

Tratamento de efluente de abatedouro de bovinos por coagulação com sulfato de alumínio em reator de bateladas

Treatment of cattle slaughterhouse effluent by coagulation with aluminum sulfate in a batch reactor

Tratamiento de efluente de matadero de bovinos por coagulación com sulfato de alumínio em reator de bateladas

DOI: 10.54033/cadpedv22n7-199

Originals received: 4/18/2025

Acceptance for publication: 5/12/2025

Tiago Osório da Silva

Mestre em Engenharia Ambiental
Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Endereço: Curitiba, Paraná, Brasil
E-mail: tiagosoriodasilva@gmail.com

André William Soares Rocha

Graduado em Engenharia Ambiental
Instituição: Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Endereço: Presidente Prudente, São Paulo, Brasil
E-mail: andresoares@hotmail.com

Francisco Javier Cuba Teran

Doutor em Hidráulica e Saneamento
Instituição: Universidade de São Paulo (USP)
Endereço: Goiânia, Goiás, Brasil
E-mail: paco@ufg.br

Renata Medici Frayne Cuba

Doutora em Hidráulica e Saneamento
Instituição: Universidade de São Paulo (USP)
Endereço: Goiânia, Goiás, Brasil
E-mail: renatafrayne@ufg.br

RESUMO

Muitas estações de tratamento operam acima de sua capacidade nominal, exigindo aumento de vazão devido à crescente demanda. Grande parte utiliza tradicionalmente o sulfato de alumínio como coagulante primário, com uso limitado de polímeros como auxiliares de floculação. Frequentemente, a escolha desses insumos desconsidera as características da água bruta. Diante da necessidade

de atender aos padrões de qualidade e lidar com sobrecargas inevitáveis, torna-se essencial identificar o coagulante e/ou auxiliar de floculação mais adequado para cada situação. Para isso, estudos laboratoriais são fundamentais, visando encontrar combinações que proporcionem água tratada com qualidade e em quantidade, ao menor custo possível. Este trabalho apresenta um estudo conduzido em uma estação de tratamento projetada para 120 L/s, mas que operava com 158 L/s, resultando em água decantada com turbidez e cor elevadas, o que comprometia o desempenho dos filtros. Foram realizados testes com diferentes produtos de coagulação, avaliando-se sua eficiência na remoção de impurezas. Como resultado, obteve-se melhoria significativa na qualidade da água decantada e filtrada, além do aumento da capacidade de tratamento. Atualmente, a estação opera com até 280 L/s, mantendo os parâmetros de qualidade conforme a Resolução CONAMA 430, (2011), com economia considerável de produtos químicos. Os resultados demonstram a importância de reavaliar o processo de coagulação, especialmente em sistemas sobrecarregados, para garantir eficiência operacional e qualidade da água tratada.

Palavras-chave: Efluente de Abatedouro. Bateladas. Coagulação. Sulfato de Alumínio.

ABSTRACT

Many water treatment plants operate above their design capacity, requiring increased flow rates due to growing demand. Most of these facilities traditionally use aluminum sulfate as the primary coagulant, with limited application of polymers as flocculation aids. Often, the selection of these reagents does not consider the specific characteristics of the raw water. To meet water quality standards and address inevitable overloading, it is essential to identify the most suitable coagulant and/or flocculation aid for each case. Laboratory-scale evaluations are thus crucial to determine the optimal combinations that ensure treated water of adequate quality and quantity at the lowest possible cost. This study reports on an investigation carried out at a water treatment plant designed for a nominal flow rate of 120 L/s but operating at 158 L/s. Under these conditions, the decanted water exhibited high turbidity and color levels, compromising filtration performance. Coagulation tests were conducted using different products to assess their effectiveness in impurity removal. As a result, significant improvements in both decanted and filtered water quality were achieved, along with an increase in treatment capacity. Currently, the plant can treat up to 280 L/s while maintaining water quality in compliance with Ordinance CONAMA 430, (2011), and with notable reductions in chemical consumption. These findings underscore the importance of reassessing coagulation strategies, particularly in overloaded systems, to enhance operational efficiency and ensure compliance with drinking water quality standards.

Keywords: Cattle Slougher. Coagulation. Batch Reactor. Alum.

RESUMEN

Muchas estaciones de tratamiento de agua operan por encima de su capacidad nominal, requiriendo un aumento del caudal debido a la creciente demanda. La

mayoría utiliza tradicionalmente sulfato de aluminio como coagulante primario, con uso limitado de polímeros como auxiliares de floculación. A menudo, la selección de estos insumos no considera las características específicas del agua cruda. Para cumplir con los estándares de calidad del agua y enfrentar la sobrecarga operativa, es fundamental identificar el coagulante y/o auxiliar de floculación más adecuado para cada situación. Por ello, se requieren ensayos en laboratorio que permitan determinar combinaciones óptimas que garanticen agua tratada de calidad y en cantidad suficiente, con el menor costo posible. Este estudio presenta una investigación realizada en una planta de tratamiento de agua diseñada para un caudal nominal de 120 L/s, pero que operaba a 158 L/s. En estas condiciones, el agua decantada presentaba niveles elevados de turbidez y color, lo que comprometía el desempeño de los filtros. Se realizaron pruebas de coagulación con diferentes productos, evaluando su eficiencia en la remoción de impurezas. Como resultado, se logró mejorar significativamente la calidad del agua decantada y filtrada, así como aumentar la capacidad de tratamiento. Actualmente, la planta opera con hasta 280 L/s, manteniendo la calidad del agua conforme a la normativa de la Ordenanza CONAMA 430, (2011), con una reducción considerable en el consumo de productos químicos. Estos resultados destacan la importancia de reevaluar las estrategias de coagulación en sistemas sobrecargados para mejorar la eficiencia operativa.

Palabras clave: Matadero. Coagulación. Reactor em Bateladas. Sulfato de Aluminio.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a literatura, para o tratamento aeróbio, como lodos ativados e suas possíveis variações, as remoções de matéria orgânica e nutrientes, atingem valores maiores que 90% e 80% respectivamente e remoção de fósforo menor que 35%. Entretanto esses reatores apresentam variações trabalhando em escala real devido ao tipo de afluente, ao pH, ao tempo de retenção celular e ao tempo de retenção hidráulica, entre outros.

Por esses e outros motivos os sistemas de lodos ativos se tornam complexos. No entanto, caso o projeto seja bem feito e o equilíbrio encontrado, observam-se remoções relevantes. Este trabalho sugere a adição de coagulantes dentro do próprio Reator Sequencial em Batela (RSB), a fim de otimizar parâmetros como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), fósforo, turbidez e sólidos.

O objetivo principal deste trabalho é promover o tratamento biológico da

matéria carbonácea, nutrientes e série de sólidos num reator operando em bateladas sequenciais (RSB) e a otimização da remoção de tais parâmetros por meio da aplicação sulfato de alumínio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O tratamento de efluentes oriundos de abatedouros de bovinos representa um grande desafio ambiental, principalmente devido à alta carga orgânica, presença de sólidos suspensos, gorduras, nitrogênio e fósforo. Segundo Prado *et al.* (2019), esses efluentes possuem elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e potencial de impacto se lançados sem tratamento adequado. Nesse contexto, sistemas biológicos como os reatores operando em bateladas sequenciais (SBR – Sequencing Batch Reactors) têm se destacado como tecnologia eficaz para tratar efluentes industriais de forma compacta e flexível (Fonseca *et al.*, 2020).

No entanto, o desempenho de um SBR pode ser comprometido pela presença excessiva de sólidos suspensos ou pela instabilidade da matéria orgânica. Assim, a adição de coagulantes como o sulfato de alumínio no pré-tratamento ou em fases específicas do ciclo SBR pode ser uma estratégia eficiente para melhorar a sedimentabilidade do lodo, reduzir a carga orgânica e turbidez, e estabilizar o processo biológico subsequente (Castro *et al.*, 2021).

Efluentes de abatedouros apresentam variabilidade na composição, com elevadas concentrações de DBO (2000–6000 mg·L⁻¹), DQO, sólidos suspensos totais (SST) e óleos e graxas (OG), além de nutrientes como nitrogênio amoniacal e fósforo (Souza *et al.*, 2018). Esses parâmetros dificultam o tratamento por métodos exclusivamente biológicos, principalmente em unidades compactas.

Para garantir maior eficiência no tratamento, é comum empregar um pré-tratamento físico-químico, que pode incluir coagulação/floculação. O sulfato de alumínio, ao reagir com a matéria orgânica particulada, forma flocos mais densos e sedimentáveis, facilitando a clarificação e reduzindo a carga que chega ao reator SBR (Lopes e Almeida, 2022).

O sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) é um coagulante amplamente utilizado na remoção de sólidos suspensos e na melhoria da sedimentabilidade dos lodos ativados. Sua aplicação em processos biológicos tem sido estudada com foco na mitigação de bulking, aumento da decantabilidade do lodo e controle da coloração em efluentes (Santos *et al.*, 2020).

Em reatores SBR, a adição pontual do coagulante no final da fase de aeração ou no início da sedimentação pode favorecer a compactação do lodo e o polimento do efluente tratado (Moraes; Lima, 2021). Entretanto, o uso indiscriminado pode interferir na microbiota responsável pela degradação da matéria orgânica, sendo necessário estabelecer dosagens ideais por meio de testes de jarros e acompanhamento de parâmetros operacionais como SVI e eficiência de remoção de DQO.

Reatores SBR operam por ciclos que incluem enchimento, reação, sedimentação, drenagem e repouso. A integração de estratégias físico-químicas no ciclo pode resultar em melhorias significativas no desempenho global. Segundo Oliveira *et al.* (2019), a aplicação combinada de coagulação e SBR resultou em aumento de até 40% na eficiência de remoção de DQO e melhora na claridade do efluente final.

Além disso, o uso de planejamento experimental e ferramentas de otimização (como o planejamento fatorial 2^n ou análise de resposta) tem permitido definir a melhor janela operacional para dosagem de sulfato de alumínio, tempo de reação e volume de recirculação, minimizando custos e maximizando a eficiência (Barbosa e Teixeira, 2021).

A aplicação de sulfato de alumínio como estratégia de pré ou pós-tratamento em reatores SBR no tratamento de efluente de abatedouros de bovinos apresenta-se como alternativa técnica viável. Ao promover a remoção prévia de sólidos e parte da matéria orgânica, melhora a performance do reator, permitindo operação mais estável, com menor tempo de sedimentação e melhor qualidade do efluente final. Contudo, é fundamental avaliar o impacto dessa aplicação sobre o lodo biológico, a geração de resíduos e os custos operacionais.

3 METODOLOGIA

O experimento foi utilizando um RSB alimentado com o efluente de uma lagoa de estabilização anaeróbia implantada em um abatedouro de bovinos.

O reator estava constituído por um reservatório de vidro com base quadrada de 0,4 m de lado e 0,5 m de altura, que foi operado com volume útil de 48 L onde 1/3 era ocupado por biomassa e os outros 2/3 abastecidos com afluente para tratamento. A aeração foi feita com cortinas de ar localizadas na base inferior do reator, conectadas a um compressor de ar com potência de 2 HP.

De forma a promover a mistura em ocasiões em que o líquido precisava ser agitado em ausência de oxigênio, foi instalado um agitador provido de motor elétrico de 60 W de potência com eixo prolongado dotado de uma hélice na extremidade inferior. Os períodos de agitação e aeração foram controlados por meio de temporizadores analógicos.

A etapa de enchimento do reator foi realizada por uma bomba da marca Ferrari com 1/4 CV de potência, a qual retirava o efluente industrial de um reservatório, de 50 L, já a retirada do efluente era feita através de torneiras instaladas em diferentes alturas do RSB. Conforme pode-se ver na Figura 1.

Figura 1. Disposição do sistema piloto



Fonte: os autores

Os ciclos de operação foram divididos em 5 etapas: enchimento, aeração, agitação, sedimentação e descarte, totalizando um período de 8 horas conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Ciclo operacional

Etapa	Tempo
Enchimento	10 min
Aeração	4 h
Agitação	2 h
Sedimentação	1 h e 30 min
Descarte	20 min

Fonte: os autores

O reator foi inoculado com lodo proveniente do fundo da lagoa de estabilização do mesmo abatedouro de onde o efluente a ser tratado foi retirado. O volume de lodo inoculado inicialmente foi de 16 L.

O experimento foi monitorado por meio de análises físico-químicas a partir de amostras coletadas uma vez por semana. Os seguintes parâmetros foram analisados: DQO, DBO, Sólidos Totais, Sólidos Totais Fixos, Sólidos Totais Voláteis, Sólidos Suspensos Totais, NTK, Nitrogênio Amoniacal, Nitritos, Nitratos e Fósforo inorgânico. Todas as análises foram feitas seguindo os procedimentos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1995).

Parâmetros como pH e OD foram monitorados diariamente.

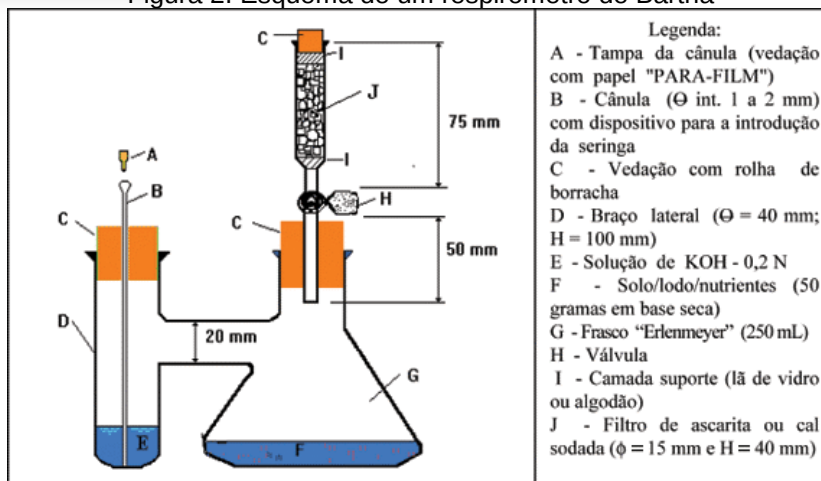
A dosagem de coagulante a ser aplicada no reator foi definida a partir de ensaios de Jar Test desenvolvidos a partir de amostras do afluente aplicando procedimento baseado em Guimarães *et al.* apud Santos (2006), com algumas modificações para as práticas laboratoriais. O tempo de mistura rápida foi de 30 segundos, de mistura lenta de 15 minutos e de sedimentação de 5 minutos sendo que estes parâmetros foram matidos fixos só variando a dosagem do coagulante, no caso sulfato de alumínio.

O coagulante foi aplicado no reator através de uma solução de sulfato de alumínio e seu pH corrigido com solução de hidróxido de sódio, um potenciômetro foi ligado ao agitador mecânico para simular as mistura rápida e lenta, conforme ensaios de Jar-Test. A aplicação do coagulante se deu nas duas últimas horas do ciclo que corresponde a fase de sedimentação e descarte.

A respirometria utilizada para avaliar o efeito da aplicação de coagulante sobre a biomassa foi desenvolvida seguindo o método respirométrico de Bartha (Norma ABNT 14283) e aplicado por Pereira *et al* (2009).

O respirômetro é um sistema fechado, formado por duas câmaras conectadas, onde, por uma delas, ocorre a biodegradação dos compostos orgânicos por microrganismos nativos ou introduzidos e, conseqüentemente, a produção do gás carbônico (CO₂), que e transferido para a segunda câmara, dissolvendo-se numa solução de hidróxido de potássio (KOH). A quantificação do CO₂ foi feita regularmente pela retirada e titulação da solução de KOH com uma solução de HCl, caracterizando o comportamento da respiração microbiana. Ver Figura 2.

Figura 2. Esquema de um respirômetro de Bartha



Fonte: os autores

As amostras utilizadas neste experimento foram colhidas em três etapas (ver Tabela 2). Primeiramente, coletaram-se porções de lodo virgem (controle) no dia 04 de fevereiro, após o período de sedimentação do último ciclo do reator sem a adição do coagulante, sendo armazenadas a 4°C até que se retirassem as amostras da biomassa referentes ao primeiro ciclo com a adição de coagulantes. Sucetida esta fase, 50 mL das amostras foram adicionadas nos respirômetros, sendo que para cada uma foram montadas réplicas em triplicatas, na estufa de DBO a 20 ± 2 °C, com fotoperíodo de 12 horas.

A terceira etapa de coleta foi realizada no dia 08 de fevereiro, no 8º ciclo de operação do reator sob adição de coagulantes, para verificar o efeito acumulativo do mesmo sobre a atividade metabólica da biomassa. Estes respirômetros de Bartha foram incubados nas mesmas condições citadas anteriormente.

Tabela 2. Descrição do experimento respirométrico com a biomassa.

Ensaio	Amostras	Origem
1	Lodo virgem (controle)	Última batelada sem adição de coagulantes
2	Lodo + coagulante	1ª Batelada
3	Lodo + coagulante	8ª Batelada

Fonte: os autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O reator foi operado durante um período de quatro meses, compreendido entre os meses de novembro de 2009 a fevereiro de 2010. Os resultados médios obtidos nesse período podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados médios

Parâmetros	Afluente	Efluente sem aplicação de coagulante ¹	Efluente com aplicação de coagulante ²	Remoção sem aplicação de coagulante (%)	Remoção com aplicação de coagulante (%)
pH	7,4	6,3	7,2	-	-
DQO (mg/L)	1582,3	955	478,9	40	70
DBO (mg/L)	390	269	213	31	46
Nitrogênio Total (mg/L)	251,9	58,6	-	66,7	-
Nitrogênio Orgânico (mg/L)	51,2	-	-	-	-
Amônia (mgNH ₃ N/L)	200,4	67,2	51,2	66,5	74,4
Nitrato (mgNO ₃ ⁻ N/L)	0,12	88,7	93,3	-	-
Nitrito (NO ₂ ⁻ N/L)	2,1	114,8	100,3	-	-
Ortofosfato (mgPO ₄ -P/L)	2,0	1,6	0,5	20,1	75,1
ST (mg/L)	1784	1718	1388	3,7	22,2
STV (mg/L)	991	1018	715	0	27,8
SST (mg/L)	815	502	325	38,4	60,1
SSV (mg/L)	575	350	215	39,1	62,6

Fonte: os autores

A adição de sulfato de alumínio trouxe uma melhora em todos os parâmetros analisados, a dosagem 180 mg/L foi escolhida segundo ensaios de Jar-Test feito em laboratório levando em relação pH, remoção de turbidez e DQO, apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6.

Tabela 4. Parâmetros físico-químicos do efluente. Ensaio 1.

pH	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)
6,97	>1000	1262,42

Fonte: os autores

Tabela 5. Parâmetros físico-químicos do efluente. Ensaio 2.

pH	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)
6,3	521	928,88

Fonte: os autores

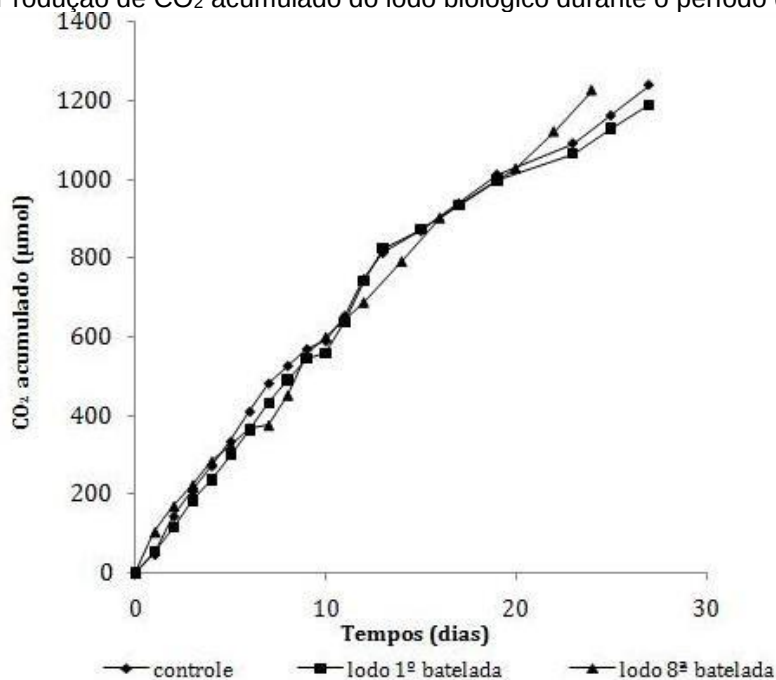
Tabela 6. Resultados dos ensaios preliminares de coagulação-floculação-sedimentação com o efluente do RSB

Ensaio	Tempo de Mistura Rápida a 150 rpm (segundos)	Tempo de Mistura Lenta a 40 rpm (minutos)	Tempo de Sedimentação (minutos)	Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/L)	pH	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)
1	30	15	5	40	6,49	84,1	1244,89
	30	15	5	60	6,25	74,7	876,22
	30	15	5	80	6,03	58,5	770,86
	30	15	5	100	5,73	39,8	595,35
	30	15	5	120	5,42	26,7	577,79
	30	15	5	140	4,96	18	525,13
2	30	15	5	160	4,09	6,64	233,32
	30	15	5	180	4,03	5,78	235,08
	30	15	5	200	3,91	2,88	222,79
	30	15	5	220	3,87	2,79	214,01
	30	15	5	240	3,83	2,73	201,73
	30	15	5	260	3,8	2,97	215,77

Fonte: os autores

A produção de CO₂ do lodo sem coagulante (controle) nos respirômetros apresenta pequena diferença, quando comparada com o lodo da 1ª e 8ª batelada com adição de coagulante (ver figura 3). Pode-se inferir que o efeito acumulativo de coagulante presente na biomassa até o período analisado, 27º dia, é inexpressivo, não interferindo na atividade bacteriana.

Figura 3. Produção de CO₂ acumulado do lodo biológico durante o período de 27 dias.



Fonte: os autores

5 CONCLUSÃO

O processo nitrificação foi satisfatório, com remoção em média em torno de 66% já a desnitrificação não ocorreu, possivelmente devido à falta de fonte de carbono necessária para a ocorrência da desnitrificação ou ao reduzido tempo percorrido depois da fase de aeração.

A remoção biológica de fósforo se dá através de zonas anaeróbias e aeróbias necessariamente, o que não ocorreu na prática, e é importante uma concentração mínima de DQO ou DBO solúvel para o sucesso desse processo, como visto em literatura.

A aplicação de sulfato de alumínio no RSB, por mais que possa causar um abaixamento no pH, não causou aparentemente efeitos prejudiciais ao lodo. A aplicação de coagulante no reator trouxe uma melhora significativa em todos os parâmetros levados em consideração, com dosagem baixa de coagulante. Podendo ser uma aplicação útil em escala real.

As análises respirométricas mostraram que a adição de coagulante não interfere na atividade das bactérias, sendo possível a aplicação de coagulante juntamente com a biomassa no mesmo reator.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que possibilitaram a realização e a publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

APHA/AWWA/WEF (1995). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20th ed., Washington, D.C., USA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos em solo - Determinação da biodegradação pelo método respirométrico**. Norma NBR 14283. São Paulo, 1999.

BARBOSA, D. F.; TEIXEIRA, A. C. **Otimização da dosagem de coagulantes em sistemas híbridos com reatores SBR**. Revista Engenharia Ambiental, v. 18, n. 3, p. 55–65, 2021.

CASTRO, L. P. *et al.* **Avaliação do uso de coagulantes químicos no desempenho de reatores biológicos**. Ciência & Engenharia, v. 29, n. 1, p. 22–30, 2021.

CONAMA. Resolução 403. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes**. (2011).

FONSECA, R. C. *et al.* **Reatores em batelada sequencial no tratamento de efluentes industriais: princípios e aplicações**. Revista DAE, v. 68, n. 220, p. 98–108, 2020.

LOPES, J. A.; ALMEIDA, R. S. **Aplicação de sulfato de alumínio no tratamento de efluentes de origem animal**. Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 27, n. 2, p. 76–84, 2022.

OLIVEIRA, L. G. *et al.* **Integração de processos físico-químicos e biológicos no tratamento de efluentes de abatedouros**. Química Nova, v. 42, n. 5, p. 589–595, 2019.

PEREIRA, N.; CAMARGO, J. A.; CABELLO, P. R.; TERAN, F. J. C. **Viabilidade da aplicação do método respirométrico de bartha para a análise da atividade microbiana de solos sob aplicação de vinhaça**. Engenharia Ambiental (online) v. 6, p. 264-271, 2009.

PRADO, M. E. *et al.* **Caracterização de efluentes de abatedouros e alternativas de tratamento**. Revista Tecnologia e Ambiente, v. 25, n. 1, p. 15–22, 2019.

SANTOS, H. F. *et al.* **Influência da coagulação com sulfato de alumínio na decantação do lodo ativado**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 25, n. 4, p. 521–529, 2020.

SANTOS, H. R. **Coagulação/precipitação de efluentes de reator anaeróbio de leito expandido e de sistema de lodo ativado precedido de reator uasb, com remoção de partículas por sedimentação ou flotação**. 2006. São Carlos, São Paulo, Brasil: Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SOUZA, T. R. *et al.* **Efluentes de abatedouros: desafios no tratamento e oportunidades de reuso**. Revista Água Brasilis, v. 9, n. 1, p. 33–41, 2018.