 7}$$

A equação 8 apresenta a linearização da equação 7, com a qual pode-se obter graficamente a constante da reação de primeira ordem K_1 plotando-se um gráfico de $\ln(C(t)/C_0)$ versus tempo.

$$\ln \frac{C(t)}{C_0} = -K_1 t \quad \text{Equação 8}$$

A equação global para a cinética química de segunda ordem é apresentada na equação 9, a concentração de fósforo diminui exponencialmente proporcional a uma constante K_2 , tendo como resultado do seu desenvolvimento algébrico a apresentação da equação 10 (AWWA, 1999).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -K_2 C^2 \quad \text{Equação 9}$$

$$C(t) = \frac{C_0}{1 + K_2 C_0 t} \quad \text{Equação 10}$$

A equação 11 apresenta a linearização da equação 10, com a qual pode-se obter graficamente a constante da reação de segunda ordem K_2 plotando-se um gráfico de $(1/C(t))$ versus tempo.

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_0} + K_2 t \quad \text{Equação 11}$$

A equação global para a cinética química de ordem n é apresentada na equação 12, a concentração de fósforo diminui exponencialmente proporcional a uma constante K_n tendo como resultado do seu desenvolvimento algébrico a apresentação da equação 13 (Snoeyink & Jenkins).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -K_n C^n \quad \text{Equação 12}$$

$$\left(\frac{1}{n-1}\right) \left[\left(\frac{1}{C_0^{n-1}}\right) - \left(\frac{1}{C_t^{n-1}}\right) \right] = -K_n t \quad \text{Equação 13}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ADSORÇÃO EM CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO

3.1.1Caulinita

Nos ensaios realizados para verificação da capacidade adsorptiva da caulinita pode-se observar um valor muito baixo de acordo com os resultados apresentados na tabela a seguir.

Tabela 2. Capacidade adsortiva da caulinita

Volume amostra (mL)	Dosagem de caulinita (mg/L)	P inicial (mgP/L)	P final (mgP/L)	Eficiência (%)	q (mg/g)
100	500	10,15	9,18	9,5	1,93
100	1000	10,15	9,56	5,8	0,59

Foram utilizadas dosagens altas de caulinita visando avaliar se a caulinita desempenharia algum papel adsortivo junto ao lodo utilizado nos testes, mas verifica-se que os valores de q são muito baixos, praticamente desprezíveis ao serem comparados com a capacidade adsortiva dos hidróxidos metálicos que serão apresentados a seguir.

3.1.2 Avaliação dos coagulantes

Realizando-se uma avaliação para diferentes coagulantes utilizados para remoção de fósforo da fase líquida, podemos visualizar na Figura 2 a grande eficiência de remoção de fósforo para todos os coagulantes testados. Considerando-se a baixa capacidade adsortiva da caulinita, expressaram-se os resultados com base na concentração de hidróxido do metal ao invés da concentração de lodo.

Os experimentos foram feitos para os três tipos de hidróxidos metálicos, com uma concentração inicial de fósforo próxima a 10 mg/L e as maiores eficiências de remoção obtidas foram superiores a 90 % para todos, atingindo valores inferiores a 1 mg/L. Os menores valores de concentração de fósforo obtidos para cada coagulante foram de:

- (sulfato de alumínio) 0,10 mgP/L para uma concentração de 235 mg/L de hidróxido, remoção de 99%;
- (cloreto férrico) 0,82 mgP/L para uma concentração de 390 mg/L de hidróxido, remoção de 92% e;
- (PAC) 0,10 mgP/L para uma concentração de 225 mg/L de hidróxido, remoção de 99%.

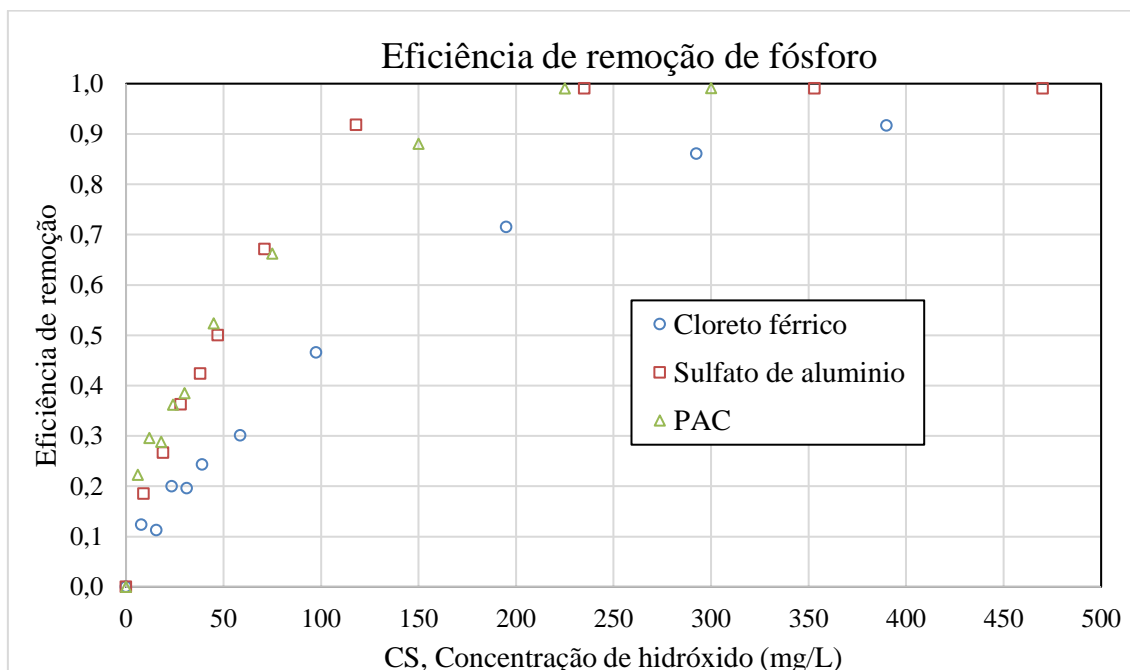


Figura 2. Eficiência de remoção de fósforo para os diferentes coagulantes.

Pode-se observar também na Figura 2 que para mesmas concentrações de hidróxidos, as maiores eficiências de remoção de fósforo foram obtidas pelos dois coagulantes de sal de alumínio, que por sinal apresentam valores muito próximos um do outro e tem capacidade de adsorção superior ao coagulante de ferro.

Quando comparamos a capacidade de adsorção dos sólidos utilizados nos experimentos na Figura 2, conseguimos visualizar que o valor de q diminui junto à diminuição do fósforo na fase líquida, e não trata-se de uma relação linear, característica do processo de adsorção, dependente do equilíbrio químico entre a concentração de fósforo na fase líquida e a concentração na fase sólida. Podemos comparar as características desse comportamento para cada um dos coagulantes e verificamos que os valores da capacidade adsortiva q variam entre 20 e 400 mg/g. Observa-se que a capacidade adsortiva para o coagulante cloreto férrico é inferior que para os coagulantes sulfato de alumínio e PAC, cujos tem comportamento bem semelhantes um ao outro na maior parte das condições, apresentando diferença representativa somente para valores de fósforo entre 8 e 10 mg/L onde o PAC apresenta maior capacidade de adsorção. Para comparação, podemos observar na mesma figura, que para a concentração final de fósforo na fase líquida próxima de 1,0 mg/L temos os seguintes valores de capacidade de adsorção, demonstrando a maior capacidade de adsorção a do coagulante sulfato de alumínio:

- Próximo a 80 mg/g para o sulfato de alumínio;

- Entre 24 e 30 mg/g para o cloreto férrico, e;
- Entre 48 e 64 mg/g para o PAC.

Levando-se em consideração que os melhores ajustes para os três coagulantes foram obtidos pela isoterma de Freundlich, são apresentados a seguir na Figura 3 apenas as isotermas de Freundlich. O modelo de adsorção pela isoterma de Freundlich considera que a adsorção ocorre em diferentes camadas, onde todos os sítios disponíveis para adsorção não têm a mesma disponibilidade para a ligação com o adsorvato. É possível notar um forte indício de que a adsorção ocorre em múltiplos estágios, evidenciados pela mudança da curvatura para valores de $C_e = 7,0$ mg/L. Altos valores de q são obtidos quando são altas as razões entre C_0 e a massa de sólidos e a competição por sítios de sorção são altos. Valem ressaltar que todos os lodos utilizados nesses experimentos são frescos, produzidos no mesmo dia, tendo suas estruturas mais porosas, o que facilitam a difusão das partículas para o interior da estrutura do sólido.

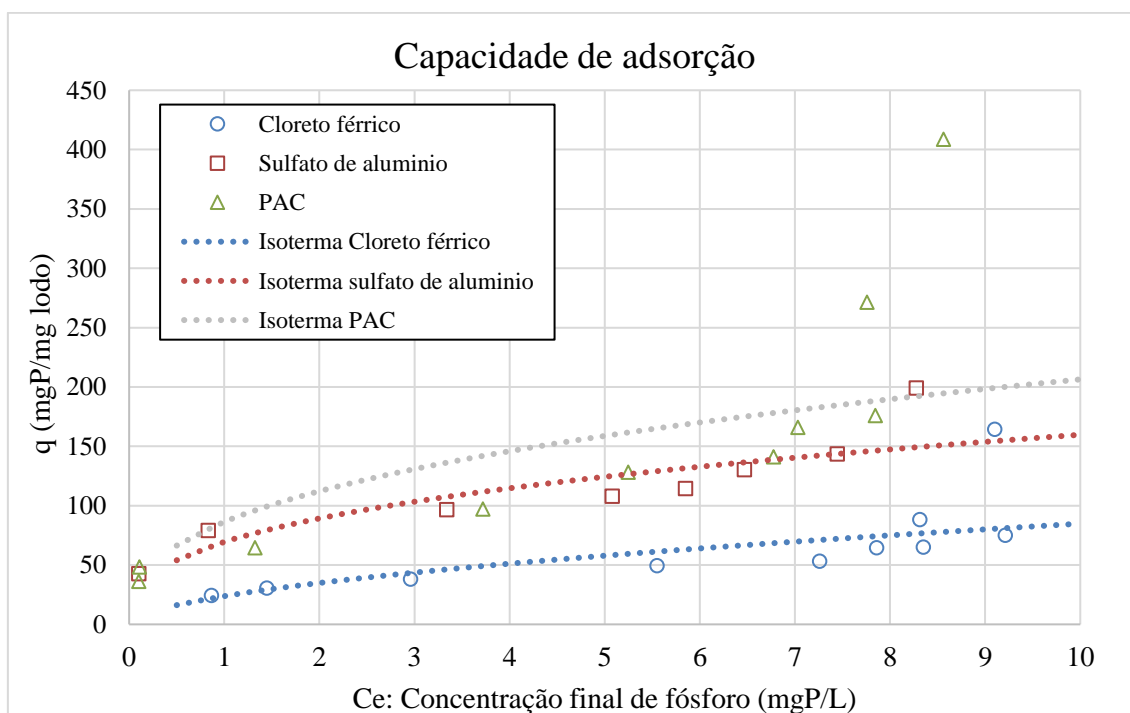


Figura 3. Apresentação das isotermas de Freundlich para os diferentes coagulantes.

3.2 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Com o intuito de avaliar as condições de adsorção durante o tempo, são apresentados os dados experimentais para cada coagulante utilizado.

Foram determinadas as ordens das reações para cada concentração de lodo e apresentadas na tabela a seguir, juntamente aos coeficientes das reações determinados.

Tabela 3. Parâmetros referentes as ordens das reações

Coagulante	Concentração de hidróxido	de Ordem reação	da Kn (L.mg ⁻¹ .min ⁻¹)	R ²
SA	47 mg/L	9	2E-8	0,91
	118 mg/L	5	0,0009	1,00
	235 mg/L	6	0,0092	1,00
	470 mg/L	5	0,0689	1,00
CF	40 mg/L	12	3E-11	0,94
	100 mg/L	10	1E-9	0,99
	200 mg/L	7	6E-6	0,97
	400 mg/L	5	0,02	0,99
PAC	36 mg/L	12	2E-11	0,89
	90 mg/L	7	2E-6	0,98
	180 mg/L	5	0,0004	1,00
	360 mg/L	4	0,02	0,99

Analisando-se a Tabela 3, pode-se notar que os ajustes foram bons e que as equações apresentam ordens de alto grau, enfatizando a alta velocidade de adsorção de fósforo. A seguir são apresentados os valores dos experimentos cinéticos para cada coagulante bem como as equações plotadas nas Figuras de 4 a 6.

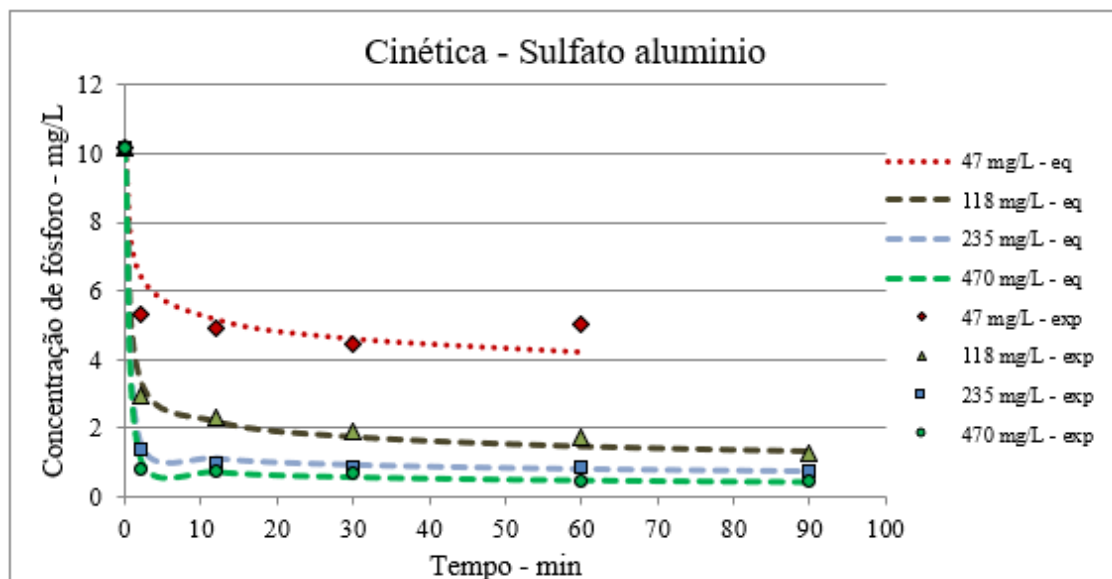


Figura 4. Cinética de adsorção para SA

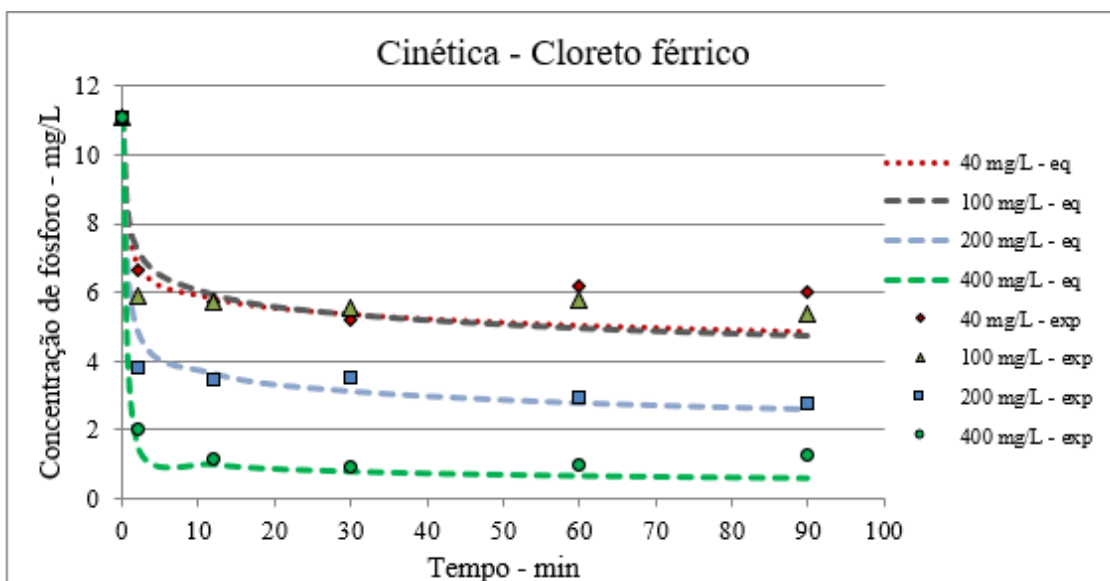


Figura 5. Cinética de adsorção para CF

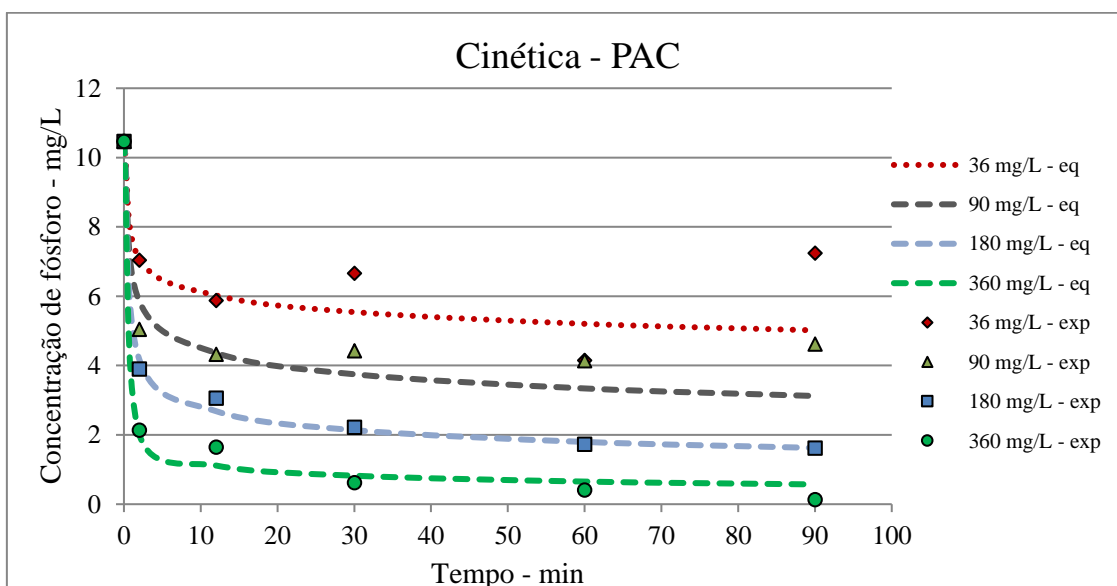


Figura 6. Cinética de adsorção para PAC

Com o intuito de comparar os resultados para cada coagulante, os dados são apresentados na Figura 7 a seguir.

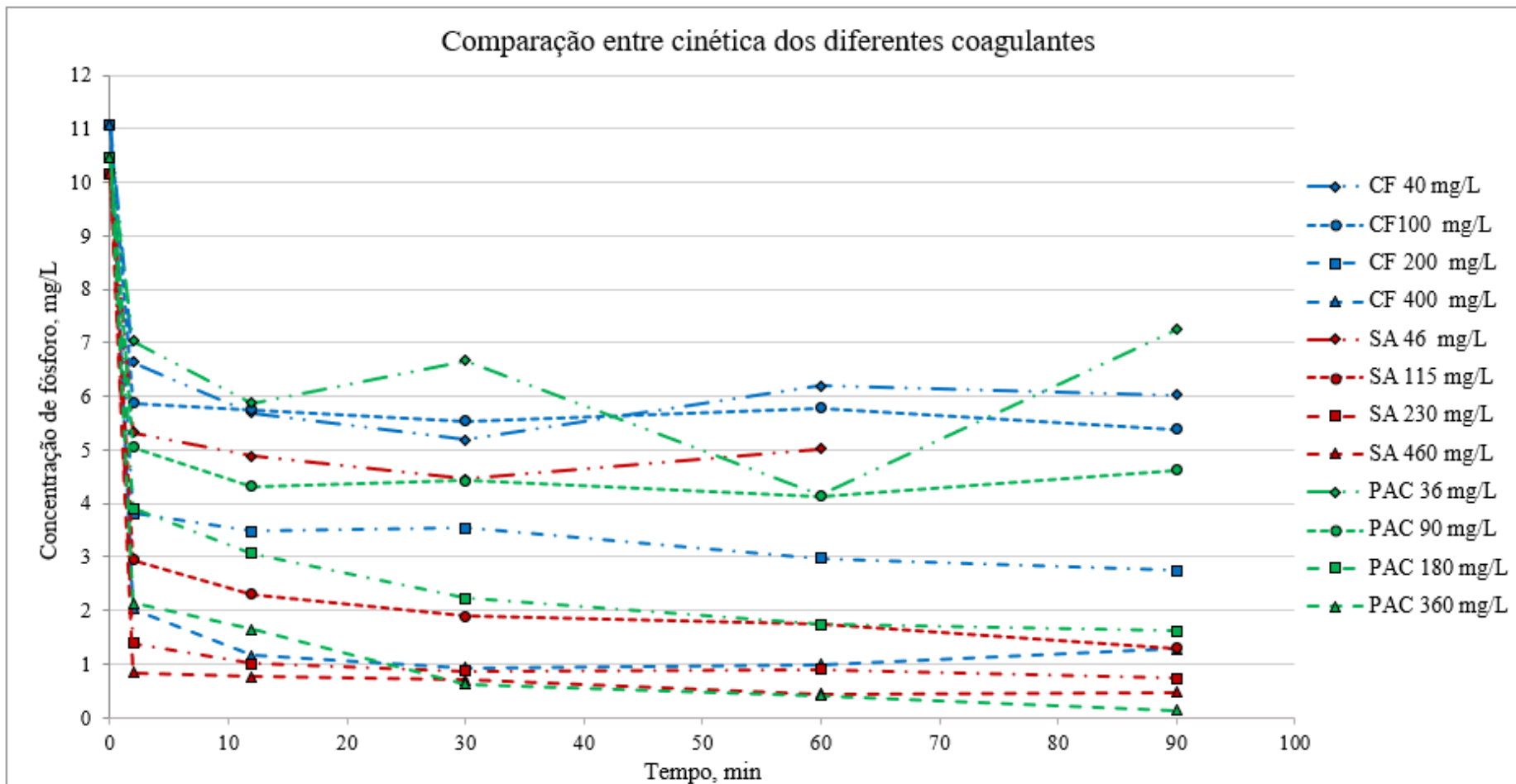


Figura 7. Comparação dos dados cinéticos de cada coagulante. CF: Cloreto Férrico; SA: Sulfato de Alumínio e PAC

Analisando-se a Figura 7, percebe-se que o comportamento das curvas entre os diferentes coagulantes tem características semelhantes, com uma inclinação forte nos primeiros minutos seguida de uma estabilização. A utilização do lodo de sulfato de alumínio, com concentração de hidróxidos de 115 mg/L obtém todo o tempo, maiores adsorções de fósforo, mesmo do que o lodo formado por cloreto férrico e PAC com concentrações superiores de hidróxido de 200 e 180 mg/L, respectivamente. Ilustra também, o melhor desempenho do sulfato de alumínio para a formação de um hidróxido capaz de adsorver fósforo, quando comparado aos dois demais coagulantes.

É demonstrado que com 12 minutos de reação, a maior parte da massa de fósforo que será adsorvida durante os 90 minutos de experimento já foi adsorvida, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Porcentagem da adsorção ocorrida para 12 minutos de reação.

Coagulante	Dosagem hidróxido (mg/L)	Massa adsorvida / massa total adsorvida
SA	40	92,4%
	100	88,6%
	200	97,1%
	400	96,7%
CF	36	91,4%
	90	93,6%
	180	91,3%
PAC	360	97,7%
	47	72,7%
	118	97,1%
	235	83,7%
	470	85,3%

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos, pode-se concluir que:

- Os lodos formados durante o processo de coagulação e floculação são resíduos gerados em larga escala nas estações de tratamento de água em todo o Brasil, compreendendo em sua composição uma grande quantidade de hidróxidos metálicos.
- Os hidróxidos metálicos formados a partir dos principais coagulantes utilizados no tratamento de água, como o sulfato de alumínio, o cloreto férrico e o PAC, têm alta

capacidade de adsorção de fósforo na forma de ortofosfato solúvel, que é a forma predominante de fósforo nos esgotos domésticos.

- A adsorção de fósforo através dos hidróxidos metálicos tem capacidade de atingir baixos valores de concentração de fósforo na fase líquida, até mesmo inferiores a valores exigidos pela legislação brasileira para a preservação ambiental dos recursos d'água;
- A caulinita, mineral utilizado para a formação do lodo padronizado nos presentes experimentos não apresentou adsorção de fósforo que possa ser considerada;
- Os hidróxidos metálicos formados a partir do sulfato de alumínio e do PAC se mostraram muitos parecidos um do outro, mostrando-se ambos bem mais eficientes que o cloreto férrico para a adsorção de fósforo.
- Os menores valores da concentração de fósforo obtidos juntamente aos respectivos valores de q foram: $C_e = 0,1$ mg/L e $q = 42,75$ mg/g para sulfato de alumínio; $C_e = 0,86$ mg/L e $q = 24,41$ mg/g para cloreto férrico e; $C_e = 0,1$ mg/L e $q = 36,38$ mg/g para PAC;
- A capacidade de adsorção de fósforo no sólido está diretamente ligada à concentração final de fósforo na fase líquida, diminuindo conforme a concentração de fósforo diminui na fase líquida.
- A isoterma que teve melhor ajuste foi a de Freundlich, cujo modelo considera que a adsorção ocorre em diferentes camadas, onde todos os sítios disponíveis para adsorção não têm a mesma disponibilidade para a ligação com o adsorvato e corroboram com os dados experimentais obtidos.
- As reações de adsorção de fósforo pelos hidróxidos metálicos caracterizam-se por ordens altas, dependendo exponencialmente da concentração de fósforo na fase líquida. A reação ocorre muito rapidamente, sendo que com 12 minutos de adsorção, em torno de 90 % da massa que será adsorvida de fósforo foi adsorvida;

REFERÊNCIAS

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – APHA, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA, WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION – WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23^a ed. Washington, D.C., USA, 2017.

AWWA – AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Water quality and treatment a handbook of community water supplies. 5th ed. New York, McGraw-Hill, c1999. 1v.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA. Diretoria de Pesquisas, Departamento de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000, Rio de Janeiro, 2002.

LEVENSPIEL, O. Chemical Reaction Engineering. 2^o ed. New York, NY, 1972.

MWH. Water treatment: principles and design. – 3rd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. 2012. 1v.

SNOEYINK, V. L. e JENKINS, D.. Water Chemistry. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1980.