

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS**

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ VICTOR OLIVEIRA BRINGEL BEZERRA

**TRATAMENTO DE CHORUME DO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS POR
PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO (POA) EMPREGANDO O REAGENTE DE
FENTON**

PALMAS

2020

JOSÉ VICTOR OLIVEIRA BRINGEL BEZERRA

**TRATAMENTO DE CHORUME DO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS POR
PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO (POA) EMPREGANDO O REAGENTE DE
FENTON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do Título
de Engenheiro Civil do Curso Superior de
Engenharia Civil do Instituto Federal do
Tocantins, *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

B574t Bezerra, José Victor Oliveira Bringel
TRATAMENTO DE CHORUME DO ATERRO SANITÁRIO DE
PALMAS POR PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO (POA)
EMPREGANDO O REAGENTE DE FENTON / José Victor Oliveira
Bringel Bezerra. – Palmas, TO, 2020.
51 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
Palmas, Palmas, TO, 2020.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Coorientador: Esp. Renan Carvalho Marques

1. TRATAMENTO DE CHORUME EM ATERRO SANITÁRIO. 2.
PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO (POA). 3. REAGENTE DE
FENTON. I. Pedroza, Marcelo Mendes. II. Marques, Renan Carvalho. III.
Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e
pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

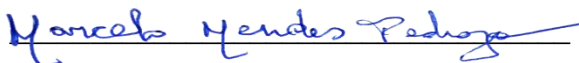
JOSÉ VICTOR OLIVEIRA BRINGEL BEZERRA

TRATAMENTO DE CHORUME DO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS POR PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO (POA) EMPREGANDO O REAGENTE DE FENTON

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Civil
Instituto Federal do Tocantins - Campus
Palmas, como exigência à obtenção do grau em
Engenheiro Civil.

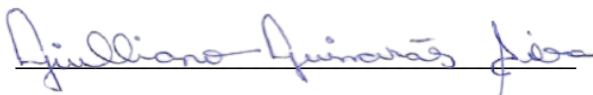
Aprovado em: 05 /11/ 2020

BANCA AVALIADORA



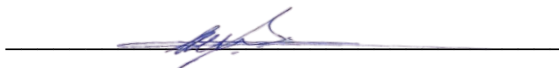
Dr. Marcelo Mendes Pedroza

IFTO – *Campus* Palmas



Dr. Giulliano Guimarães Silva

IFTO – *Campus* Palmas



Me. Paulo Ricardo Silva Machado

UFT – *Campus* Palmas

Dedico essa conquista àqueles que são minha base: meus pais, Sioneidia Bringel e Paulo Ernani, aos meus irmãos Otávio Bringel, Ernani Martins e Mateus Martins, assim como a minhas cunhadas, sobrinhos, tios e avós, e principalmente a quem foi minha companheira e sempre me deu apoio em todo esse caminho, Maria Vitória Abrão. Amo muito vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus, meu melhor amigo, protetor, companheiro e auxiliador. Obrigado por ter me permitido sonhar e conseguir realizar esse sonho que foi tão batalhado e de difícil trajetória. Se não fosse pelo seu cuidado, refrigério e fortalecimento não teria alcançado essa realização profissional.

Aos meus pais, Paulo Ernani e Sioneidia Bringel, que apesar de todas as dificuldades encontradas, sempre fizeram o impossível para me dar apoio nesse caminho difícil e durante todo o curso e pela educação recebida, contribuindo na minha formação como pessoa e como profissional, para que sempre possa atuar de maneira correta, humilde e responsável.

Aos meus irmãos Ernani, Otávio e Mateus, que apesar da distância e dificuldades vividas sempre mantendo nosso companheirismo e cumplicidade durante esse percurso e também pelos momentos de diversão e descontração.

A meu orientador Professor Dr. Marcelo Pedroza, que agradeço imensamente por ter me ajudado e sempre colaborado comigo apesar de toda a dificuldade vivida, estar sempre me auxiliando apesar dos empecilhos e pelo acompanhamento deste trabalho durante esse ano e tendo se tornado um amigo para a vida. Obrigado pelo incentivo, risadas, apoio e aprendizado nesse período que, além de procurar impulsionar constantemente meu senso crítico, contribuiu no meu interesse pela área do saneamento básico.

Ao Professor Dr. Giuliano Guimarães, membro da banca avaliadora e um dos melhores professores que já tive na faculdade, sendo que me fez criar interesse por uma área que nunca me imaginei atuando, procurando da melhor maneira ensinar sobre a importância dos ensaios físico-químicos e microbiológicos, transmitindo ensinamentos valiosos.

Ao Me. Paulo Ricardo por aceitar o pedido de ser membro da banca avaliadora deste trabalho e pela contribuição ímpar na normatização do mesmo bem como na minha formação profissional relativa à preocupação com o meio ambiente.

À minha companheira Maria Vitória Abrão pela sua presença constante e incentivo em todos os momentos que vivemos juntos, e que apesar de todas as dificuldades, sempre esteve comigo me dando forças.

À toda minha família, sobrinhos, cunhadas, tios, tias, avós e avôs que sempre me encorajaram diante das dificuldades do curso e dessa dissertação e, que a todo momento, festejava minhas etapas conquistadas.

Ao meu amigo Marcel que contribuiu significativamente nesse trabalho, me auxiliando a todo momento e sanando todas as minhas dúvidas referentes a dissertação, tornando a finalização desse trabalho possível.

Ao técnico operacional do Aterro Sanitário de Palmas, Adeluzio, que contribuiu extraordinariamente me repassando as informações referentes ao mesmo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), *Campus* Palmas, pela minha formação acadêmica, sempre procurando incentivar os alunos a pensar no futuro e a usar o conhecimento de maneira correta e ética.

Aos meus amigos de turma pelo companheirismo durante esses cinco anos de curso, onde vivemos grandes emoções e criamos laços fortes de amizades.

Aos queridos professores do curso do IFTO – *Campus* Palmas que conseguiram compartilhar todos os seus conhecimentos durante esses anos de curso.

A todos vocês, o meu profundo obrigado!

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, ria, dance, chore e viva intensamente cada momento de sua vida, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos. ”

Charles Chaplin

RESUMO

Atualmente a disposição de resíduos industriais e municipais em aterros é o método mais difundido e econômico para a disposição de resíduos sólidos em países subdesenvolvidos, essa disposição nos lixões ou nos aterros sofrem os processos de decomposição física, química e biológica, dando origem a efluentes líquidos e gasosos. Este trabalho objetiva analisar a viabilidade dos POA's como tratamento de chorume in natura, proveniente do aterro sanitário da cidade de Palmas-TO, a partir do emprego de reagente de Fenton, como também a avaliação da remoção de compostos orgânicos de amostras de chorume. Foi verificado por meio de planejamento multivariável o efeito de dois fatores na degradação química do chorume, sendo considerado como fator 1 a concentração do H_2O_2 e fator 2 a concentração dos íons Fe^{++} tendo a Demanda Química de Oxigênio (DQO) como resposta do planejamento experimental. Os níveis para degradação do chorume variaram para os dois fatores, utilizando três níveis: 0,32 mM, 0,34 mM e 0,36 mM para H_2O_2 e 0,07 mM, 0,08 mM e 0,09 mM para Fe^{++} respectivamente referente aos níveis (-1), (0) e (1), foram realizados sete experimentos variando tais dosagens, sendo que os ensaios foram realizados na ausência de luz, a temperatura ambiente, e em um reator de 1 litro de capacidade, em regime de batelada e com período de 1 hora de reação. Após fim do ensaio, foi feita a realização da leitura no espectrofotométrico dos valores de DQO obtidos. Também foi realizado no trabalho a estimativa da geração teórica de percolato produzido pelo Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins, a partir da simulação computacional conforme a aplicação de dois métodos empíricos: o Método Racional e o Método Suíço. Os resultados obtidos demonstraram a similaridade entre os dois modelos matemáticos utilizados para a estimativa de produção de percolato gerado pelo Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins, apresentando os valores de 3,06 l.s-1 e 2,44 l.s-1 pelo método suíço e racional respectivamente. Para a degradação do chorume, as melhores concentrações utilizadas para a maior remoção de DQO foram observadas no ensaio 3 (73%) onde a dosagem de H_2O_2 foi de 0,32mM e de Fe^{++} 0,09mM e a menor remoção foi de 56% foi obtida no ensaio 4, onde se teve alta concentração de H_2O_2 (0,36mM) e alta de Fe^{++} (0,09mM). Assim, a degradação de chorume no Aterro Sanitário de Palmas por Processo Oxidativo mostrou-se como uma alternativa bastante viável e eficaz para maximizar a degradação do chorume, podendo ser utilizada como pré-tratamento e/ou pós-tratamento, podendo ser associada aos processos já existentes de tratamentos, como o processo biológico, já que este tipo de tratamento é o mais empregado, no sentido de aumentar a biodegradabilidade do lixiviado, minimizando o tamanho das lagoas, ou aumentando a vazão de lixiviado tratado, pois apresentam elevadas eficiências na remoção de poluentes orgânicos, com custo relativamente baixo e facilidade operacional. Então se torna possível realizar a remoção de compostos orgânicos do chorume proveniente do Aterro Sanitário de Palmas – TO, através de processo oxidativo avançado (POA) empregando o Reagente de Fenton, alcançando eficiência de cerca de 70% na remoção de poluentes no tratamento de lixiviado sintético que simulando o chorume do Aterro Sanitário de Palmas-TO.

Palavras-chave: Chorume; Reagente de Fenton; Processo Oxidativo Avançado; Aterro Sanitário.

ABSTRACT

This work aims to analyze the viability of POA's as a treatment of fresh leachate from the landfill in the city of Palmas-TO, using Fenton's reagent, as well as the evaluation of the removal of organic compounds from leachate samples from Brazil. Landfill of Palmas-TO through POA using FENTON reagent. The work also aimed at determining the flow, characterizing samples, among other situations. It was verified through multivariable planning the effect of two factors in the chemical degradation of leachate, with factor 1 being the concentration of H_2O_2 and factor 2 being the concentration of Fe^{++} ions with the Chemical Oxygen Demand (DQO) as the response of the experimental design. Levels for leachate degradation varied for both factors, using three levels: 0.32 mM, 0.34 mM and 0.36 mM for H_2O_2 and 0.07 mM, 0.08 mM and 0.09 mM for Fe^{++} respectively regarding levels (-1), (0) and (1), seven experiments were performed varying such dosages, and the tests were carried out in the absence of light, at room temperature, and in a 1 liter capacity reactor, in batch mode and with a 1 hour reaction period. After the end of the test, the DQO values obtained were read in the spectrophotometric. The work also estimated the theoretical generation of percolate produced by the Landfill of Palmas - Tocantins, based on computer simulation according to the application of two empirical methods: the Rational Method and the Swiss Method. The results obtained demonstrated the similarity between the two mathematical models used to estimate the percolate production generated by the Landfill of Palmas - Tocantins, presenting the values of 3.06 ls^{-1} and 2.44 ls^{-1} by the Swiss and rational method respectively. For the leachate degradation, the best concentrations used for the highest COD removal were observed in test 3 (73%) where the H_2O_2 dosage was 0.32mM and Fe^{++} 0.09mM and the lowest removal was 56%. obtained in test 4, where there was a high concentration of H_2O_2 (0.36mM) and a high Fe^{++} (0.09mM). Thus, the leachate degradation in the Palmas Landfill by Oxidative Process proved to be a very viable and effective alternative to maximize leachate degradation, and can be used as pre-treatment and / or post-treatment, and can be associated with processes existing treatments, such as the biological process, since this type of treatment is the most used, in the sense of increasing the leachate's biodegradability, minimizing the size of the ponds, or increasing the flow of treated leachate, as they present high efficiency in the removal of organic pollutants, with relatively low cost and easy operation. Then it becomes possible to remove organic compounds from the leachate from the Landfill of Palmas - TO, through an advanced oxidative process (POA) using the Fenton Reagent, reaching about 70% efficiency in removing pollutants in the leachate treatment. That simulating the leachate of the Landfill of Palmas-TO.

Keywords: Slurry; Fenton reagent; Advanced Oxidative Process; Landfill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aterro consorciado na região de Mirassol D'Oeste-MT	19
Figura 2 - Depósito de chorume de aterro sanitário	20
Figura 3 - Foto ativação do catalisador TiO_2	25
Figura 4 - Tratamento de chorume em lagoas de estabilização no Aterro Sanitário de Palmas (TO)	28
Figura 5 - Planejamento experimental adotado na degradação química de corante através da Reação de Fenton.....	30
Figura 6 - Reator empregado nos ensaios	34
Figura 7 - Médias de precipitação da cidade de Palmas-TO	35
Figura 8 - Resultado encontrado da vazão pelo Método Suíço	35
Figura 9 - Resultado encontrado da vazão pelo Método Racional.....	36
Figura 10 - Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) na remoção de corante através de POA com reagente de Fenton.	38
Figura 11 – Valores observados versus valores previstos, para a remoção de corante	40
Figura 12 – Superfície de resposta para a degradação de corante, com os fatores de H_2O_2 e Fe^{++}	40
Figura 13 – Gráfico de coluna com os resultados obtidos da remoção de DQO para cada um dos sete ensaios.....	42
Figura 14 - Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) na degradação de chorume sintético através de POA com reagente de Fenton.....	42
Figura 15 – Valores observados versus valores previstos, para a degradação de chorume sintético.....	44
Figura 16 – Superfície de resposta para a degradação de corante, com os fatores de H_2O_2 e Fe^{++}	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do lixiviado de aterros sanitários	21
Tabela 2 - Sistema típicos de Processos de Oxidativos Avançados	24
Tabela 3 – Valores de K para aplicação do Método Suíço.....	30
Tabela 4 -Fatores e níveis empregados no planejamento experimental (2^2)	31
Tabela 5 - Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR 2^2	31
Tabela 6 – Composição química do chorume sintético empregado nessa pesquisa.....	32
Tabela 7 - Fatores e níveis empregados no planejamento experimental	32
Tabela 8 - Ordem dos experimentos empregados no Delineamento Composto Central.....	33
Tabela 9 - Metodologia empregada na análise do lixiviado	34
Tabela 10 - Valores utilizados para cálculo de vazão pelo Método Suíço	35
Tabela 11 - Valores utilizados para cálculo de vazão pelo Método Racional	36
Tabela 12 - Resultados dos valores da absorbância obtidos através do ensaio de remoção de corante através de POA com reagente de Fenton.	37
Tabela 13 - Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR 2^2 obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança.	38
Tabela 14 – ANOVA para a degradação de corante de azul de metileno através de POA com reagente de Fenton.....	39
Tabela 15 - Resultados obtidos de DQO da degradação química de chorume sintético através de POA com Reagente de Fenton e a partir de ensaio espectrofotométrico.....	41
Tabela 16 - Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR 2^2 obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança.	43
Tabela 17 – ANOVA para a degradação de chorume sintético através de POA com reagente de Fenton.	43

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

POA's – Processo Oxidativo Avançado

NBR- Norma Brasileira

GEE- Gases de Efeito Estufa

NINBY- Not In My Back Yard

DQO- Demanda Química de Oxigênio

DBO- Demanda Bioquímica de Oxigênio

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

DCCR- Delineamento Composto Central Rotacional

SONDA- Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Especiais

CCST- Centro de Ciências do Sistema Terrestre

LISTA DE SÍMBOLOS

OH – Radical hidroxila

H₂O₂ – Peróxido de Hidrogênio

Fe⁺⁺ – Cátion Ferroso

CO₂ – Dióxido de Carbono

pH – Potencial Hidrogeniônico

mg/L – Miligrama por litro

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

m³ – Metros cúbicos

m² – Metros quadrados

km – Quilômetros

N – Nitrogênio

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

Vol – Volume

A – Área

NO₃ – Nitrato

NO₂ – Dióxido de Nitrogênio

Ca –Cálcio

Na – Sódio

K – Potássio

Mn – Manganês

Mg – Magnésio

C – Coeficiente de escoamento ou “runoff”

i – intensidade média da chuva

A – Área da bacia receptora da chuva

L – Litros

s - Segundos

L/s – Litro por segundo

Fe – Ferro

Zn – Zinco

Cu – Cobre

Cd – Cádmio

Pb – Chumbo

O_3 – Ozônio

mM – milimol

TiO_2 – Dióxido de Titânio

ZnO – Óxido de Zinco

m^3/s – Metro cúbico por segundo

há – hectare

mm – milímetro

NH_4Cl – Cloreto de Amônio

$CaCl_2$ – Cloreto de Cálcio

$MgCl_2$ – Cloreto de Magnésio

$CdCl_2$ – Cloreto de Cádmio

$NiCl_2$ – Cloreto de Nitrato

$ZnSO_4$ – Sulfato de Zinco

K_2Cr_2 – Dicromato de Potássio

$FeCl_3$ – Cloreto de Ferro

$Pb(NO_3)_2$ – Nitrato de Chumbo

H_2SO_4 – Ácido Sulfúrico

Q – Vazão média do percolado

A – Área total do aterro

t – Número de segundos em 1 mês

K – Coeficiente que depende do grau de compactação do aterro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. PROBLEMA DA PESQUISA	16
3. JUSTIFICATIVA.....	16
4. OBJETIVOS.....	17
4.1 Objetivo Geral.....	17
4.2 Objetivos Específicos	17
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
5.1 Aterro Sanitário	18
5.2 Chorume	19
5.3 Tratamento de Chorume.....	21
5.4 Processo Oxidativo Avançado (POA)	22
5.4.1 Vantagens dos Processos oxidativo avançados	25
5.4.2 Desvantagens dos Processos oxidativo avançados.....	26
6. METODOLOGIA	26
6.1 Localização do Aterro Sanitário de Palmas	27
6.2 Determinação da vazão do Aterro Sanitário de Palmas	28
6.3 Remoção de Corante através de POA com reagente de FENTON: Otimização de processo.....	30
6.4 Ensaios de degradação química de Chorume através de POA com reagente de FENTON.....	32
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
7.1 Determinação de vazão do aterro sanitário de Palmas	34
7.1.1 Método Suíço.....	35
7.1.2 Método Racional	35
7.1.3 Comparativo entre Método Racional e Método Suíço	36
7.2 Planejamento experimental 2²- Delineamento Composto Central Rotacional para o ensaio de remoção de corante através de POA com reagente de FENTON	37
7.3 Ensaio de degradação química de chorume sintético através de POA com reagente de FENTON na remoção de DQO	41
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a disposição de resíduos industriais e municipais em aterros é o método mais difundido e econômico para a disposição de resíduos sólidos em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, contudo, a tendência mundial principalmente em países desenvolvidos é que, os resíduos sólidos sejam tratados utilizando-se outros processos. Apesar de inúmeras restrições, o aterro sanitário tem sido utilizado como uma das alternativas para a disposição destes resíduos, de maneira a minimizar os efeitos negativos ao meio ambiente e a saúde pública (SILVA, 2009). Os resíduos sólidos dispostos nos lixões ou nos aterros sofrem os processos de decomposição física, química e biológica, dando origem a efluentes líquidos e gasosos. A fração líquida, conhecida como chorume ou lixiviado, é originada pela umidade natural presente nos resíduos, pelo processo de decomposição da matéria orgânica e pela água da chuva que percola sobre a massa de resíduo (KJELDSEN *et al*, 2002).

O chorume é uma consequência do processo de decomposição de matérias orgânicas depositadas no meio. Ele ocorre principalmente nos aterros, onde há a deposição e degradação de grandes quantidades de material orgânico. O chorume é um líquido com cheiro forte e desagradável, cuja coloração é escura, sendo também conhecido como “lixiviado”, e é muito poluente, podendo afetar o meio ambiente e a saúde humana. O poder poluente do chorume vai depender da quantidade de material químico e metais pesados em sua composição. A quantidade de chorume produzido depende de fatores variados, como os índices de precipitação na área do depósito, o escoamento superficial e a infiltração subterrânea, a umidade natural já existente no material orgânico, a compactação do material de origem, bem como os solos no local da formação do chorume (MARQUES, 2019).

Os lixiviados do aterro sanitário são definidos por (MORAVIA, 2007) como efluente líquido originado da umidade natural e da água presente nos resíduos, do resultado da degradação biológica dos materiais orgânicos e da água que infiltra na camada de cobertura e no interior das células existentes no aterro. Este líquido em contato com a água da chuva, percola a massa do aterro, gerando lixiviado tóxico. O chorume é rico basicamente por água rica em sais, metais pesados e matéria orgânica, sendo todos solúveis.

As características dos percolados variam de local para local, sazonalmente, e também ao longo da vida útil de um aterro, apresentando constantes mudanças no que se refere à vazão gerada, à composição química e à concentração. Portanto, seu volume e sua capacidade de lixiviação depende da quantidade de água e precipitação atmosférica que atinge os resíduos, da quantidade e qualidade da matéria orgânica e do tipo de solo, que em última análise pode

permitir uma infiltração maior do chorume nas camadas mais profundas do solo (HEITZMANN Jr., 1999).

A característica do lixiviado é influenciada por alguns fatores como: variações climáticas, técnica de aterramento e método de compactação, os quais influenciam na quantidade e na qualidade do lixiviado produzido no aterro. Sendo o seu envelhecimento caracterizado pela presença de substâncias recalcitrantes (TELLES, 2010).

Neste contexto os Processos Oxidativos Avançados (POA's) surgem como uma alternativa para maximizar a degradação do chorume, podendo ser utilizada como pré-tratamento e/ou pós-tratamento que pode ser associada aos processos de tratamento biológicos. Os POA's são processos que envolvem a geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), altamente reativos, que tem a capacidade de destruição total de muitos poluentes orgânicos (PAULINO *et al*, 2015).

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade dos POA's como tratamento de chorume *in natura*, proveniente do aterro sanitário da cidade de Palmas, capital do estado do Tocantins, a partir do emprego de reagente de Fenton.

2. PROBLEMA DA PESQUISA

É possível realizar a remoção de compostos orgânicos do chorume proveniente do Aterro Sanitário de Palmas - TO através de processo oxidativo avançado (POA) empregando o reagente de FENTON? Qual a eficiência de remoção de poluentes alcançada por esse método de tratamento de lixiviado?

3. JUSTIFICATIVA

Aterro sanitário, por si só já se define como algo que prevê cuidados técnicos e evidentemente sanitários, tendo em vista que aterro, significa terreno onde são depositados, em camadas compactadas, resíduos sólidos, que são tratados de maneira a reduzir ao mínimo os efeitos nocivos sobre o ambiente ou a saúde pública e sanitário, é algo relativo à saúde pública ou individual, à higiene, cuidados com o meio ambiente e consequentemente efeitos progressivos ou regressivos para saúde pública.

Já se define conforme postulados encontrados em livros e biografias que aterro sanitário é uma técnica que busca encontrar mecanismos de tratamento para corrigir os efeitos corrosivos do lixo criados pelos seres humanos, principalmente em residências, o que acreditamos que podemos reduzir drasticamente, o volume de lixo doméstico.

Em 2014 a produção de resíduos domésticos na cidade de Palmas (Tocantins) foi de aproximadamente 77.8 toneladas. Quando comparado com a produção no ano de 2008 que foi de 44.6 toneladas, observa-se um crescimento de cerca de 74.5%. De acordo com Folha Capital (2019), o lixo doméstico que especificamente em Palmas gira em torno de 240 (duzentos e quarenta) tonelada dia.

O chorume pode conter altas concentrações de metais pesados, sólidos suspensos e compostos orgânicos. Por apresentar substâncias altamente solúveis, pode percolar e alcançar as coleções hídricas superficiais ou até mesmo infiltrar-se no solo, podendo atingir as águas subterrâneas (BERTAZZOLI, 2002). A eficiência dos sistemas convencionais (biológicos) adotados no tratamento de chorume vem sendo discutida por alguns pesquisadores (FREIRE, 2000, MARQUES, 2019).

Assim sendo, torna-se necessária a busca de novas tecnologias que apresentem maior eficiência no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Dentre as novas tecnologias, se destacam os Processos Oxidativos Avançados (POA's), os quais se baseiam na utilização de espécies altamente oxidantes para promover uma degradação mais efetiva do poluente a ser tratado (BRITO & SILVA, 2012). Os POA's podem ser utilizados em conjunto com tratamentos biológicos, a fim de aumentar a biodegradabilidade de compostos recalcitrantes, diminuindo assim o tempo requerido para o tratamento via processos biológicos tradicionais (DE MORAES & PERALTA-ZAMORA, 2005).

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Avaliar a remoção de compostos orgânicos de amostras de chorume proveniente do Aterro Sanitário de Palmas-TO através de POA empregando reagente de FENTON.

4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as amostras de lixiviado sintético;
- Determinar a vazão de chorume do Aterro Sanitário de Palmas;
- Efetuar a degradação de compostos orgânicos através de POA com reagente de FENTON;
- Avaliar a eficiência de remoção de compostos através do processo adotado nessa pesquisa;

- Observar e selecionar as melhores concentrações de H_2O_2 e Fe^{++} com base na eficiência da aplicação de POA na descoloração de azul de metileno.

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Objetivando uma maior fundamentação, buscou-se cumprir os objetivos via caracterização e contextualização do tema abordado utilizando-se para o seu desenvolvimento a pesquisa bibliográfica através de livros, apostilas, revistas, periódicos e internet.

Os conceitos apresentados fundamentam o presente trabalho e conduzem o referencial metodológico.

5.1 Aterro Sanitário

De acordo com Albuquerque (2011, p. 315), um aterro sanitário é definido “como aterro de resíduos sólidos urbanos, ou seja, adequado para a recepção de resíduos de origem doméstica, varrição de vias públicas e comércios”.

Já o autor Fiorillo (2011, p. 359) explica que “[...] aterros sanitários são os locais especialmente concebidos para receber lixo e projetados de forma que se reduza o perigo para a saúde pública e para a segurança”.

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 8419, 1992, p. 62), o conceito de Aterro sanitário é:

“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.”

Nesse sentido, Costa e Ribeiro (2013, p. 53) também destacam a aludida norma técnica asseverando que “trata-se de uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais”. Ainda segundo os autores,

Esse método de engenharia [...], apresenta baixo custo operacional, se comparado às alternativas existentes, oportunizando a associação de outras tecnologias, além de ser uma amplamente conhecida, que potencializa a geração de empregos, permitindo também a possibilidade de gestão consorciada entre Municípios, como exemplifica a Figura 1.

Figura 1 - Aterro consorciado na região de Mirassol D'Oeste-MT



Fonte: Quatro Marcos (2020).

Nesse caso, os custos podem ser reduzidos significativamente [...]. Entretanto, os aterros sanitários também apresentam algumas desvantagens, como a geração de odores característicos, a possibilidade de exposição e riscos aos trabalhadores, a necessidade de grandes áreas para o empreendimento e ainda a resistência por parte da comunidade do entorno, fenômeno internacionalmente conhecido como Not in My Back Yard (NINBY), ou seja, Não Está no Meu Quintal. Ainda, vale dizer que esses aterros se constituem em fontes de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), havendo também proliferação de vetores e potenciais doenças associadas e, além do mais, após seu encerramento a possibilidade de passivos ambientais.

5.2 Chorume

Chorume é um líquido escuro gerado pela degradação dos resíduos em aterros sanitários. Ele é originário de três diferentes fontes:

- Da umidade natural do lixo, aumentando no período chuvoso;
- Da água de constituição da matéria orgânica, que escorre durante o processo de decomposição;
- Das bactérias existentes no lixo, que expelem enzimas, enzimas essas que dissolvem a matéria orgânica com formação de líquido;

O impacto produzido pelo chorume (Figura 2) sobre o meio ambiente está diretamente relacionado com sua fase de decomposição.

Figura 2 - Depósito de chorume de aterro sanitário



Fonte: Tera (2013).

O chorume de aterro novo, quando recebe boa quantidade de águas pluviais é caracterizado por pH ácido, alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), alto valor de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e diversos compostos potencialmente tóxicos. Com o passar dos anos há uma redução significativa da biodegradabilidade devido a conversão, em gás metano e CO_2 , de parte dos componentes biodegradáveis.

Deve-se ressaltar que a composição físico-química do chorume é extremamente variável dependendo de vários fatores que vão desde as condições ambientais locais, tempo de disposição, forma de operação do aterro e até características do próprio despejo.

O chorume possui as seguintes características, entre outras:

- Líquido de coloração escura (também denominado de líquido percolado);
- Resíduo gerado pela decomposição do chamado lixo doméstico;
- De textura viscosa e forte odor característico;
- Originário da umidade natural do lixo, que aumenta no período de chuvas; da água;
- É proveniente da matéria orgânica.

No que diz respeito a composição e características do chorume, importante ressaltar que é variável, depende de fatores como as condições do ambiente local, o tempo de disposição do lixo, o modo como opera o aterro sanitário e até as características dos detritos descartados. Geralmente, o chorume se compõe de substâncias orgânicas (em especial nitrogênio orgânico e carbono) e também elementos inorgânicos, como cobre, cobalto, cromo, arsênio, cádmio, chumbo e mercúrio (Tabela 1).

Tabela 1 - Características do lixiviado de aterros sanitários

Variáveis	Mínimo	Máximo
pH	3,7	8,5
Condutividade (µS/cm)	2 810	16 800
DQO (mg/L)	40	89 500
DBO (mg/L)	40	33 400
ST (mg/L)	0	59 200
Dureza (mg/L de CaCO ₃)	0	22 800
Fosfato total (mg/L)	0	130
NAT (mg/L de N)	0	1 100
N-NO ₃ ⁻ + N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,2	10
Ca (mg/L)	50	7 200
Na (mg/L)	0	7 700
K (mg/L)	28	3 770
Mn (mg/L)	0,09	125
Mg (mg/L)	17	15 600
Fe (mg/L)	0	2 800
Zn (mg/L)	0	370
Cu (mg/L)	0	9,9
Cd (mg/L)	< 0,03	17
Pb (mg/L)	< 0,05	2
Cloretos (mg/L)	4,7	2 467
Sulfatos (mg/L)	1,1	1 558

Fonte: Garland e Mosher (1975) apud Castilhos Júnior. (1991)

O chorume pode conter altas concentrações de sólidos suspensos, metais pesados, compostos orgânicos originados da degradação de substâncias que facilmente são metabolizadas como carboidratos, proteínas e gorduras. Por apresentar substâncias altamente solúveis, o chorume pode contaminar as águas do subsolo nas proximidades do aterro. A presença do chorume em águas subterrâneas pode ter consequências extremamente sérias para o meio ambiente e para a saúde pública por apresentar compostos altamente tóxicos. Devido à movimentação dos lençóis o chorume pode dispersar-se e atingir poços artesianos

Devido a sua maior agressividade em relação ao esgoto bruto, torna-se necessário um tratamento específico mais adequado ao chorume. O tratamento de chorume é uma medida de proteção ambiental, de manutenção da estabilidade do aterro e uma forma de garantir uma melhor qualidade de vida para a população local.

5.3 Tratamento de Chorume

O tratamento biológico do chorume constitui como uma alternativa de alta eficiência que ocorre na presença de microrganismos aeróbios que se alimentam dos compostos orgânicos,

transformando a matéria orgânica decomposta em material que pode ser aproveitado na agricultura.

Após a coleta no aterro, o chorume pode ser encaminhado para uma instalação onde há uma série de etapas de tratamento.

Em áreas onde há alta concentração de matéria orgânica em decomposição a capacidade de danos ao meio ambiente por contaminação por chorume é elevada e todas as medidas de precaução devem ser tomadas. Nos aterros sanitários, por exemplo, não basta a contenção e o isolamento do terreno dos riscos de contato do chorume com o meio ambiente, o que deve ser feito em conformidade com a NBR 8419/1992, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que dispõe sobre a construção de aterros sanitários no Brasil. Afinal, o tratamento do chorume é a solução que viabiliza a transformação da substância em uma série de compostos estáveis. Parte dele poderá, inclusive, ser utilizado como adubo orgânico, conforme já citado acima.

5.4 Processo Oxidativo Avançado (POA)

Os POA's são processos que envolvem a geração de radicais hidroxila (OH), altamente reativos, que têm a capacidade de destruição total de muitos poluentes orgânicos. O reagente de Fenton é uma mistura de peróxido de hidrogênio e sais de ferro. O peróxido de hidrogênio é um oxidante eficiente, seguro e de custo acessível, utilizado há décadas em aplicações ambientais em todo o mundo (Neyens & Baeyens, 2003).

Conforme (HIRVONEN et al., 1996; NOGUEIRA & JARDIM, 1998; SILVA, 2007; VINODGOPAL et al., 1998), os Processos Oxidativos Avançados (POA's) são baseados na geração de radicais livres, em especial o radical hidroxil (OH). Este radical possui alto poder oxidante e pode promover a degradação de vários compostos poluentes em poucos minutos.

Já para (LEGRINI et al, 1993; GLAZE et al, 1995; DE LAAT et al, 1999), os POA's (processos oxidativos avançados) são técnicas que envolvem a geração de radicais altamente reativos, como por exemplo, os radicais hidroxila (-OH), capazes de oxidar contaminantes orgânicos, formando água, dióxido de carbono e íons inorgânicos ou ainda, de acordo com (HIGARASHI, 1999; ARSLAN e BALCIOLU, 2001) transformá-los em compostos intermediários mais biodegradáveis. Estes processos vêm sendo aplicados com sucesso na descontaminação in situ de solos, na desinfecção de águas, na remoção de cor e contaminantes orgânicos em efluentes industriais (MESQUITA, 2004), na remediação de águas subterrâneas,

no tratamento de efluentes municipais ou efluentes contendo surfactantes (SANZ et al, 2003), água para consumo humano, lixiviado de aterros e águas superficiais.

O processo oxidativo avançado (POA) empregando reagente de Fenton surgiu como uma alternativa para resolver a degradação do chorume, apresenta-se como uma alternativa de pré-tratamento e/ou pós-tratamento que pode ser associada aos processos de tratamento biológico, já que este tipo de tratamento é o mais empregado, no sentido de aumentar a biodegradabilidade do lixiviado, minimizando o tamanho das lagoas, ou aumentando a vazão de lixiviado tratado, pois apresentam elevadas eficiências na remoção de poluentes orgânicos, com custo relativamente baixo e facilidade operacional.

O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) é empregado para geração de radicais hidroxila, entretanto, é necessária a adição de ativadores, como sais de ferro, ozônio e/ou luz ultravioleta, para produzir a alta taxa de radicais requerida (Bull & Zeff, 1991).

Os radicais livres (OH) formados atacam o composto orgânico levando à sua oxidação completa produzindo CO_2 e H_2O , ou quando resulta em uma oxidação.

Segundo Nogueira et al., (2007) o processo oxidativo fundamenta-se na geração da radical hidroxila, por reação entre Fe^{++} e peróxido de hidrogênio (reação de Fenton, Eq. 29) e define a radical hidroxila como sendo:

“geralmente formado em reações que resultam da combinação de oxidantes como ozônio e peróxido de hidrogênio com irradiação ultravioleta (UV) ou visível (Vis) e catalisadores, como íons metálicos ou semicondutores. Dependendo da estrutura do contaminante orgânico, podem ocorrer diferentes reações envolvendo a radical hidroxila, tais como abstração de átomo de hidrogênio, adição eletrofílica a substâncias contendo instaurações e anéis aromáticos, transferência eletrônica e reações radical-radical descritas a conforme segue: $RX + \bullet OH \rightarrow RX^{\bullet+} + OH^{-2}$ ”

Segundo Domenech (2001), os processos oxidativos avançados podem ser divididos em fotoquímicos e não fotoquímicos, in verbis:

- ✓ Processos não fotoquímicos: como, por exemplo, a ozonização em meio alcalino (O_3/OH), a ozonização com período de hidrogênio (O_3/H_2O_2), o processo Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2) e similares, a oxidação eletroquímica, a radiólise, o plasma não térmico, entre outros;
- ✓ Processos fotoquímicos: a fotólise da água em ultravioleta vácuo (UV-Vácuo), o ultravioleta com peróxido de hidrogênio (UV/ H_2O_2), o ultravioleta com Ozônio (UV/ O_3), o foto-Fenton ($(Fe^{2+}/H_2/UV)$) e relacionados, a fotocatalise heterogênea, e outros.

Os POA's podem ser divididos em sistemas homogêneos e heterogêneos, conforme aparentando na Tabela 2.

Tabela 2 - Sistema típicos de Processos de Oxidativos Avançados

Processo	Homogêneo	Heterogêneo
Com irradiação	O ₃ /UV	Fotocatálise Heterogênea (TiO ₂ /O ₂ /UV
	H ₂ O ₂ /UV	
	O ₃ /H ₂ O ₂ /UV	
	Foto-Fenton	
Sem irradiação	O ₃ /HO [•]	O ₃ /catalisador
	O ₃ /H ₂ O ₂	
	Reativo de Fenton	

Fonte: Souza (2010).

De acordo com (CHAMARRO et al., 2001), os processos homogêneos são aqueles os quais a reação de geração de radicais se processa em uma única fase (CHAMARRO et al., 2001). As principais formas de processos homogêneos são as seguintes:

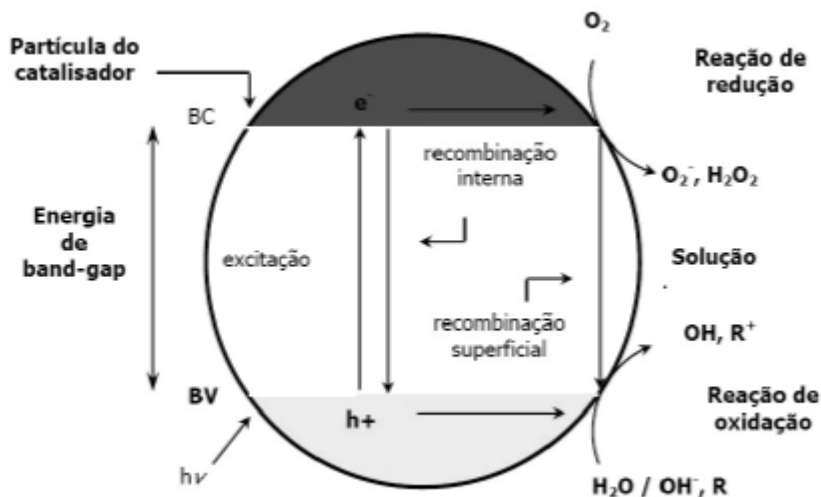
- ✓ Fe²⁺/H₂O₂: Processo no qual é conhecido o processo Fenton, o qual consiste na reação entre sais de Fe²⁺ com H₂O₂ (CHAMARRO et al., 2001);
- ✓ Fe²⁺/H₂O₂/UV: Conhecido como processo Foto - Fenton, possui grande aplicação na degradação de compostos orgânicos, sendo considerado muito efetivo (BAUER; FALMANN, 1997);
- ✓ UV/H₂O₂: Este processo é realizado a partir da quebra da molécula de H₂O₂ pela radiação em dois radicais hidroxilas (DANESHVAR et al., 2007);
- ✓ UV: Este método se baseia na formação de radicais a partir de reações nas quais os reagentes absorvem a radiação UV passando para estados mais excitados (ESPLUGAS et al., 2002);

De acordo com (PÉREZ, 2002), O processo Foto-Fenton, tem sido mais utilizado com sucesso, principalmente, no tratamento de vários tipos de efluentes como herbicidas e pesticidas, e conforme (OLIVEIROS, 1997), tem sido utilizado, no tratamento de vários tipos de efluentes como chorume, inclusive no tratamento de efluentes em escala industriais em escala piloto.

Já os processos heterogêneos são caracterizados pela introdução de uma forma catalítica em suspensão no meio reacional, ou seja, quando um catalisador se apresenta em uma fase

distinta dos reagentes ou produtos. Estas espécies catalíticas podem ser óxidos de metais semicondutores, os quais podemos citar o TiO_2 (Figura 3) e o ZnO (NAVES, 2009).

Figura 3 - Foto ativação do catalisador TiO_2



Fonte: TEIXEIRA e JARDIM (2009).

5.4.1 Vantagens dos Processos oxidativo avançados

Conforme Araújo et al.; (2016), apud Dezotti (2008), explicitou diversas vantagens que os POAs apresentam, como, por exemplo:

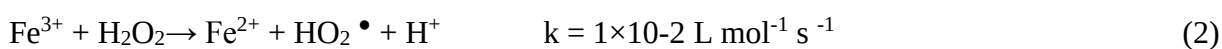
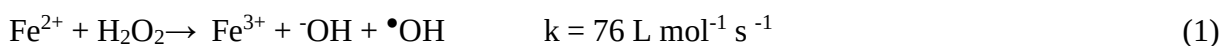
- Forte poder oxidante;
- Mineralização total dos poluentes e oxidação total de espécies inorgânicas;
- Versatilidade e eficiência;
- Decomposição dos reagentes utilizados como oxidantes em produtos de menor impacto ao meio ambiente; e
- Condições operacionais de temperatura e pressão ambiente;
- Facilidade no tratamento de efluentes (carga e descarga, limpeza e reciclo);
- Opera em pH neutro, etc.;

Os POA apresentam uma série de outras vantagens, as quais listamos abaixo:

- Mineralizam o poluente e não somente transferem de fase;
- São muito usados para compostos refratários a outros tratamentos;
- Transformam produtos refratários em compostos biodegradáveis;
- Podem ser usados em outros processos (pré e pós tratamento);
- Tem forte poder oxidante, com cinética de reação elevada;
- Geralmente não necessitam uns pós tratamento ou disposição final;

- Tendo sido usado oxidante suficiente, mineralizam o contaminante e não formam subprodutos;
- Geralmente melhoram as qualidades organolépticas da água tratada;
- Em muitos casos, consomem menos energia, acarretando menor custo;
- Possibilitam tratamento *in situ*.

De acordo com o XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2016, os processos oxidativos avançados (POAs) se destacam por apresentarem elevada capacidade de degradação em tempos relativamente curtos, sendo uma alternativa aos métodos convencionais de tratamento, que não são eficazes na remoção de cor e toxicidade dos efluentes têxteis (XIA et al., 2011). Um dos POAs mais promissores consiste na reação entre Fe^{2+} e H_2O_2 , conforme Equação 1, designada reação de Fenton, a qual permite obter elevados níveis de depuração à pressão e temperatura ambientes. No entanto, o Fe^{3+} é mais vantajoso de ser usado por ser mais abundante e ter menor custo. Porém, um inconveniente à utilização de Fe^{3+} refere-se ao fato de que a reação de Fenton torna-se mais lenta, segundo Equação 2 (AGUIAR e FERRAZ, 2007; SANTANA e AGUIAR, 2015 a, b).



5.4.2 Desvantagens dos Processos oxidativo avançados

Ainda de acordo com Araújo, et al., (2016), apud Dezotti (2008), os processos oxidativos avançados apresentam também algumas desvantagens, dentre elas:

- O alto consumo energético;
- Podem necessitar de grande tempo de retenção;
- Custo elevado quando comparado, por exemplo, aos processos biológicos;
- Formação de subprodutos de reação e outros.

6. METODOLOGIA

Esta pesquisa é do tipo aplicada, explicativa e experimental, sendo definidos dois tópicos a serem contemplados no desenvolver das atividades práticas: (a) aplicação de POA na descoloração de azul de metileno e (b) remoção de compostos orgânicos de chorume sintético de aterro sanitário através do processo Fenton. Serão apresentadas a seguir todas as metodologias usadas na concretização dos objetivos dessa pesquisa.

6.1 Localização do Aterro Sanitário de Palmas

O Aterro Sanitário de Palmas está localizado na área rural, ao sul do município, distante aproximadamente 25 km do centro do plano diretor e cerca de 6 km do bairro de Taquaralto, em uma região de baixa densidade demográfica e com área original de 92.914 ha, o aterro possui 5 células com cerca de 25 metros de altura de forma piramidal, o que totaliza 132.000 m² de base. A quantidade de resíduos depositada no aterro de Palmas desde 2001 até setembro 2020 foi de 1.219.199 toneladas de resíduos.

O sistema de drenagem do chorume gerado no aterro é constituído por tubos de concreto perfurados divididos em faixas retangulares na base do aterro, os drenos são interligados aos de drenagem de gases e direcionam o chorume para o tratamento biológico. O tratamento do chorume é realizado por dois sistemas, compostos por 03 lagoas de tratamento e uma vala de infiltração, para cada sistema, sendo as lagoas respectivamente 01 lagoa anaeróbia, 02 facultativas e uma vala de infiltração (Figura 4).

As lagoas ficam em uma área de 26 mil m², onde o chorume passa por um tratamento natural feito pelas próprias bactérias e micro-organismos presentes no líquido. Na última lagoa de decantação a água já conta com mais de 80% de pureza.

A vazão de chorume do Aterro Sanitário de Palmas seria determinada na entrada do sistema de lagoas de estabilização do sistema de tratamento de lixiviados, com o auxílio de recipiente plástico com calibração volumétrica e cronômetro. No momento da aferição de vazão, seriam coletadas amostras para ensaios de caracterização do lixiviado e para o teste de degradação química através da reação de Fenton.

Entretanto devido aos acontecimentos oriundos no ano de 2020, com uma pandemia mundial que assolou todo o mundo, e a interferência das aproximações sociais a aferição da vazão do chorume foi feita de modo estimado, a partir da comparação de dois métodos empíricos, o método Suíço de Orth *apud* Neto *et alii* (1981 e 1999) e o método racional de Wiken (1978) *apud* Castro (2001) e Lins (2003), sendo que tais modelos utilizados para cálculo são utilizados para dimensionar o sistema de tratamento.

Figura 4 - Tratamento de chorume em lagoas de estabilização no Aterro Sanitário de Palmas (TO)



Fonte: Prefeitura de Palmas (2017).

6.2 Determinação da vazão do Aterro Sanitário de Palmas

Para a determinação da vazão do aterro sanitário de Palmas, foi feito a aplicação de dois modelos matemáticos para a estimar a geração de percolado (chorume) no Aterro Sanitário, sendo tais métodos utilizados para o dimensionamento de Aterros, além do que demonstram ser uma ferramenta extremamente útil para avaliar o potencial econômico da geração de percolado em um dado Aterro, também demonstrando uma economia expressiva em relação aos demais métodos, devido a sua aplicabilidade estrita em ambientes computacionais (MARQUES, 2018).

A estimativa da produção de percolado (chorume) produzido pelo Aterro Sanitário de Palmas – TO foi realizada conforme a aplicação de dois métodos empíricos: o Método Racional e o Método Suíço.

6.2.1 Método Racional

Segundo Wilken (1978) *apud* Castro (2001) e citado por Lins (2003), o cálculo da vazão superficial por este método baseia-se em três parâmetros: área da bacia de contribuição; intensidade e duração das chuvas e o coeficiente de escoamento, conforme Equação abaixo:

$$Q = C . i . A \quad (3)$$

Onde:

Q: Vazão superficial máxima (L/s ou m³/s);

C: Coeficiente de escoamento de “runoff”, relação entre pico de vazão e a chuva média sobre a área receptora;

i: Intensidade média da chuva (L ou m³ por ha/s);

A: Área da bacia receptora da chuva (ha);

Justificativa do C do método racional: O coeficiente de escoamento (C) é obtido através da razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado na área em estudo, num dado período amostral (AZEVEDO NETTO, 1998).

Na ausência de dados precisos dos volumes de chuva na área de influência direta do maciço de resíduos do aterro sanitário de Palmas, a bibliografia inerente a temática foi consultada com o intuito de obter um valor tabelado para a aferição da vazão de percolado produzido pelo aterro através do método racional. Em condições ambientais e de operação semelhantes as vivenciadas na área de estudo, o valor do coeficiente de escoamento superficial adotado é de 0,40, sendo assim utilizado para a execução da presente estimativa de geração de percolado (CETESB, 1997; LINS & JUCÁ 2003).

Apesar da fórmula do Método Racional para a geração de percolados em aterros sanitários desprezar algumas variáveis como o grau de umidade dos resíduos e dos materiais de cobertura para o presente cálculo, a sua confiabilidade e precisão é inalterada, uma vez que as variáveis desconsideradas no cálculo representam uma ínfima parcela de contribuição para a geração do percolado, quando levadas em consideração as outras variáveis utilizadas na execução do método (CASTRO, 2001).

6.2.2 Método Suíço

Este é um método de formulação semelhante ao Método Racional, entretanto não considera os efeitos da evaporação potencial. Segundo Neto *et alii*. (1999), é um método bem simples, mas deixa a desejar no que diz respeito à precisão Conforme Orth (1981), apud Neto *et alii*, (1999), a fórmula algébrica para a aplicação do método suíço, onde se estima a vazão de percolado é mostrada na Equação e na tabela os valores de K para aplicação do método.

$$Q = \frac{(P.A.K)}{t} \quad (4)$$

Onde:

Q: vazão média do percolado (L/s);

P: Precipitação média mensal (mm);

A: Área total do aterro (m²);

t: Número de segundos em 1 mês;

K: Coeficiente que depende do grau de compactação dos RSU.

Tabela 3 – Valores de K para aplicação do Método Suíço.

Tipo de Aterro	Peso Específico do Lixo	K
Aterros Fracamente Compactados	0,4 a 0,7 ton/m ³	0,25 a 0,50
Aterros Fortemente Compactados	Acima de 0,7 ton/m ³	0,15 a 0,25

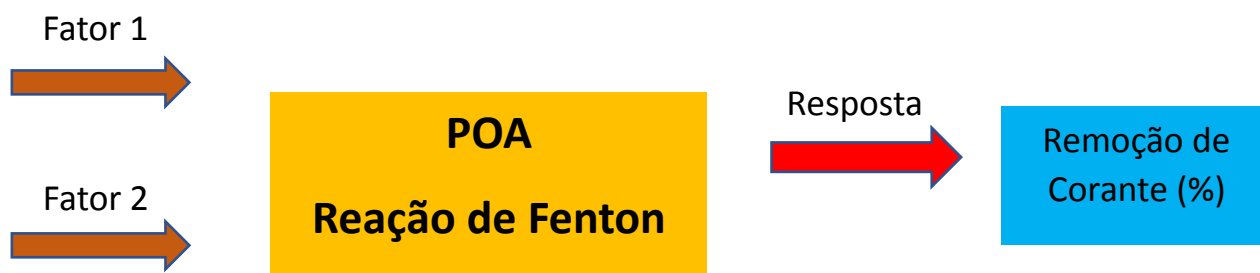
Fonte: ORTH, *apud* NETO *et alii* (1981e 1999).

Justificativa do K do método suíço: Para o caso específico do Aterro Sanitário de Palmas – TO, por possuir compactação próxima de 0,7t/m³, utilizou-se um K = 0,5. Esse valor poderá ser alterado conforme o recobrimento final das células de disposição final de resíduos sólidos urbanos, resultando na dificuldade de incorporação de ar atmosférico na massa de resíduos disposta e permanecendo com o grau de compactação imposto ao maciço no momento de sua disposição final.

6.3 Remoção de Corante através de POA com reagente de FENTON: Otimização de processo

Foi verificado por meio de planejamento multivariável o efeito de dois fatores no sistema de descoloração de azul de metileno através do Processo Fenton, sendo considerado como fator 1 a concentração do H₂O₂ (mM) e fator 2 a concentração dos íons Fe⁺⁺ (mM) como ilustra a Figura 5. Esse planejamento teve como finalidade observar o comportamento dos dois reagentes na degradação química do corante, observando as melhores dosagens a serem aplicadas durante o processo.

Figura 5 - Planejamento experimental adotado na degradação química de corante através da Reação de Fenton



Fonte: Autor (2020).

Aplicou-se um planejamento experimental fracionário 2² – Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), sem repetições, com 11 tipos de combinações entre os fatores. Os

domínios das faixas dos parâmetros estudados estão de acordo com PAULINO et al., 2015. Os experimentos foram realizados de acordo com os níveis apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 -Fatores e níveis empregados no planejamento experimental (2^2)

Fatores	Níveis				
	(-1,4)	(-1)	(0)	(+1)	(+1,4)
H₂O₂ (mM)	0,06	0,1	0,2	0,30	0,34
Fe⁺⁺ (mM)	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07

Fonte: Autor (2020).

A Tabela 5 apresenta a ordem dos experimentos adotados nessa pesquisa. Os experimentos foram realizados de forma aleatória.

Tabela 5 - Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR 2²

Ordem dos Experimentos	Fatores	
	H ₂ O ₂ (mg/L)	Fe ⁺⁺ (mg/L)
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	-1,4	0
9	0	1,4
10	1,4	0
11	0	-1,4

Fonte: Autor (2020).

6.4 Ensaios de degradação química de Chorume através de POA com reagente de FENTON

Nessa pesquisa foi empregado um efluente sintético devido as dificuldades encontradas para se coletar a amostra “*in locu*”, então foi simulado as características químicas de chorume de aterro sanitário observadas na literatura. A Tabela 6 apresenta as quantidades das substâncias empregadas na preparação de 1 litro do efluente sintético. O efluente sintético preparado foi diluído na razão 1:100 com água destilada para o início dos ensaios.

Tabela 6– Composição química do chorume sintético empregado nessa pesquisa

Constituintes	Quantidade (mg)
Humate de sódio	250
NH ₄ Cl	191
CaCl ₂ .2H ₂ O	36,7
MgCl ₂ .2H ₂ O	83,6
CdCl ₂ .2,5H ₂ O	2,0
NiCl ₂ .6H ₂ O	4,0
ZnSO ₄ .7H ₂ O	4,4
MnCl ₂ .4H ₂ O	3,6
K ₂ Cr ₂ O ₇	5,7
FeCl ₃ .6H ₂ O	4,8
Pb(NO ₃) ₂	2,2

Fonte: Autor (2020).

Foi verificado por meio de planejamento multivariável o efeito de dois fatores no sistema de remoção de DQO de amostra de chorume sintético através do Processo Fenton, sendo considerado como fator 1 a concentração do H₂O₂ (mM) e fator 2 a concentração dos íons Fe⁺⁺ (mM). Aplicou-se um Delineamento Composto Central, sem repetições, com 07 tipos de combinações entre os fatores. Os experimentos foram realizados de acordo com os níveis apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Fatores e níveis empregados no planejamento experimental

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
H ₂ O ₂ (mM)	0,32	0,34	0,36
Fe ⁺⁺ (mM)	0,07	0,08	0,09

Fonte: Autor (2020).

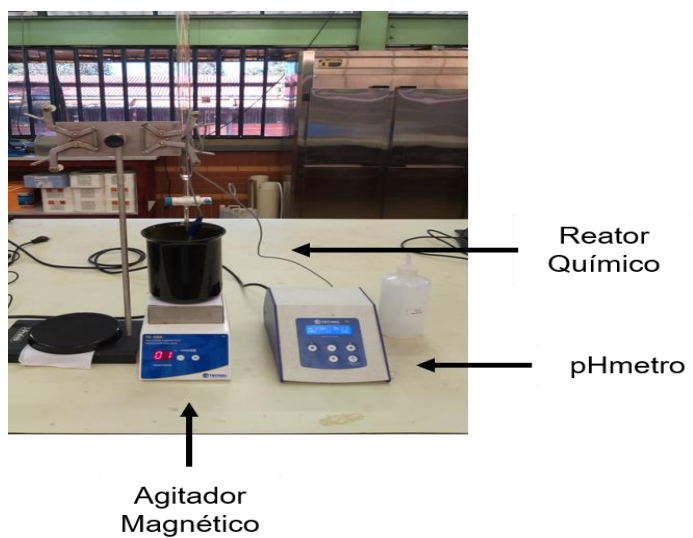
A Tabela 8 apresenta a ordem dos experimentos adotados nessa pesquisa. Os experimentos foram realizados de forma aleatória.

Tabela 8- Ordem dos experimentos empregados no Delineamento Composto Central

Ordem dos Experimentos	Fatores	
	H ₂ O ₂ (mg/L)	Fe ⁺⁺ (mg/L)
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	0	0
6	0	0
7	0	0

Fonte: Autor (2020).

Os ensaios foram realizados em um reator de 1 litro de capacidade, em regime de batelada, com agitação, por um período de 1 hora de tempo de reação (Figura 6). A amostra do lixiviado foi armazenada no reator e em seguida foi adicionada a solução estoque de Fe²⁺ conforme valores observados no planejamento DCCR já informado anteriormente. O pH da solução foi então, devidamente ajustado para $3 \pm 0,5$ com solução 0,5 M de H₂SO₄. A reação foi iniciada a partir da adição de volume da solução estoque de H₂O₂, sendo empregadas as dosagens ótimas observados no planejamento DCCR adotado nessa pesquisa.

Figura 6 - Reator empregado nos ensaios

Fonte: Autor (2020).

Após a etapa de oxidação, o sistema foi neutralizado com solução de Cal a 5 %, deixando o reator em repouso para que a sedimentação do material. Alíquotas do líquido sobrenadante foram coletadas para caracterização, conforme Tabela 5, para fins de determinação dos valores de eficiência do processo.

Tabela 9 - Metodologia empregada na análise do lixiviado

Parâmetro analítico	Metodologia	Reference (APHA, 2005)
DQO	Espectrofotométrico	SMEWW 5220D

Fonte: Autor (2020).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Determinação de vazão do aterro sanitário de Palmas

A estimativa da geração teórica de percolato produzido pelo Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins, partiu da simulação computacional conforme a aplicação de dois métodos empíricos: o Método Racional e o Método Suíço. A aplicação dos modelos matemáticos para a estimativa de geração percolato (chorume) em Aterros Sanitários, além de demonstrarem ser uma ferramenta extremamente útil para avaliar o potencial econômico da geração de percolato em um dado Aterro, também demonstra uma economia expressiva em relação aos demais métodos, devido a sua aplicabilidade estrita em ambientes computacionais (MARQUES, 2018).

Para a execução da modelagem matemática, os dados meteorológicos disponibilizados pelo Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo Centro de Ciências do Sistema Terrestre (CCST) – Estação de Palmas, com os dados pluviométricos referentes ao mês de outubro de 2020.

Figura 7- Médias de precipitação da cidade de Palmas-TO

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
Temperatura Máxima (°C)	30,7	30,5	31,4	31,6	32,0	32,0	32,4	34,5	35,2	33,1
Temperatura Mínima (°C)	20,8	20,5	21,0	21,8	18,9	16,4	15,4	16,4	19,3	21,0
Temperatura Média (°C)	25,3	25,2	25,5	25,5	24,6	23,2	22,9	24,3	26,5	26,4
Precipitação Média (mm)	245	220	170	100	15	5	0	5	20	120
Umidade Relativa (%)	80	82	83	80	74	64	54	48	52	69

Fonte: Sonda, INPE (2020).

7.1.1 Método Suíço

A partir da obtenção de todos os dados, foi possível realizar o cálculo da vazão, como demonstra a Figura 8.

Tabela 10- Valores utilizados para cálculo de vazão pelo Método Suíço

COEFICIENTES	VALORES
Precipitação Média Mensal	120 mm
Área de Base (Aterro)	132.000 m ²
K: Coef. Compactação	0,5
t: Segundos em 1 mês	2592000 segundos

Fonte: Autor (2020).

A partir dos dados extraídos, foi possível realizar o cálculo da vazão no aterro através do método suíço:

Figura 8- Resultado encontrado da vazão pelo Método Suíço

$$Q = \frac{(P.A.K)}{t}$$

Q	3,06 L/s
----------	----------

Fonte: Autor (2020).

7.1.2 Método Racional

A partir da obtenção de todos os dados, foi possível realizar o cálculo da vazão, como demonstra a Figura 9.

Tabela 11- Valores utilizados para cálculo de vazão pelo Método Racional

COEFICIENTES	VALORES
Coeficiente de Escoamento	0,4
Intensidade média da chuva	0,00004629 Litros
Área da Bacia Receptora	132.000 m ²

Fonte: Autor (2020).

A partir dos dados, foi possível realizar o cálculo da vazão no aterro através do método suíço:

Figura 9- Resultado encontrado da vazão pelo Método Racional

Método Racional	
$Q = C.i.A$	
Q	2,44 L/s

Fonte: Autor (2020).

7.1.3 Comparativo entre Método Racional e Método Suíço

Os resultados obtidos demonstraram a similaridade entre os dois modelos matemáticos utilizados para a estimativa de produção de percolado gerado pelo Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins, apresentando os valores de 3,06 l.s-1 e 2,44 l.s-1 pelo método suíço e racional respectivamente. A pequena produção de percolado gerado pelo aterro é justificada devido ao pequeno índice pluviométrico registrado na região de instalação e influência do Aterro Sanitário de Palmas, cerca de 120 mm, o que de certa forma contribui diretamente com os dados demonstrados pela presente modelagem matemática, visto que, a pluviosidade é o fator principal para a produção de percolado no Aterro Sanitário.

Entretanto, com o aumento ou diminuição da pluviosidade no local de estudo, acarreta diretamente na produção de percolado pelas células de destinação final dos resíduos sólidos urbanos do município de Palmas. Para a presente estimativa não foram consideradas as perdas de percolado por evaporação ou pelo sistema de coleta e transporte do percolado até o sistema de tratamento proposto e instalado no Aterro, servindo assim, como estimativa norteadora para a obtenção de dados que sirvam de suporte para o monitoramento do sistema de tratamento de líquidos e percolados instalados no Aterro, bem como, na concepção de um sistema que atenda a demanda da geração de percolado nos períodos onde a produção de percolado seja influenciada pela grande pluviosidade local.

7.2 Planejamento experimental 2²- Delineamento Composto Central Rotacional para o ensaio de remoção de corante através de POA com reagente de FENTON

Foram verificados por meio de planejamento multivariável o efeito dos fatores concentração de H_2O_2 (mg/L) e a concentração de íons Fe^{++} (mg/L) no sistema de descoloração de azul metileno através de processo de Fenton, sendo considerado como fator 1 a concentração do H_2O_2 (mg/L) e fator 2 a concentração dos íons Fe^{++} (mg/L) como ilustra a Figura 5.

Esse planejamento teve como finalidade observar o comportamento dos dois reagentes na degradação química do corante, observando as melhores dosagens a serem aplicadas durante o processo. Os resultados experimentais obtidos no planejamento DCCR são apresentados na Tabela 12. A absorbância do corante foi considerada a resposta do planejamento experimental, mostrando o quanto a luz transpassou no recipiente ensaiado indicando as eficiências de remoção, ou seja, valores mais baixos indicam as melhores remoções.

Tabela 12- Resultados dos valores da absorbância obtidos através do ensaio de remoção de corante através de POA com reagente de Fenton.

Ordem dos Experimentos	Fatores		
	H_2O_2 (mg/L)	Fe^{++} (mg/L)	Absorbância (-)
1	-	-	0,348
2	+	-	0,090
3	-	+	0,510
4	+	+	0,062
5	0	0	0,330
6	0	0	0,330
7	0	0	0,320
8	-1,4	0	0,412
9	0	1,4	0,300
10	1,4	0	0,010
11	0	-1,4	0,450

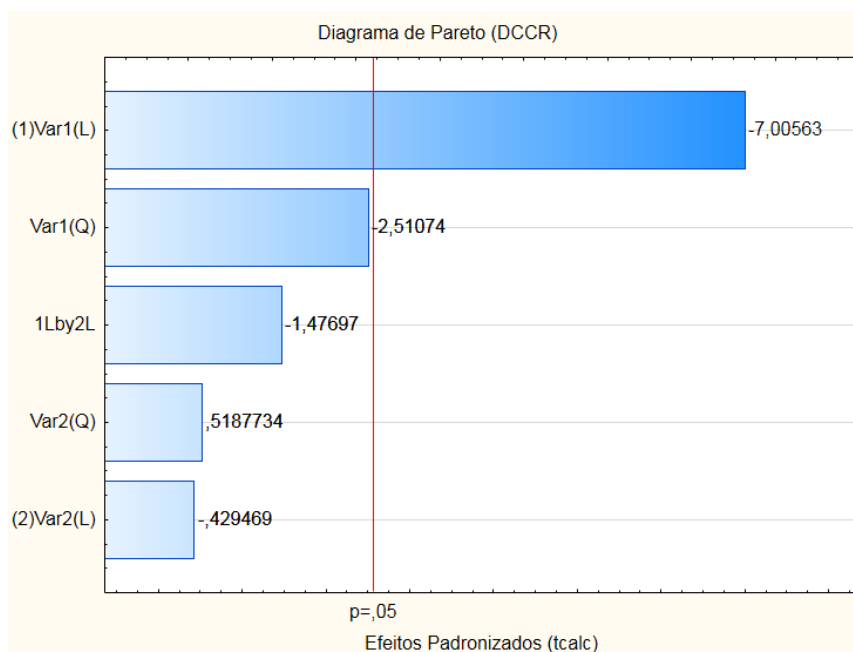
Fonte: Autor (2020).

De acordo com os resultados obtidos e considerando as duas variáveis independentes (H_2O_2 e Fe^{++}) e uma dependente (absorbância), foi possível realizar uma análise estatística, obtendo diversos dados, como o Diagrama de Pareto (Figura 10) gerado a partir dos dados do planejamento fatorial já mencionado indica que o H_2O_2 (variável 01) teve efeito significativo e o Fe^{++} (variável 02) não teve um efeito positivo para a remoção do corante azul de metileno.

De acordo com o Diagrama de Pareto (Figura 10) é possível observar que apenas a

variável “1” (H_2O_2) está a frente da linha vermelha, ou seja, o que demonstra ser a única variável que teve efeito significativo na degradação do corante de azul de metileno nas amostras.

Figura 10- Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) na remoção de corante através de POA com reagente de Fenton



Fonte: Autor (2020).

A maior redução de corante de azul de metileno foi observada no ensaio 10 (absorbância igual a 0,010), sendo esse experimento operado nas condições: (a) sem ausência de luz (b) temperatura ambiente (c) tempo de 1 hora de ensaio. A menor remoção de corante (absorbância igual a 0,510) foi obtida no ensaio 3, onde se teve pouca concentração H_2O_2 .

A Tabela 13 mostra os coeficientes de regressão das variáveis estudadas na remoção do corante azul de metileno com adição do íon Fe^{++} e de H_2O_2 . Foi considerado também o efeito de interação entre as variáveis. Os efeitos significativos foram destacados a um nível de 95% de confiança.

Tabela 13- Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR 2² obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	Tcalc	p-valor
Média	0,33	0,04	8,80	0,0003
X1	-0,16	0,02	-7,01	0,0009
X1 ²	-0,07	0,03	-2,51	0,0538
X2	-0,01	0,02	-0,43	0,6855
X2 ²	0,01	0,03	0,52	0,6261
X1*X2	-0,05	0,03	-1,48	0,1997

Fonte: Autor (2020).

Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, foi possível escrever o modelo ajustado que descreve a remoção de corante de azul de metileno através de POA com Reagente de Fenton empiricamente, conforme Equação 3.

$$\text{Remoção de Corante (\%)} = 0,33 - 0,16X_1 - 0,07X_1^2 - 0,01X_2 + 0,01X_2^2 - 0,05 X_1.X_2 \quad (3)$$

Onde: $X_1 = \text{H}_2\text{O}_2$ (mg/L);

$$X_2 = \text{Fe}^{++} \text{ (mg/L)}$$

A Tabela 14 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a degradação química de corante de azul de metileno através de POA.

Tabela 14 – ANOVA para a degradação de corante de azul de metileno através de POA com reagente de Fenton.

Fonte de Variação	Soma Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calculado}	p- valor
Regressão	0,2	5	0,0	11,9	0,00835
Resíduos	0,0	5	0,0		
Falta de ajuste	0,0	3	0,0	206,2	0,00483
Erro Puro	0,0	2	0,0		
Total SS	0,3	10			

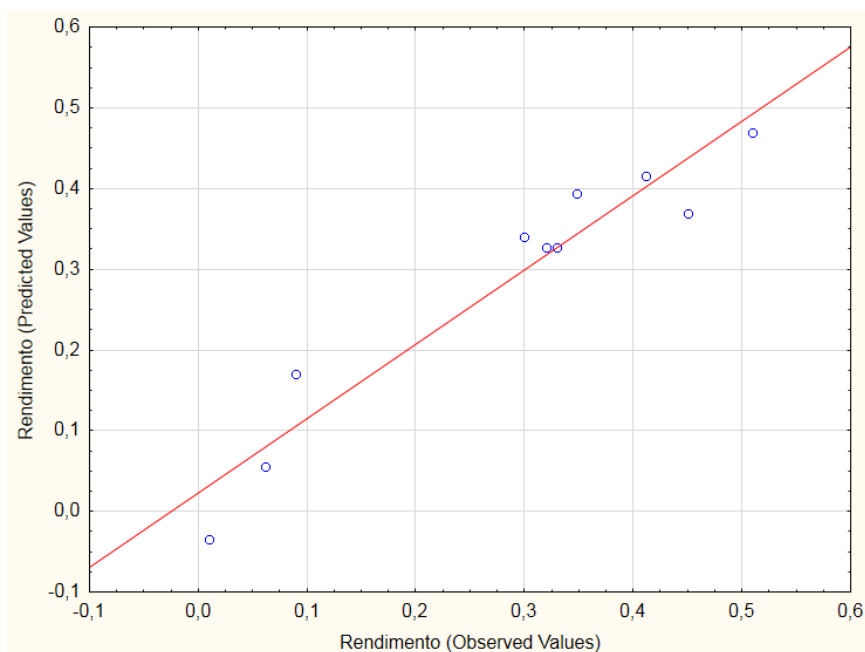
$R^2 = 0,9225$; $F_{\text{tabelado}} (5; 5; 0,05) = 5,05$.

Fonte: Autor (2020).

Verifica-se na Tabela 12 que o coeficiente de determinação (R^2) obtido pela regressão é de 0,9225. A Figura 11 apresenta a comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles preditos pelo modelo ajustado. Observa-se pela análise da Figura 11 um bom ajuste do modelo, justificado pela apreciável aglomeração de pontos próximos da reta representativa.

Para confirmação da significância dos parâmetros do modelo pela análise da ANOVA (Tabela 14), foi realizado o teste F. No teste F para ser significativo estatisticamente, o valor de F obtido da regressão deve ser maior que o valor de F_{tabelado} (Neto *et al.*, 2007; Rodrigues e Lemma, 2009). O valor de $F_{\text{calculado}}$ foi determinado pela expressão, $F_{\text{calculado}} = \text{Quadrado médio regressão} / \text{Quadrado médio erro}$. Comparando o valor de $F_{\text{calculado}}$ (11,9) para a regressão com o valor de F_{tabelado} ($F_{\text{tabelado}} = 5,05$), verifica-se uma regressão significativa.

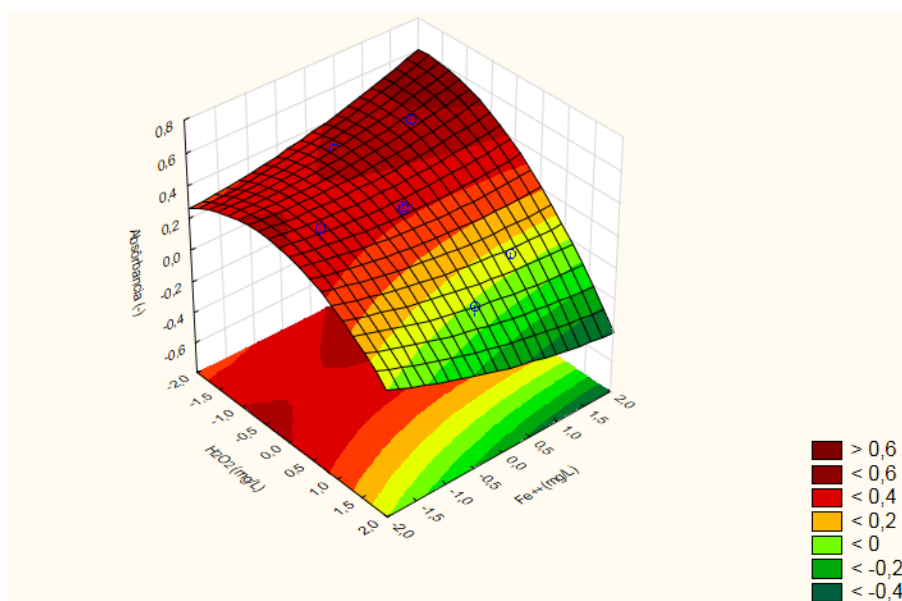
Figura 11 – Valores observados versus valores previstos, para a remoção de corante



Fonte: Autor (2020).

Portanto, os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser utilizado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. A mínima quantidade de absorbância foi obtida em condições de baixo Fe^{++} e alto H_2O_2 , conforme observado na superfície de resposta gerada pelo modelo da Figura 12.

Figura 12 – Superfície de resposta para a degradação de corante, com os fatores de H_2O_2 e Fe^{++} .



Fonte: Autor (2020).

7.3 Ensaio de degradação química de chorume sintético através de POA com reagente de FENTON na remoção de DQO

A partir de planejamento multivariável o efeito de dois fatores no sistema de remoção de DQO de amostra de chorume sintético através do Processo Fenton, sendo considerado como fator 1 a concentração do H_2O_2 (mM) e fator 2 a concentração dos íons Fe^{++} (mM). Aplicou-se um Delineamento Composto Central, sem repetições, com 07 tipos de combinações entre os fatores.

Esse planejamento teve como finalidade observar o comportamento dos dois reagentes na degradação química do chorume e na remoção de demanda química de oxigênio, observando as melhores dosagens e eficiência de tal processo para implementação em grande escala. Os resultados experimentais obtidos no planejamento experimental são apresentados na Tabela 15.

A Demanda Química de Oxigênio foi considerada a resposta do planejamento experimental, evidenciando os resultados de cada ensaio na eficiência de remoção de DQO, ou seja, valores mais baixos indicam as melhores remoções.

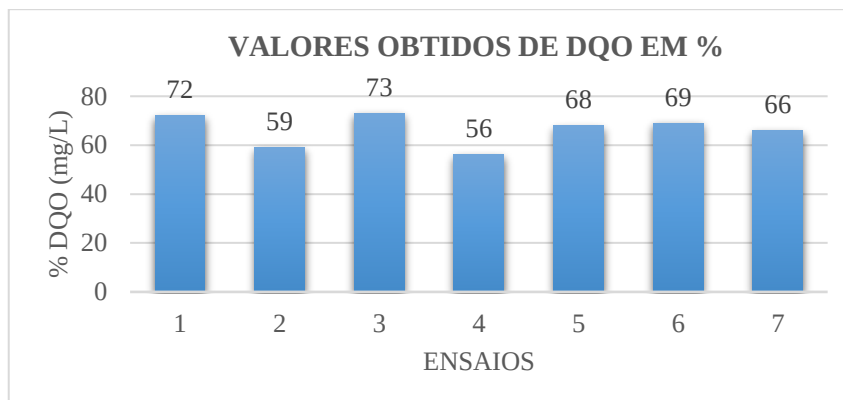
Tabela 15- Resultados obtidos de DQO da degradação química de chorume sintético através de POA com Reagente de Fenton e a partir de ensaio espectrofotométrico

Ordem dos Experimentos	Fatores		DQO (%)
	H_2O_2 (mg/L)	Fe^{++} (mg/L)	
1	-	-	72
2	+	-	59
3	-	+	73
4	+	+	56
5	0	0	68
6	0	0	69
7	0	0	66

Fonte: Autor (2020).

A partir dos dados obtidos no ensaio espectrofotométrico elaborou-se um gráfico (Figura 13) demonstrando o resultado dos ensaios, demonstrando visualmente que os resultados foram próximos, sendo que o ensaio 1 e 3 apresentaram as melhores remoções de Demanda Química de Oxigênio (DQO).

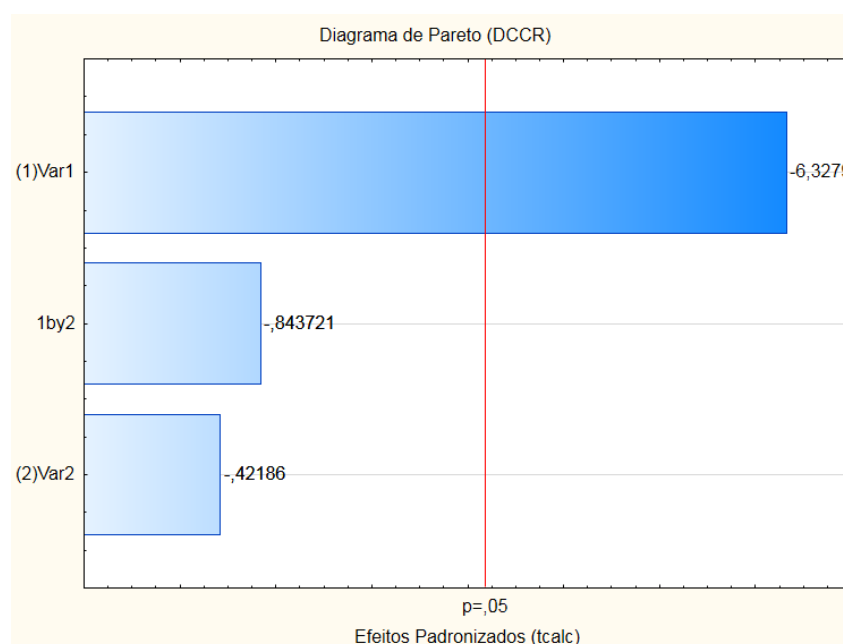
Figura 13 – Gráfico de coluna com os resultados obtidos da remoção de DQO para cada um dos sete ensaios



Fonte: Autor (2020).

De acordo com os resultados obtidos e considerando as duas variáveis independentes (H_2O_2 e Fe^{++}) e uma dependente (DQO), foi possível realizar uma análise estatística, obtendo diversos dados, dentre eles o Diagrama de Pareto (Figura 14) gerado a partir dos dados do planejamento fatorial já mencionado indica que o H_2O_2 teve efeito significativo e o Fe^{++} não teve um efeito positivo para a remoção de DQO. De acordo com o Diagrama de Pareto (Figura 14) é possível observar que apenas a variável “1” (H_2O_2) está a frente da linha vermelha, ou seja, o que demonstra ser a única variável que teve efeito significativo na degradação do chorume sintético nas amostras analisadas.

Figura 14 - Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) na degradação de chorume sintético através de POA com reagente de Fenton.



Fonte: Autor (2020).

A maior remoção de DQO foi observada no ensaio 3 (73%) onde a dosagem de H_2O_2 foi de 0,32mM e de Fe^{++} 0,09mM, sendo esse experimento operado nas condições: (a) sem ausência de luz (b) temperatura ambiente (c) tempo de 1 hora de ensaio A menor remoção foi de 56% foi obtida no ensaio 4, onde se teve alta concentração de H_2O_2 (0,36mM) e alta de Fe^{++} (0,09mM).

A Tabela 16 mostra os coeficientes de regressão das variáveis estudadas na remoção de DQO com adição do íon Fe^{++} e de H_2O_2 . Foi considerado também o efeito de interação entre as variáveis. Os efeitos significativos foram destacados a um nível de 95% de confiança.

Tabela 16- Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR 2² obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	Tcalc	p-valor
Média	66,14	0,89	73,82	0,0000
X1	7,50	1,19	-6,33	0,0080
X2	0,50	1,19	-0,42	0,7015
X1*X2	1,00	1,19	-0,84	0,4608

Fonte: Autor (2020).

Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, foi possível escrever o modelo ajustado que descreve a remoção de demanda química de oxigênio através de POA com Reagente de Fenton empiricamente, conforme Equação 4.

$$\text{Remoção de Chorume Sintético (mg/L)} = 66,14 - 7,50X_1 - 0,50X_2 - 1,00 X_1.X_2 \quad (4)$$

Onde: $X_1 = \text{H}_2\text{O}_2$ (mg/L);

$$X_2 = \text{Fe}^{++} \text{ (mg/L)}$$

A Tabela 17 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a degradação química de corante de azul de metileno através de POA.

Tabela 17 – ANOVA para a degradação de chorume sintético através de POA com reagente de Fenton.

Fonte de Variação	Soma Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calculado}	p- valor
Regressão	230,0	3	76,7	13,6	0,02967
Resíduos	16,9	3	5,6		
Falta de ajuste	12,2	1	12,2	5,2	0,14961
Erro Puro	4,7	2	2,3		
Total SS	246,9	6			

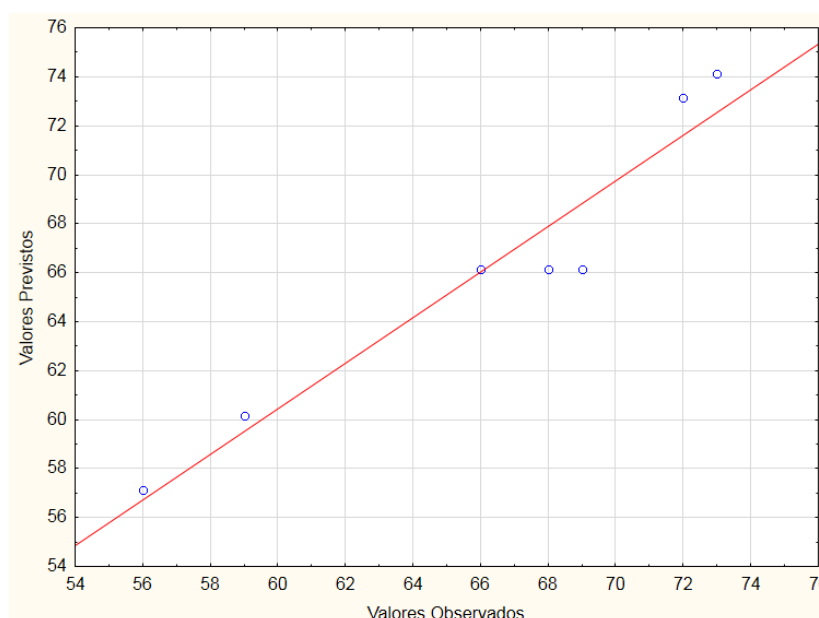
$$R^2 = 0,9317; F_{\text{tabelado}} (3; 3; 0,05) = 9,28.$$

Fonte: Autor (2020).

Verifica-se na Tabela 17 que o coeficiente de determinação (R^2) obtido pela regressão é de 0,9317. A Figura 16 apresenta a comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles preditos pelo modelo ajustado. Observa-se pela análise da Figura 16 um bom ajuste do modelo, justificado pela apreciável aglomeração de pontos próximos da reta representativa.

Para confirmação da significância dos parâmetros do modelo pela análise da ANOVA (Tabela 17), foi realizado o teste F. No teste F para ser significativo estatisticamente, o valor de F obtido da regressão deve ser maior que o valor de F_{tabelado} (Neto *et al.*, 2007; Rodrigues e Lemma, 2009). O valor de $F_{\text{calculado}}$ foi determinado pela expressão, $F_{\text{calculado}} = \text{Quadrado médio regressão} / \text{Quadrado médio erro}$. Comparando o valor de $F_{\text{calculado}}$ (13,6) para a regressão com o valor de F_{tabelado} ($F_{\text{tabelado}} = 9,28$), verifica-se uma regressão significativa.

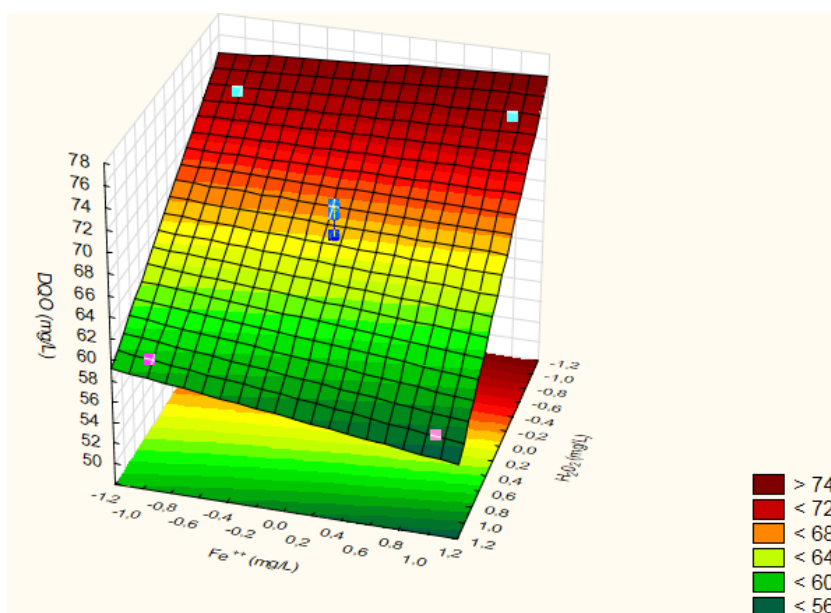
Figura 15 – Valores observados versus valores previstos, para a degradação de chorume sintético



Fonte: Autor (2020).

Portanto, os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser utilizado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. A melhor remoção de DQO foi obtida em condições de alto Fe^{++} e baixo H_2O_2 , conforme observado na superfície de resposta gerada pelo modelo da Figura 16.

Figura 16 – Superfície de resposta para a degradação de corante, com os fatores de H_2O_2 e Fe^{++} .



Fonte: Autor (2020).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa da degradação de chorume no Aterro Sanitário de Palmas por Processo Oxidativo mostrou-se como uma alternativa bastante viável e eficaz para maximizar a degradação do chorume, podendo ser utilizada como pré-tratamento e/ou pós-tratamento, podendo ser associada aos processos já existentes de tratamentos, como o processo biológico, já que este tipo de tratamento é o mais empregado, no sentido de aumentar a biodegradabilidade do lixiviado, minimizando o tamanho das lagoas, ou aumentando a vazão de lixiviado tratado, pois apresentam elevadas eficiências na remoção de poluentes orgânicos, com custo relativamente baixo e facilidade operacional.. A partir disso, é possível reduzir significativamente o impacto ambiental da disposição final desse lixiviado, além de principalmente reduzir os poluentes orgânicos e inorgânicos compostos nos efluentes que são nocivos para a saúde.

Assim sendo, o de tratamento de chorume *in natura* através de POA se torna bastante interessante pois devido aos seus ótimos resultados de remoção de DQO, custo-benefício, facilidade de implementação e se torna uma alternativa para suprir toda a demanda futura que advém do crescimento da cidade. O tratamento do chorume com Reagente de Fenton apresentou bastante eficiência na remoção de DQO, visto que para todos os ensaios, o valor de DQO ficou acima de 50% sendo que com a melhor dosagem obteve-se valor de 73 % de remoção.

A partir disso é possível avaliar que o processo é eficiente e possível de ser implementado em grande escala, vindo a solucionar um problema que está se tornando cada vez maior – O tratamento do lixiviado. Portanto é possível realizar a remoção de compostos orgânicos do chorume proveniente do Aterro Sanitário de Palmas - TO através de processo oxidativo avançado (POA) empregando o Reagente de Fenton, alcançando eficiência de cerca de 70% na remoção de poluentes no tratamento de lixiviado.

Portanto, a implementação do Processo Oxidativo Avançado com Reagente de Fenton apresentou eficiência satisfatória na degradação de chorume sintético que simula o chorume do aterro sanitário de Palmas, tornando-se assim uma alternativa consonante a outros processos bastante promissora de tratamento de efluentes.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. B. Torres de. Resíduos sólidos. Leme: Independente, 2011.
- BAUER, R.; FALLMANN, H. The photo-Fenton oxidation – A cheap and eficiente wastewater treatment method. Res.Chem.Intermed., v.23, p.341-354, 1997. https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522006000200011
- Bertazzoli R, Pelegrini R. Descoloração e degradação de poluentes orgânicos em soluções aquosas através do processo fotoeletroquímico. Química Nova 2002; 25:470-6. Disponível digitalmente em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2007000400021.
- BRASIL. NBR 8419. Procedimentos – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- BULL R.A.; ZEFF, J. D. *Hydrogen Peroxide in Advanced Oxidation Process for Treatment of Industrial Process and Contaminated Groundwater*. In: ECKENFELDER, W. W.; BOWERS, A. R.; ROTH, J. A. *Chemical Oxidation: Technologies for the Nineties*. Lancaster: Technomic, p. 26-36. 1991. Disponível digitalmente em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522006000200011.
- BRITO, N. N. De.; SILVA, V. B. M. Processos Oxidativos Avançados e sua aplicação ambiental. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, n.3, v.1, p.36-47, 2012.
- CAPELO NETO, J. Estudo quanti-qualitativo do percolado gerado no aterro sanitário oeste, em Caucaia, Ceará. Fortaleza, 1999. 108 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, disponível digitalmente em <file:///C:/Users/User/Downloads/tcc2%20-%20juciane%20coelho%202018.pdf>.
- CETESB. Aterro Sanitário. Disponível em <http://cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Aterro%20Sanitario/21Aterro%20Sanitario/>. Acesso em 16 de outubro de 2020.
- CHAMARRO, E.; Marco, A.; Esplugas, S. (2001). Use of Fenton Reagent to improve organic chemical, biodegradability. Water Reserarch, 35, 1047-1051.
- DANESHVAR, N.; BEHNAJADY, M. A.; ZORRIYEH, A. Y. Protooxidative degradation of 4-nitrophenol (4-NP) in UV/H₂O₂ process: Influence of operational parameters and reaction mechanism. Journal of Hazardous, v. B39, p. 275 - 279, 207.
- DOMÈNECH, X., JARDIM, W. F., LITTER, M. I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. In: Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogênea. Cap. 1, Rede CYTED, La Plata, 2001.
- DE MORAIS, J. L.; PERALTA- ZAMORA, P. Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates. Journal of Hazardous Materials, v.123, n.1- 3, p 181- 186, 2005.

ESPLUGAS, S.; GIMÉNEZ, J., CONTRERAS, S., et al., 2002, "Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation", *Water Research*, v. 36, n. 4, pp.1034–1042.

FIORILLO, Celso Antônio Pacheco. Curso de Direito Ambiental brasileiro. São Paulo: Saraiva, 2011.

FOLHA CAPITAL. Aterro sanitário de Palmas ganhará sexta célula para depósito de resíduos sólidos. Disponível em: <https://www.folhacapital.com.br/portal/noticias/view/9186/aterro-sanitario-de-palmas-ganhara-sexta-celula-para-deposito-de-residuos-solidos>. Acesso em: 6 jul. 2020.

FREIRE, R.S.; PELEGRINI, R.; KUBOTA, L.T.; DURÁN, N. Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. *Química Nova*, v.23, n.4, p.504- 511, 2000.

HIGARASHI, M. M.; JARDIM, W. F. Processos Oxidativos avançados aplicados à remediação de solos brasileiros contaminados com pesticidas. Campinas, 1999, 77 p. (Tese de Doutorado em Química Analítica): Curso de Pós-Graduação em Química, Instituto de Química. UNICAMP, 1999.

HIRVONEN, A.; TUHKANEN, T.; KALLIOKOSKI, P. Treatment of TCE- and PCE contaminated groundwater using UV/H₂O₂ and O₃/H₂O₂ oxidation processes. *Wat. Sci. Tech.*, v.33, p.67-73, 1996.

KJELDSEN, P.; BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Environmental Science and Technology*. V. 32, (4), p. 297 - 336, 2002.

LEGRINI, O.; OLIVEROS, E.; BRAUN, A.M. Photochemical processes for water treatment. *Chem. Rev.*, v.93, n.2, p.671-698, 1993;

LINS, E.A.M. A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca. Dissertação de Mestrado, 125f., 2003. Departamento de engenharia Civil Universidade Federal de Pernambuco.

____ & JUCÁ, J. A. T. A Utilização de Métodos Empíricos para a Estimativa do Percolado Gerado no aterro da Muribeca. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais..., Joinville, 14 a 19 Setembro de 2003.

MESQUITA, A. C. (2004). Uso de Técnicas de oxidação química e biodegração na remoção de alguns compostos recalcitrantes. Tese de Doutorado, COPPE, Departamento de Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.

MORAVIA, W.G. Estudos de caracterização, tratabilidade e condicionamento de lixiviados visando tratamento por lagoas. 161 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, 2007.

NAVES, Fabiano Luiz. Utilização de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes a base de resina fenólica, proveniente de indústria de tintas e derivados. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de Lorena, 2009, Lorena, SP, Brasil.

NEYENS, E., BAEYENS, J. A Review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique, *Journal of Hazardous Materials B*, v. 98, p. 33 – 50, 2003, disponível digitalmente em <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13135/1/Arquivototal.pdf> NOGUEIRA, R. F. P.; JARDIM, W. F. Heterogeneous photocatalysis and its environmental. *Química Nova*, v.21, n.1, p.69- 72, 1998

NOGUEIRA, Raquel F. Pupo et al. Fundamentos e aplicações ambientais dos processos fenton e foto-fenton. *Quím. Nova*. São Paulo, vol.30, n.2, p.400-408, Apr. 2007, disponível digitalmente em https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422007000200030&script=sci_abstract&tlng=pt

OLIVEROS, E.; LEGRINI, O.; HOHL, M.; MULLER, T.; BRAUN, A. M. Industrial waste water treatment large scale development of a light – enhanced Fenton reaction, *Chemical Engineering and Processing. Chemical Research*, v. 36, p.397 – 405, 1997.

ORTH, M.H. de A. Aterros Sanitários. *Revista de Limpeza Pública*, São Paulo, v. 8, n.20, p.26-34, 1981.

PAULINO, T. R. S.; ARAÚJO, R. S.; SALGADO, B. C. B. Estudo de Oxidação Avançada de corantes básicos via reação Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$). *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 3, p. 347-352, 2015, disponível digitalmente http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc39_4/10-EEQ-84-16.pdf.

PÉREZ, M.; TORRADORES, F.; GARCIA-HORTAL, J. A.; DOMÉNECH, X.; PERAL, J. Removal of organic contaminants in paper pulp treatment effluents under fenton and photo-fentons conditions. *Applied Catalysis*, v.36, p.63-74, 2002.

QUATRO MARCOS. Aterro sanitário coletivo será inaugurado dia 6 em Mirassol. Disponível em: <http://www.quatromarcosnoticias.com.br/artigo/aterro-sanitario-coletivo-sera-inaugurado-dia-6-em-mirassol>. Acesso em: 21 jul. 2020.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. Planejamento de experimentos e otimização de processos. 2. ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009. 358 p.

SANTANA, C. S.; AGUIAR, A. Effect of biological mediator, 3-hydroxyanthranilic acid, in dye decolorization by Fenton processes. *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, v. 104, p. 1-7, 2015 a.

SANTANA, C. S.; AGUIAR, A. Effect of Lignin-Derived Methoxyphenols in Dye Decolorization by Fenton Systems. *Water Air Soil Pollut.*, v. 227, p. 1-10, 2015 b.

SANZ, L. A. Procedimentos Metodológicos: fazendo caminhos. Rio de Janeiro: Ed. Senac Nacional, 2003.

SILVA, L. P. Modificação e imobilização de TiO₂ visando a degradação de compostos orgânicos poluentes via o processo de fotocatalise heterogênea. 2007. 115f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, USP, 2007.

SILVA, Diego Domingos da. Remoção biológica do nitrogênio pela via curta de lixiviado de aterro sanitário operando um reator em bateladas sequenciais (SBR). 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SONDA. ESTAÇÃO DE PALMAS - CLIMATOLOGIA LOCAL. Disponível em: http://sonda.ccst.inpe.br/estacoes/palmas_clima.html#:~:text=A%20esta%C3%A7%C3%A3o%20chuvosa%20vai%20de,fica%20abaixo%20dos%2030mm%20mensais. Acesso em: 13 out. 2020.

SOUZA, B. M. de. Avaliação de processos oxidativos avançados acoplados com carvão ativado granulado com biofilme para reuso de efluentes de refinaria de petróleo. 2010; 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

TELLES, C. A. S. Processos Combinados para o Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Rio de Janeiro / COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

VINODGOPAL, K.; PELLER, J.; MAKOGON, O.; KAMAT, P.V., Ultrasonic mineralization of reactive textile azo dye, Remazol Black B. Water Research, v.32, p.3646-3650, 1998.

XIA, M.; LONG, M.; YANG, Y.; CHEN, C.; CAI, W.; ZHOU, B. A highly active bimetallic oxides catalyst supported on Al-containing MCM-41 for Fenton oxidation of phenol solution. Appl. Catal., v. 110, p. 118-125, 2011.

WILKEN, P. Engenharia de drenagem superficial. São Paulo: CETESB, 1978