

RUBENS CALEGARI BONORA

**TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO
ATRAVÉS DO PROCESSO DE FLOCODECANTAÇÃO
SEGUIDO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANA**

RUBENS CALEGARI BONORA

**TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO
ATRAVÉS DO PROCESSO DE FLOCODECANTAÇÃO
SEGUIDO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANA**

Proposta para Trabalho de Conclusão de
Curso apresentada ao curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária da Universidade de
Passo Fundo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo
Hemkemeier

Passo Fundo

2022


RUBENS CALEGARI BONORA

**TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO
ATRAVÉS DO PROCESSO DE FLOCODECANTAÇÃO
SEGUIDO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Hemkemeier

BANCA EXAMINADORA


Orientador: Prof. Dr. Marcelo Hemkemeier

Universidade de Passo Fundo


Prof. Me. Edesnei Barbosa Brião

Universidade de Passo Fundo



Prof. Dr. Vandré Barbosa Brião

Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo

2022

Rubens Calegari Bonora. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário através do processo de flocculação seguido de separação por membrana.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo. 2022

RESUMO

A disposição em aterros sanitários é utilizada cada vez mais como destino final para os resíduos sólidos urbanos. Um dos subprodutos que são resultados dessa disposição é o lixiviado, caracterizado como um efluente com alto potencial de contaminação e degradação ao meio ambiente, ao mesmo tempo que possui difícil tratabilidade.

Os métodos tradicionais, em muitos casos, não atendem mais aos parâmetros mínimos exigidos pela legislação, bem como, técnicas como a recirculação do lixiviado na própria célula não são mais admitidas, sendo necessário tratamento adequado para posterior destino aceito pela legislação vigente e, conseqüentemente, não sendo prejudicial ao meio ambiente. Neste sentido, o presente trabalho busca apresentar um estudo de tecnologias que possam ser aplicadas de forma complementar ao tratamento biológico básico existente nos aterros sanitários.

Será analisado a condição do efluente após tratamento biológico já existente no aterro sanitário específico que é objeto de estudo, o método de flocculação através de diferentes combinações e concentrações de coagulante e floculante e por fim a filtração através de membranas pelo método de nanofiltração (espiral). Após cada teste serão realizadas análises laboratoriais e, se observada necessidade, ainda considerado um tratamento auxiliar através de osmose reversa.

Palavras-chaves: tratamento biológico; lixiviado; nanofiltração; tratamento físico-químico; aterro sanitário.

Rubens Calegari Bonora. **Treatment of landfill leachate through floccantation process followed by nanofiltration separation.** 2022. environmental and sanitary engineering course, University of Pass Fundo, 2022.

ABSTRACT

The disposal in sanitary landfills is increasingly used as a final destination for urban solid waste. A product that results from this disposal is the sludge, characterized as a high potential for production and degradation to the environment, at the same time that it has difficulty.

Traditional methods, in many cases, no longer meet the minimum parameters required by legislation, as well as techniques such as the recirculation of the leachate in the cell itself are no longer accepted, requiring adequate treatment for a subsequent destination accepted by current legislation. In this sense, the present work seeks to present a study of technologies that can be applied in a complementary way to the basic biological treatment existing in sanitary landfills.

The condition of the effluent after biological treatment already existing in the specific landfill that is the object of study will be analyzed, the floccantation method through different combinations and concentrations of coagulant and flocculant and finally the filtration through membranes by the nanofiltration method (spiral). After each test, laboratory analyzes will be performed. If necessary, an auxiliary treatment through reverse osmosis will still be considered.

Key-words: biological treatment; leached; nanofiltration; physical-chemical treatment; landfill

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática de um aterro sanitário. Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2000.....	13
Figura 2: Localização do empreendimento em estudo a partir do município de Lagoa Vermelha - RS	23
Figura 3: Sistema atual de tratamento no aterro sanitário e condição do efluente na coleta	26
Figura 4: Equipamento utilizado para filtração	30
Figura 5: Comparativo do efluente bruto (esquerda), pós tratamento físico-químico e pós separação por membrana (direita)	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros médios do lixiviado observados na literatura e em análises prévias do aterro em questão.....	16
Tabela 2: Características dos módulos utilizados industrialmente.....	21
Tabela 3: Resultados da análise do efluente bruto do aterro sanitário	27
Tabela 4: Resultados das análises do efluente após tratamento físico-químico (teste 1)	28
Tabela 5: Resultados das análises do efluente após tratamento físico-químico (teste 3)	29
Tabela 6: Resultados de análises realizadas após processo de filtração.....	31
Tabela 7: Resultados das análises do efluente em comparação com a Resolução CONSEMA 355.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Variação do tempo para filtração de 1 litro de efluente durante 100 minutos	31
Gráfico 2: Eficiência na remoção de condutividade elétrica do efluente	33
Gráfico 3: Eficiência na remoção de DQO do efluente.....	34
Gráfico 4: Eficiência da remoção de fósforo total do efluente.....	34
Gráfico 5: Eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal do efluente	35
Gráfico 6: Variação do pH durante as etapas de tratamento	36
Gráfico 7: Eficiência na remoção de sólidos suspensos totais do efluente	36
Gráfico 8: Eficiência na remoção de turbidez no efluente	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Aterro sanitário – Geração e tratamento do lixiviado	12
2.2 Lixiviado de aterro sanitário	14
2.3 Qualidade do lixiviado de aterro sanitário	15
2.4 Tratamento de lixiviado	16
2.5 Tratamento físico-químico - flocculação	18
2.6 Processos de filtração por membrana	19
2.6.1 Microfiltração por membrana	19
2.6.2 Ultrafiltração por membrana	19
2.6.3 Nanofiltração por membrana	19
2.6.4 Osmose reversa	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1 Coleta e caracterização do efluente	26
4.2 Testes físico-químicos	27
4.2.1 Teste n° 1 - Policloreto de Alumínio 18 % (fornecedor 1)	28
4.2.2 Teste n° 2 – Tanino vegetal	28
4.2.3 Teste n°3 – Policloreto de Alumínio 18% (fornecedor 2)	28
4.2.4 Reprodução da melhor situação para filtração	30
4.3 Filtração por membrana	30
4.4 Eficiência dos tratamentos	32
4.5 Resultados e comparação	37
5. CONCLUSÕES	40
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42
7. REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência do constante avanço do crescimento populacional mundial, aliado aos atuais hábitos de consumismo desenfreado, principalmente no que tange a produtos industrializados, tem-se a maior geração de resíduos sólidos no mundo. Diante disso, é uma necessidade a otimização do processo de destinação e tratamento desses resíduos, bem como do lixiviado gerado pela decomposição dos mesmos, a fim de controlar e evitar todo e qualquer dano ambiental que o manejo incorreto dos resíduos gerados possa acarretar.

Um aterro sanitário é caracterizado por uma área impermeabilizada, geralmente com geomembrana PEAD, com camadas de solo no fundo compactadas, contendo normalmente argila ou bentonita misturada ao solo natural, buscando atender a um coeficiente de permeabilidade mínimo de 10^{-7} cm/s, exigido pela NBR 13.896 (ABNT, 1997), que define critérios para projeto implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos.

Ainda, a seleção de uma área adequada para instalação de um aterro sanitário deve atender as condições impostas pelas normas NBR 10004 (ABNT, 2004) que estabelece os critérios para classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde do homem. NBR 10005 (ABNT, 1987) que estabelece os procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. NBR 8419 (ABNT, 1992), que estabelece os procedimentos para apresentação de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos e, ainda, pela legislação de nível municipal, estadual e federal, conforme Resolução do CONAMA n° 404/2008.

Conforme citado, os aterros sanitários produzem subprodutos, resultantes da decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos. Objetivo desse estudo, o lixiviado é originado da fração líquida natural do próprio resíduo e deve atender padrões determinados pela Resolução CONSEMA n° 355 de 2017 Resolução CONSEMA 357 de 2005 e CONSEMA 430 de 2011 (complementar a CONSEMA 357), que dispõem sobre os critérios e padrões de emissão de efluente líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul.

No ano de 2017, a FEPAM, através da Diretriz Técnica n° 04, restringiu a técnica de recirculação do efluente tratado para a própria célula do aterro sanitário, processo que até então era muito utilizado. O item 7.3 da Diretriz referida determina os critérios para operação (LO) e cita em seus subitens:

L) Para os aterros sanitários em operação na publicação desta Diretriz, que realizam a recirculação do efluente deverá ser adequado ou implementado um sistema de tratamento de efluentes, considerando o destino final proposto. No prazo máximo de 02 (dois) anos da publicação dessa Diretriz a FEPAM não admitirá mais a técnica de recirculação;

M) O uso da técnica de aspersão do efluente, bruto ou tratado, na superfície da célula do aterro somente será considerada para situações específicas, quando comprovada a viabilidade técnica para tal. O procedimento de aspersão somente poderá ser aplicado com o objetivo de melhorar a eficiência de degradação dos resíduos na célula do aterro (teor de umidade), não sendo admitido como objetivo de diminuição de volume das lagoas, não sendo aceita a técnica de recirculação.

Sem o processo de recirculação, a busca por alternativas para correto tratamento aumentou. Portanto, grande parte dos aterros sanitários de pequeno porte que possuíam para tratamento do lixiviado um sistema simplificado, contendo apenas lagoa de tratamento, onde o efluente era tratado através de processo naturais de degradação, sem interferência mecânica ou tratamento físico-químico complementar e, no final da última lagoa, o efluente era então recirculado para a célula em operação do aterro sanitário.

Ainda, o lixiviado, por ser altamente variável, apresenta um padrão de dados para interpretação na literatura. Sabe-se que apresentam substâncias com solubilidade elevada, possuindo um alto potencial de contaminar águas superficiais receptora e, em consequência, prejudicar a vida aquática e até mesmo ser nociva à espécie humana, que por ventura utilize desse recurso para abastecimento próprio, direta ou indiretamente. A composição do lixiviado geralmente apresenta altas concentrações de produtos orgânicos, inorgânicos, metais pesados, substâncias recalcitrantes de difícil degradabilidade e contaminantes microbiológicos.

Assim, a geração e tratamento adequado do lixiviado se caracteriza como uma grande preocupação atual, visto o potencial negativo que um mau gerenciamento pode ter, sua dificuldade e complexidade de tratamento. Portanto, é de extrema importância a caracterização inicial do lixiviado, entendimento do mesmo, para proposta de um tratamento adequado, considerando todas as restrições e legislações vigentes. O processo atual, composto por tratamento biológico através de três lagoas, não atende aos parâmetros definidos pelas Resoluções do CONSEMA, nº 355 e 430, justificando a necessidade de uma adequação e a proposta de complementação do tratamento a ser apresentada.

O presente trabalho objetiva avaliar o tratamento de lixiviado oriundo de aterro sanitário, através do método de filtração por membrana, mais especificamente nanofiltração utilizando membranas do tipo espiral e avaliando o comportamento da técnica sob diferentes pressões. Anterior ao processo de filtração já existe no aterro em questão um tratamento biológico, com uma lagoa anaeróbia e duas facultativas. Será avaliado ainda, se há necessidade de antes da passagem pelos processos de filtração, a implantação de um tratamento físico-químico básico, utilizando o método de flocculação.

Dessa forma, o objetivo proposto é o atendimento a todos os parâmetros das legislações vigentes, bem como melhora nas condições ambientais e de operação do aterro, lançando seu efluente sem causar qualquer degradação ao meio ambiente, considerando ainda que o destino final do efluente tratado deve ser o recurso hídrico mais próximo, que possui uma vazão baixa e, portanto, só poderá receber o efluente se o mesmo estiver em excelentes condições. Ainda, se observada viabilidade, reuso do efluente tratado para atividades internas no próprio aterro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Primeiramente foi realizado uma breve revisão dos conceitos básicos dos principais elementos do aterro sanitário, levando em consideração NBR's, diretrizes e demais legislações vigentes, a fim de um melhor entendimento da situação, bem como, para efeitos de comparação com a situação encontrada no aterro sanitário específico em estudo, com foco principal na geração de lixiviado em adequação às novas diretrizes do órgão regulamentador sob o mesmo e processos de tratamento, que são tema do presente trabalho, especificamente processos de separação através de membrana pelo método de nanofiltração.

Processos de separação por membranas são conhecidos há pelo menos 200 anos, quando se utilizava membranas de bexigas de animais e se observava o processo de separação de dois líquidos, passando de um recipiente, mesmo que isolado, para outro. A aplicação desse método passou a ser mais difundida nos anos 1970, através do método da inversão de fases, que é o fenômeno por meio do qual ocorre um intercâmbio entre as fases de uma dispersão líquido-líquido: a fase dispersa inverte para transformar-se em fase contínua e vice-versa, ou seja, uma emulsão a inverte em emulsão sob circunstâncias determinadas por variação das propriedades do sistema.

De acordo com Liu, 2005, quando a inversão de fases é promovida pela variação da temperatura do sistema, causando uma mudança na afinidade do tensoativo pelas duas fases, ocorre a inversão de fases transitiva, também conhecida como temperatura de inversão de fases (TIF). Sendo este o processo de inversão de fases que melhor promove a formação de emulsões estáveis, o qual foi desenvolvido por Shinoda e demais colaboradores.

2.1 Aterro sanitário – Geração e tratamento do lixiviado

Os aterros sanitários são caracterizados como uma forma de acondicionamento e destino final ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. A NBR 10004 (ABNT, 2004) caracteriza resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição todos

provenientes dos sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviáveis seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isto soluções técnicas e economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

A disposição incorreta de resíduos sólidos urbanos pode causar sérios riscos e danos à saúde pública e ao meio ambiente. De acordo com a NBR 8419 (ABNT, 1992), o aterro sanitário é uma técnica de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, que não causa danos à saúde pública, reduzindo os impactos ambientais.

O objetivo de otimizar a utilização de áreas e minimizar impactos negativos ao meio ambiente e a saúde pública. É o método mais utilizado no Brasil, uma vez que traz consigo uma maior segurança e um menor custo associado.

Para implantação de um aterro sanitário, são observadas diversas etapas, considerando desde a escolha da área adequada, elaboração do projeto, licenciamento ambiental perante ao órgão competente, limpeza do terreno, obras de terraplanagem, construção das vias de acesso, implantação das camadas de impermeabilização do solo e de sistemas de drenagem de gás e do percolado dos resíduos dispostos.

A figura abaixo mostra um esquema simplificado de um aterro sanitário.

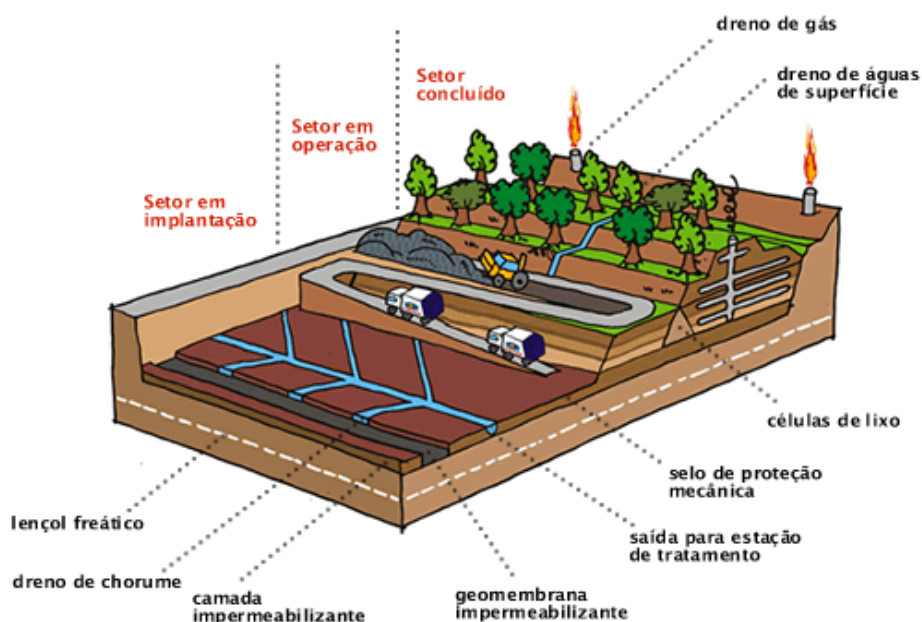


Figura 1: Representação esquemática de um aterro sanitário. Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2000.

Algumas vantagens da implantação de aterro sanitário para destinação final dos resíduos sólidos são o custo relativamente baixo de implantação e operação, a simplicidade da operação e, ainda, em alguns casos, o aproveitamento do biogás gerado para geração de energia, reduzindo assim custos e otimizando o processo de emissão de gases de efeito estufa devido ao consumo de metano.

Quanto às desvantagens pode-se citar a vida útil limitada, a dificuldade no controle dos resíduos recebidos, a demanda por grandes áreas para implantação e a contaminação do solo e águas pelo lixiviado, objetivo de estudo do presente trabalho.

O lixiviado (também conhecido como chorume) resulta da decomposição dos resíduos dispostos na célula que, após determinado tempo, junta-se às águas das chuvas que infiltram na célula e escoam para tratamento, antes da disposição final. Podem ser utilizados diversas técnicas de tratamento, desde que o lixiviado tratado atenda a legislação vigente, CONSEMA 355 (2017), que dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul, e CONSEMA 430 (2020) que dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes na gestão de lançamento de efluentes em águas superficiais.

2.2 Lixiviado de aterro sanitário

O lixiviado é caracterizado como um efluente de aspecto escuro, resultado da degradação dos resíduos dispostos na célula de um aterro sanitário. Possui origem em três fontes básicas, que se complementam, sendo: a umidade natural do lixo, que está diretamente ligada as condições climáticas (aumento no período chuvoso); da água de constituição da matéria orgânica, que ocorre naturalmente durante todo o processo de decomposição; e das bactérias que existem no resíduo.

Os resíduos sólidos depositados em aterros sanitários se decompõem através de uma combinação de processos químicos, físicos e biológicos. Os processos biológicos atuam sobre os materiais orgânicos dentro do aterro e começam logo após a disposição final do resíduo. Nos processos físicos ocorre a degradação física dos resíduos, pelo

movimento dos mesmos ou pela ação do movimento da água. Enquanto nos processos químicos, a decomposição dos resíduos é o resultado da hidrólise, dissolução/precipitação, adsorção/dessorção e da troca iônica (McBeam et al., 1995).

2.3 Qualidade do lixiviado de aterro sanitário

De acordo com EHRIG, 1984; CRAWFORD e SMITH, 1985, a composição e a concentração dos contaminantes são diretamente influenciados pelo tipo de resíduos depositados no aterro, fatores hidrogeológicos dos solos da região e principalmente a idade do aterro.

O lixiviado geralmente é caracterizado por conter altas concentrações de sólidos suspensos, metais pesados, compostos orgânicos originados da degradação de substâncias que são facilmente metabolizadas como carboidratos, proteínas e gorduras. Ainda, o lixiviado apresenta substâncias altamente solúveis, com alto potencial de contaminar as águas do subsolo. Casos de contaminação de águas subterrâneas e/ou superficiais por lixiviado bruto são extremamente sérias para o meio ambiente e para a saúde pública, devido a seus componentes altamente tóxicos.

Na literatura, é possível encontrar relatórios descrevendo o tratamento de lixiviado através de processos biológicos anaeróbios, bem como aeróbios, por vezes combinados a processos físico-químicos. Na maioria da literatura consultada, foram encontrados valores de DQO e DBO elevados, caracterizando esse efluente como impróprio para lançamento em corpos receptores sem um tratamento complementar.

Segundo GOMES E MARTINS, 2003:

Se os lixiviados apresentarem as características representativas de um aterro velho, com DQO entre 1500 e 3000 mg/L e relações DBO5/DQO menores que 0,4, fala-se que, houve um decréscimo significativo de sua fração orgânica biodegradável. Neste caso, espera-se também uma elevada concentração de nitrogênio amoniacal. Estes líquidos ficaram retidos longos períodos na massa de resíduos aterrada e assim, tiveram sua matéria orgânica mais rica em energia quase totalmente biodegradada. Diante do potencial poluidor destes efluentes gerados diariamente em aterros

sanitários, devido à degradação dos resíduos sólidos nestes depositados, faz-se necessário um estudo detalhado do tratamento destes.

A seguir é apresentado uma média das concentrações dos principais parâmetros observados em lixiviado de aterro sanitário. Os resultados foram filtrados a fim de apresentar resultados teóricos de aterros semelhantes ao do presente estudo, uma vez que esse efluente possui uma variabilidade muito grande.

Parâmetros	Lixiviado bruto (literatura)	Lixiviado bruto (específico)
Condutividade elétrica: μS/cm	4000	8000
DBO (mg/L)	701	800
DQO (mg/L)	7997	2000
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	3890	350
pH	8,13	8
Sólidos suspensos totais (mg/L)	650	400

Tabela 1: Parâmetros médios do lixiviado observados na literatura e em análises prévias do aterro em questão. Fonte: Telles (2010), entre outros.

2.4 Tratamento de lixiviado

O lixiviado oriundo de aterro sanitário é um líquido com potencial poluidor extremamente alto, que pode causar diversos efeitos nocivos aos lençóis freáticos e às águas superficiais localizadas nas proximidades do aterro, se o lixiviado não for adequadamente tratado antes do descarte ao meio ambiente. Segundo SILVA (2002), RODRIGUES (2008):

A atual geração dos resíduos sólidos urbanos domiciliares, que vem acompanhada do elevado crescimento da população mundial e, por consequência, do aumento do consumo e verifica-se o quão complexo é equilibrar essa geração com a sua destinação adequada, sabendo que

destinação adequada é aquela em que se pode dispor os resíduos de forma que ocorra sua transformação sem degradar o meio ambiente.

O tratamento do lixiviado é considerado um tratamento bastante complexo, dada a variabilidade das características desse efluente, bem como dos aterros de resíduos sólidos, principalmente em função do tipo dos resíduos disposto e respectivo estado de decomposição. São utilizados tratamentos biológicos e tratamentos químicos, sendo que, para aterros sanitários de menor porte, o mais comum é a utilização apenas de tratamento biológico, uma vez que a composição em sua maior parte é biodegradável.

Porém, com a restrição da legislação diante da técnica de reciclo do efluente final para a célula em operação, os padrões do efluente tratado precisarão atender as legislações vigentes para lançamento em recurso hídrico.

O tratamento geralmente é dividido em duas etapas, sendo uma para tratamento primário, que objetiva a remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis, materiais flutuantes e parte de matéria orgânica em suspensão coloidal, além de preparar o efluente para a próxima etapa. Pode ser realizada através de processos físicos ou químicos, dependendo da natureza dos poluentes, sendo que em alguns casos, ambos podem ser utilizados. O tratamento secundário é responsável pela remoção da matéria orgânica dissolvida e em suspensão (remanescente do tratamento primário). A principal característica dessa etapa é o processo biológico, geralmente através de micro-organismos que consomem a matéria orgânica.

Pode-se ainda ser aplicado um tratamento terciário, com objetivo de remover contaminantes específicos ou ainda algum dos contaminantes que, mesmo após os tratamentos primário e secundário, permanecem no efluente, além de promover a desinfecção do efluente tratado. Este processo tem como característica a utilização de sistemas mais avançados de tratamento, como processos oxidativos e filtração por membrana, inclusive a nanofiltração, objetivo do presente estudo, em conjunto com a flocculação.

2.5 Tratamento físico-químico - flocculação

Um decantador é um equipamento onde as impurezas presentes na água são agrupadas pela ação de um agente auxiliar, no caso, através da ação de um coagulante, que agrupa as partículas presentes no efluente e partículas maiores (flocos) que podem então ser removidos pelo processo de decantação. Os coagulantes são reagentes, geralmente policloreto de alumínio (PAC) ou cloreto férrico. O processo de ocorrência pode ser dividido em coagulação, onde ocorre o fenômeno de agrupamento das impurezas presentes no efluente, e floculação, onde ocorre de fato a produção dos flocos.

Segundo AHMAD et al, 2007, coagulação química, seguido por sedimentação é uma técnica utilizada para o tratamento de águas residuais de elevada quantidade de sólidos suspensos, especialmente aquelas formadas por materiais coloidais. Aplicações práticas demonstraram que a coagulação como tratamento primário, reduz a carga de poluição dos efluentes de celulose e papel, gerando uma adequada recuperação da água.

Para a floculação, geralmente utiliza-se a mistura de determinado polímero com alto peso molecular. O floculante adsorve-se dos flocos submícrons e facilita a ligação de lacunas entre os flocos. O fato de aproximar as partículas cria o alcance eficaz para as forças de atração, que reduzem a barreira energética para a floculação e a forma de flocos agregada. A floculação ocorre naturalmente durante a formação de flocos ou sedimentos submarinos, mas também é utilizada em larga escala como forma complementar de tratamento de efluente nos mais diversos setores, desde indústrias à efluentes oriundos de aterros sanitários.

Em estudo realizado por Yamagushi (2012), o processo de coagulação/floculação teve bons resultados no tratamento de lixiviado de aterro sanitário, obtendo com o coagulante Tanfloc SL, uma remoção na cor de 94,67% e remoção de DQO de 41,19%. Gewehr (2012) também obteve bons resultados no tratamento de efluente de aterro sanitário, atingindo índices de remoção de aproximadamente 98% da cor e da turbidez utilizando o coagulante cloreto férrico e ainda índices de 85% da cor e 93% de turbidez quando utilizado tanino vegetal como coagulante.

2.6 Processos de filtração por membrana

Os processos de filtração por membranas são tecnologias que fazem uso de tipos específicos de membranas que funcionam como uma barreira seletiva, filtrando as partículas líquidas, bem como, retendo as moléculas que possuem tamanho e peso molecular superior ao diâmetro dos poros da membrana. Tem uma operação considerada simples e boa eficiência, possibilitando que seja utilizada para diferentes fins, desde para produção de produtos à tratamento de efluentes complexos. É subdividida em microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa.

2.6.1 Microfiltração por membrana

As membranas de microfiltração geralmente são utilizadas em processos onde é necessário separar partículas com dimensões maiores que 0,1 mm de diâmetro, sendo também eficiente para retenção de bactérias e sólidos em suspensão que passem pelos poros de 0,1 a 10 μm e pressão que varia entre 0,2 a 1 BAR. Devido as características, também pode ser utilizada como um tratamento precedente a nanofiltração (pré-tratamento).

2.6.2 Ultrafiltração por membrana

A diferença básica entre a microfiltração e a ultrafiltração é o tamanho das partículas que podem ser removidas pelo processo. No caso da ultrafiltração, as partículas que são removidas variam entre 0,001 e 0,1 μm , removendo assim partículas como proteínas e macromoléculas. Da mesma forma que a microfiltração, a ultrafiltração também é muito utilizada como um tratamento anterior ao processo de nanofiltração.

2.6.3 Nanofiltração por membrana

A nanofiltração tem obtido destaque nos recentes cenários de técnicas para tratamentos de efluentes, devido principalmente ao seu custo benefício e alta eficiência na remoção de parâmetros, possibilitando o atendimento às legislações que estão ficando

mais rígidas. A nanofiltração pode ser executada diretamente após o tratamento biológico ou ainda ser precedida da microfiltração ou ultrafiltração, dependendo das características do efluente pós tratamento biológico.

Esse processo difere da microfiltração e da ultrafiltração, uma vez que possui membranas densas, ou seja, muito pouco porosas. Nesse caso, o mecanismo de separação tem base na diferença dos coeficientes de solubilidade e difusão entre o solvente e o soluto. A nanofiltração é capaz de separar soluções heterogêneas e solutos que se apresentam dissolvidos na água, permitindo que apenas determinados componentes passem pela membrana. Sua pressão de trabalho varia de 10 a 25 bar.

Na nanofiltração o transporte ocorre através de mecanismos de difusão, exclusão molecular e interações eletrostáticas que removem determinados íons polivalentes. Para utilização, a nanofiltração dispõe de uma área extensa de membrana, que, apesar disso, deve se adequar em um arranjo compacto. Dessa forma, os sistemas geralmente são projetados em módulos, sendo que cada módulo possui um invólucro, suporte para as membranas e um conjunto de condutos que garantem a correta alimentação e a coleta da corrente do permeado. A opção por sistemas modulares faz com que os processos de separação por membranas sejam versáteis, possibilitando aumentar ou diminuir a área total de membrana e, caso haja necessidade de uma manutenção, permite a substituição apenas de determinado módulo, não interferindo em toda a instalação. O processo de nanofiltração irá gerar resíduos, ou seja, o material sólido que fica retido na membrana, este pode ser disposto novamente na célula do próprio aterro sanitário.

Segundo Ribeiro (UFRGS, 2002), os diferentes tipos de módulos utilizados industrialmente são: de pratos planos, tubulares, em espiral e de fibras ocas. Nestes módulos, a alimentação passa de forma tangencial à membrana, ocorrendo assim a remoção do material acumulado na superfície. Abaixo é apresentada tabela com as características dos módulos utilizados industrialmente.

Características	Pratos planos	Tubular	Espiral	Fibras ocas
Compactação (m²/m³)	400 – 600	20 - 30	800 – 1000	600 – 1200
Preço	Elevado	Muito elevado	Baixo	Muito baixo

Facilidade de limpeza	Boa	Excelente	Boa	Má
Controle da transferência de massa adjacente à membrana	Razoável	Muito bom	Pobre	Muito mau
Aplicações	MF tangencial, UF, NF, OR	MF, UF e NF de baixa pressão	UF, NF, OR	OR

Tabela 2: Características dos módulos utilizados industrialmente. Adaptado de Ribeiro (UFRGS, 2002).

O modelo a ser utilizado para aplicação do presente trabalho é o espiral. Esse modelo, além das especificações mostradas acima, é um modelo que possibilita uma grande variedade de combinações e um bom custo-benefício, por isso, este tipo de módulo é o mais comum em atividades que envolvem nanofiltração com membrana. O design é compacto, fornecendo uma boa relação superfície-área-volume. A altura do canal de alimentação varia conforme a espessura do material separador, o que permite adaptar a diferentes níveis de viscosidade ou teor de sólidos do líquido. Sendo esta uma característica do projeto que leva a uma excelência hidrodinâmica em combinação com baixa demanda de energia. Outra vantagem das membranas é a possibilidade de operar em temperaturas de até 80 °C, com pH variando de 0 a 14.

Como principais vantagens do método citam-se: elevada densidade de empacotamento; elevada resistência térmica e química; alto padrão de qualidade; substituição do módulo econômico e simples; módulo com várias opções de dimensões.

2.6.4 Osmose reversa

Os primeiros usos dos processos de osmose reversa foram com objetivo de dessalinizar a água do mar, sendo que, nos últimos 50 anos essa tecnologia passou a ser utilizada para tratamento em processos industriais e sanitários. O processo de osmose reversa utiliza uma pressão externa superior à pressão osmótica, a água atravessa uma

membrana quase impermeável, passando então de uma solução carregada, com contaminantes, principalmente alta concentração de sal, pra uma solução de baixa contaminação.

Na osmose reversa, por meio de uma pressão externa superior à pressão osmótica, força-se o fluxo contrário da água, ou seja, uma solução altamente concentrada é forçada através de uma membrana para uma região de baixa concentração de solutos (Cunha et al. 2014; Chamon, 2011). Dessa forma, obtém-se duas correntes de alimentação do sistema, concentrado e tratado, e a separação ocorre devido à diferença de tamanho entre as partículas e moléculas presentes, sendo utilizadas membranas porosas através das quais os compostos são retidos e a água é capaz de atravessar (Costa, 2009). O material concentrado que fica retido, por ser um material mais sólido, pode ser disposto novamente na célula do aterro sanitário.

A presente técnica apresenta algumas vantagens, podendo alcançar taxas de purificação próximas a 100% para diversos parâmetros definidos pela legislação, garantindo ainda a retenção até mesmo de sais monovalentes, como o cloreto, devido ao alto limite de separação das membranas. A construção modular do sistema de osmose reversa também confere flexibilidade e mobilidade, além de necessitar um espaço físico reduzido para implantação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O aterro sanitário utilizado como base para o trabalho localiza-se na Rodovia RS 126, km 54, em zona rural do município de Lagoa Vermelha/RS, sob coordenadas 28°12'18.00"S de latitude e 51°37'58.80"O de longitude. Abaixo é apresentada imagem da localização do empreendimento.

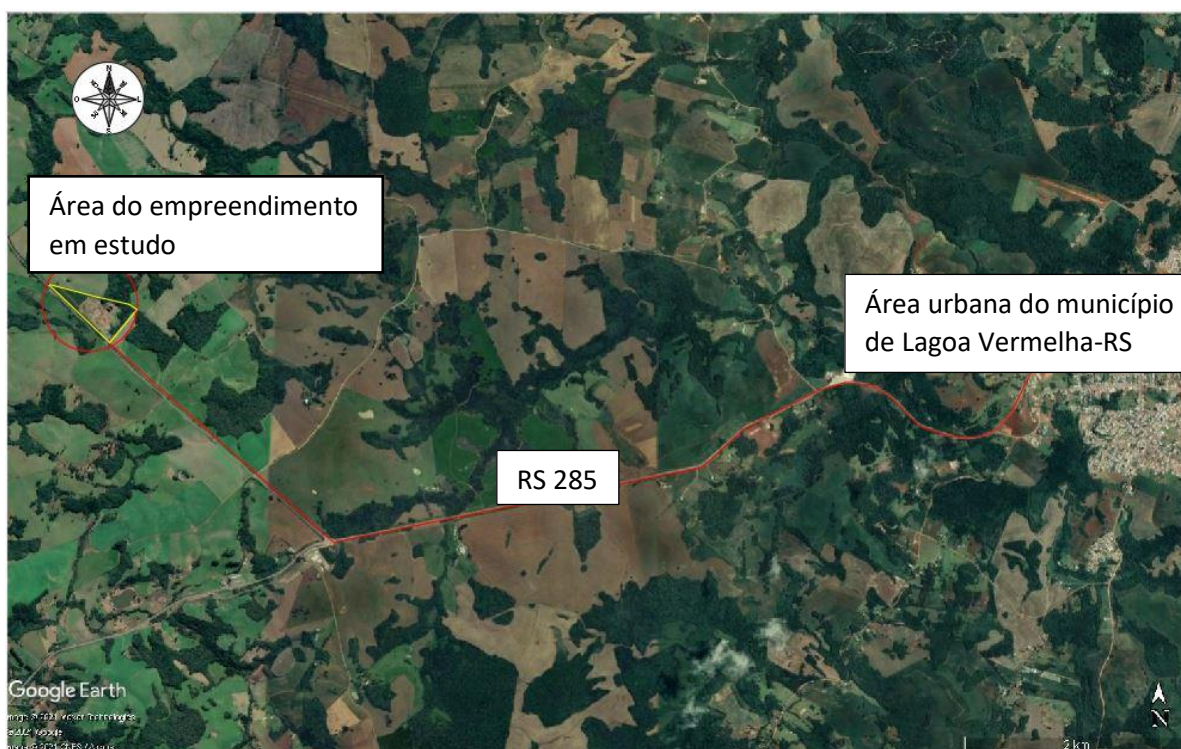


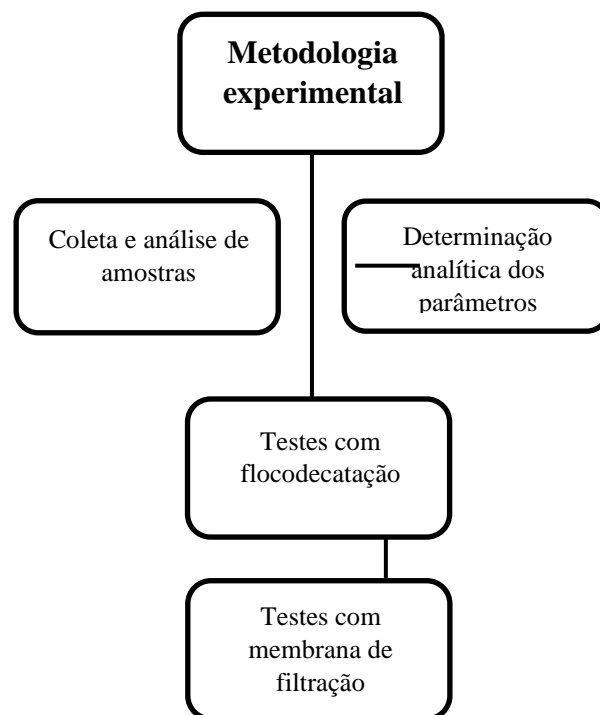
Figura 2: Localização do empreendimento em estudo a partir do município de Lagoa Vermelha - RS

O aterro sanitário em questão está em operação desde 2017, com capacidade diária de recebimento de 26 toneladas de resíduos. Estando sob uma área de 16 hectares, atualmente possui uma célula em operação e outra já encerrada. O aterro sanitário recebe apenas resíduos classe II, não sendo permitido o recebimento de resíduos de saúde, de construção civil ou industriais.

Observa-se que o aterro possui, atualmente, apenas tratamento biológico, composto por 3 lagoas, de onde o efluente é recirculado para a célula em operação após saída da última lagoa. A primeira lagoa é uma lagoa anaeróbia, com dimensões de projeto iguais a 25 x 25 x 3 metros, possui caixas de inspeção na entrada e na saída e sistema de impermeabilização com geomembrana PEAD 2 mm.

As duas outras lagoas de tratamento são consideradas facultativas, com dimensões de 20 x 40 x 2,5 metros cada, sistema de impermeabilização através de geomembranas PEAD 2 mm e caixas de inspeção na entrada e saída de cada lagoa. A vazão de projeto é estimada em 6,5 m³/dia e apresenta ainda a problemática de precisar lançar seu efluente em um recurso hídrico de baixa vazão.

Abaixo é apresentado o fluxograma da metodologia de trabalho.



➔ **Coleta e análise de amostras:** Para o procedimento de coleta e análise das amostras foi seguido a NBR 9898 (ABNT, 1987), que fixa as condições exigíveis para coleta e a preservação de amostras e de efluentes líquidos domésticos, industriais e de amostras de água, sedimentos e organismos aquáticos dos corpos receptores interiores superficiais. Em auxílio a NBR citada, foi utilizada como base também a NBR 9897 e o manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química da água (Embrapa, 2011).

Objetivando permitir comparações dos resultados obtidos, foram padronizados os procedimentos de coleta e análise dos dados, assim, é imprescindível atenção ao roteiro de coleta e das metodologias, observando alguns parâmetros de grande importância,

como: coleta das amostras em diferentes profundidades, variação do horário de coleta, utilização de métodos reconhecidos na literatura que sejam passíveis de reprodução, entre outros.

As amostras podem ser simples (coletadas num intervalo pequeno de tempo) ou compostas (durante um período maior de tempo). Geralmente as amostras compostas apresentam maior representatividade. Dessa forma, esse foi o método utilizado para realização dos testes no presente trabalho.

→ **Determinação analítica dos parâmetros:** Em laboratório, foi seguido o guia para análises conhecido como Standard Methods, definidos pela American Public Health Association, uma organização profissional com sede nos Estados Unidos. O guia teve sua primeira publicação em 1905 e, até o momento, teve 20 edições que incluíram diversas técnicas analíticas para determinação da qualidade das águas e efluentes. Garantindo, portanto, acreditação necessária para resultados obtidos através do método. Portanto, para fins de uma melhor acreditação dos resultados obtidos, todas as análises realizadas serão de acordo com o Standard Methods.

→ **Testes com flocculação:** foram simuladas diversas situações possíveis de tratamento físico-químico do efluente de saída da última lagoa de tratamento. Foram realizados testes com os coagulantes policloreto de alumínio (PAC), cloreto férrico e tanino vegetal, utilizando também um polímero aniônico auxiliar e, quando necessário, realizado o ajuste no pH utilizando soda cáustica líquida (se necessário aumentar o pH) e ácido clorídrico (se necessário baixar o pH). Foram coletadas amostras para análise dos resultados obtidos nos testes, a fim de análise em laboratório e determinação das melhores condições.

→ **Testes com nanofiltração por membrana:** Foi utilizado equipamento de nanofiltração por membranas do tipo espiral, avaliando sua eficiência e determinando o fluxo. Os testes foram realizados considerando o efluente após tratamento físico-químico por flocculação, uma vez que o efluente com tratamento prévio apenas biológico não apresentou condições de filtração direta. Da mesma forma que nos testes com flocculação, foram separadas amostras dos resultados obtidos, que posteriormente foram analisados em laboratório, obtendo as melhores condições de aplicação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Coleta e caracterização do efluente

A coleta do efluente foi realizada no ponto identificado abaixo, tendo, portanto, um tratamento prévio através de uma lagoa anaeróbia e duas lagoas facultativas. Foram coletados em primeira visita ao local de estudo, 30 litros de efluente, e numa segunda visita, aproximadamente 120 litros de efluente em bombonas plásticas de 25 e 50 litros. Abaixo é apresentada a composição do sistema de tratamento atual no empreendimento, destacando o efluente coletado.



Figura 3: Sistema atual de tratamento no aterro sanitário e condição do efluente na coleta

O lixiviado bruto possui características como: coloração escura (preto/castanha), alta turbidez e elevadas concentrações de DQO. Por se tratar de um aterro recente, a relação DBO/DQO é relativamente alta, e comparando com dados de monitoramento do aterro, mantem-se por volta de 0,4. Ainda, a fração de compostos inorgânicos faz com que o pH do efluente seja levemente alcalino, apresentando valores próximos a 9 na maioria das medições realizadas.

Após análise prévia das condições do efluente, definiu-se não ser possível a passagem do mesmo diretamente pela membrana sem um tratamento físico-químico. O

efluente apresentava alta concentração de sólidos em suspensão, cor e turbidez elevada. Os resultados apresentados a seguir se referem a análise laboratorial do efluente coletado, sem qualquer tratamento adicional.

Análise do efluente bruto	
Parâmetro	Resultado
Condutividade elétrica: $\mu\text{S}/\text{cm}$	3100
DQO (mg/L)	882,4
Fósforo	3,22
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	51,5
pH	8,1
Sólidos suspensos totais (mg/L)	240

Tabela 3: Resultados da análise do efluente bruto do aterro sanitário

Os principais objetivos do processo de coagulação/floculação são a redução da cor e a remoção da matéria orgânica. Dessa forma, prosseguiu-se para realização dos testes físico-químicos, sendo explicitadas as soluções e métodos utilizados para cada amostra. Assim sendo, para determinação das condições otimizadas do efluente, foram realizados ensaios que forneceram os dados necessários para avaliar a eficiência do processo de tratamento.

4.2 Testes físico-químicos

Os testes foram realizados com 4 coagulantes diferentes, sendo 3 inorgânicos (policloreto de alumínio 18% - fornecedor 1, policloreto de alumínio de alumínio 18% - fornecedor 2, cloreto férrico 38% e 1 coagulante orgânico (tanino vegetal), além de soda cáustica líquida 50%, ácido clorídrico e um polímero aniônico, sempre sob uma amostra de 500 mL do efluente, procurando-se avaliar o desempenho nas melhores condições de tratamento.

Os testes 1, 2, 3 e 4 foram realizados sob a amostra de 30 litros coletada na primeira visita ao local, enquanto o teste 5 buscou reproduzir em laboratório a melhor condição observada nos testes preliminares para posterior filtração.

4.2.1 Teste nº 1 - Policloreto de Alumínio 18 % (fornecedor 1)

- O pH medido foi de 8,96, ajustado para 7,22 com auxílio de ácido clorídrico;
- Adicionado 0,8 mL de PAC 18%;
- Adicionado polímero aniônico;
- Mantido em agitação por alguns minutos e aguardado decantar;
- pH final = 6,12.

O teste de número 1 foi enviado para análise externa em laboratório. Os resultados são apresentados na tabela seguinte.

Análise do efluente pós tratamento físico-químico		
Parâmetro	Resultado	Metodologia
DQO (mg/L)	412	SMEWW 23° - Método 5220 "D"
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	49	SMEWW 23° - Método 4500-NO3 E
pH	5,96	ABNT NBR 9251-1986
Sólidos suspensos totais (mg/L)	82	SMEWW 23° - Método 2540 "F"

Tabela 4: Resultados das análises do efluente após tratamento físico-químico (teste 1)

4.2.2 Teste nº 2 – Tanino vegetal

- O pH medido foi de 8,96;
- Adicionado 1 mL de tanino;
- Mantido em agitação por alguns minutos e aguardado decantar;
- pH final 6,98.

O referido teste não apresentou bons resultados, portanto, a amostra não foi enviada a laboratório.

4.2.3 Teste nº3 – Policloreto de Alumínio 18% (fornecedor 2)

O teste número 3 foi realizado no laboratório de operações unitárias da UPF, objetivando inicialmente reproduzir o teste número 1, que obteve bons resultados. O efluente coletado ficou alguns dias armazenados até ser possível realizar os testes, por

isso, alguns parâmetros podem ter sofrido interferência, sendo que se buscou em laboratório corrigir essas possíveis diferenças.

- pH inicial medido foi de 7,27; condutividade elétrica de 3100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e turbidez igual a 108 NTU;
- Foram adicionadas 0,24 mL (3 gotas) de soda cáustica líquida 50% para elevar o pH, obtendo valor igual a 8,67;
- Foi adicionado 1 mL de policloreto de alumínio 18%;
- Mantido em agitação, aguardado decantação e novamente feita a leitura dos parâmetros de pH, condutividade e turbidez;
- pH final = 6,26; condutividade elétrica = 3350 $\mu\text{S}/\text{cm}$; e turbidez = 39 NTU.

O teste número 3 foi tomado como base para comparação da eficiência do processo de tratamento físico-químico sob o efluente bruto, bem como utilizado para passagem na membrana de filtração. Posteriormente também foram realizados outros testes físico-químicos utilizando diferentes dosagens de policloreto de alumínio 18%, além de testes com sulfato de alumínio e cloreto férrico.

A referida amostra foi enviada para laboratório, onde foram analisados os parâmetros abaixo descritos, bem como respectivos resultados, assemelhando-se bastante aos resultados da análise do teste número 1.

Análise do efluente pós tratamento físico-químico		
Parâmetro	Resultado	Metodologia
DQO (mg/L)	475	SMEWW 23° - Método 5220 "D"
Fósforo (mg/L)	2,07	POP 31
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	41	SMEWW 23° - Método 4500-NO3 E
pH	6,12	ABNT NBR 9251-1986
Sólidos suspensos totais (mg/L)	98	SMEWW 23° - Método 2540 "F"

Tabela 5: Resultados das análises do efluente após tratamento físico-químico (teste 3)

4.2.4 Reprodução da melhor situação para filtração

Com aproximadamente 110 litros de efluente restante, dividiu-se a quantidade em 5 baldes com 15 litros cada de efluente e mais 1 com 35 litros. Nesses recipientes a condição do teste n° 3 foi reproduzida e, posterior a decantação, o efluente foi transferido para recipientes maiores, utilizando ainda um papel filtro com objetivo de reter sólidos em suspensão que eventualmente ainda se apresentassem presentes nas amostras.

Os 110 litros de efluente, após separação e passagem para os novos recipientes, resultaram em aproximadamente 75 litros efluente pronto para filtração por membrana e 35 kg de lodo decantado.

4.3 Filtração por membrana



Figura 4: Equipamento utilizado para filtração

O processo de filtração na membrana foi realizado em escala de bancada e se iniciou com 26 litros de efluente, onde foi possível, inicialmente, estabelecer a melhor pressão para o trabalho, que foi definida em 4 bar. A partir da definição da pressão, passou-se a monitorar o tempo para que a vazão do efluente filtrado atingisse 1 litro. A partir da definição da pressão, os testes foram realizados durante 1 hora e 40 minutos,

sendo registrado o tempo a cada 10 minutos. O gráfico a seguir apresenta os respectivos tempos obtidos durante todo o processo de filtração.

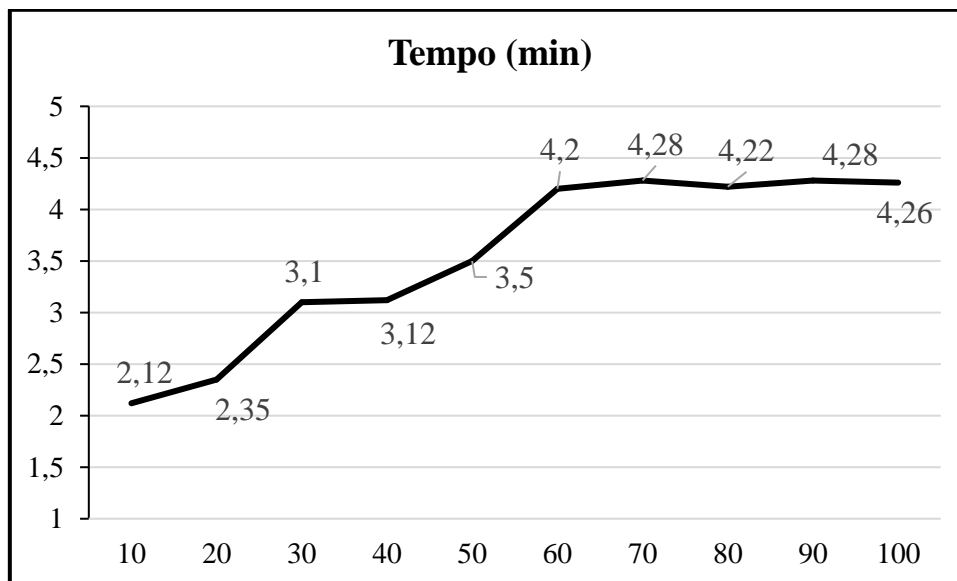


Gráfico 1: Variação do tempo para filtração de 1 litro de efluente durante 100 minutos

Foram coletadas pequenas amostras do efluente tratado para leitura dos parâmetros de pH, turbidez e condutividade elétrica durante 3 intervalos de tempo. Os resultados médios obtidos são apresentados abaixo.

Análise do efluente após processo de filtração	
Parâmetro	Resultado
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	254
pH	5,98
Turbidez (NTU)	0,08

Tabela 6: Resultados de análises realizadas após processo de filtração

A quantidade total de efluente filtrado foi de 51 litros, sendo, portando, possível avaliar o fluxo do permeado até que o mesmo apresentasse uma vazão considerada como “padrão”, o que ocorreu após aproximadamente 70 minutos de trabalho, onde obteve-se valores variando de 4:20 à 4:28 min.

Portanto, tomou-se para fins de cálculos o valor de 4:20 min, ou seja, 252 segundos para filtrar 1 litro do efluente, o que equivale a uma vazão média de 0,004 litros por segundo (L/s), ou ainda 0,24 litros por minuto (L/min).

A vazão medida inicialmente na membrana, utilizando água, foi de 0,018 litros por segundo (L/s) ou 1,08 litros por minuto (L/min), evidenciando que, mesmo realizando um pré-tratamento através de coagulação, há bastante diferença quando o líquido é o efluente. A vazão medida após filtração, foi de 0,01 litros por segundo (L/s) ou 0,6 litros por minuto (L/min). Portanto uma redução percentual de 45% no fluxo.

Os resultados também mostraram que o fluxo do permeado de água aumenta linearmente com o aumento de pressão na membrana, comprovando que a membrana se apresentava compactada.

O protocolo de limpeza aplicado à membrana se mostrou eficiente, uma vez que foi possível recuperar o fluxo inicial da água, sendo este um indicativo da eficiência da limpeza realizada e que as interações da solução com a membrana não são definitivas. Abaixo é apresentado o protocolo seguido para limpeza da membrana.

- ➔ 10 min de passagem com água quente;
- ➔ 20 min de passagem com 10 mL de soda adicionados à água;
- ➔ 10 min de passagem com água quente;
- ➔ 10 min de passagem com 10 mL de ácido adicionados à água;
- ➔ Determinação do pH;
- ➔ Teste de vazão com água gelada e comparação com a vazão de referência.

4.4 Eficiência dos tratamentos

Apesar da eficiência observada, o tratamento físico-químico para lixiviado de aterro sanitário, quando não for combinado com outra técnica, apresenta dificuldades no atendimento de todos os parâmetros e exigências ambientais atuais. Abaixo são apresentados gráficos com as respectivas eficiências de tratamento de cada um dos parâmetros através de tratamento físico-químico combinado com processo de separação por membrana.

- Condutividade elétrica

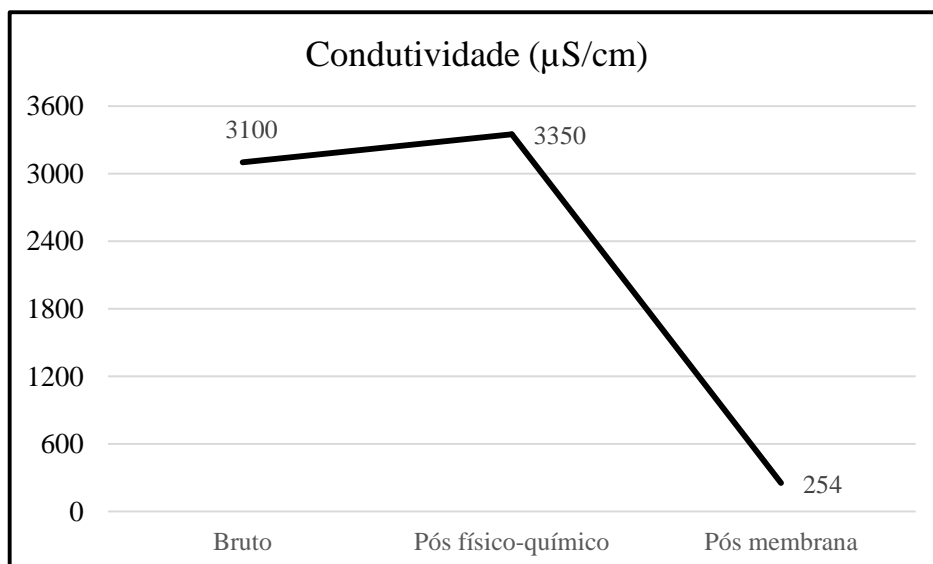


Gráfico 2: Eficiência na remoção de condutividade elétrica do efluente

Observa-se que a condutividade elétrica do efluente após tratamento físico químico é ligeiramente maior que a do efluente bruto, possivelmente devido a adição de soda cáustica e policloreto de alumínio para tratamento, uma vez que há presença de residual de alumínio, que é um condutor de eletricidade, conseqüentemente aumentando a condutividade em aproximadamente 8%.

Após passagem pela membrana a condutividade tem uma redução significativa de aproximadamente 92,5%, isso se deu possivelmente pela movimentação dos íons presentes no efluente, diminuindo consideravelmente a concentração dos mesmos na solução filtrada.

- Demanda Química de Oxigênio

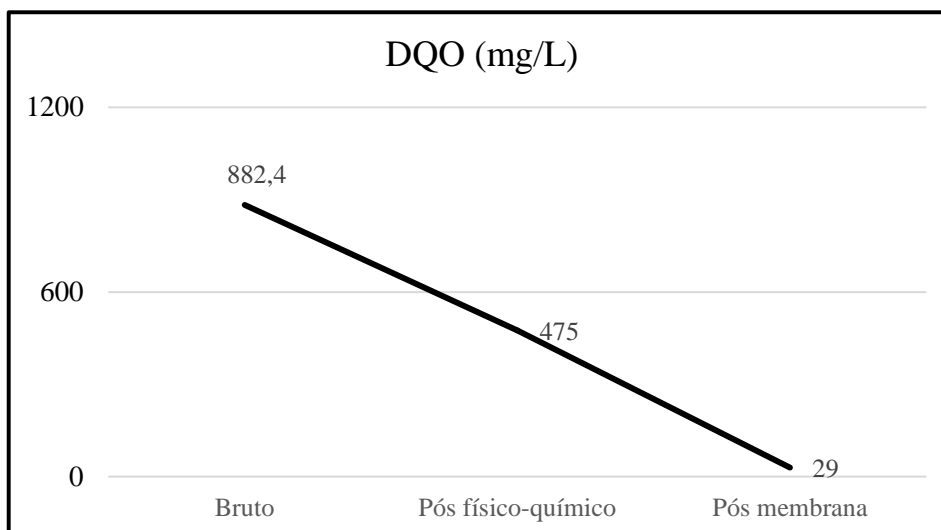


Gráfico 3: Eficiência na remoção de DQO do efluente

A DQO teve uma remoção de aproximadamente 46% com o tratamento físico-químico, uma eficiência não tão elevada se comparada a outros efluentes submetidos aos mesmos processos, não chegando aos limites impostos pela legislação, mas considerada aceitável por se tratar de lixiviado e possuir mais uma etapa de tratamento.

O processo de filtração apresentou uma ótima remoção de aproximadamente 94%, sob as condições pós físico-químico, atendendo todas as exigências ambientais vigentes. Essa eficiência pode ser explicada pela capacidade de retenção de biomassa e de compostos moleculares.

- Fósforo total

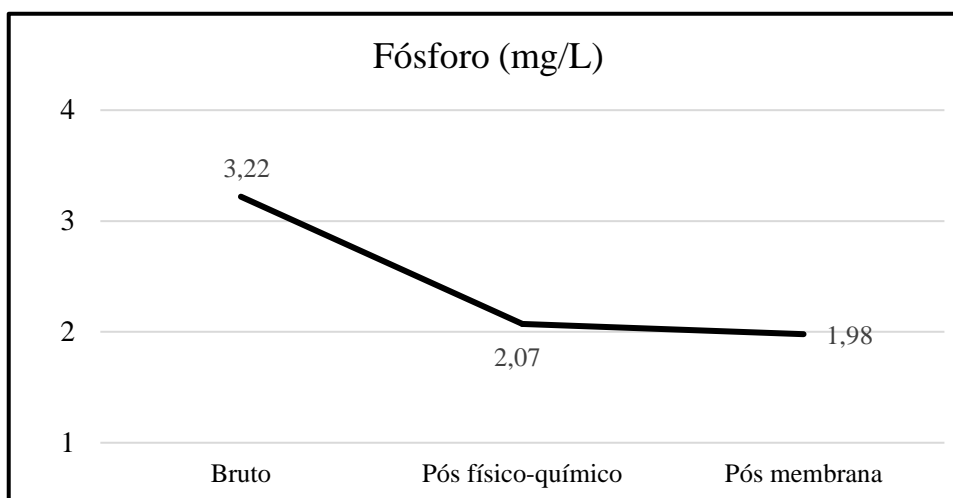


Gráfico 4: Eficiência da remoção de fósforo total do efluente

O parâmetro de fósforo já não se apresentava num valor elevado mesmo no efluente bruto. A remoção obtida com o tratamento físico químico foi de aproximadamente 36%, enquanto que após passagem pela membrana houve mais uma pequena remoção de aproximadamente 5%. O parâmetro também se enquadra dentro das normas vigentes.

- Nitrogênio amoniacal

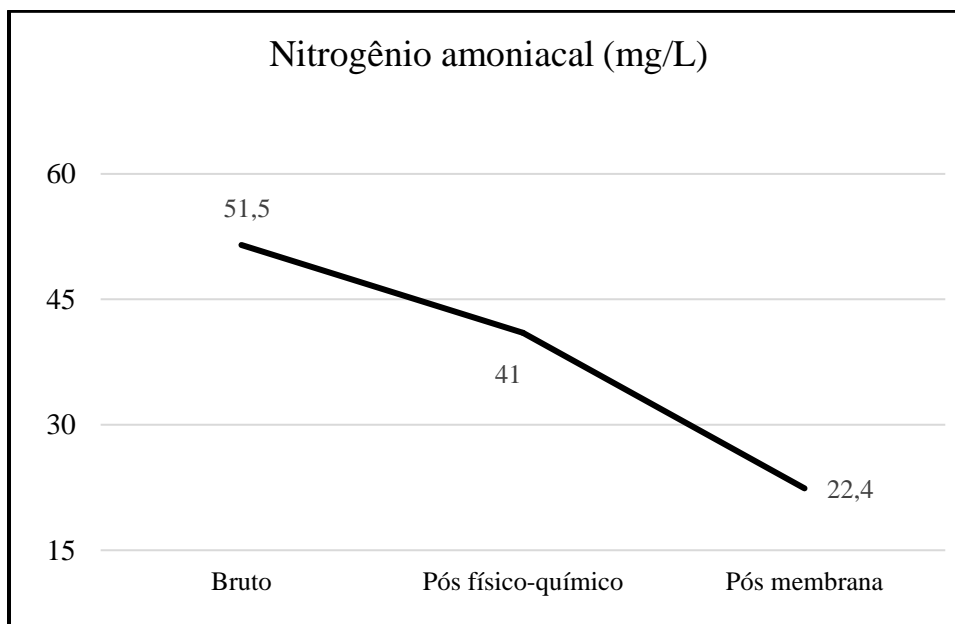


Gráfico 5: Eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal do efluente

Nitrogênio amoniacal apresentou redução após o tratamento físico-químico, ficando próximo aos 20% de eficiência. Já após filtração, a remoção obtida foi de aproximadamente 46%. Dessa forma, mesmo o sistema de tratamento atual do aterro sanitário não contar com lagoa aerada ou qualquer introdução de oxigênio para remoção de nitrogênio amoniacal, a eficiência de remoção desse parâmetro é boa, ficando próxima das condições limite para lançamento do efluente e atendimento à legislação.

- pH

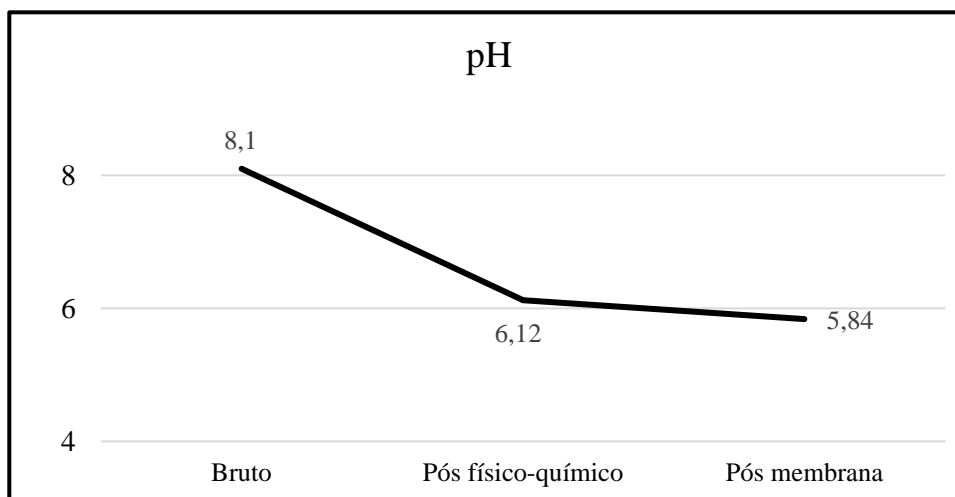


Gráfico 6: Variação do pH durante as etapas de tratamento

O pH de lixiviado de aterros sanitários normalmente apresenta caráter alcalino, inclusive o do aterro em questão. Este apresentou uma redução considerável após tratamento físico-químico, isso porque o coagulante “consome” alcalinidade, impactando diretamente na redução do pH. Após passagem pela membrana, o pH teve mais um decréscimo, ficando, por fim, abaixo de 6 e respectivamente abaixo do proposto pela legislação.

- Sólidos suspensos totais

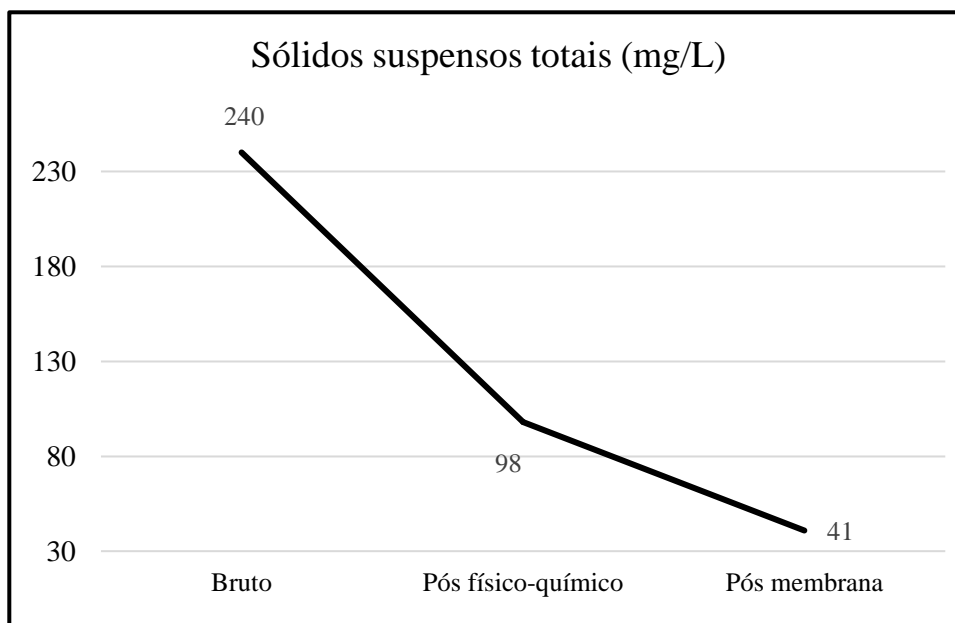


Gráfico 7: Eficiência na remoção de sólidos suspensos totais do efluente

SST apresentaram boa remoção no tratamento físico-químico, aproximadamente 61 %, sendo essencial a aplicação dessa etapa antes da filtração, caso contrário a membrana poderia colmatar com muita facilidade. Após filtração, houve excelente remoção também, chegando a valores finais inferiores a 41 mg/L, que é o limite de quantificação do laboratório. Essa remoção é realizada pela retenção desses sólidos na membrana, que possui poros com diâmetros extremamente pequenos.

- Turbidez

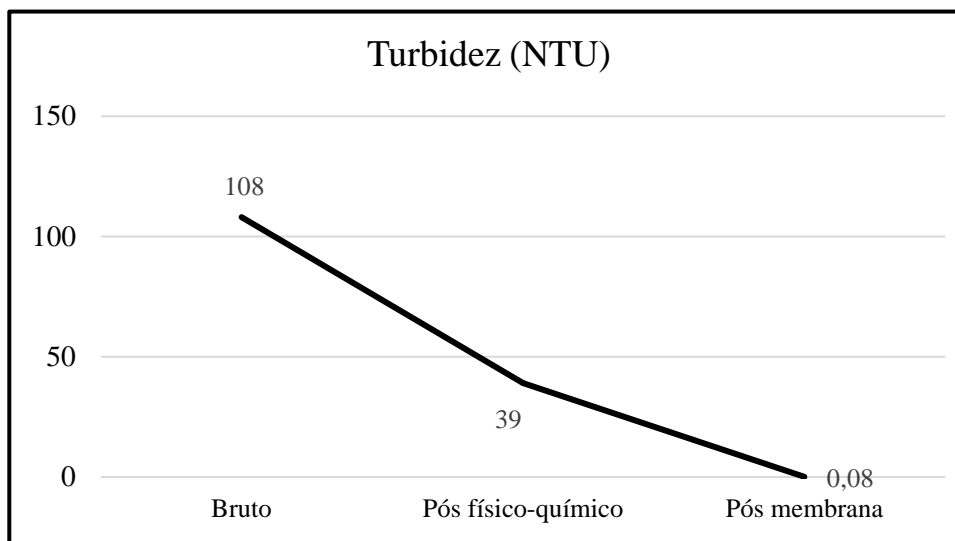


Gráfico 8: Eficiência na remoção de turbidez no efluente

A turbidez apresentou remoção de aproximadamente 64% após o tratamento físico-químico e 99,8% quando submetida a separação por membrana, atingindo até mesmo padrões exigidos pela Portaria 888 para água potável. Essa eficiência é justificada através da retenção da biomassa do efluente, deixando o efluente mais límpido.

4.5 Resultados e comparação

A tabela abaixo apresenta o comparativo das análises realizadas sob as amostras separadas de cada uma das etapas.

Resultados de análises do efluente conforme cada etapa realizada comparados aos limites do CONSEMA				
Parâmetro	Bruto	Pós físico-químico	Pós filtração	CONSEMA 355
Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	3100	3350	254	-
DQO (mg/L)	882,4	475	29	330
Fósforo	3,22	2,07	1,98	4
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	51,5	41	22,4	20
pH	8,1	6,12	5,84	6 a 9
Sólidos suspensos totais (mg/L)	240	98	< 41	140
Turbidez (NTU)	108	39	0,08	-

Tabela 7: Resultados das análises do efluente em comparação com a Resolução CONSEMA 355

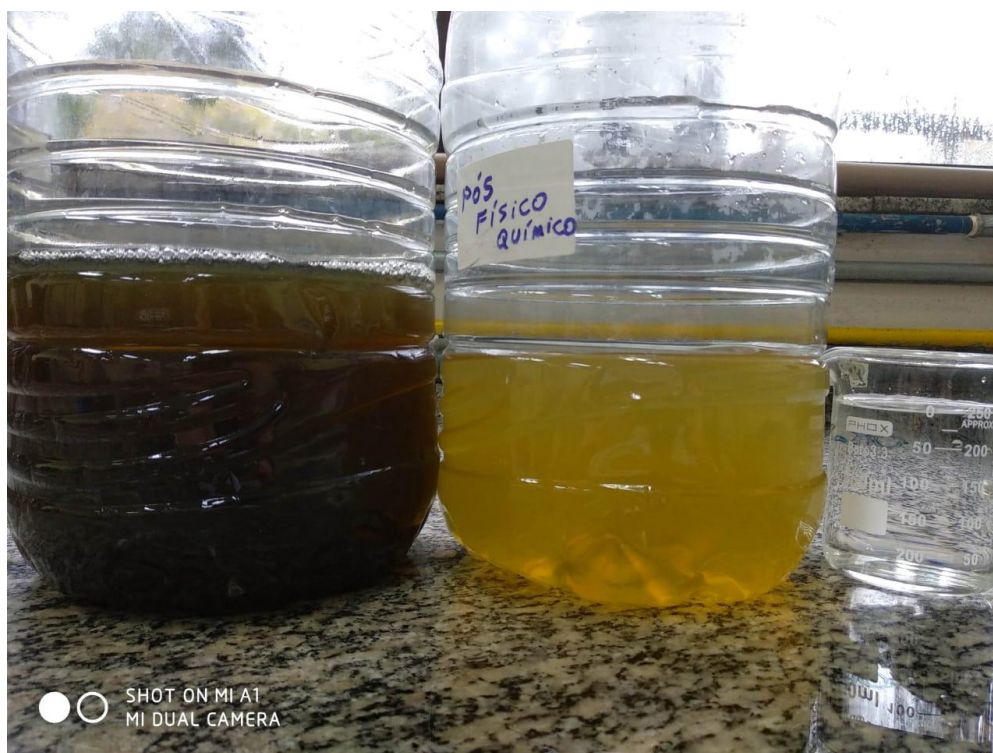


Figura 5: Comparativo do efluente bruto (esquerda), pós tratamento físico-químico e pós separação por membrana (direita)

Os valores apresentados na tabela 7 podem ser observados também através da interpretação da figura 5, onde é visível a diferença em cada etapa do tratamento.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta a avaliação da aplicação de processo físico-químico combinado com um polimento final através de processo de separação por membrana no tratamento do lixiviado do aterro sanitário municipal de Lagoa Vermelha-RS. O lixiviado oriundo do aterro em questão já possui um tratamento primário composto por lagoas anaeróbias e facultativas.

Através do tratamento físico-químico, pode-se observar boa eficiência no tratamento, principalmente devido às características como a elevada carga orgânica e concentração de sólidos suspensos totais. O tratamento promoveu a clarificação do lixiviado através da regulação do pH e adição de coagulantes, boa redução na demanda química de oxigênio, sólidos suspensos totais e fósforo total chegando a 46%, 61% e 34% de remoção respectivamente. O parâmetro nitrogênio amoniacal não apresentou grande redução, atingindo pouco mais de 10% de eficiência.

Apesar da boa remoção de DQO, se comparado com a legislação, o parâmetro, apenas com tratamento físico-químico, permanece fora dos limites estabelecidos pela CONSEMA 355, bem como o parâmetro de nitrogênio amoniacal, evidenciando a importância de a etapa de tratamento biológico também ser otimizada, uma vez que essa é a principal se tratando principalmente remoção de nitrogênio amoniacal e evidenciando também a necessidade de um polimento final/tratamento terciário.

O processo de filtração por membrana obteve excelente resultado de remoção de DQO, turbidez e condutividade elétrica, atingindo quase 100% de eficiência. Os parâmetros de fósforo e nitrogênio amoniacal também apresentaram eficiência, de XX e XX respectivamente. O pH do efluente final ficou abaixo de 6, mesmo que muito próximo, sendo eventualmente necessário o ajuste do mesmo antes do lançamento em destino final.

Todos os parâmetros foram atendidos, com exceção de nitrogênio amoniacal, que obteve uma concentração final igual a 22,4, ou seja, 2,4 mg/L acima do padrão definido pela CONSEMA 355. A utilização do processo de separação por membrana como etapa final no tratamento do lixiviado de aterro sanitário se mostrou uma alternativa tecnicamente viável, principalmente por se tratar de um aterro de pequeno porte e da necessidade de vetar a técnica de recirculação e dispor efluente em recurso hídrico.

Apesar dos ótimos resultados obtidos na membrana, foi possível determinar que o fluxo na mesma é diretamente proporcional a qualidade do efluente, sendo, portanto,

imprescindível um bom tratamento prévio, melhorando as condições de operação, prolongando a vida útil e o fluxo da membrana.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os estudos realizados no presente trabalho resultaram em algumas questões que podem ainda ser trabalhadas para que a implementação dos processos propostos em aterros sanitários possa ser realizada com maior confiabilidade, bem como, condições que foram observadas e são passíveis de melhora/otimização. Abaixo são listadas algumas sugestões.

- ➔ Otimização do tratamento físico-químico do lixiviado de aterro sanitário de pequeno porte;
- ➔ Estudo de viabilidade econômica de implementação do sistema de tratamento de lixiviado através de flocculação seguido por filtração por membrana;
- ➔ Avaliar a concentração e capacidade de remoção de sais e metais do lixiviado através de métodos de filtração por membrana;
- ➔ Propor alternativa para o volume de lodo gerado durante processos de flocculação e/ou separação por membrana.

7. REFERÊNCIAS

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. **ABNT NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT. 1997. 12 p.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. **ABNT NBR 9897**: Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro: ABNT. 1987. 14 p.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. **ABNT NBR 9898**: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro: ABNT. 1987. 22 p.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. **ABNT NBR 10004**: critérios para classificação dos resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT. 2004. 71 p.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. **ABNT NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato de lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT. 1987. 20 p.

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas. **ABNT NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT. 1992. 7 p.

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química da água**. Brasília: Embrapa. 2011. 67 p.

PEREIRA, B. C. **Tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico por processo PACT®**: avaliação da influência da mistura lixiviado/esgoto. Monografia apresentada para a conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Seropédica, 2014

L, SILVA, A. C.; DEZOTTI, M.; SANT'ANNA JR., G. Treatment and detoxification of a sanitary landfill leachate: -. **Chemosphere**, [s. l.], 2004.

L. Liu; O.K. Matar; E. Susana Perez de Ortiz; G.F. Hewitt. **Chemical Engineering Science**. 60, 85-94 p. 2005.

RIBEIRO, M. L. **Remoção de compostos orgânicos de águas por ultra e nanofiltração em membranas poliméricas**. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

AWWA – Research Foundation. **Water treatment- Membrane Processes**. Malleaville, J; Odendaal, P. E.; Wiesnar, M. R. (eds), McGraw-Hill, South Africa, 707 p.

MEULAN F, J. A.; BORILLE, O.; BASSO, L. H. **Potencial de reuso de água em cortume**. **Universidade Estadual do Oeste do Paraná** – Unioeste. Centro de ciências exatas e tecnológicas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Cascaval, 2009.

DIGIANO, F. A. BRAGHETTA, A.; NILSON, J.; UTNE, B. **Fouling of nanofiltration membranes by natural organic matter**: Critical issues in water and wastewater treatment National Conference on Environmental Engineering. 1994.

TELLES, C. A. S. **Processos Combinados para o Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário**. 22-23 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

CONSEMA - Conselho Estadual do Meio Ambiente. **CONSEMA 355 - critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul**: Rio Grande do Sul: Secretaria do ambiente e desenvolvimento sustentável. 2017. 7 p.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **CONSEMA 430 – condições e padrões para lançamento de efluente**. Brasília: Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2011.

Costa A. C. M. **Desenvolvimento de membranas de osmose inversa resistentes à deposição de matéria orgânica e bioincrustações**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro. 2009.

HABERT, A. C.; BORGES, C.P., NÓBREGA, R. **Processos de Separação por Membranas. Cap. 3. Caracterização de Membranas**. COOPPE, UFRJ, 2006.

BORSI, I.; CARETTI, C.; FASANO, A.; HEIJNEN, M.; LUBELLO, C. **Optimization of hollow fibers membrane wastewater treatment: An experimental study**. Desalination, v. 302, p. 80-86, 2012.

MÁXIMO, V.A. **Tratamento por coagulação dos lixiviados do aterro sanitária da região metropolitana de Florianópolis**. 2007. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Universidade de Santa Catarina, Florianópolis.

MCBEAN, E.A.; ROVERS, R.; FARQUHAR, G.J. **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. Prentice Hall, New Jersey, p. 521, 1995.