UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

APLICAÇÃO DE TRATAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS COMO ALTERNATIVA PARA A REDUÇÃO DE DQO EM EFLUENTE À BASE DE ÁCIDO FÚLVICO

ALUNO(A): Karine Graeff Giacometti
ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Guilherme Martinez Mibielli
COORIENTADOR(A): Prof. Dr. João Paulo Bender

Dezembro - 2024

KARINE GRAEFF GIACOMETTI

APLICAÇÃO DE TRATAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS COMO ALTERNATIVA PARA A REDUÇÃO DE DQO EM EFLUENTE À BASE DE ÁCIDO FÚLVICO

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: **Prof. Guilherme Martinez Mibielli.**

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 02.12.2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Guilherme Martinez Mibielli - UFFS

Eng. Rafael Celuppi – Kemia Tratamento de Efluentes

Prof. Dr. Leandro Bassani - UFFS

APLICAÇÃO DE TRATAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS COMO ALTERNATIVA PARA A REDUÇÃO DE DQO EM EFLUENTE À BASE DE ÁCIDO FÚLVICO

Karine Graeff Giacometti[1]
Guilherme Martinez Mibielli[2]
João Paulo Bender[2]

RESUMO

A baixa taxa de reciclagem dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil implica em uma grande demanda por disposição final em aterros sanitários. Isso representa um desafio ambiental, pois a decomposição dos rejeitos no aterro gera subprodutos poluentes, como o chorume. Este efluente altamente complexo e rico em compostos recalcitrantes, como os ácidos fúlvicos, são de difícil remoção pelos métodos convencionais de tratamento. Neste contexto métodos alternativos vêm sendo testados, como a eletrofloculação, o qual consiste no tratamento físico-químico aplicando-se uma diferença de potencial no efluente a partir de um par de eletrodos, ocasionando no meio a formação de íons positivos que desestabilizam o sistema de partículas suspensas, possibilitando a coagulação e a formação de flocos. Os efluentes de chorume possuem como características elevados valores de cor, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e toxicidade, podendo causar diversos impactos quando descartados no ambiente sem o devido tratamento. Este trabalho visa avaliar a efetividade de tratamentos físico-químicos, com enfoque na eletrofloculação, para reduzir a DQO em efluentes sintéticos à base de ácido fúlvico. A escolha dessa técnica se justifica pela necessidade de alternativas que superem as limitações dos métodos convencionais de tratamento. Assim, realizou-se o preparo de um efluente sintético composto de ácido fúlvico que foi submetido aos ensaios de eletrofloculação e coagulação tradicional. Após os ensaios obteve-se resultados positivos com o processo de eletrofloculação nas condições experimentais de pH igual a 3,00, densidade de corrente de 10,6 mA/cm² e eletrodo de alumínio, alcançando redução de 45 % de DQO, 79 % de cor e 80 % de turbidez. Para os ensaios com o método de coagulação tradicional os resultados não foram promissores.

Palavras-chave: Ácido Fúlvico, Eletrofloculação, Eletrodo de alumínio, DQO.

[1] Discente do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Chapecó, SC, Brasil. E-mail: karineggiacometti@gmail.com

[2] Docente do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Chapecó, SC, Brasil. E-mail: guilherme.mibielli@uffs.edu.br

[2] Docente do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Chapecó, SC, Brasil. E-mail: joão.bender@uffs.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Naturalmente, todas as atividades humanas geram resíduos, no início dos tempos, os hominídeos extraiam recursos da natureza apenas para garantir a subsistência, com o passar dos anos findou-se a vida nômade e a partir de então surgiram as primeiras civilizações. O aumento populacional e a urbanização intensificaram o descarte daquilo que hoje erroneamente chamamos de lixo.

Historicamente, o termo "lixo" foi empregado para se referir ao "resto da atividade humana ou a sobra indesejada de um processo de produção" (Velloso, 2008, p. 1954). Após a sedentarização humana, surgiram preocupações referentes ao manejo dos resíduos, suas sobras normalmente eram queimadas, enterradas ou compostadas. Antigamente começou-se a entender que o contato com os resíduos era um fator de disseminação de doenças, assim, com o tempo surgiu a necessidade de afastá-los do contato com as pessoas para evitar problemas de saúde pública. Neste sentido os resíduos passaram a ser levados para locais afastados das cidades, dando início aos lixões, que por sua vez, causam a contaminação do solo, das águas e do ar, além de facilitar a proliferação de vetores.

No Brasil determinou-se o fim dos lixões com a Lei nº 12.305/10, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e estabeleceu que a disposição final dos resíduos sólidos deve ser feita em aterro sanitário, que são obras de engenharia projetadas para dispor os rejeitos de maneira segura e ambientalmente adequada. Embora seja uma solução válida se tratando de destinação final, o aterro é uma proposta para mitigar os prejuízos causados pela falta da gestão adequada dos resíduos sólidos, que deveria ser focada na concepção de logística reversa e economia circular.

Conforme o levantamento realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) em 2023, estima-se que sejam produzidos no Brasil, aproximadamente 80 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos anualmente. Ainda, segundo a ABRELPE, de todo o montante coletado apenas 4 % dos resíduos urbanos são reciclados, isso implica em uma alta demanda de disposição em aterros sanitários.

Mecanismos físicos, químicos e biológicos compõem o processo de degradação dos compostos presentes nos rejeitos, dessa forma pode-se dizer que os aterros sanitários se comportam como reatores que recebem água e rejeitos e produzem chorume e biogás através da ação de microrganismos decompositores (Moravia, 2007). A NBR 8419/92 define o chorume como o líquido escuro e de forte odor, resultante da decomposição dos resíduos, combinado com a água que infiltra no aterro sanitário. Este efluente possui uma composição

complexa e alto potencial poluidor devido a presença de substâncias recalcitrantes (ABNT,1992).

A composição química do chorume é extremamente variada e complexa. De acordo com Christensen et al (2001) os principais poluentes encontrados no líquido percolado são divididos em material orgânico dissolvido (MOD), compostos inorgânicos, metais pesados e compostos xenobióticos. Os componentes inorgânicos do chorume incluem a presença de cátions e ânions, como cloretos, sulfatos e metais, enquanto os componentes orgânicos são predominantemente compostos por substâncias húmicas, incluindo ácidos húmicos e fúlvicos. Ao contrário dos ácidos húmicos, que são solúveis apenas em meio alcalino, os ácidos fúlvicos são altamente solúveis em água, independentemente do pH, e atuam na composição do chorume atribuindo cor, toxicidade e influenciando o seu comportamento no meio ambiente (Christensen et al., 2001).

O tratamento de lixiviados emerge então, como um novo problema a ser investigado, o grande desafio no tratamento deste efluente deve-se à presença de substâncias recalcitrantes, como os ácidos fúlvicos, cujos métodos convencionais de tratamento costumam não ser suficientes na remoção completa desses compostos, exigindo a aplicação de tratamentos mais avançados, que por sua vez, dificultam e encarecem o processo. Com isso, nota-se a importância de avaliar métodos alternativos, como o tratamento por eletrofloculação.

A disposição de rejeitos em aterros sanitários é uma prática consolidada no Brasil, sabe-se que o aterramento dos resíduos gera o lixiviado, um subproduto que causa impactos imensuráveis quando descartado no meio ambiente em seu estado bruto, tendo-se a necessidade em aprimorar as técnicas para o tratamento deste efluente.

O tratamento de efluentes por eletrofloculação apresenta resultados positivos na remoção de poluentes suspensos, portanto pode ser empregado no processo de tratamento. Dessa forma, este estudo busca avaliar se a técnica da eletrofloculação mostra-se efetiva na remoção de ácidos fúlvicos do efluente sintético, comparando os resultados do tratamento via eletrofloculação com tratamentos convencionais normalmente utilizados, como por exemplo, a coagulação com adição de substâncias químicas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PREPARO DO EFLUENTE SINTÉTICO

Dresch et al. (2023) quantificou as substâncias húmicas presentes no chorume oriundo de quatro aterros sanitários localizados na região sul. Em seu estudo observou que a concentração de ácido fúlvico nas amostras era em média 0,2 %. Dessa forma, para avaliar o

comportamento do ácido fúlvico aos tratamentos propostos pelo trabalho, preparou-se um efluente sintético com concentração de 0,2 %, diluindo o ácido fúlvico comercial "BioGain ® Fúlvico 70" em água destilada. Para purificar a solução de modo a obter um efluente composto apenas por ácido fúlvico, utilizou-se a metodologia citada em Dresch et al. (2023), onde reduziu-se o pH da solução para próximo de 1,00 adicionando-se H_2SO_4 20 % e após 24h de repouso, realizou-se a filtração à vácuo. Posteriormente o efluente preparado foi submetido à refrigeração em 4°C.

2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO CHORUME

Para analisar os resultados é necessário comparar os parâmetros de qualidade do efluente antes e após os tratamentos de interesse. Assim, a caracterização do efluente sintético se deu pela análise dos seguintes parâmetros físicos e químicos: pH, condutividade elétrica, cor, turbidez e DQO.

2.2.1 Determinação de pH e Condutividade elétrica

A determinação de pH das amostras foi realizada pelo método potenciométrico a partir de um pHmetro mPA210 MS TECNOPON®. A condutividade elétrica foi determinada com o auxílio do condutivímetro Gehaka CG 1800, ambos disponíveis no Laboratório de Resíduos da UFFS.

2.2.2 Determinação de Cor e Turbidez

A cor foi determinada com o equipamento colorímetro Del Lab® disponível no Laboratório de Resíduos da UFFS. As amostras possuíam valores de cor superiores às faixas de leitura suportadas pelo equipamento disponível (limite de 500 uC), portanto foram diluídas. Para a leitura de turbidez utilizou-se o equipamento turbidímetro, que também está disponível no Laboratório de Resíduos da UFFS.

2.2.3 Determinação de DQO

A Demanda química de oxigênio é um parâmetro utilizado para avaliar a quantidade de oxigênio requerida para a oxidação química de um resíduo orgânico (Bassani, 2010). A presença de substâncias que podem sofrer oxidação, como cloretos e nitratos, podem interferir na leitura da DQO.

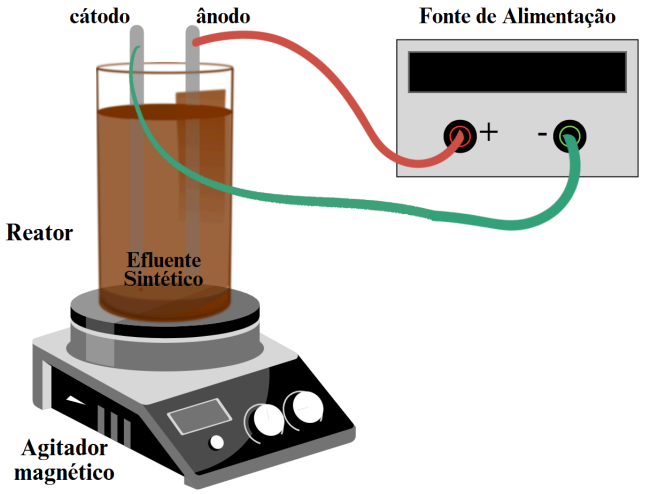
A determinação seguiu a metodologia do Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater (APHA et al., 1999), que baseia-se na digestão ácida da amostra com solução catalisadora e solução oxidante em bloco digestor a 160 °C por duas horas. A solução catalisadora é composta por ácido sulfúrico (H_2SO_4) e sulfato de prata ($AgSO_4$) e a solução

oxidante contém dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), sulfato de mercúrio ($HgSO_4$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e água deionizada. Após a digestão no bloco, as amostras repousam por 30 minutos e então é realizada a leitura no espectrofotômetro a 600 nm. Inicialmente foi necessário realizar uma curva padrão, utilizando a solução padrão de biftalato de potássio (KHP), obedecendo a relação descrita em Peixoto et. al (2008) onde 2,0 mL de KHP possui o valor teórico de DQO de 2000 mgO_2/L.

2.3 ENSAIO DE ELETROFLOCULAÇÃO

Neste estudo, os ensaios de eletrofloculação foram realizados em reator batelada constituído por um béquer de vidro, contendo aproximadamente 150 mL de amostra submetidos a agitação magnética. Foi utilizada a fonte de alimentação DC POWER SUPPLY FA-3030 da Instrutherm®. A montagem do experimento ocorreu conforme o esquema representado pela Figura 01.

Figura 01 - Esquema do reator de eletrofloculação.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os ensaios foram realizados com eletrodos de diferentes materiais, e as demais variáveis do processo foram fixadas de acordo com os melhores resultados obtidos em estudos anteriores com eletrofloculação em chorume de aterro sanitário. Foram utilizados dois eletrodos (um ânodo e um cátodo) com distância de 1,5 cm. A densidade de corrente pode ser obtida pela divisão de intensidade de corrente e área de contato do eletrodo no líquido. Onde a área de contato foi fixada em 18,85 cm² respeitando o afogamento de 6 cm dos eletrodos em um volume de 150 mL de amostra. Na Tabela 01 encontram-se as condições operacionais que foram aplicadas aos ensaios. Para que não houvesse interferência nos resultados pela presença de sólidos suspensos, as amostras repousaram por 24 horas e posteriormente foi realizado o ensaio de centrifugação nas condições de 7000 rpm a 20 °C durante 10 minutos.

Tabela 01 - Condições operacionais

Parâmetros	Condições Operacionais
Tipo de eletrodo	Alumínio, ferro, latão, cobre
Distância entre eletrodos	1,5 cm
pH do meio	3,0
Corrente elétrica	100, 200 mA
Densidade de Corrente	5,3 e 10,6 mA/cm²
Tempo de Reação	40 min

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

2.4 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

Neste estudo, os ensaios de coagulação e floculação foram realizados em um reator batelada utilizando agitador magnético e béquer de 200 mL com aproximadamente 150 mL de amostra. As condições operacionais aplicadas nos ensaios podem ser observadas na Tabela 02. Para que não houvesse interferência nos resultados pela presença de sólidos suspensos, as amostras repousaram por 24 horas e posteriormente foi realizado o ensaio de centrifugação nas condições de 7000 rpm a 20 °C durante 10 minutos.

Tabela 02 - Condições operacionais para os ensaios

Parâmetros	Condições Operacionais
Tipo de Coagulante	Policloreto de Alumínio, Cloreto Férrico
Dosagem (g/L)	1, 3, 5, 8
pH	5,88
Tempo mistura rápida	60 s
Tempo de mistura lenta	20 min

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

A escolha em estudar um efluente sintético composto por ácido fúlvico deve-se à resistência deste composto à degradação e aos inconvenientes causados pela sua presença na água, representando um impacto ambiental significativo que afeta a qualidade da água para consumo e outros usos.

A caracterização do efluente sintético foi feita pela leitura dos parâmetros de cor, turbidez, DQO, pH e condutividade elétrica. Cor e turbidez são parâmetros físicos da água, resultantes da presença de substâncias em solução ou suspensão no meio líquido. De acordo com Bassani (2010) a DQO é utilizada para medir a quantidade de oxigênio requerida para a

oxidação química de um resíduo orgânico, sendo um dos parâmetros mais importantes para avaliar o potencial de poluição de um efluente. Os parâmetros físico-químicos avaliados no efluente sintético utilizado neste trabalho encontram-se na Tabela 03.

Tabela 03 - Caracterização físico-química do efluente sintético em estado bruto

Parâmetro	Resultado
DQO (mg O_2/L)	6.516
Cor (UC)	15.444
Turbidez (NTU)	59
pH	5,88
Condutividade elétrica (mS/cm)	1093

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Cenci (2023) trabalhou com lixiviado após tratamento biológico cuja DQO situava-se em torno de 6.700 mg O2/L e a cor foi superior a 14.000 uC. Pedroso (2012) realizou a caracterização do lixiviado de um aterro sanitário de Maringá (PR) onde obteve-se a mediana de 8.266 mg O2/L de DQO, 4.480 uC de cor e 2.250 NTU de turbidez. A partir dos resultados da literatura, observa-se que existe uma variação dos valores encontrados, sendo relacionado principalmente pela composição de resíduos depositados, bem como pela idade do aterro. A comparação de resultados se fez com trabalhos que utilizaram chorume de aterro sanitário, pois na literatura não há estudos com efluente sintético constituído de ácido fúlvico.

3.2 ENSAIOS DE ELETROFLOCULAÇÃO

A eletrofloculação é um método de tratamento eletroquímico ou eletrolítico que consiste na combinação de três processos: eletrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação que acontecem simultaneamente (Rodrigues, 2007). Dentre as vantagens do processo de eletrofloculação conforme Mollah et al. (2001, apud Rodrigues, 2007), pode-se destacar a não adição de produtos químicos, baixa produção de lodo, baixo tempo de detenção, utilização de equipamentos simples, compactos e de fácil operação. Entretanto, o método pode ocasionar custos adicionais pelo uso de eletricidade e necessidade de substituição dos eletrodos.

O tratamento é realizado em um reator eletroquímico composto por um ânodo e um cátodo. Ao aplicar uma diferença de potencial com uma fonte externa, o material do ânodo é oxidado, enquanto o cátodo sofre redução (Fornari, 2007). No processo de oxidação do ânodo, são liberados íons positivos que desestabilizam o sistema das partículas negativas suspensas no efluente, possibilitando a coagulação e a formação de flocos sedimentáveis (Belan, 2014). Ainda, conforme Belan (2014), o eletrodo cátodo age na clarificação do efluente por meio da

geração de bolhas de gás hidrogênio que promovem o arraste dos flocos ou partículas suspensas até a superfície do reator (eletroflotação).

A partir da análise de outros estudos que realizaram eletrofloculação com chorume de aterro sanitário, optou-se por realizar os ensaios deste trabalho com tempo de 40 minutos, pH igual a 3,00 e densidade de corrente de 5,3 mA/cm², com eletrodos de alumínio, ferro, latão e cobre, cujos resultados são apresentados na Tabela 04.

Tabela 04 - Resultados dos ensaios de eletrofloculação

Ensaio	Eletrodo	DC (mA/cm²)	DQO (%R)	Cor (%R)	Turbidez (%R)
E1	Alumínio	5,30	4.842(26)	7.860 (49)	22,0 (63)
E2	Ferro	5,30	> 6.500 (0)	16.000 (0)	28,0 (53)
E3	Latão	5,30	> 6.500 (0)	14.780 (4)	19,8 (66)
E4	Cobre	5,30	> 6.500 (0)	11.022 (29)	13,2 (78)

DC: densidade de corrente; %R: valor percentual de remoção em relação ao efluente bruto.
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De acordo com a Tabela 04, o ensaio E1 reduziu a DQO em 26% e a cor em 49%, enquanto os ensaios com outros eletrodos apresentaram variações insignificantes. Inclusive no ensaio E2, realizado com eletrodo de ferro, houve aumento da cor do efluente em comparação ao seu estado bruto, isso pode ter acontecido devido a oxidação do ferro, que durante o processo tende a formar íons Fe^{+2} e/ou Fe^{+3}, sendo que o Fe^{+3} atua melhor como coagulante, entretanto se estiver em excesso pode permanecer suspenso no meio, atribuindo cor ao líquido. Além da densidade de íons no meio, o pH ideal para a coagulação e precipitação na utilização de ferro é o pH próximo da neutralidade, sendo que o experimento ocorreu em pH ácido, influenciando no desempenho do processo.

Em razão dos primeiros ensaios não apresentarem resultados desejáveis, buscou-se uma alternativa para melhorar a eficiência do processo, e como já utilizou-se eletrodos de quatro materiais distintos, optou-se então por elevar a densidade de corrente. A Tabela 05 apresenta os resultados com o aumento da densidade de corrente.

Tabela 05 - Resultados dos ensaios de eletrofloculação após elevar DC

Ensaio	Eletrodo	DC (mA/cm²)	DQO (%R)	Cor (%R)	Turbidez (%R)
E5	Alumínio	10,60	3.584 (45)	3.238 (79)	11,6 (80)
E6	Ferro	10,60	4.941 (24)	12.309 (20)	21,0 (64)
E7	Latão	10,60	4.127 (37)	5.080 (67)	13,5 (77)
E8	Cobre	10,60	4.127 (37)	3.400 (78)	10,1 (83)

DC: densidade de corrente; %R: valor percentual de remoção em relação ao efluente bruto.
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Tabela 05 observa-se que o aumento da densidade de corrente resultou em uma redução mais intensa da DQO, alcançando o melhor resultado no ensaio com eletrodo de alumínio (E5), que por sua vez além de reduzir a DQO em 45 %, também reduziu 79 % de cor e 80 % de turbidez. O aumento da densidade de corrente também melhorou a aparência do efluente, como mostra a Figura 02. Esse efeito pode ser atribuído à maior liberação de íons ocasionada pelo aumento da corrente elétrica, o que promove uma instabilidade maior no sistema, melhorando os processos de coagulação e floculação no meio aquoso, facilitando a agregação e posterior remoção dos contaminantes.

Figura 02 - Amostras de ácido fúlvico após ensaio de eletrofloculação

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Estudos com a aplicação de eletrofloculação ao tratamento de lixiviados de aterro sanitário, como por exemplo Godoi (2019) obteve os melhores resultados em pH ácido e tempo de reação de 40 minutos. Cenci (2023) obteve redução de 80 % de DQO e 96 % de cor nos ensaios com lixiviado após tratamento biológico cujas condições ótimas foram pH igual a 3,00, densidade de corrente igual a 5,3 mA/cm² e tempo de reação de 40 minutos.

Dia et al. (2018) reduziu a DQO de lixiviado em 37 % realizando o processo de eletrofloculação com ânodo de alumínio, cátodo de aço inoxidável, densidade de corrente de 8 mA/cm² e 20 minutos de reação. Rodrigues (2007) obteve redução de 23 % de DQO do lixiviado bruto após realizar a eletrofloculação com eletrodos de alumínio. Ao realizar o ensaio com lixiviado após tratamento biológico a redução de DQO foi de 86 %.

A comparação dos resultados evidencia que a eletrofloculação aplicada ao efluente sintético de ácido fúlvico apresentou eficiência moderada na remoção de DQO em relação ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário, em contrapartida, os resultados para remoção de cor e turbidez foram semelhantes aos obtidos nos trabalhos, demonstrando que os mecanismos físicos do processo foram eficazes.

Trabalhos com lixiviado submetido a pré-tratamento biológico, como os de Cenci (2023) e Rodrigues (2007), obtiveram valores significativamente superiores (entre 80 e 86 %

de redução de DQO), enquanto estudos com lixiviado bruto, como os de Dia et al. (2018) e Rodrigues (2007), apresentaram remoções mais próximas aos resultados do presente trabalho. Essa diferença é atribuída à recalcitrância do ácido fúlvico, um composto orgânico específico mais resistente à oxidação eletroquímica e a coagulação por íons, frente à biodegradabilidade do lixiviado. Ainda assim, o tratamento de eletrofloculação se mostrou válido na redução da DQO causada pelo ácido fúlvico, com potencial para melhorias no processo. Sugere-se que sejam feitos estudos futuros com densidades de corrente mais elevadas, pois observou-se que o aumento da DC resultou em eficiências melhores.

3.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO

A coagulação é um processo que provoca a desestabilização e aglutinação das partículas suspensas em um ambiente aquoso através da aplicação de um agente coagulante seguido de uma mistura rápida (Gewehr, 2012). O processo de coagulação/floculação é uma das etapas do tratamento físico-químico convencional largamente aplicado ao tratamento de águas de abastecimento e águas residuais. Entre suas vantagens é possível destacar o baixo custo, facilidade de operação e eficácia na remoção de diversos contaminantes.

Para o tratamento de lixiviados, Castilhos Jr. et al. (2006, apud Moravia 2007) afirmam que as maiores eficiências normalmente são alcançadas com dosagens de coagulante na ordem de 500 a 3.000 mg/L. Gewehr (2012) realizou ensaios de coagulação para tratamento de lixiviado bruto utilizando policloreto de alumínio e cloreto férrico nas concentrações de 1 a 6 g/L e obteve 63 % de redução de DQO, 98 % de cor e turbidez na coagulação de lixiviado bruto utilizando cloreto férrico a 1102 mgFe/L. Assim, realizou-se ensaios com policloreto de alumínio (PAC) em concentrações de 3, 5 e 8 g/L e cloreto férrico a 1, 5 e 8 g/L, conforme Tabela 06.

Tabela 06 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação

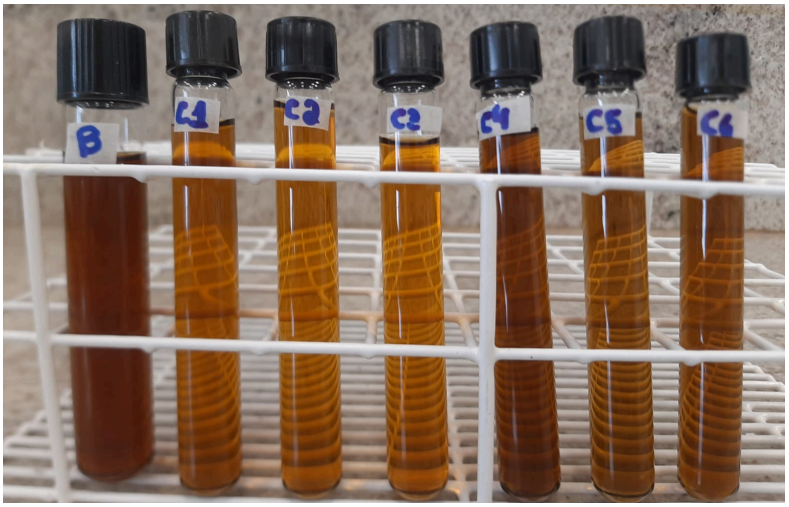
Ensaio	Coagulante	Concentração (g/L)	DQO (%R)	Cor (%R)	Turbidez (%R)
C1	PAC	3,0	> 6.500 (0)	8.700 (44)	23,0 (63)
C2	PAC	5,0	> 6.500 (0)	7.440 (52)	9,5 (53)
C3	PAC	8,0	> 4.253 (35)	6.840 (56)	*
C4	Cloreto Férrico	1,0	4.507 (31)	11.055 (28)	13,8 (77)
C5	Cloreto Férrico	5,0	4.398 (33)	10.758 (30)	40 (32)
C6	Cloreto Férrico	8,0	3.638 (44)	10.989 (29)	*

DC: densidade de corrente; %R: valor percentual de remoção em relação ao efluente bruto;
* não foi possível realizar a leitura devido à instabilidade do aparelho.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os ensaios com PAC apresentaram melhora na condição visual do efluente (Figura 03), entretanto só houve redução de DQO no ensaio C3 cuja concentração de coagulante foi de 8 g/L. Já os ensaios realizados com o coagulante de cloreto férrico apresentaram aproximadamente 30 % de redução de DQO para as concentrações de 1 e 5 g/L e 44 % para a concentração de 8 g/L.

Figura 03 - Amostras após os ensaios de coagulação



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os ensaios mostraram que o cloreto férrico foi mais eficiente na redução de DQO, alcançando até 44 % em 8 g/L, enquanto o PAC se destacou na redução de cor. No entanto, ambos coagulantes apresentaram resultados apenas em concentrações elevadas (8 g/L), superiores às geralmente utilizadas, o que torna sua aplicação inviável.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos percebe-se que a coagulação convencional, embora tenha alcançado valores de redução de DQO próximos ao do melhor ensaio de eletrofloculação, não se apresenta como uma técnica de tratamento promissora quando aplicada ao tratamento de efluente sintético à base de ácidos fúlvicos, devido à necessidade em se utilizar elevadas concentrações de coagulante, o que torna sua aplicação inviável.

Em contrapartida, os ensaios demonstraram que a técnica de eletrofloculação apresenta resultados promissores na redução de DQO, cor e turbidez do efluente sintético, mostrando-se mais eficaz do que os métodos de coagulação e floculação convencionais.

A melhor condição para este estudo foi alcançada no ensaio de eletrofloculação com tempo de 40 minutos, pH igual a 3,00, eletrodos de alumínio e densidade de corrente de 10,6 mA/cm². Tais condições proporcionaram a redução de 45 % na DQO, 79 % na cor e 80 % na turbidez do efluente. Contudo se faz necessário a sequência de estudos utilizando-se a

eletrocoagulação, principalmente aumentando-se a densidade de corrente, a qual mostrou-se promissor para a redução da DQO.

O aterro sanitário vem sendo apresentado como a solução mais adequada para a disposição final dos resíduos sólidos devido aos procedimentos técnicos e operacionais responsáveis em evitar a proliferação de vetores, mau cheiro e principalmente pelos controles ambientais que visam impedir a contaminação do solo, das águas e do ar. Entretanto, não deixa de ser um passivo ambiental com muitos impactos associados. Portanto, deve-se enfatizar a importância em melhorar a gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil com a ampliação de programas de coleta seletiva, incentivos à reciclagem, ao consumo consciente e à economia circular como estratégias para reduzir a geração e promover a utilização dos resíduos e assim reduzir a demanda por disposição final em aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 1992.

ABRELPE, 2023. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL**. Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf>. Acesso em: 17 out. 2023.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington**, 1999.

BRASIL. **Lei Nº 12305, de 2 de agosto de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília

BASSANI, Fabiana. **Monitoramento do lixiviado do aterro controlado de Maringá, Paraná, e avaliação da tratabilidade com coagulantes naturais, radiação ultravioleta (UV) e ozônio.** 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010. Disponível em: <https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UEM-10_2d556ee499cbc1526c36ce47bb7e1222>. Acesso em out. 2024.

BELAN, André Luiz Damasceno. **Eletrofloculação aplicada ao tratamento de efluentes têxteis:** Revisão Bibliográfica. Monografia de Especialização - Pós Graduação em Gestão Ambiental em Municípios, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2014.

CENCI, Caroline Pagani. Avaliação Da Eletrofloculação Quando Aplicada Ao Tratamento De Lixiviado De Aterro Sanitário. In: Anais IV EMADS - Encontro sobre Meio Ambiente e Dinâmicas Socioambientais: Inovação e Tecnologia no Tratamento e Qualidade da Água. **Anais...**Chapecó (SC) Unochapecó, 2024. Disponível em: https//www.even3.com.br/anais/iv-emads/919637-avaliacao-da-eletrofloculacao-quando-aplicada-ao-tratamento-de-lixiviado-de-aterro-sanitario. Acesso em: 21 nov. 2024

CHRISTENSEN, T. H. et al. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. **Applied Geochemistry**, v. 16, n. 7-8, p. 659-718, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18300825>. Acesso em: 25 set. 2024.

DIA, Oumar et al. Hybrid process, electrocoagulation-biofiltration for landfill leachate treatment. **Waste Management,** v. 75, p. 391–399, 1 maio 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18300825>. Acesso em: 05 nov. 2024.

DRESCH, Aline Perin et al. Evaluation Of Two Different Methods For The Quantification Of Humic Substances In Landfills In Southern Brazil. In: Congresso Brasileiro De Biotecnologia Industrial, I, 2024, Florianópolis. **Anais** [...]. Chapecó, 2023. Disponível em: <https://www.cobbind.com.br/evento/cobbind2024/trabalhosaprovados/naintegra/17086>. Acesso em: 21 out. 2024.

FORNARI, Marilda Menchon Tavares. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes de curtume**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/1866>. Acesso em: 28 out. 2024.

GEWEHR, André Granzotto. **Tratamento por coagulação-floculação de lixiviado bruto de aterro sanitário com e sem pré-tratamento biológico em reator sequencial em batelada.** 2012. 163 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/62110>. Acesso em: 21 nov. 2024.

GODOI, Mayara Caroline Santos. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por meio de processo de eletrocoagulação e filtração**. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/12165/1/LD_COEAM_2019_1_12.pd> . Acesso em: 18 out. 2024.

MORAVIA, Wagner Guadagnin. **Estudos de caracterização, tratabilidade e condicionamento de lixiviados visando tratamento por lagoas**. 2007. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-7AJN5A>. Acesso em: 18 out. 2024.

PEDROSO, Keylla. **Avaliação do tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Maringá, Paraná, por processo de coagulação/floculação e ozonização**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá.

PEIXOTO, André Luís de Castro et al. Predição da demanda química de oxigênio em chorume maduro contendo reagente de fenton, por meio de modelo matemático empírico gerado com planejamento fatorial completo. **Química Nova**, v. 31, n. 7, p. 1641–1647, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/FNLCq6GcZ84qKBxkxh9bdJR/?lang=pt#ModalTutors>. Acesso em: 19 set. 2024.

RODRIGUES, Marina de Castro. **Tratamento eletrolítico de lixiviado de aterro sanitário.** 2007. 123 f. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2007.

VELLOSO, Marta Pimenta. Os restos na história: percepções sobre resíduos. **Ciência & Saúde Coletiva,** v. 13, p. 1953-1964, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/RZCMgZVGdW4y5wF7xHKYPcF/>. Acesso em: 19 set. 2024.