



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

MARIA CRISTINA DA CUNHA MOURA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS CINZAS DA INCINERAÇÃO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS NO TRATAMENTO DE LIXIVIADOS DE
ATERROS SANITÁRIOS**

FORTALEZA

2023

MARIA CRISTINA DA CUNHA MOURA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS CINZAS DA INCINERAÇÃO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS NO TRATAMENTO DE LIXIVIADOS DE
ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos

Coorientadora: Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Instituto Federal do Ceará - IFCE

Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M929a Moura, Maria Cristina da Cunha.

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS CINZAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS PERIGOSOS NO TRATAMENTO DE LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS /

Maria Cristina da Cunha Moura. - 2023.

98 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão
Ambiental, Campus Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos .

Coorientação: Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos .

1. Incineração. 2. Resíduos Sólidos Perigosos. 3. Cinzas. 4. Lixiviados de Aterros
Sanitários. I. Título.

CDD 628

MARIA CRISTINA DA CUNHA MOURA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS CINZAS DA INCINERAÇÃO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS NO TRATAMENTO DE LIXIVIADOS DE
ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus Fortaleza*, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 17/11/2023

Prof. Dr. **Gemmelle Oliveira Santos** (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. **Ronaldo Stefanutti**
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. **Roberto Antônio Cordeiro da Silva**
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Documento assinado eletronicamente por **Gemmelle Oliveira Santos, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 17/11/2023, às 17:30, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Stefanutti, Usuário Externo**, em 18/11/2023, às 12:40, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ROBERTO ANTONIO CORDEIRO DA SILVA, Usuário Externo**, em 24/11/2023, às 08:12, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **5559347** e o código CRC **5B6A48B1**.

A Deus.

Aos meus pais.

À minha irmã, Helena.

Ao meu marido e filho.

Aos mestres.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus por todos os dias já vividos e pelos que ainda estão por vir, por suas bênçãos e por ter me permitido cumprir mais uma etapa da minha jornada de vida, com saúde e sabedoria. Agradeço por ter me dado a capacidade e discernimento na elaboração e conclusão deste trabalho e ter a oportunidade de conhecer pessoas que, cada um à sua maneira, colaboraram nesse processo.

A todos os meus familiares pelo incentivo ao longo desta caminhada. Em especial ao meu marido, Ednir Vieira de Moura e ao meu filho, Bruno da Cunha Moura, pelo apoio incondicional.

As minhas amigas e parceiras de vida Brena Karoline e Nirlania Diógenes, por sempre me ajudarem no decorrer da pesquisa.

À coordenação do PGTGA e aos demais professores que compartilharam comigo um pouco da enorme sabedoria.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Marquise Ambiental e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

Ao professor Roberto Antônio Cordeiro da Silva e a todos que fazem parte do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC, local de realização dos ensaios e de aprendizado.

Ao Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da UFC.

À Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos pela coorientação, ensinamentos e dedicação.

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos, por sua disponibilidade em compartilhar seus conhecimentos, por seus ensinamentos, orientações e tempo investido na elaboração e conclusão deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

“PEDAÇOS DE MIM”

Vez por outra a vida bate,
E como ela tem batido...
Quando a pancada é de jeito
Me vejo no chão, caído.
Nessa hora me refaço,
Renasço em cada pedaço
Daquilo que foi partido.

Sei que uma só semente não faz brotar um
jardim.

Talvez se despedaçar não seja assim tão
ruim.

Se um de mim já é forte, não há mal que
suporte vários pedaços de mim”.

Bráulio Bessa.

RESUMO

O estudo objetivou avaliar a capacidade das cinzas provenientes da incineração de Resíduos Sólidos Perigosos (RSP) como elemento de filtração de lixiviados de aterros sanitários. Foram montados 3 filtros com 100% de areia (F1), 50% de areia e 50% de cinza (F2) e 100% de cinza (F3). O lixiviado foi analisado antes e depois da passagem pelas colunas de filtração sob 14 parâmetros físico-químicos. Os resultados mostraram que as características físicas das cinzas foram similares com as propriedades das areias enquanto as químicas e mineralógicas revelaram a presença de 18 componentes elementares, com destaque para o Óxido de Cálcio (60,06%), Dióxido de Titânio (7,52%) e Trióxido de Enxofre (6,95%). Quanto às fases, a análise cristalográfica identificou cristais de etringita, calcita, rutilo, hematita e quartzo. Em termos de propriedades, as cinzas graúdas se mostraram pouco esféricas, moderadamente rugosas e subangulares. Já as cinzas miúdas, foram classificadas como subarredondadas e semialongadas. O F1 (100% areia) alcançou 31 eventos de redução da concentração dos parâmetros físico-químicos do lixiviado (55,4% do total analisado); o F2 alcançou 36 reduções (64,3%); o F3 alcançou 35 reduções (62,5%), portanto, houve maior eficiência nos filtros com a presença de cinzas. As maiores reduções foram observadas para óleos e graxas (92%), sólidos dissolvidos (99,9%) e materiais sedimentáveis (100%). A pesquisa foi um primeiro passo para compreensão sobre as características físico-químicas das cinzas da incineração de RSP e de como elas se comportam como elemento de filtração do lixiviado. Os resultados, além de promissores, já começaram a abrir espaço para realização de experimentos em maior escala. A ideia é reduzir o envio das cinzas para o aterro sanitário, agregar valor a esse material e inaugurar uma linha de investigação sobre novas tecnologias de tratamento de lixiviados.

Palavras-chave: Incineração. Resíduos Sólidos Perigosos. Cinzas. Lixiviados de Aterros Sanitários.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the capacity of ash derived from the incineration of Hazardous Solid Waste (HSW) as a filter element for landfill leachate. Three filters were set up with 100% sand (F1), 50% sand and 50% ash (F2) and 100% ash (F3). The leachate was analyzed before and after passing through the filtration columns using 14 physical and chemical parameters. The results showed that the physical characteristics of the ash were like those of the sand, while the chemical and mineralogical characteristics revealed the presence of 18 elemental components, particularly Calcium Oxide (60.06%), Titanium Dioxide (7.52%) and Sulphur Trioxide (6.95%). As for the phases, crystallographic analysis identified crystals of ettringite, calcite, rutile, hematite, and quartz. In terms of properties, the coarse ash was not very spherical, moderately rough, and subangular. The fine ashes, on the other hand, were classified as subrounded and semi-elongated. F1 (100% sand) achieved 31 reduction events in the concentration of the physical-chemical parameters of the leachate (55.4% of the total analyzed); F2 achieved 36 reductions (64.3%); F3 achieved 35 reductions (62.5%), so there was greater efficiency in the filters with the presence of ash. The greatest reductions were observed for oil and grease (92%), dissolved solids (99.9%) and settleable materials (100%). The research was a first step towards understanding the physicochemical characteristics of ash from the incineration of RSP and how it behaves as a leachate filtration element. The results, as well as being promising, have already begun to open the way for larger-scale experiments. The idea is to reduce the amount of ash sent to landfill, add value to this material and open a line of research into new leachate treatment technologies.

Keywords: Incineration. Hazardous Solid Waste. Ash. Leachate from Landfills.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma esquemático das grandes etapas da pesquisa	31
Figura 2 - Vistas parciais do incinerador de Fortaleza/CE	32
Figura 3 - Área de deposição dos resíduos perigosos (fosso)	33
Figura 4 - Vistas parciais da ETE da CTRP	34
Figura 5 - Contêiner para acondicionamento das cinzas do CTRP	35
Figura 6 - Localização da 2ª lagoa de estabilização do ASMOC	36
Figura 7 - Materiais grosseiros retirados das amostras de cinzas de RSP	37
Figura 8 - <i>Eppendorfs</i> com amostras de cinzas de RSP para análise FRX e DRX. 39	
Figura 9 - Imagens do ensaio sobre a forma das cinzas com o uso do AIMS	39
Figura 10 - Detalhamento da montagem dos filtros do experimento piloto	41
Figura 11 - Imagem do experimento.....	41
Figura 12 - Detalhamento interno das colunas de filtração	42
Figura 13 - Imagens do ensaio de granulometria	44
Figura 14 - Curvas com distribuição granulométrica das cinzas de RSP	44
Figura 15 - Curvas de compactação das cinzas de RSP	46
Figura 16 - Imagens do ensaio de compactação	47
Figura 17 - Imagens do ensaio para determinação da densidade real.....	49
Figura 18 - Teor de umidade natural das amostras de cinzas de RSP.....	50
Figura 19 - Difratoograma das cinzas de RSP	54
Figura 20 - Comportamento do parâmetro pH (fase 1 do experimento)	64
Figura 21 - Comportamento do parâmetro pH (fase 2 do experimento)	65
Figura 22 - Comportamento do parâmetro cloreto (fase 1 do experimento)	66
Figura 23 - Comportamento do parâmetro cloreto (fase 2 do experimento)	67
Figura 24 - Comportamento do parâmetro cor aparente (fase 1)	68
Figura 25 - Comportamento do parâmetro cor aparente (fase 2)	68
Figura 26 - Comportamento do parâmetro fósforo (fase 1)	70
Figura 27 - Comportamento do parâmetro fósforo (fase 2)	70
Figura 28 - Comportamento do parâmetro DQO (fase 1)	71
Figura 29 - Comportamento do parâmetro DQO (fase 2)	72
Figura 30 - Comportamento do parâmetro materiais sedimentáveis (fase 1)	73
Figura 31 - Comportamento do parâmetro materiais sedimentáveis (fase 2)	73
Figura 32 - Comportamento do parâmetro sólidos dissolvidos (fase 1)	75

Figura 33 - Comportamento do parâmetro sólidos dissolvidos (fase 2)	75
Figura 34 - Comportamento do parâmetro nitrato (fase 1)	76
Figura 35 - Comportamento do parâmetro nitrato (fase 2)	77
Figura 36 - Comportamento do parâmetro nitrito (fase 1)	78
Figura 37 - Comportamento do parâmetro nitrito (fase 2)	78
Figura 38 - Comportamento do parâmetro nitrogênio amoniacal (fase1)	80
Figura 39 - Comportamento do parâmetro nitrogênio amoniacal (fase 2)	80
Figura 40 - Comportamento do parâmetro óleos e graxas (fase 2)	81
Figura 41 - Comportamento do parâmetro óleos e graxas (fase 2)	82
Figura 42 - Comportamento do parâmetro sulfato (fase 1)	83
Figura 43 - Comportamento do parâmetro sulfato (fase 2)	83
Figura 44 - Comportamento do parâmetro sulfeto (fase 1)	84
Figura 45 - Comportamento do parâmetro sulfeto (fase 2)	85
Figura 46 - Comportamento do parâmetro turbidez (fase 1)	86
Figura 47 - Comportamento do parâmetro turbidez (fase 2)	86
Quadro 1 - Exemplos de resíduos industriais passíveis de incineração	22
Quadro 2 - Tratamentos utilizados para lixiviados de aterro sanitário	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Programação de análise das cinzas de RSP	38
Tabela 2 - Composição granulométrica das cinzas	45
Tabela 3 - Resultados da literatura para a compactação de cinzas de RSP	48
Tabela 4 - Densidade real das cinzas de RSU na literatura	49
Tabela 5 - Teor de umidade natural das amostras de cinzas de RSP	50
Tabela 6 - Composição química elementar das cinzas de RSP	52
Tabela 7 - Propriedades de forma das cinzas	56
Tabela 8 - Síntese da filtração dos lixiviados nos três filtros - Fase 1	57
Tabela 9 - Síntese da filtração dos lixiviados nos três filtros - Fase 2	59
Tabela 10 - Resultados da filtração do lixiviado no Filtro 1	61
Tabela 11 - Resultados da filtração do lixiviado no Filtro 2	62
Tabela 12 - Resultados da filtração do lixiviado no Filtro 3	63

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AIMS	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASMOC	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia
CNEN	Comissão Nacional de Energia
COEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTRP	Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos
CV	Coeficiente de Variação
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FRX	Fluorescência de Raios-X
Funasa	Fundação Nacional de Saúde
H _{ótima}	Umidade Ótima
MEAS _{máx}	Massa Específica Aparente Seca Máxima
NBR	Norma Brasileira
PDI	Processamento Digital de Imagens
PGRS	Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
PGRSS	Plano de Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RSP	Resíduos Sólidos Perigosos
RSS	Resíduos de Serviço de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária

UFC

Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	Objetivo geral.....	18
2.2	Objetivos específicos.....	18
2.3	Objetivos complementares.....	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1	Resíduos Sólidos Perigosos (RSP).....	19
3.2	Incineração de resíduos.....	23
3.3	Cinzas provenientes da incineração.....	25
3.4	Lixiviados provenientes de aterros sanitários.....	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1	Descrição de etapas e da área estudada.....	31
4.2	Descrição dos procedimentos.....	36
4.2.1	<i>Com as cinzas.....</i>	36
4.2.2	<i>Com o lixiviado bruto e tratado.....</i>	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5.1	Granulometria.....	44
5.2	Compactação.....	46
5.3	Densidade real.....	48
5.4	Teor de umidade.....	50
5.5	Permeabilidade.....	51
5.6	Fluorescência de Raios-X.....	52
5.7	Identificação das fases cristalinas.....	53
5.8	Propriedades das cinzas.....	56
5.9	Comportamento dos filtros.....	57
5.9.1	<i>Análise qualitativa.....</i>	57
5.9.2	<i>Análise quantitativa.....</i>	64
6	CONCLUSÃO.....	88
	REFERÊNCIAS.....	90

1. INTRODUÇÃO

A história da geração e destinação dos resíduos sólidos se confunde com a própria história da humanidade. O aumento da população, o avanço das tecnologias e a cultura do descartável fazem crescer a necessidade por soluções viáveis para destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos.

Os Resíduos Sólidos Perigosos (RSP) - conforme definição encontrada na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - são aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental (Brasil, 2010).

Em função dessas características, um dos objetivos da PNRS (Artigo 7º, V) é reduzir o volume e a periculosidade desses resíduos; um dos seus instrumentos (Artigo 8º, XV) é o Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos; uma das suas exigências (Artigo 20, II) é que os geradores desse tipo de resíduo elaborem e cumpram um Plano de Gerenciamento.

O descarte de RSP tem sido um desafio crescente, especialmente nas grandes cidades. Nesse sentido, a incineração tem se mostrado uma alternativa que reduz acentuadamente o peso (até 70%) e o volume (até 90%) dos resíduos através de um processo de combustão controlada (Pinto, 2018).

No Brasil, uma parte dos RSP é enviada para unidades de tratamento por incineração, autoclave, micro-ondas e aterros industriais (que representam as alternativas mais caras); outra parte segue para blendagem, coprocessamento em fornos de cimenteiras (que são formas de aproveitá-los como insumos) e outra parte vai para aterros sanitários Classe IIA ou outras disposições sobre o solo, agregando diversos riscos ambientais e sociais.

Em Fortaleza-CE, os geradores de RSP (independente do volume) são obrigados a assumir todos os custos pelos serviços de manejo (segregação, acondicionamento, armazenamento, transporte, tratamento, destinação e disposição final) conforme a Lei Municipal 10.340/2015 (Fortaleza, 2015). Em geral, os geradores licenciados enviam seus RSP para incineração no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos - CTRP, localizado no bairro Jangurussu, por meio de um contrato com uma transportadora especializada.

O incinerador de Fortaleza-CE foi inaugurado em 2001, tem tecnologia alemã,

é do tipo leito fluidizado e possui duas câmaras (de 900 e 1000°C), conforme Viana (2013). Informações atualizadas apontam para o tratamento de 250 toneladas de RSP por mês, garantindo a esterilização e redução de volume e peso. Ainda segundo os técnicos do CTRP, aproximadamente 98% correspondem a Resíduos de Serviço de Saúde - RSS e os outros 2% são resíduos industriais e outros.

A queima dos RSP resulta em dois subprodutos principais: cinzas e gases. Pela literatura, as cinzas podem conter metais pesados como chumbo, cádmio, cromo, cobre, zinco, mercúrio e arsênio (Patra; Whaung; Kwan, 2017), podendo também apresentar compostos inorgânicos e orgânicos tóxicos, como dioxinas e furanos (Ferreira, 2019; Pessoa Filho, 2020).

No CTRP, as cinzas são acondicionadas em um contêiner e enviadas para o novo Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia - ASMOC. Já os gases, em contracorrente e sob pressão, passam por uma lavagem alcalina (1º tanque) e ácida (2º tanque), por um filtro de carvão (para redução de odores, dioxinas e furanos) e por um filtro manga (para retenção de material particulado) antes de serem lançados na atmosfera. O efluente gerado na lavagem dos gases é enviado para uma estação de tratamento interna, onde passará por processos físicos e químicos e por osmose reversa, sendo a água reaproveitada no próprio CTRP, mantendo um ciclo fechado.

Em várias partes do mundo, vem crescendo a tentativa de aumentar a valorização das cinzas geradas em incineradores e reduzir seu envio aos aterros sanitários. Alguns estudos têm investigado sua aplicabilidade na construção de pavimentos e base de estradas (Patra; Whaung; Kwan, 2017), na produção de cimento (Clavier *et al.*, 2019), como agregado em concreto (Li *et al.*, 2018), na incorporação em argamassas normais e adesivas (Aguiar *et al.*, 2002), em cerâmicas vermelhas (Coutinho; Vieira, 2016), em misturas asfálticas, na síntese de materiais leves aerados ativados por álcali (Zhu *et al.*, 2018a), mas pouco se sabe sobre o comportamento das cinzas como meio filtrante de soluções ou amostras líquidas contaminadas, a exemplo dos lixiviados de aterros sanitários, aumentando a necessidade de novas pesquisas.

Em geral, os lixiviados de aterros são tratados em lagoas de estabilização ou utilizando destilador solar (Sá; Jucá; Motta Sobrinho, 2012), reator biológico sequencial descontinuado (Chávez-Porras; Ramírez-Contreras; Casallas-Ortega, 2018), filtros de areia (Roehrs, 2007) ou processo de eletroflotação, mas o tratamento de lixiviados em colunas de filtração compostas por cinzas da incineração de RSU é

desconhecido.

Considerando que a geração de cinzas provenientes da incineração de RSP tende a crescer, torna-se evidente a ausência de estudos que caracterizem essas cinzas. Diante dessa lacuna, surge a necessidade de pesquisar as possibilidades de reaproveitamento e valorização desse resíduo, visando não apenas a gestão sustentável, mas também a redução da sua destinação ao aterro sanitário. Além disso, destaca-se a importância ambiental de diminuir o envio dessas cinzas ao aterro, contribuindo para a preservação do meio ambiente.

Nesse contexto, a pesquisa ganha relevância ao focar não apenas a problemática das cinzas resultantes da incineração, mas também ao reconhecer o valor agregado ao desenvolvimento de novas tecnologias para o tratamento do lixiviado proveniente dessas cinzas. A abordagem integrada desses aspectos busca não apenas soluções eficazes, mas também a promoção de práticas ambientalmente sustentáveis.

É pertinente ressaltar que esta pesquisa se insere nos projetos Mulheres Integradas 2021 do IFCE e Universal 2021, CNPq 408682/2021-3, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Essa integração destaca a colaboração entre diferentes esferas acadêmicas e de pesquisa, fortalecendo a base de conhecimento e a busca por soluções inovadoras e sustentáveis para os desafios relacionados à gestão de resíduos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a capacidade das cinzas provenientes da incineração de Resíduos Sólidos Perigosos (RSP) como elemento de filtração de lixiviados de aterros sanitários.

2.2 Objetivos específicos

Estabeleceu-se os objetivos específicos a seguir:

- a) Determinar, em laboratório, as características físicas e químicas das cinzas;
- b) Determinar, em laboratório, as características físicas e químicas do lixiviado de aterro sanitário pré e pós passagem pelas colunas de filtração preenchidas com areia (100%), areia e cinza (50%/50%) e cinzas (100%);
- c) Avaliar em que medida o lixiviado tratado atende aos padrões de lançamento (Conselho Estadual de Meio Ambiente - COEMA e Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA).

2.3 Objetivos complementares

Contribuir para ampliação do número de estudos sobre as cinzas da incineração de RSP, buscando sua valorização e redução do descarte em aterros sanitários.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Resíduos Sólidos Perigosos (RSP)

Os resíduos perigosos são aqueles que apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade (Brasil, 2010).

Conforme o Decreto Federal 10.936/2022 (Artigo 68) são enquadrados como geradores de resíduos perigosos todos aqueles cujo processo produtivo gere resíduos perigosos, cuja atividade envolva o comércio de produtos que possam gerar resíduos perigosos e cujo risco seja significativo, que prestem serviços que envolvam a operação com produtos que possam gerar resíduos perigosos e cujo risco seja significativo, que prestem serviços de coleta, transporte, transbordo, armazenamento, tratamento, destinação e disposição final de resíduos ou rejeitos perigosos, que exerçam atividades classificadas como geradoras ou como operadoras de resíduos perigosos em normas editadas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA, do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária - SNVS ou do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária - SUASA (Brasil, 2022).

Uma parte dos RSP são gerados em unidades de assistência à saúde humana ou animal, através do que se conhece como Resíduo de Serviço de Saúde - RSS. Os RSS são todos os resultantes de serviços relacionados com o atendimento à saúde humana ou animal, inclusive os serviços de assistência domiciliar e de trabalhos de campo; laboratórios analíticos de produtos para saúde; necrotérios, funerárias e serviços onde se realizem atividades de embalsamamento (tanatopraxia e somatoconservação); serviços de medicina legal; drogarias e farmácias inclusive as de manipulação; estabelecimentos de ensino e pesquisa na área de saúde; centros de controle de zoonoses; distribuidores de produtos farmacêuticos; importadores, distribuidores e produtores de materiais e controles para diagnóstico in vitro; unidades móveis de atendimento à saúde; serviços de acupuntura; serviços de tatuagem, entre outros similares (Brasil, 2018).

Conforme a Resolução da Diretoria Colegiada - RDC 222/2018, os RSS podem ser divididos em cinco grupos (A, B, C, D e E), assim entendidos:

GRUPO A - resíduos com a possível presença de agentes biológicos que, por suas características, podem apresentar risco de infecção [...];

GRUPO B - resíduos contendo produtos químicos que apresentam periculosidade à saúde pública ou ao meio ambiente, dependendo de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade, mutagenicidade e quantidade [...];

GRUPO C - qualquer material que contenha radionuclídeo em quantidade superior aos níveis de dispensa especificados em norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN - e para os quais a reutilização é imprópria ou não prevista;

GRUPO D - resíduos que não apresentam risco biológico, químico ou radiológico à saúde ou ao meio ambiente, podendo ser equiparados aos resíduos domiciliares [...];

GRUPO E - materiais perfurocortantes ou escarificantes, tais como: lâminas de barbear, agulhas, escalpes, ampolas de vidro, brocas, limas endodônticas, pontas diamantadas, lâminas de bisturi, lancetas; tubos capilares; ponteiros de micropipetas; lâminas e lamínulas; espátulas; e todos os utensílios de vidro quebrados no laboratório (pipetas, tubos de coleta sanguínea e placas de Petri) e outros similares.

Os geradores de RSS devem elaborar e cumprir um Plano de Gerenciamento, onde constarão informações sobre a segregação, identificação, acondicionamento, armazenamento, transporte, tratamento e disposição final (Brasil, 2010). O Artigo 21 prevê como conteúdo mínimo do Plano de Gerenciamento:

I - descrição do empreendimento ou atividade;

II - diagnóstico dos resíduos sólidos gerados ou administrados, contendo a origem, o volume e a caracterização dos resíduos, incluindo os passivos ambientais a eles relacionados;

III - observadas as normas estabelecidas pelos órgãos do SISNAMA, do SNVS, e do SUASA e, se houver, o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos:

a) explicitação dos responsáveis por cada etapa do gerenciamento de resíduos sólidos;

b) definição dos procedimentos operacionais relativos às etapas do gerenciamento de resíduos sólidos sob responsabilidade do gerador;

IV - identificação das soluções consorciadas ou compartilhadas com outros geradores;

V - ações preventivas e corretivas a serem executadas em situações de gerenciamento incorreto ou acidentes;

VI - metas e procedimentos relacionados à minimização da geração de resíduos sólidos e, observadas as normas estabelecidas pelos órgãos do SISNAMA, do SNVS e do SUASA, à reutilização e reciclagem;

VII - se couber, ações relativas à responsabilidade compartilhada pelo ciclo

de vida dos produtos [...];

VIII - medidas saneadoras dos passivos ambientais relacionados aos resíduos sólidos;

IX - periodicidade de sua revisão, observado, se couber, o prazo de vigência da respectiva licença de operação a cargo dos órgãos do SISNAMA [...].

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), desde a década de 90, fixa condições específicas para o armazenamento de resíduos perigosos (Norma Brasileira - NBR 12.235/1992) e não perigosos (NBR 11.174/1990). Conforme a NBR 12.235/1992, o acondicionamento de resíduos perigosos, como forma temporária de espera para reciclagem, recuperação, tratamento e/ou disposição final, pode ser realizado em contêineres, tambores, tanques e/ou a granel, a saber:

Os contêineres e/ou tambores devem ser armazenados, preferencialmente, em áreas cobertas, bem ventiladas, e os recipientes são colocados sobre base de concreto ou outro material que impeça a lixiviação e percolação de substâncias para o solo e águas subterrâneas. A área deve possuir ainda um sistema de drenagem e captação de líquidos contaminados para que sejam posteriormente tratados. Os contêineres e/ou tambores devem ser devidamente rotulados de modo a possibilitar uma rápida identificação dos resíduos armazenados. A disposição dos recipientes na área de armazenamento deve seguir as recomendações para a segregação de resíduos de forma a prevenir reações violentas por ocasião de vazamentos ou, ainda, que substâncias corrosivas possam atingir recipientes íntegros. Em alguns casos é necessário o revestimento dos recipientes de forma a torná-los mais resistentes ao ataque dos resíduos armazenados (Brasil, 1992).

Os tanques podem ser utilizados para o armazenamento de resíduos líquidos/fluidos, à espera do tratamento, da incineração ou da recuperação de determinados componentes do resíduo, o que muitas vezes ocorre em caráter temporário. Quanto à instalação e manutenção, os tanques de superfície são menos problemáticos do que os enterrados, onde a detecção de falhas, rupturas ou vazamentos é mais difícil. O uso de um tanque enterrado ou semi-enterrado é desaconselhável em face da possibilidade de vazamento e contaminação das águas subterrâneas. Dependendo do tipo de resíduo líquido, o seu armazenamento, em tanques, pode necessitar também de vários equipamentos acessórios como: abafador de faísca, corta-chama, respiradores de pressão e vácuo, válvula de alívio para conservação de calor, válvula de segurança interna, aterramento, sistema de contenção etc. Existem vários tipos de tanques de armazenamento (Brasil, 1992).

O armazenamento de resíduos sólidos perigosos, a granel, deve ser feito em construções fechadas e devidamente impermeabilizadas. É aceitável o armazenamento em montes sobre o solo, em grandes quantidades, desde que devidamente autorizado pelo órgão de controle ambiental. Na escolha do tipo de armazenamento, algumas características dos resíduos devem ser consideradas, assim como: densidade, umidade, tamanho da partícula, ângulo de repouso, ângulo de deslizamento, temperatura, pressões diferenciais, propriedades de abrasão e coesão, ponto de fusão do material e higroscopicidade. Devido às características de corrosividade de determinados resíduos, o depósito deve ser construído de material e/ou revestimento adequados. O armazenamento de resíduos em montes pode

ser feito dentro de edificações ou fora delas, com uma cobertura adequada, para controlar a possível dispersão pelo vento, e sobre uma base devidamente impermeabilizada (Brasil, 1992).

A indústria também é geradora de RSP e, diferentemente dos serviços de saúde, é capaz de produzir em grandes quantidades e com características bem diversas.

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), os resíduos industriais são aqueles gerados nos processos produtivos e instalações industriais, onde seus geradores se sujeitam à elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos industriais, como parte integrante do processo de licenciamento ambiental (art. 24, Lei nº 12.305/2010), e da implantação do sistema de logística reversa, quando couber (Brasil, 2023).

Alguns dos resíduos industriais, normalmente destinados à incineração, são resumidamente apresentados no Quadro 1, cuja elaboração teve como fonte informações obtidas em visita ao incinerador, junto a equipe técnica do CTRP, e literatura pertinente.

Quadro 1 - Exemplos de resíduos industriais passíveis de incineração

Rejeitos industriais	Resíduos sólidos ou líquidos que não podem ser reciclados ou reaproveitados, como embalagens contaminadas, filtros usados, equipamentos de proteção individual contaminados, lodos de tratamento de efluentes etc.
Lodo industrial	Resíduo gerado pela separação de fases sólida e líquida em processos industriais, como papel e celulose, siderurgia, mineração, entre outros, podendo conter substâncias orgânicas e inorgânicas, como metais pesados, óleos, graxas, corantes etc.
Solos contaminados	Solos que apresentam concentrações de substâncias químicas acima dos valores de referência estabelecidos pela legislação ambiental, como hidrocarbonetos, solventes, pesticidas, metais pesados etc. Podendo ser incinerados para remover as substâncias tóxicas e recuperar a qualidade do solo, ou como forma de destinação final ambientalmente adequada.
Defensivos agrícolas e suas embalagens	Produtos químicos e suas embalagens, utilizados na agricultura para combater pragas, doenças ou plantas daninhas nas culturas. Podendo ser incinerados para evitar a

	contaminação do solo, da água ou ainda como forma de eliminação de seus componentes ativos.
Resíduos Líquidos (Classe I e Classe II)	Líquidos que apresentam características de periculosidade (Classe I) ou não (Classe II), como solventes orgânicos, tintas, vernizes, óleos lubrificantes, detergentes etc.
Óleo ascarel	Óleo isolante utilizado em equipamentos elétricos, como transformadores e capacitores, contendo substâncias altamente tóxicas e cancerígenas, como bifenilas policloradas, capazes de acumular no organismo humano e nos ecossistemas.
Produtos controlados pela Polícia Civil, Polícia Federal e Exército Brasileiro	Produtos que possuem restrições legais quanto à sua fabricação, comércio, transporte ou uso, como armas de fogo, munições, explosivos, drogas ilícitas, medicamentos controlados etc.
Fármacos e reagentes químicos	Fármacos em geral e substâncias utilizadas em processos químicos, como análises laboratoriais, sínteses orgânicas, produção de fármacos etc.

Fonte: Autora (2023).

3.2 Incineração de resíduos

Segundo Mantonini e Mauro (2013) a incineração teve origem na Inglaterra por volta de 1876 e as primeiras instalações voltadas para o tratamento térmico de resíduos eram compostas por uma câmara de combustão que tinha como objetivo principal garantir certo grau de salubridade pública e prevenir epidemias, especialmente nas cidades mais populosas.

O processo de incineração é principalmente utilizado em locais com espaço de terra limitado e com altas densidades populacionais (Ghouleh; Shao, 2018). Além de reduzir o volume de resíduos pode produzir energia verde (Bosmans *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2018b).

A NBR 11.175/1990 define a incineração de resíduos sólidos como o processo de oxidação à alta temperatura que destrói ou reduz o volume ou recupera materiais ou substâncias (ABNT, 1990).

Uma publicação da Fundação Nacional de Saúde - FUNASA (2019) considera a incineração como um dos tratamentos, atuais, mais empregados para resíduos perigosos.

Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública (ABLP)

apontam que os primeiros incineradores instalados no Brasil foram, respectivamente, nas capitais do Amazonas (1896), Pará (1908) e São Paulo (1919), conforme Menezes; Gerlach; Menezes (2000).

De acordo com Cardozo, Mannarino e Ferreira (2021) a incineração no Brasil começa a ganhar espaço como alternativa de destinação de resíduos para regiões intensamente urbanizadas, como forma de otimizar a vida útil dos aterros sanitários e de proporcionar a recuperação de energia. Ainda segundo os autores, a incineração pode ser considerada uma atividade segura do ponto de vista ambiental, desde que, operada obedecendo rígidos padrões de controle.

Em 2020, o Brasil coletou 289,915 toneladas de RSS em seus municípios e desse total 4,8% receberam tratamento por micro-ondas, 21,6% por autoclave e 33,4% por incineração; os demais resíduos foram destinados pelos municípios sem nenhum tratamento prévio, em desacordo com as normas pertinentes e proporcionando riscos aos trabalhadores, saúde pública e meio ambiente (Abrelpe, 2021).

De acordo com Ghoulé e Shao (2018), o processo de incineração gera cinzas volantes e de fundo. Cerca de 80% das cinzas são de fundo, que contém menor quantidade de substâncias tóxicas, metais pesados e cloreto em comparação com as cinzas volantes (Li *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2018b).

Uma publicação feita pela *Confederation of European Waste-to-Energy Plants* (2019) aponta que a incineração é amplamente utilizada nos países europeus. Na Finlândia, por exemplo, 59% dos resíduos coletados são incinerados, na Dinamarca e Suécia (53%), nos Países Baixos e Luxemburgo (44%). O Japão, conforme Saffarzadeh, Arumugam e Shimaoka (2016), incinera 75% dos resíduos coletados. É importante lembrar que a incineração implica em investimento financeiro elevado, alto custo de operação e manutenção e exigência de mão-de-obra especializada (Schalch *et al.*, 2002).

No Brasil, os custos da incineração ficam ainda maiores porque os equipamentos precisam ser licenciados mediante elaboração e aprovação de um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente (RIMA), conforme a Resolução do CONAMA 01/1986 (Brasil, 1986) e 237/1997 (Brasil, 1997).

De acordo com o Artigo 62, XI, Decreto Federal 6.514/2008, a multa por colocar em funcionamento um equipamento de incineração sem o devido licenciamento ambiental pode variar de R\$ 5.000,00 (cinco mil reais) a R\$ 50.000.000,00 (cinquenta

milhões de reais), dependendo do dano decorrente da infração e em conformidade com a gradação do impacto causado ao meio ambiente (Brasil, 2008).

3.3 Cinzas provenientes da incineração

Cinzas e gases são descritos como os principais subprodutos resultantes do processo de incineração (Patra; Whaung; Kwan, 2017). Tais subprodutos devem atender a padrões rigorosos para que não se tornem uma fonte de impacto significativa (Cardozo; Mannarino; Ferreira, 2021).

A disposição das cinzas da incineração em aterros sanitários é proibida na Holanda (Tang; Florea; Brouwers, 2017) e, em Singapura, há um significativo interesse na reutilização dessas cinzas, devido à escassez de terras e recursos (Liu *et al.*, 2018a).

A utilização de cinzas de incineração em novos processos proporciona economia de custos com novos materiais (Yin *et al.*, 2018). Existem pesquisas que empregaram as cinzas como material cimentício suplementar na produção de concreto (Liu *et al.*, 2018a), como agente formador de gás para a produção de geopolímero aerado leve (Zhu *et al.*, 2018b) e para geração de gás hidrogênio como compensação dos impactos adversos da incineração (Saffarzadeh; Arumugam; Shimaoka, 2016).

Por meio de processos hidrotérmicos, as cinzas podem se transformar em uma fonte de minerais (Hu *et al.*, 2015). Tal fração mineral pode ser utilizada na indústria da construção, substituindo agregantes e materiais naturais (Allegrini *et al.*, 2015).

A pesquisa de Liu *et al.* (2018b) mostrou que as cinzas também são capazes de remover o azul de metileno presente em alguns efluentes.

Por determinação da CONAMA 316/2002 (Artigo 43, §1º), as cinzas e escórias provenientes do processo de tratamento térmico devem ser consideradas, para fins de disposição final, como resíduos Classe I - Perigoso ou ainda (§ 2º), o órgão ambiental poderá autorizar a disposição das cinzas e escórias como resíduos Classe IIA (não perigoso, não inerte) e Classe IIB (não perigoso, inerte), se comprovada sua inertização pelo operador.

Gupta *et al.* (2021) destacam a importância de uma avaliação sistemática das propriedades (físicas, químicas e mecânicas) das cinzas resultantes da incineração de resíduos, para o desenvolvimento e compreensão do material, assim como, para a

compreensão de sua natureza variável devido à composição dos resíduos incinerados.

Dijkstra *et al.* (2019) defendem a necessidade de criação de padrões específicos de classificação para os materiais antropogênicos com base em suas propriedades litológicas específicas, já que os padrões de classificação utilizados, em sua grande maioria, foram desenvolvidos principalmente para sedimentos naturais.

Em geral, as cinzas de RSU são quimicamente diferentes da composição de outros tipos de escórias (cinzas de carvão mineral e lodo) porque apresentam metais pesados diversos e o alto teor de perda ao fogo (Mendonça, 2018).

3.4 Lixiviados provenientes de aterros sanitários

Em 1992, a NBR 8.419 definiu a lixiviação como o deslocamento ou arraste, por meio líquido, de certas substâncias contidas nos resíduos sólidos urbanos.

Renou *et al.* (2008) definiram lixiviado como um efluente aquoso gerado como consequência da percolação da água da chuva através dos resíduos, dos processos bioquímicos nas células dos resíduos e do conteúdo de água inerente aos próprios resíduos, o qual, pode conter grandes quantidades de matéria orgânica, formada por constituintes do tipo húmico, nitrogênio amoniacal, metais pesados, sais orgânicos clorados e inorgânicos.

Conforme Iwai (2005), a formação do lixiviado recebe influência de variáveis como: umidade natural, matéria orgânica existente na massa de resíduo e sua degradação (por bactérias e suas enzimas), precipitação natural da região de deposição, acréscimo de umidade de fontes naturais ou artificiais, grau de compactação e profundidade de aterramento sob a qual foi submetido a massa de resíduo, tempo de aterramento, temperatura etc.

Na produção do lixiviado em aterro sanitário, a matéria orgânica passa por uma série de vias de degradação e fases. Na fase acidogênica, para aterros jovens, que contêm grandes quantidades de matéria orgânica biodegradável, essa degradação é reforçada por um alto teor de umidade ou água nos resíduos sólidos, sendo responsável pela liberação de grandes quantidades de ácidos graxos voláteis (AGV), podendo ser composto de até 95% do conteúdo orgânico; já na fase metanogênica, em um aterro maduro, os AGVs são convertidos em biogás ou, quando não ocorre a conversão completa da matéria orgânica, resulta em uma alta carga de compostos recalcitrantes e tóxicos na composição final do lixiviado (Wang; Smith; El-Din, 2003;

Renou *et al.*, 2008).

A caracterização do lixiviado (físico-química e microbiológica) poderá fornecer informações sobre os tipos de resíduos aterrados, em que fase se encontra sua decomposição, além, de poder indicar um tratamento que apresente uma melhor eficiência na remoção de agentes poluidores (Lôbo, 2006).

As características dos lixiviados de aterros sanitários, em função da heterogeneidade dos resíduos dispostos e da idade do aterro, tornam o tratamento deste resíduo desafiador sendo, portanto, a determinação de técnicas efetivas de tratamento, uma operação delicada em decorrência da variabilidade de volumes e concentrações apresentadas (Castilhos Junior; Dalsasso; Rohers, 2010).

O tratamento de lixiviados é uma condição necessária para a redução de impactos ambientais negativos, não somente para atendimento da legislação ou reuso da água, mas também na recuperação dos recursos (Lebron *et al.*, 2021).

Conforme observado por Reis (2014) há um enorme obstáculo para o tratamento convencional do lixiviado, devido à complexidade da composição e natureza recalcitrante deste, ainda mais, quando potencializado pelo envelhecimento dos aterros e o aumento da rigidez dos padrões de lançamento.

Carard (2018) destaca que os tratamentos comumente empregados (biológicos e físico-químicos) demonstram dificuldades em sua remediação, podendo não garantir um descarte seguro e colocando em risco o meio ambiente e a saúde humana. Alguns dos tratamentos utilizados para lixiviados de aterro sanitário são resumidamente apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Tratamentos utilizados para lixiviados de aterro sanitário

Tratamento	Descrição
Coagulação-Floculação	A coagulação/floculação é o processo que tem por objetivo remover o material coloidal e partículas muito finas que sedimentam muito lentamente. Esse material coloidal pode ser formado por microrganismos, gorduras, proteínas e argilas, estando o diâmetro da partícula na faixa entre 0,1 e 0,01 μm .
Precipitação de Estruvita	A remoção de compostos químicos por precipitação é uma estratégia bastante utilizada no tratamento de efluentes. Somado a isto, uma das formas mais efetivas para remoção de nitrogênio amoniacal é na forma de fosfato de amônia e magnésio hexahidratado ou também

	conhecido como estruvita.
Tratamento Biológico	Estes tratamentos visam converter a matéria orgânica biodegradável dos efluentes em gases, sólidos inorgânicos (como sulfatos, hidróxidos etc.) e material biológico sedimentável. Os principais e mais utilizados processos biológicos são: lodos ativados, lagoas aeradas, lagoas de estabilização, filtros biológicos e digestores anaeróbios.
Adsorção em Carvão Ativado	A adsorção de compostos orgânicos em carvão ativado é uma das tecnologias mais utilizadas para tratamento de efluentes industriais. Além desses compostos, o processo de adsorção em carvão ativado pode ser empregado na redução de micropoluentes orgânicos e metais pesados, por exemplo, prata e mercúrio são completamente removidos enquanto o chumbo e o cobre são reduzidos a níveis aceitáveis.
Processo de Separação por Membrana	A membrana é a característica comum em todos os processos de separação por membranas e é definida como uma barreira seletiva que existe entre duas fases, sendo em sua maioria constituídas de material polimérico que pode ter origem orgânica ou inorgânica. Os tipos de filtração mais utilizados são: filtração por gravidade, filtração pressurizada, filtração direta e filtração tangencial.
Microfiltração	Processo composto por membranas com tamanho de poros entre 0,1 e 10 μm , é bastante utilizada, por exemplo, para esterilização bacteriana, concentração de células, clarificação, entre outros. Este processo permite que a fase emulsionada e os sólidos suspensos sejam retidos na fase de tratamento preliminar ou em tratamentos mais avançados como fase de polimento, principalmente devido à sua capacidade de reter microrganismos e sólidos em suspensão.
Ultrafiltração	A ultrafiltração é muito similar a microfiltração, opera com o tamanho de poros entre 0,001 e 0,1 μm . É mais comumente usada para tratamento de água para abastecimento em razão do menor consumo de energia elétrica e maior eficiência na remoção de matéria orgânica em função do peso molecular de corte. Além disso, este processo apresenta preferência em relação a microfiltração devido sua maior capacidade de separação para vírus e coloides.

Nanofiltração	É um processo intermediário entre a ultrafiltração e a osmose inversa. Bastante utilizado para purificação de enzimas, íons da água e em biorreatores a membranas, sendo comumente utilizado em tratamento de água, efluentes (lixiviado), no setor de alimentos, farmacêuticas e biomédicas e no de óleo e gás.
Osmose Inversa	Procedimento para remoção de sais da água utilizando membranas permeáveis a água, mas fundamentalmente impermeáveis a sais.
Processos Oxidativos Avançados	Baseiam-se na utilização de espécies altamente oxidantes a fim de promover uma degradação mais efetiva dos poluentes. Podem ser utilizados em conjunto com outros processos, como por exemplo, o processo biológico aumentando a biodegradabilidade do efluente tratado e reduzindo o tempo necessário para tratamentos por processos biológicos tradicionais.
Processo Fenton	É caracterizado pelo uso do peróxido de hidrogênio e sais de ferro. Entre outras vantagens pode-se citar seu baixo custo e alta eficiência. Desta forma, este processo consiste em um conjunto de reações cíclicas que utilizam os íons Fe^{2+} e os íons Fe^{3+} como catalisadores com o objetivo de decompor o peróxido de hidrogênio e produzir então radicais hidroxila.
Processo Foto-Fenton	O processo Foto-Fenton funciona de maneira similar ao processo Fenton, no entanto, utiliza irradiação no seu processo e gera pouquíssimo ou nenhum poluente para o meio ambiente.
Ozonização	É um processo oxidativo avançado e tem servido como uma excelente alternativa para o tratamento de efluentes industriais e água para consumo mostrando-se bastante eficaz no processo de descontaminação ambiental. No tratamento do lixiviado, a ozonização pode alterar a estrutura molecular dos compostos orgânicos refratários transformando-os em compostos de fácil assimilação biológica. Além disso, tem se mostrado capaz de destruir compostos recalcitrantes em efluentes e provocar alterações na biodegradabilidade.

Fonte: Adaptado de Vicente (2021).

Conforme Costa, Alfaia e Campos (2019), o grande desafio é desenvolver um tratamento para o lixiviado que concilie a implantação de tecnologias eficientes, que

atendam aos padrões legais e ambientais estabelecidos, porém, que se adequem a realidade de todos os municípios brasileiros. Ainda segundo os autores, falta disponibilidade de dados e fiscalização acerca do desempenho dos sistemas de tratamento de lixiviado ao longo da vida dos aterros sanitários brasileiros.

Segundo o Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), a caracterização criteriosa do lixiviado de aterro sanitário evidencia a complexidade para o seu tratamento, sendo, a caracterização por meio de parâmetros específicos importante como auxílio na tomada de decisões técnicas que atendam padrões tecnológicos mais simplificados com adequabilidade econômica e legal.

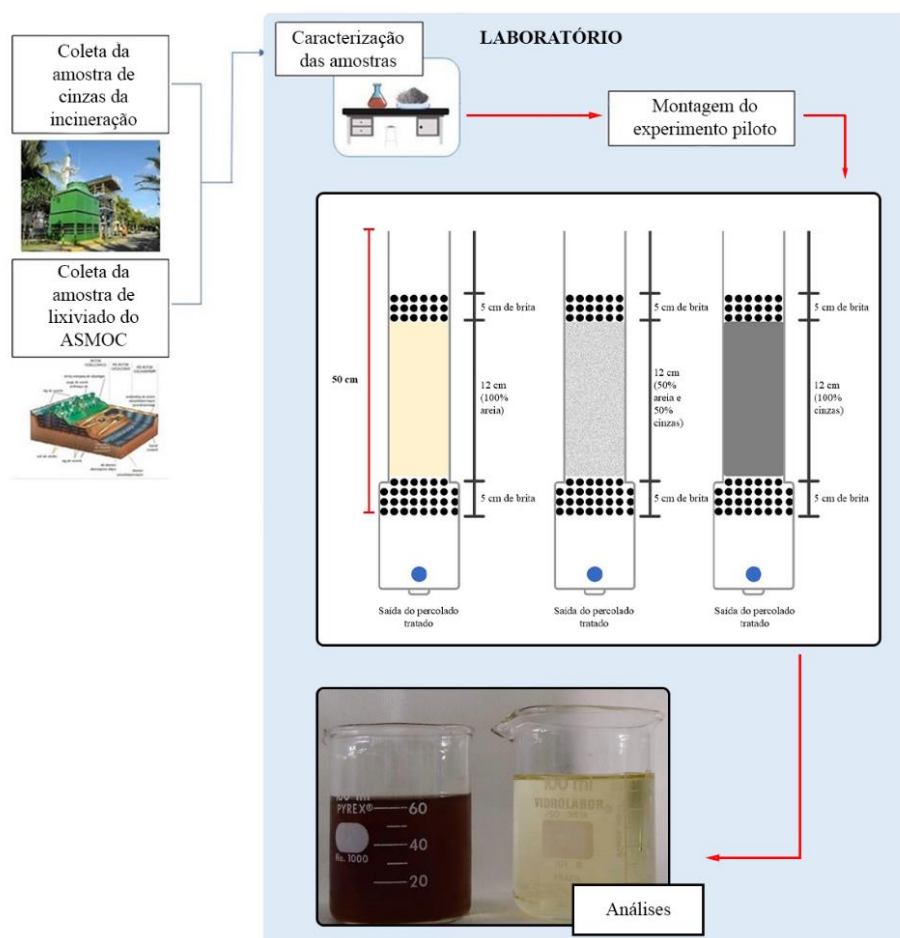
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição de etapas e da área estudada

A pesquisa foi desenvolvida em 05 grandes etapas (resumidas na Figura 1), sendo:

1. Coleta das amostras de cinzas da incineração de RSP e dos lixiviados do novo Aterro Sanitário de Caucaia;
2. Caracterização física e química das amostras de cinzas e lixiviados em laboratório;
3. Montagem do experimento piloto (colunas de filtração);
4. Alimentação do sistema com lixiviado bruto;
5. Análise laboratorial dos lixiviados pré e pós passagem nas colunas de filtração.

Figura 1 - Fluxograma esquemático das grandes etapas da pesquisa



Fonte: Autora (2022).

As amostras das cinzas foram coletadas no incinerador de resíduos existente no Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos (CTRP); inaugurado em 2001 e sob operação do Grupo Marquise Ambiental. O equipamento fica localizado na Rua Estrada do Itaperi, nº 745, Bairro Jangurussu, em Fortaleza-CE. A Figura 2 mostra partes do incinerador.

Figura 2 - Vistas parciais do incinerador de Fortaleza/CE



Fonte: Autora (2022).

O incinerador tem tecnologia alemã, é do tipo leito fluidizado, funcionando com duas câmaras de 900 e 1000°C (Viana, 2013). De acordo com Silva, Rilton (2017), os resíduos são submetidos à queima na câmara primária e os gases, resultantes desse processo, tratados na câmara secundária (Figura 3).

Figura 3 - Área de deposição dos resíduos perigosos (fosso)



Fonte: Autora (2022).

Os gases gerados no processo de incineração, passam, em contracorrente e sob pressão, por uma lavagem alcalina (1º tanque) e ácida (2º tanque), por um filtro de carvão (para redução de odores, dioxinas e furanos) e por um filtro de manga (para retenção de material particulado) antes de serem lançados na atmosfera, como forma de reduzir os danos ao meio ambiente e em observância a legislação pertinente, especialmente, a Resolução CONAMA nº 316/2002.

A lavagem dos gases gera um efluente que, juntamente com os demais líquidos gerados pela torre de resfriamento, seguem para um tanque de equalização e, na sequência, são conduzidos até uma Estação de Tratamento de Efluentes interna (Figura 4), onde passam por processos físico-químicos e por osmose reversa, permitindo o reaproveitamento da água no próprio CTRP, mantendo, desta forma, um ciclo fechado.

Figura 4 - Vistas parciais da ETE da CTRP

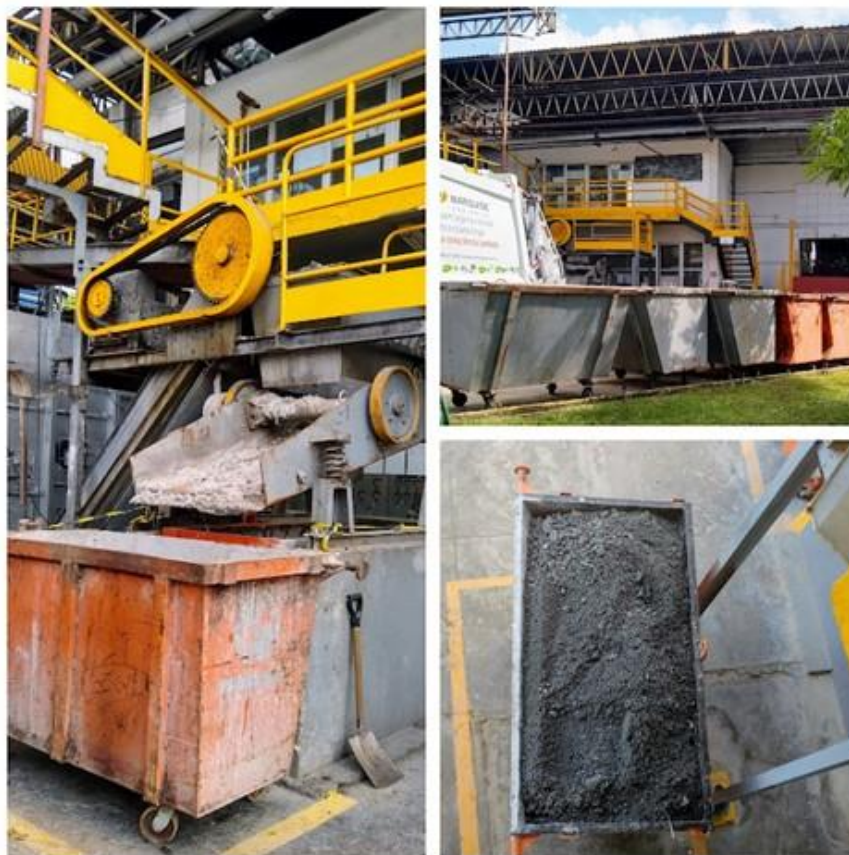


Fonte: Autora (2022).

Do total recebido, 98% são resíduos provenientes de unidades públicas e privadas de assistência à saúde humana e animal localizadas em Fortaleza e Região Metropolitana (chamados de Resíduos de Serviços de Saúde - RSS). Os demais resíduos, 2%, são constituídos por Resíduos Sólidos Industriais - RSI diversos.

Dentro do CTRP, os resíduos são pesados, encaminhados ao fosso e posteriormente despejados sobre a esteira do incinerador, indo ao forno. As cinzas de fundo são removidas pelo arrastador de cinzas; em seguida são peneiradas e enviadas em esteiras até um contêiner (Figura 5) que, após cheio, é encaminhado para o novo Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia - ASMOC.

Figura 5 - Contêiner para acondicionamento das cinzas do CTRP



Fonte: Autora (2022).

O novo ASMOC pode ser acessado pelas Rodovias BR - 222 e BR - 020. O equipamento conta com 101,7 hectares, dos quais 73,3 são destinados para recebimento dos resíduos. Em 2022, o aterro recebeu 2.122.084,99 toneladas de resíduos sólidos urbanos, conforme informação recebida por e-mail de um técnico da Autarquia de Regulação, Fiscalização e Controle dos Serviços Públicos de Saneamento Ambiental (ACFOR). As amostras de lixiviado que fizeram parte da pesquisa foram obtidas na 2ª lagoa de estabilização (Figura 6).

Figura 6 – Localização da 2ª lagoa de estabilização do ASMOC



Fonte: Adaptado de Google Earth (2022).

4.2 Descrição dos Procedimentos

4.2.1 Com as cinzas

As amostras de cinzas foram coletadas de um contêiner existente dentro do CTRP, seguindo as recomendações de amostragem da NBR 10.007/2004 (ABNT, 2004) e enviadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC).

No laboratório, os materiais extremamente grosseiros e não queimados (cacos de vidro, pedaços de metais, agulhas, fios ortodônticos, lâminas de bisturi) foram manualmente retirados (catados) das amostras (Figura 7). Materiais grosseiros também foram observados por Andrade (2012), correspondendo a 34% da amostra analisada e por Gupta *et al.* (2021): entre 10 e 20% da fração mais grossa das amostras. Em seguida, as cinzas passaram por secagem ao ar livre por 24h e depois foram quarteadas.

Figura 7 - Materiais grosseiros retirados das amostras de cinzas de RSP



Fonte: Autora (2022).

Na ausência de normas específicas para caracterização de materiais antropogênicos, como já observado por Dijkstra *et al.* (2019), utilizou-se de métodos e normas técnicas usualmente empregados em amostras de solos, conforme programação descrita na Tabela 1.

Tabela 1 - Programação de análise das cinzas de RSP

Análise	Referência/Método	Local
Granulometria (05 amostras)	NBR 7181/2018	Laboratório de Mecânica dos Solos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC
Compactação Proctor Normal (05 amostras)	NBR 7182/2020	
Teor de Umidade Natural da Amostra (05 amostras)	Estufa a 60-65°C por 24h	
Massa Específica do Grão (05 amostras)	NBR 6508/2017	
Permeabilidade com Carga Variável (02 amostras)	NBR 14545/2021	
Permeabilidade com Carga Constante (02 amostras)	NBR 13292/2021	
Composição Química Elementar (05 amostras)	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X	Laboratório de Raios- X Departamento de Física, UFC
Identificação das fases cristalinas (05 amostras)	Difração de raios-X	
Propriedades de forma no <i>A/MS</i> (02 amostras)	Norma DNIT 432/2020 - ME	Laboratório de Geologia do Departamento de Geologia, UFC

Fonte: Autora (2022).

A composição química elementar e a identificação das fases cristalinas foram realizadas em 04 amostras passantes na peneira 0,075 mm, Figura 8.

A espectrometria de Raio-X (FRX) correlaciona a intensidade dos raios X característicos dos elementos químicos com seu teor na amostra e que emprega as propriedades ondulatórias das radiações fazendo uso de uma estrutura cristalina para discriminar os diversos comprimentos de onda presentes nos feixes de Raio-X, além de quantificar a intensidade da radiação selecionada para cada elemento químico através de detectores, de acordo com a NBR ISO 12.677/2014.

O ensaio de difração de Raio-X foi realizado com objetivo de complementar os resultados encontrados nas análises de FRX e fazer conhecer as fases que compõem os materiais.

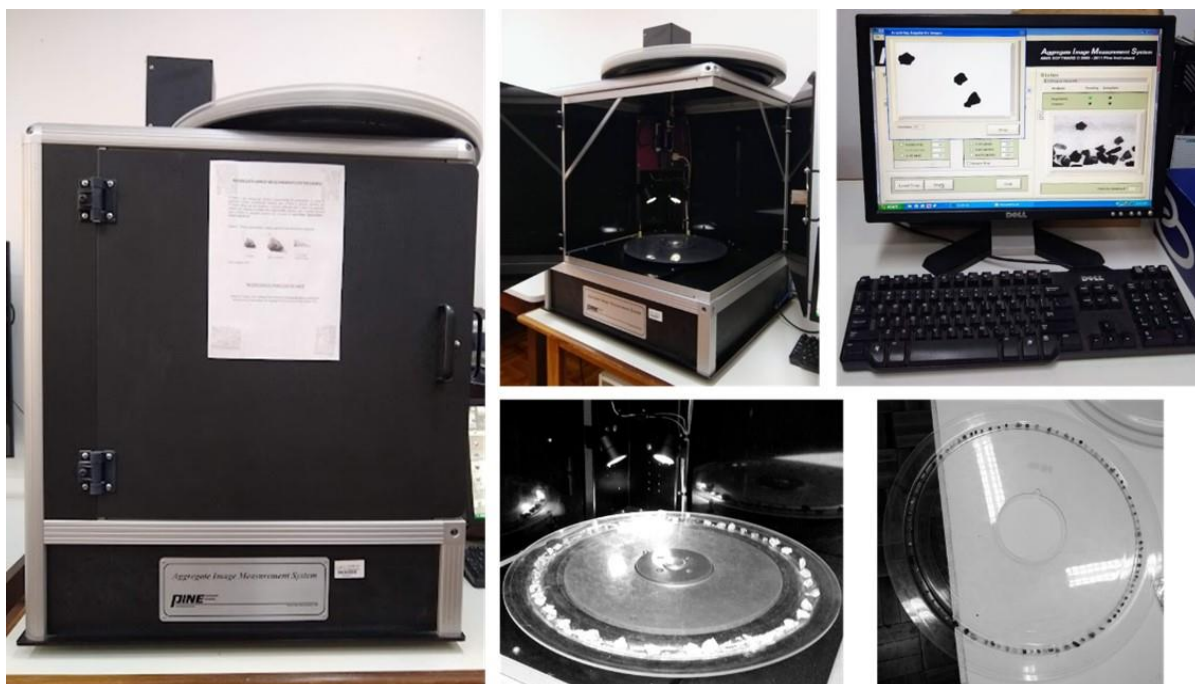
Figura 8 - *Eppendorfs* com amostras de cinzas de RSP para análise FRX e DRX



Fonte: Autora (2022).

A esfericidade, forma, textura e angularidade das cinzas foram investigadas através do Processamento Digital de Imagens (PDI) por meio do *Aggregate Image Measurement System* - AIMS. Para a análise, foram utilizadas as cinzas pertencentes a quarta (am4) e quinta amostras (am5) de cinzas e o resultado obtido foi interpretado conforme a metodologia de classificação proposta por Al Rousan (2004). Parte dos ensaios foram registrados na Figura 9.

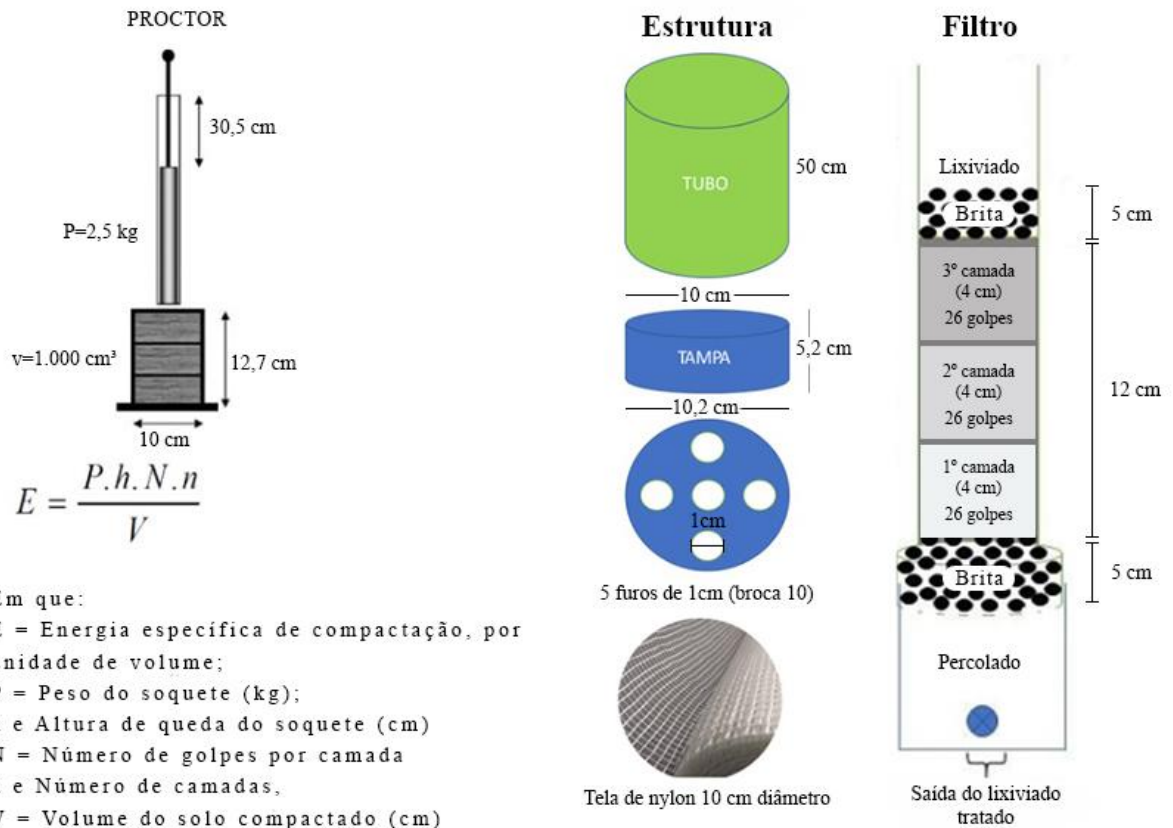
Figura 9 - Imagens do ensaio sobre a forma das cinzas com o uso do AIMS



Fonte: Autora (2022).

Após caracterização física e química das cinzas de RSP, realizou-se a montagem dos filtros. Foram montadas 6 colunas de filtração com tubos de PVC de 10 cm de diâmetro e 50 cm de altura. Na parte inferior do tubo foi instalada uma tampa (cap) de PVC devidamente furada para permitir a saída do lixiviado passante. Dentro do tubo foi utilizada cinza bruta sem os materiais grosseiros (catados). Foram colocadas 03 camadas de 4,0 cm de material dentro do tubo e sobre cada camada aplicou-se a compactação com energia do Proctor Normal, 26 golpes. Também foram colocadas britas lavadas, com granulometria entre 9,5 e 12,5 mm, como camada drenante (sob e sobre os meios filtrantes) e tela de nylon (10 cm de diâmetro e abertura 1,11 mm), conforme a Figura 10. Assim, o experimento ficou com 2 colunas de filtração com 100% de areia (com granulometria entre 0,6 e 1,18 mm), 2 colunas com 50% de areia e 50% de cinza (cinza da quinta amostra) e 2 colunas com 100% de cinza (cinza da quinta amostra), Figuras 11 e 12. Cabe salientar que entre as fases 1 e 2 da etapa de filtração, houve a remontagem dos meios filtrantes, utilizando-se a mesma metodologia e recursos anteriormente empregados em cada um dos filtros. O procedimento foi necessário pelo longo tempo entre as campanhas em decorrência do tempo de análise, interpretação dos resultados, qualificação da pesquisa, uso de uma nova amostra de lixiviado bruto etc.

Figura 10 - Detalhamento da montagem dos filtros do experimento piloto



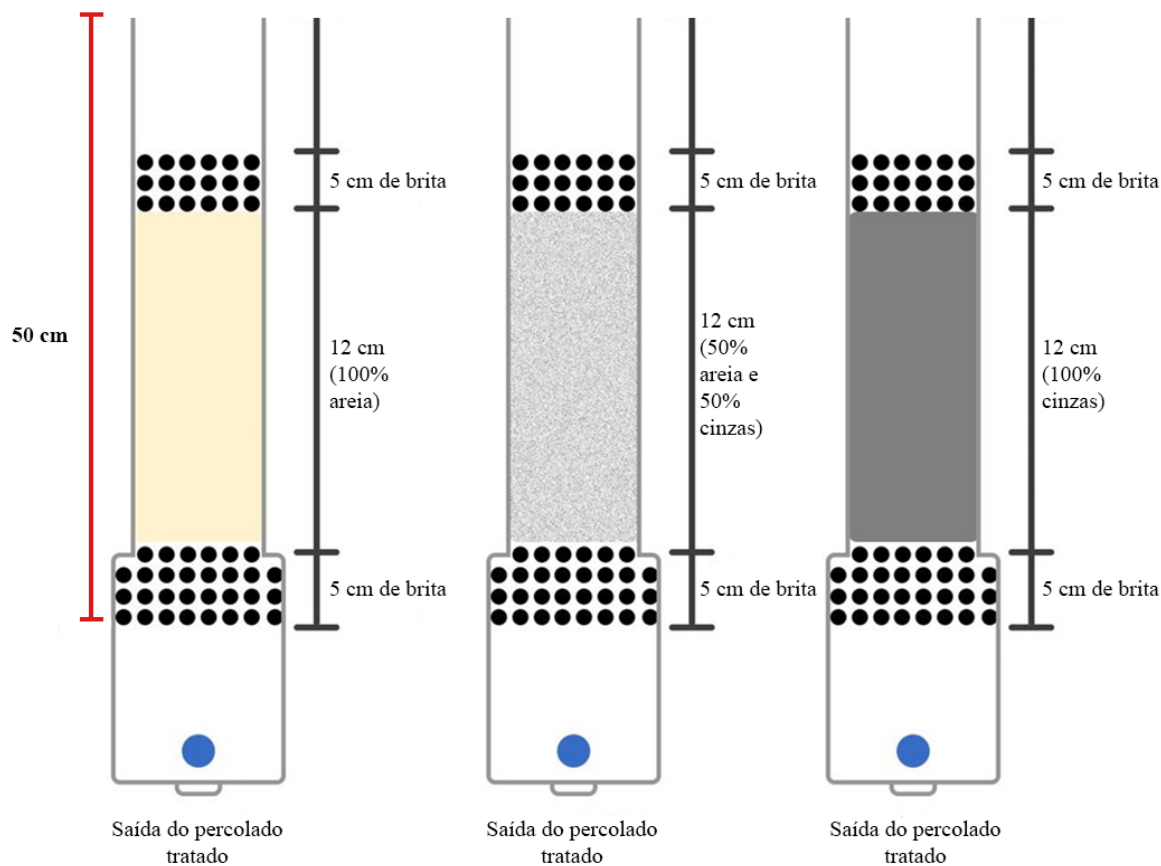
Fonte: Autora (2022).

Figura 11 - Imagem do experimento



Fonte: Autora (2022).

Figura 12 - Detalhamento interno das colunas de filtração



Fonte: Autora (2022).

4.2.2 Com o *lixiviado bruto e tratado*

O experimento se deu em duas fases. Em cada fase, foram realizadas duas campanhas completas, ou seja, fase 1 (1ª e 2ª campanhas), fase 2 (3ª e 4ª campanhas).

O *lixiviado bruto* foi coletado na 2ª lagoa de estabilização do novo Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia, em ambas as fases.

Em cada fase, uma amostra do *chorume bruto* (2 L) foi enviada para análise no mesmo dia da coleta. Cada filtro foi abastecido com outros 2 L do *lixiviado bruto* (1ª, 2ª, 3ª e 4ª campanhas), com refrigeração da amostra entre as campanhas. O filtrado foi recolhido após 24h após abastecimento e passagem pelas colunas de filtração e encaminhados ao laboratório para análises.

No laboratório no Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC) foram determinados os seguintes parâmetros: cloreto, cor aparente, Demanda Química de Oxigênio - DQO, fósforo, materiais sedimentáveis, nitrogênio

amoniaco, nitrito, nitrato, óleos e graxas, pH, sólidos dissolvidos, sulfato, sulfeto e turbidez segundo o método o *Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater*, tanto para amostra bruta do lixiviado, como para a amostra passante em cada filtro (F1, F2 e F3). Os filtros foram alimentados em 04 campanhas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Granulometria

A análise granulométrica demonstrou que as cinzas de fundo - provenientes da incineração de RSP em Fortaleza-CE - apresentaram 20,8% de material semelhante aos pedregulhos, 24,8% semelhante com a areia grossa, 23% (areia média), 13,6% (areia fina), 17,6% do(a)s siltes/argilas, portanto, a cinza tem dimensão semelhante a areia (61,4%), podendo indicar a formação de macroporos e dutos que possibilitam uma boa capacidade de infiltração, Figura 13.

Os resultados do peneiramento, de 5 amostras de cinza, foram reunidos na Tabela 2 e suas curvas granulométricas encontram-se plotadas na Figura 14.

Figura 13 - Imagens do ensaio de granulometria



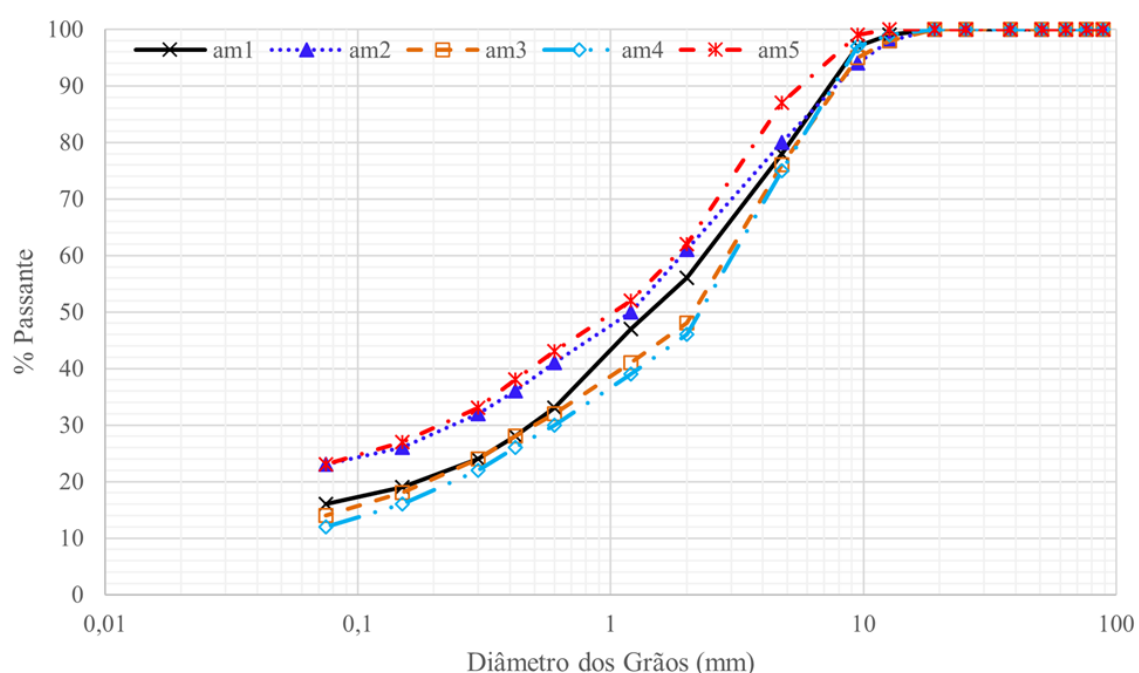
Fonte: Autora (2022).

Tabela 2 - Composição granulométrica das cinzas

Composição	Amostras (am)					Média	CV
	am1	am2	am3	am4	am5		
Pedregulho (%)	22	20	24	25	13	20,8	21
Areia grossa (%)	22	19	28	29	26	24,8	15
Areia média (%)	27	25	20	19	24	23	13
Areia fina (%)	12	13	14	14	15	13,6	7,5
Silte /Argila (%)	16	23	14	12	23	17,6	26

Fonte: Autora (2022).

Figura 14 - Curvas com distribuição granulométrica das cinzas de RSP



Fonte: Autora (2022).

Nas pesquisas de Bastos *et al.* (2021), Lino (2022) e Correia (2022), todas realizadas em Fortaleza-CE, o material semelhante a areia foi, respectivamente, 53,0%, 63,5% e 22,0%.

Dourado (2013), em um estudo para a avaliação da aplicabilidade de cinzas de fundo de RSU em camadas de pavimento, assim como Vizcarra (2010), ao estudar a aplicabilidade de cinzas de RSU para base de pavimentos, constataram que 63% das cinzas analisadas apresentavam características granulométricas semelhantes a areia siltosa.

Ao estudar a caracterização das cinzas de incineração de RSS para inserção em ciclos produtivos e ambientais, Mendonça (2018) obteve uma curva granulométrica com predominância de distribuição entre as faixas de menor diâmetro,

variando de 0,3 mm a 0,6 mm, classificando-a como semelhante à areia média.

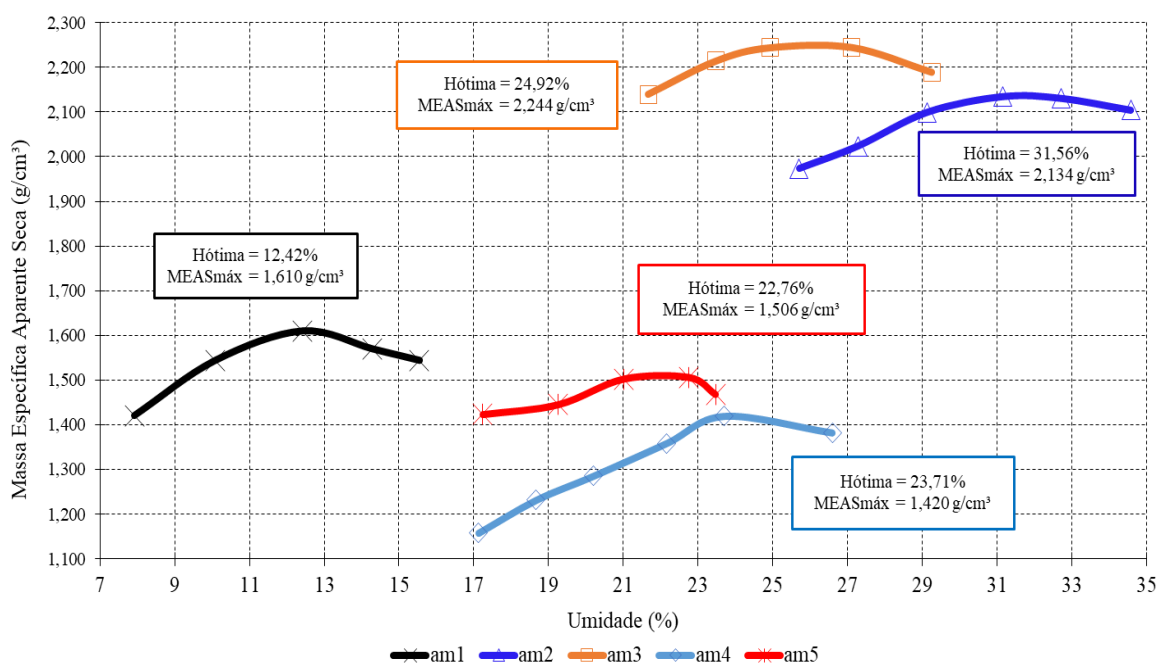
Gupta *et al.* (2021), ao estudar as cinzas residuais de incineração de RSU como substituto de materiais convencionais em aplicações geotécnicas, classificaram as amostras como essencialmente uma mistura de areia e cascalho com finos não plásticos.

Alam, Singh e Kumar (2021) demonstraram que 92% das partículas de cinzas encontravam-se na faixa de 2,36 a 75 mm, obtendo a classificação de material mal graduado.

5.2 Compactação

O ensaio de Proctor Normal, realizado nas 5 amostras de cinzas, apontou para uma Massa Específica Aparente Seca Máxima ($MEAS_{m\acute{a}x}$) de 1,783 g/cm³ (média) e 23,1% da Umidade Ótima ($H\acute{o}tima$), conforme a Figura 15 e 16.

Figura 15 - Curvas de compactação das cinzas de RSP



Fonte: Autora (2022).

Figura 16 - Imagens do ensaio de compactação



Fonte: Autora (2022).

Em termos gerais, a morfologia das curvas de compactação das cinzas de RSP lembram as curvas de compactação de solos arenosos (Soares, 2021) e as de RSU (Silva, Roberto, 2017).

Características como a forma dos grãos, que confere uma menor densidade (Vizcarra, 2010) e a porosidade (Dijkstra *et al.*, 2019; Gupta *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2022; Alam; Singh; Kumar, 2022) podem justificar a grande variação nos valores encontrados.

Para efeito comparativo, os parâmetros de compactação também foram determinados na areia utilizada no Filtro 1 do experimento piloto, alcançando Massa Específica Aparente Seca Máxima de $1,570 \text{ g/cm}^3$ e Umidade Ótima de 7,09%. Quando a areia foi misturada com a cinza (para compor o Filtro 2), os valores foram maiores: $1,659 \text{ g/cm}^3$ e 15,38%. Alguns resultados da literatura foram reunidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados da literatura para a compactação de cinzas de RSP

Autor(es)/ano	MEAS _{máx} (g/cm ³)	CV (%)	H _{ótima} (%)	CV (%)
Dados obtidos	1,331 - 2,244	21	12 - 32	30
Silva e Lange (2008)	1,93 - 2,18		-	
Lin <i>et al.</i> (2015)	-		15	
Alam, Singh e Kumar (2021)	1,7	22	19	25
Mendonça (2018)	2,03		-	
Bastos <i>et al.</i> (2021)	1,35		29	
Gupta <i>et al.</i> (2021)	1,36 - 1,64		16 - 23	

Fonte: Autora (2022).

Os parâmetros de compactação evidenciaram a heterogeneidade das cinzas, especialmente, quanto os valores observados para a H_{ótima} (CV de 30 e 25%, Tabela 2). Essa variação pode ser associada a vários fatores: composição química, granulometria, densidade e porosidade das cinzas, podendo ainda, sofrer variação de acordo com a tecnologia empregada para essa caracterização (Silva; Lange, 2008; Carvalho *et al.*, 2022).

Como demonstrado na Tabela 3, os valores obtidos para a MEAS_{máx} apresentaram um coeficiente de variação (CV) de 21,25%; próximo ao observado pela literatura: 21,86%. O mesmo comportamento foi observado para a H_{ótima}, quando se obteve coeficiente de variação de 29,82% enquanto a literatura cita 24,92%.

5.3 Densidade real

Os resultados dos ensaios de densidade real das cinzas, Figura 17, variaram entre 2,065 e 2,367, revelando dados homogêneos (CV de 6%) entre as amostras e análogos à literatura, Tabela 4. A areia utilizada no experimento apresentou 2,656 e a mistura areia e cinza: 2,546.

Tabela 4 - Densidade real das cinzas de RSU na literatura

Autor(es)/ano	Resultado	CV (%)
Dados obtidos	2,065 - 2,367	6
Alencar (2022)	1,76	
Alam, Singh e Kumar (2021)	2,07	
Mendonça (2018)	2,03	12
Pinto (2018)	2,06	
Vizcarra (2010)	2,43	

Fonte: Autora (2022).

Figura 17 - Imagens do ensaio para determinação da densidade real



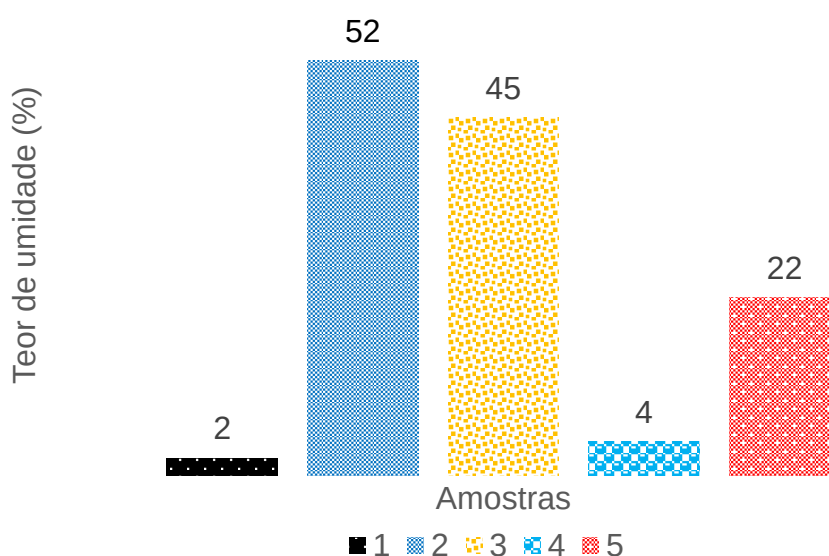
Fonte: Autora (2022).

Conforme a Tabela 4, os valores obtidos para os ensaios de densidade real apresentaram coeficiente de variação de 6%, o que demonstra não haver variação significativa entre as amostras, para esse parâmetro, em concordância com os observados pelos demais estudos onde o coeficiente de variação foi de 12%. A variação na densidade das amostras pode estar relacionada ao tipo e a composição dos resíduos, ao processo de incineração e ao método de análise empregado (Silva; Lange, 2008; Carvalho *et al.* 2022).

5.4 Teor de umidade

O teor de umidade natural variou entre 2 e 52%, Figura 18. Nos poucos estudos com cinzas de RSU, o teor de umidade foi de 19% (Alam; Singh; Kumar, 2022), entre 17 e 25% (Gupta *et al.*, 2021), entre 1 e 6% (Silva; Lange, 2008), Tabela 5.

Figura 18 - Teor de umidade natural das amostras de cinzas de RSP



Fonte: Autora (2022).

Tabela 5 - Teor de umidade natural das amostras de cinzas de RSP

Autor(es)/ano	Resultado (%)	CV (%)
Dados obtidos	2-52	91
Alam, Singh e Kumar (2022)	19	
Gupta <i>et al.</i> (2021)	17 - 25	89
Silva e Lange (2008)	1-6	

Fonte: Autora (2022).

Os elevados valores dos coeficientes de variação observados, dados obtidos (91%) e literatura (89%), demonstram que umidade natural das amostras de cinzas é um parâmetro notadamente heterogêneo.

No incinerador estudado, a umidade está diretamente relacionada com os procedimentos de lavagem dos gases (alcalina e ácida), com o uso de água para a

interrupção da combustão dos materiais e com o resfriamento do equipamento, além, do tempo de exposição das cinzas a temperatura ambiente, antes da coleta da amostra para análise.

Em duas pesquisas, a variação no teor de umidade das cinzas foi associada com o tempo, a operacionalização da coleta, a condição climática e o período do dia (Silva; Lange, 2008; Lino, 2022).

5.5 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade (carga variável) foi realizado com as cinzas de RSP da amostra 5 (am5) obtendo-se $K_{20} = 3,2 \times 10^{-5}$ cm/s. Também foi ensaiada a mistura areia/cinza, obtendo $K_{20} = 2,9 \times 10^{-5}$ cm/s. Já a areia e a brita, pelo método da carga constante, apresentaram $K_{20} = 2,3 \times 10^{-2}$ cm/s e $K_{20} = 1,1 \times 10^{-2}$ cm/s, respectivamente. Os resultados obtidos - tanto para as cinzas puras como para a mistura areia/cinzas - foram semelhantes aos descritos para as areias muito finas e siltes 10^{-3} a 10^{-7} cm/s.

Apesar do coeficiente de permeabilidade de amostras de cinzas de RSP ainda ser pouco explorado, o estudo conduzido por Yvon *et al.* (2006) revela algumas conclusões importantes:

- (i) as cinzas desenvolvem microfissuras ao longo do tempo, o que resulta em um aumento na permeabilidade e isso permite que fluidos passem facilmente por essas fissuras;
- (ii) a maior permeabilidade das cinzas facilita a lixiviação, ou seja, a dissolução de poluentes pelos fluidos que passam através delas e isso torna os poluentes mais propensos a serem transportados para o meio ambiente;
- (iii) a circulação de líquidos através das microfissuras pode promover reações químicas entre os poluentes presentes nas cinzas e os componentes dos fluidos que passam por elas e isso pode levar à remoção de alguns poluentes ou à formação de produtos secundários;
- (iv) as microfissuras podem afetar a estabilidade física das cinzas a longo prazo, levando a fraturas e alterações nas propriedades mecânicas das cinzas sólidas.

5.6 Fluorescência de Raios-X

As análises mineralógicas por fluorescência de Raio-X, média de 04 resultados, estão expostas na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química elementar das cinzas de RSP

Elemento	%					Média (%)	CV (%)
	am1	am2	am3	am4	am5		
Óxido de Cálcio	57,41	62,19	65,11	57,42	58,19	60,06	5,74
Óxido Férrico	16,43	3,86	3,01	5,48	4,34	6,62	83,81
Dióxido de Titânio	7,88	7,47	8,56	6,65	7,04	7,52	9,87
Dióxido de Silício	4,47	6,11	5,64	7,72	7,84	6,36	22,51
Trióxido de Enxofre	4,05	10,46	6,53	7,26	6,44	6,95	33,18
Óxido de Alumínio	2,78	3,54	5,94	7,64	8,27	5,64	43,06
Pentóxido de Fósforo	2,56	1,47	1,07	2,09	2,08	1,85	31,60
Óxido de Zinco	2,04	1,31	1,46	1,65	1,18	1,53	21,82
Cloro	1,41	1,31	1,18	1,35	1,73	1,39	14,67
Óxido de Potássio	0,34	0,18	0,24	0,26	0,27	0,26	21,64
Óxido de Manganês	0,25	0,23	0,13	0,15	0,14	0,18	30,91
Óxido de Cobre	0,22	0,16	0,17	0,21	0,14	0,18	19,71
Óxidos de Cromo	0,21	0,00	0,00	0,00	0,21	0,08	136,93
Óxido de Estrôncio	0,09	0,12	0,13	0,10	0,05	0,10	33,11
Óxido de Níquel	0,06	0,00	0,05	0,05	0,05	0,00	5,74
Óxido de Magnésio	0,00	2,46	3,05	2,79	2,79	0,00	5,74
Óxido de Sódio	0,00	0,93	0,00	0,00	0,59	0,30	142,65
Trióxido de Arsênio	0,00	0,00	0,00	0,08	0,03	0,02	160,10

■ 1º lugar ■ 2º lugar ■ 3º lugar

Fonte: Autora (2023).

Como se observa, os principais constituintes identificados nas amostras foram o Óxido de Cálcio (60,06%), Dióxido de Titânio (7,52%) e Trióxido de Enxofre (6,95%). Este perfil de composição é congruente com as conclusões de Dijkstra *et al.* (2019), que destacaram a presença de óxidos primários nas cinzas de fundo, sendo o Óxido de Cálcio um componente significativo. Além disso, os autores ressaltaram que, durante o resfriamento rápido, materiais parcialmente fundidos geram uma série de

produtos de reação intermediárias nas cinzas de fundo, como também foi verificado nessa pesquisa.

A literatura nacional frequentemente relata a presença do Óxido de Cálcio em amostras de cinzas com valores variando de 35% (Mendonça, 2018), 54% (Alencar, 2022) e até 67% (Bastos *et al.*, 2021).

O Dióxido de Titânio, componente que representa 7,88% das amostras analisadas, é descrito por Mendonça (2018) como um componente capaz de auxiliar no tratamento de recursos hídricos não potáveis e quando utilizado como filtro, evita incrustações e a passagem de contaminantes, sendo eficiente e de baixo custo. Em outras palavras, a presença desse componente na cinza estudada desperta a criação de novas pesquisas voltadas para a valorização das cinzas e recuperação desse elemento.

Azni *et al.* (2005) identificaram como principais compostos o Silício (53,93%), o Alumínio (16,74%) e Cálcio (9,82%), mostrando que as cinzas variam de uma região para outra e conforme o processo de queima. Os autores atribuem à volatilização de materiais de baixo ponto de ebulição a composição encontrada nas cinzas.

5.7 Identificação das fases cristalinas

A análise cristalográfica identificou 05 fases cristalinas nas cinzas desta pesquisa:

hidroxisulfato de alumínio e cálcio - $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (etringita);

carbonato de cálcio - CaCO_3 (calcita);

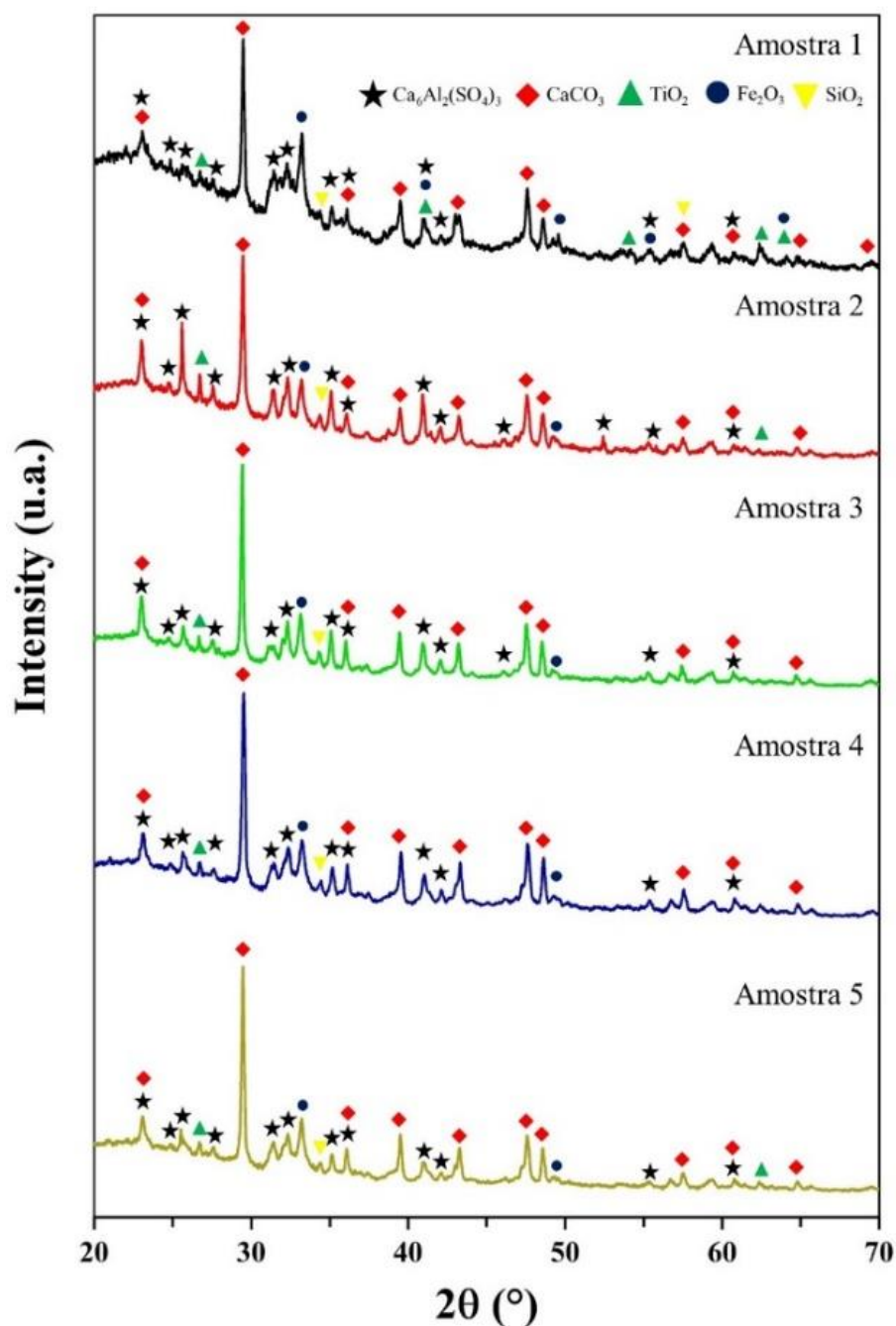
dióxido de titânio - TiO_2 (rutilo);

óxido férrico - Fe_2O_3 (hematita);

dióxido de silício - SiO_2 (quartzo), Figura 19.

Cabe aqui lembrar que os resíduos incinerados, em sua grande maioria, são de serviços de saúde, com destaque para a Classe B (químicos), conforme a RDC 222/2018.

Figura 19 - Difratoograma das cinzas de RSP



Fonte: Autora (2023).

As amostras 2, 3, 4 e 5 apresentam uma linha de base baixa e picos bem definidos, indicando a natureza cristalina do material. No entanto, a baixa intensidade dos picos, com contagens de amostra variando entre 3000 e 5000, resulta em uma relação sinal/ruído desafiadora, dificultando a atribuição de alguns picos. A amostra 1 foi a mais afetada, apresentando a menor intensidade entre todas as amostras e um

ruído mais evidente. O refinamento *Rietveld* não foi feito devido à complexidade das amostras, apresentando, cada uma delas, 5 fases.

A etringita é descrita como uma estrutura cristalina em forma de agulhas, que podem formar um leito filtrante poroso e permeável, podendo contribuir para a filtração de efluentes industriais que contêm íons sulfato (remoção de até 85% do sulfato presente na solução) por precipitar esses íons em forma de um sólido insolúvel (Ferreira; Lima; Leão, 2011).

A calcita apresenta a capacidade de reter impurezas e partículas sólidas presentes no lixiviado, além de funcionar como um corretivo de acidez do solo, pois reage com o hidrogênio e o alumínio presentes, formando compostos menos tóxicos (Instituto de Geociências, 2023).

O rutilo é um mineral que pode ser usado como elemento filtrante de lixiviado, por ter a capacidade de reter impurezas e partículas sólidas, além de ter propriedades fotocatalíticas que podem degradar compostos orgânicos e inorgânicos presentes no lixiviado (Carard, 2018).

A hematita, tem sido estudada em reações heterogêneas de Fenton por sua atividade catalítica. É considerado um mineral antiferromagnético e estável com diversas aplicações ambientais. Em catálise é capaz, inclusive, de degradar antibióticos (Rojas-Mantilla; Ayala-Duran; Nogueira, 2021).

O quartzo, principal componente da areia, é um mineral muito utilizado na filtração, por ter a capacidade de reter impurezas e partículas sólidas presentes no meio (Soares, 2021). O quartzo é aplicado em filtros de diferentes granulometrias, dependendo do grau de filtração desejado, é resistente à corrosão e não altera o pH (Instituto de Geociências, 2023).

Carvalho *et al.* (2022) observaram fases cristalinas que incluem calcita, óxido de alumínio, halita e quartzo em seus estudos. Eles notaram que, durante o processo de calcinação, o aumento da temperatura resultou na potencialização da presença de alguns minerais, como SiO_2 , NaCl e Al_2O_3 , enquanto reduziu a presença de CaCO_3 , levando à eliminação do carbono associado.

Singh *et al.* (2022), ao identificarem quartzo em suas amostras de cinzas, destacaram que o quartzo é uma das principais fases minerais encontradas em areias naturais, sugerindo seu potencial uso como agregado miúdo alternativo.

5.8 Propriedades das cinzas

Os resultados obtidos quanto às propriedades das cinzas demonstram que, com exceção da esfericidade, as classificações quanto à angularidade, forma 2D e textura foram iguais para as duas amostras, revelando similaridade entre as amostras estudadas, quanto as propriedades de forma (Tabela 7). Além disso, as características encontradas indicam um possível uso das cinzas como meio filtrante.

Tabela 7 - Propriedades de forma das cinzas

Características	Média		Classificação	
			Al Rousan (2004)	
	am4	am5	am4	am5
Cinzas graúdas				
Esfericidade	0,75	0,67	Esfericidade moderada	Baixa esfericidade
Angularidade	4719,3	4019,5	Subangular	Subangular
Textura	378,88	385,88	Rugosidade moderada	Rugosidade moderada
Cinzas miúdas				
Angularidade	3966,7	3895,5	Subarredondado	Subarredondado
Forma 2D	8,29	8,33	Semialongado	Semialongado

Fonte: Autora (2022).

Para Vizcarra (2010), a forma rugosa, observada na superfície dos grãos da cinza de fundo, proporciona uma menor densidade aparente dos grãos, quando comparado às partículas do solo, fazendo com que a Massa Específica Aparente Seca diminua à medida que se aumenta o teor de cinza de fundo nas misturas. Esse comportamento não foi observado nesta pesquisa, o que em parte destaca a heterogeneidade das cinzas.

Singh *et al.* (2022) observaram que as partículas de cinzas apresentavam formas irregulares e angulares em todas as frações de tamanho em concordância com os resultados obtidos.

Gupta *et al.* (2021) identificaram partículas aglomeradas e de formato irregular com textura de superfície áspera nas amostras de cinzas. Ambos utilizaram a microscopia eletrônica de varredura, método diferente do utilizado por este trabalho.

5.9 Comportamento dos Filtros

5.9.1 Análise qualitativa

O comportamento geral dos filtros na Fase 1, em termos de eficiência no tratamento dos lixiviados do aterro sanitário, foi resumido na Tabela 8.

Tabela 8 - Síntese da filtração dos lixiviados nos três filtros - Fase 1

Parâmetros	Filtros						Comportamento do Parâmetro	
	F1		F2		F3		E (Elevação)	R (Redução)
	E	R	E	R	E	R		
pH	2		2		2		6	0
Cloretos	2		2		2		6	0
Cor aparente	1	1		2		2	1	5
Fósforo	1	1		2	1	1	2	4
DQO		2	1	1		2	1	5
Materiais sedimentáveis	2		2		1	-	4	1
Sólidos dissolvidos	1	1	2		1	1	4	2
Nitratos	1	1		2		2	1	5
Nitrito		2		2		2	0	6
Nitrogênio amoniacal		2		2		2	0	6
Óleos e graxas		2		2		2	0	6
Sulfato	2		2		2		6	0
Sulfeto	1	1		2		2	1	5
Turbidez		2		2		2	0	6
Total	13	15	11	17	9	18	33	50
Total							83	

Fonte: Autora (2023).

Na fase 1, foram obtidos 83 resultados dos 14 parâmetros físico-químicos investigados, sendo que 50 (60,3% dos resultados) comprovaram redução na concentração dos parâmetros enquanto 33 resultados (39,8%) comprovaram aumento na concentração. Como se observa, o Filtro 3 (100% de cinzas) foi o mais eficiente, com 18 registros de redução (36% do total de reduções) e 9 resultados que indicaram elevação (27,3% do total de elevações) na concentração dos parâmetros. Cabe observar que, na 1ª campanha, F3, o parâmetro “materiais sedimentáveis” se manteve

sem alteração em relação ao lixiviado bruto.

O filtro de areia (F1) teve capacidade de reduzir a concentração de 7 parâmetros do lixiviado na primeira campanha (50,0% do total de parâmetros analisados) e de 8 parâmetros (57,1%) na segunda campanha. Nas duas campanhas houve redução coincidente na concentração de 5 parâmetros (DQO, nitrito, amônia, óleos e graxas, turbidez). A maior taxa de redução ocorreu com o nitrito (85,0% na primeira campanha e 88,0% na segunda campanha).

O filtro de areia+cinzas (F2) teve capacidade de reduzir a concentração de 8 parâmetros do lixiviado na primeira campanha (57,1% do total de parâmetros analisados) e de 9 parâmetros (64,3%) na segunda campanha. Nas duas campanhas houve redução na concentração de 8 parâmetros (cor aparente, fósforo, nitrato, nitrito, amônia, óleos e graxas, sulfeto, turbidez). A maior taxa de redução ocorreu com o nitrito nas duas campanhas (88,0%).

O filtro de cinzas (F3) teve capacidade de reduzir a concentração de 9 parâmetros do lixiviado nas duas campanhas, 1ª e 2ª, (64,3% do total de parâmetros analisados). Nas duas campanhas houve redução na concentração de 8 parâmetros (cor aparente, fósforo, DQO, nitrato, nitrito, amônia, óleos e graxas, sulfeto, turbidez). A maior taxa de redução ocorreu com o nitrito na primeira campanha (88,0%) e com óleos e graxas na segunda campanha (92,0%).

O comportamento geral dos filtros na Fase 2, em termos de eficiência no tratamento dos lixiviados do aterro sanitário, foi resumido na Tabela 9.

Tabela 9 - Síntese da filtração dos lixiviados nos três filtros – Fase 2

Parâmetros	Filtros						Comportamento do Parâmetro	
	F1		F2		F3		E (Elevação)	R (Redução)
	E	R	E	R	E	R		
pH	2		2		2		6	0
Cloretos		2	2		2		4	2
Cor aparente	1	1		2		2	1	5
Fósforo		2		2		2	0	6
DQO	1	1		2	1	1	2	4
Materiais sedimentáveis		2		2		1	0	5
Sólidos dissolvidos		2		2		2	0	6
Nitratos	1	1	2		2		5	1
Nitrito	1	1		2		2	1	5
Nitrogênio amoniacal		2		2		2	0	6
Óleos e graxas	2		1	1	1	1	4	2
Sulfato	1	1	2		2		5	1
Sulfeto		2		2		2	0	6
Turbidez	1	1		2		2	1	5
Total	10	18	9	19	10	17	29	54
Total							83	

Fonte: Autora (2023).

Na fase 2, foram obtidos novamente 83 resultados, sendo que 54 (65,1% dos resultados) comprovaram redução na concentração dos parâmetros enquanto 29 resultados (34,5%) comprovaram aumento na concentração. Como se observa, o Filtro 2 (50% areia, 50% cinzas) foi o mais eficiente, com 19 registros de redução (67,9% dos resultados) e 9 resultados que indicam elevação (32,1%). Como o ocorrido na fase 1, na 3ª campanha, F3, o parâmetro “materiais sedimentáveis” se manteve sem alteração em relação ao lixiviado bruto.

O F1 teve capacidade de reduzir a concentração de 10 parâmetros do lixiviado na terceira campanha (71,4% do total de parâmetros analisados) e de 6 parâmetros (42,9%) na quarta campanha. Nas duas campanhas houve redução na concentração de 5 parâmetros (cloreto, materiais sedimentáveis, sólidos dissolvidos, nitrogênio amoniacal e sulfeto). A maior taxa de redução ocorreu com os materiais sedimentáveis na terceira campanha e quarta campanha (aproximadamente 100%), Tabela 10.

O F2 teve capacidade de reduzir a concentração de 10 parâmetros do lixiviado na 3ª campanha (71,4% do total de parâmetros analisados) e de 6 parâmetros (42,9%)

na 4ª campanha. Nas duas campanhas houve redução coincidente na concentração de 4 parâmetros (cloretos, materiais sedimentáveis, sólidos dissolvidos, nitrogênio amoniacal e sulfeto). A maior taxa de redução ocorreu com os materiais sedimentáveis na terceira campanha e quarta campanha (aproximadamente 100%), Tabela 11.

O F3 teve capacidade de reduzir a concentração de 9 parâmetros do lixiviado na 3ª e na 4ª campanha (64,3% do total de parâmetros analisados). Nas duas campanhas houve redução na concentração de 8 parâmetros (cor aparente, fósforo, materiais sedimentáveis, sólidos dissolvidos, nitrito, nitrogênio amoniacal, sulfeto, turbidez). A maior taxa de redução ocorreu com os materiais sedimentáveis na quarta campanha (aproximadamente 100%) e com sulfeto na quarta campanha (83,6%). Tabela 12.

Tabela 10 - Resultados da filtração do lixiviado no Filtro 1

Parâmetros	1ª FASE					2ª FASE				
	Bruto	Filtrado				Bruto	Filtrado			
		1ª C	%	2ª C	%		3ª C	%	4ª C	%
pH à 25°C	8,3	8,4	0,7	8,5	2,3	8,7	9,2	5,8	9,4	7,8
Cloretos (mg/L)	4.475,6	4.626,2	3,4	4506,6	0,7	4.448,5	4278,8	3,8	4387,9	1,4
Cor aparente (uH)	2.370,0	2.180,0	8,0	2550,0	7,6	4.976,7	4782,0	3,9	5067,0	1,8
Fósforo (mg/L)	0,7	1,0	31,1	0,3	54,1	434,4	456,5	5,1	464,8	7,0
DQO (mg/L)	594,8	307,5	48,3	390,5	34,3	8.338,8	9051,3	8,5	6964,2	16,5
Materiais sedimentáveis (mg/L)	2,0	2,9	45,0	3,0	50,0	0,1	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sólidos dissolvidos (mg/L)	11.834,0	10.218,0	13,7	12164,0	2,8	13.948,0	13468,0	3,4	13,6	99,9
Nitrato (mg/L)	0,3	0,3	3,0	0,3	3,0	27,1	14,7	45,6	94,2	248,0
Nitrito (mg/L)	2,8	0,4	85,2	0,4	87,7	0,6	0,5	7,0	0,8	31,6
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	1.547,7	1.443,4	6,7	1542,4	0,3	1.120,0	1101,1	1,7	962,5	14,1
Oleos e graxas (mg/L)	326,0	168,0	48,5	41,0	87,4	118,0	380,5	222,5	146,5	24,2
Sulfato (mg/L)	9,1	13,4	46,8	10,8	18,8	337,0	336,7	0,1	470,4	39,6
Sulfeto (mg/L)	2,4	2,5	5,4	2,1	11,3	9,0	7,4	17,8	1,2	86,7
Turbidez (mg/L)	264,0	257,0	2,7	160,2	39,3	335,3	284,0	15,3	337,0	0,5
Resumo		1ª C	%	2ª C	%		3ª C	%	4ª C	%
	Elevação	7	50	6	42,9	Elevação	4	28,6	8	57,1
	Redução	7	50	8	57,1	Redução	10	71,4	6	42,9

*< LQ= menor que o limite quantificável

Fonte: Autora (2023).

Tabela 11 - Resultados da filtração do lixiviado no Filtro 2

Parâmetros	1ª FASE					2ª FASE				
	Bruto	Filtrado				Bruto	Filtrado			
		1ª C	%	2ª C	%		3ª C	%	4ª C	%
pH à 25°C	8,3	8,8	5,4	8,7	4,8	8,7	9,5	9,8	9,4	8,5
Cloretos (mg/L)	4.475,6	5.051,6	12,9	4.883,2	9,1	4.448,5	4.994,0	12,3	4.642,4	4,4
Cor aparente (uH)	2.370,0	2.070,0	12,7	2.080,0	12,2	4.976,7	3.658,0	26,5	4.043,0	18,8
Fósforo (mg/L)	0,7	0,2	74,3	0,1	86,5	434,4	235,5	45,8	336,7	22,5
DQO (mg/L)	594,8	619,0	4,1	292,0	50,9	8.338,8	7.057,3	15,4	7.461,1	10,5
Materiais sedimentáveis (mg/L)	2,0	3,0	50,0	3,0	50,0	0,1	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sólidos dissolvidos (mg/L)	11.834,0	13.430,0	13,5	11.950,0	1,0	13.948,0	13.312,0	4,6	13.532,0	3,0
Nitrato (mg/L)	0,3	0,3	12,1	0,3	12,1	27,1	83,6	208,6	36,5	34,7
Nitrito (mg/L)	2,8	0,4	87,7	0,3	88,0	0,6	0,5	7,0	0,6	3,5
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	1.547,7	1.252,4	19,1	1.524,1	1,5	1.120,0	989,4	11,7	1.036,5	7,5
Oleos e graxas (mg/L)	326,0	124,0	62,0	42,0	87,1	118,0	47,0	60,2	144,0	22,0
Sulfato (mg/L)	9,1	35,4	288,2	18,2	99,8	337,0	722,0	114,2	606,1	79,8
Sulfeto (mg/L)	2,4	1,1	52,9	1,3	44,6	9,0	4,6	48,9	1,5	83,6
Turbidez (mg/L)	264,0	187,3	29,1	167,5	36,6	335,3	273,0	18,6	263,0	21,6
Resumo		1ª C	%	2ª C	%		3ª C	%	4ª C	%
	Elevação	6	42,9	5	35,7	Elevação	4	28,6	5	35,7
	Redução	8	57,1	9	64,3	Redução	10	71,4	9	64,3

*< LQ= menor que o limite quantificável

Fonte: Autora (2023).

Tabela 12 - Resultados da filtração do lixiviado no Filtro 3

Parâmetros	1ª FASE					2ª FASE				
	Bruto	Filtrado				Bruto	Filtrado			
		1ª C	%	2ª C	%		3ª C	%	4ª C	%
pH à 25°C	8,3	8,8	6,0	8,9	7,5	8,7	9,7	11,3	9,4	8,5
Cloretos (mg/L)	4.475,6	5.202,3	16,2	5.033,9	12,5	4.448,5	5.030,3	13,1	4.969,7	11,7
Cor aparente (uH)	2.370,0	1.900,0	19,8	1.770,0	25,3	4.976,7	3.528,0	29,1	3.742,0	24,8
Fósforo (mg/L)	0,7	0,3	55,4	1,1	48,7	434,4	254,3	41,5	304,0	30,0
DQO (mg/L)	594,8	587,0	1,3	310,0	47,9	8.338,8	6.683,9	19,8	8.982,7	7,7
Materiais sedimentáveis (mg/L)	2,0	2,0		3,0	50,0	0,1	0,1		<LQ	<LQ
Sólidos dissolvidos (mg/L)	11.834,0	17.738,0	49,9	11.398,0	3,7	13.948,0	12.716,0	8,8	13.272,0	4,8
Nitrato (mg/L)	0,3	0,3	21,2	0,3	9,1	27,1	38,9	43,5	54,2	100,0
Nitrito (mg/L)	2,8	0,3	88,0	0,3	89,4	0,6	0,5	14,0	0,6	1,8
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	1.547,7	1.408,0	9,0	1.351,4	12,7	1.120,0	996,1	11,1	1.009,6	9,9
Óleos e graxas (mg/L)	326,0	50,0	84,7	26,0	92,0	118,0	17,5	85,2	349,0	195,8
Sulfato (mg/L)	9,1	18,7	104,6	34,0	272,3	337,0	542,3	60,9	538,5	59,8
Sulfeto (mg/L)	2,4	1,7	30,4	1,5	38,8	9,0	5,2	42,2	2,2	75,6
Turbidez (mg/L)	264,0	173,7	34,2	143,4	45,7	335,3	275,0	18,0	257,0	23,4
Resumo		1ª C	%	2ª C	%		3ª C	%	4ª C	%
	Elevação	4	28,6	5	35,7	Elevação	4	28,6	6	42,9
	Redução	9	64,3	9	64,3	Redução	9	71,4	8	57,1
	Manutenção	1	7,1	-	-	Manutenção	1	7,1	-	-

*< LQ= menor que o limite quantificável

Fonte: Autora (2023).

5.9.2 Análise quantitativa

- pH

O potencial hidrogeniônico (pH) fornece indicação sobre a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade do meio, varia de 0 a 14 e é um parâmetro adimensional. Conforme Lôbo (2006), o pH indica a evolução da degradação microbológica da matéria orgânica e a evolução global do processo de estabilização da massa de resíduos.

Uma análise mais detalhada permitiu observar que, apesar dos lixiviados brutos se mostrarem praticamente constantes (pH entre 8,3 e 8,7), houve elevação no pH do lixiviado após filtração, tornando-o mais alcalino. Os lixiviados obtidos na primeira fase (1ª e 2ª campanhas) estiveram dentro dos limites da CONAMA e COEMA pertinentes (Figura 20), enquanto os obtidos na segunda fase (3ª e 4ª campanhas) ficaram acima do que estabelece as referidas resoluções (5 a 9), Figura 21.

Figura 20 - Comportamento do parâmetro pH (fase 1 do experimento)

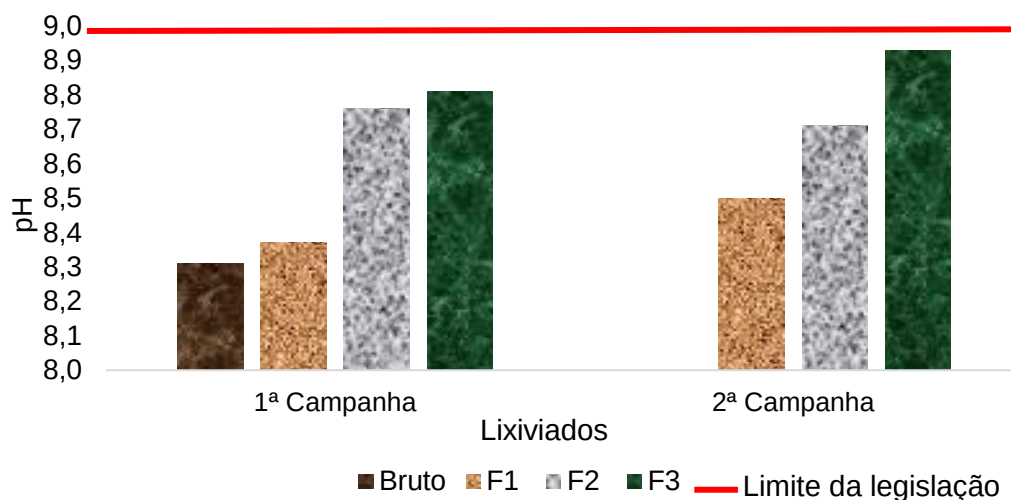
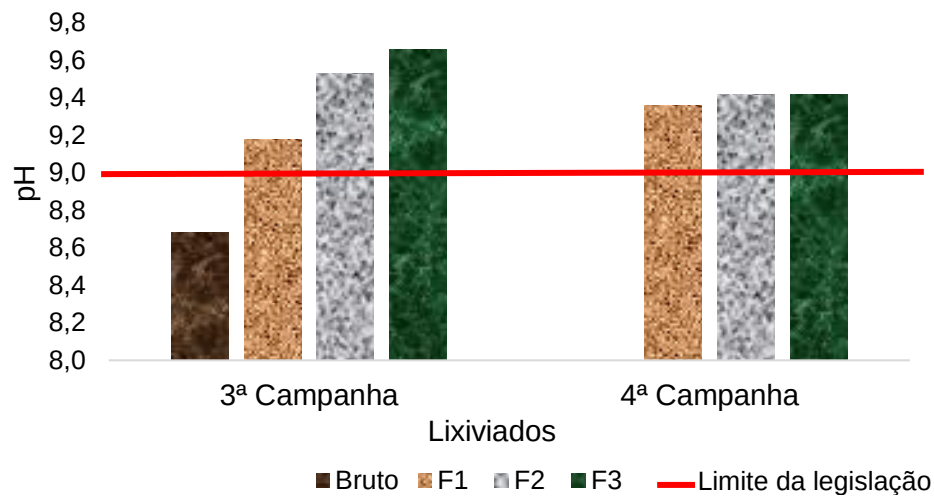


Figura 21 - Comportamento do parâmetro pH (fase 2 do experimento)



Fonte: Autora (2023).

O comportamento do pH após tratamento do lixiviado não tem tendência única, a saber:

(i) Carard (2018), após aplicação do tratamento por ozonização fotocatalítica com dióxido de titânio, alcançou redução do pH após o tratamento em todos os ensaios promovidos;

(ii) Godoi (2019), utilizando filtro de papel como meio filtrante, observou aumento do pH, após a filtração, para a maioria das amostras;

(iii) Silva *et al.* (2021) utilizaram areia de variadas granulometrias, argilas e carvão ativado como meio filtrante e o pH do lixiviado, após filtração, não variou consideravelmente em relação ao lixiviado bruto.

- Cloretos

A literatura indica que a presença de elevada concentração de íons cloretos em lixiviados, que são advindos da dissolução de sais, pode acarretar sérias implicações ao tratamento, tanto na etapa de remoção de matéria orgânica quanto na remoção de amônia por processos biológicos.

As altas concentrações cloreto, assim como de íons sódio, podem aumentar a permeabilidade do solo, devido a desestruturação das partículas de argilas componentes do solo base do aterro, o que facilitaria a contaminação das águas subterrâneas e/ou superficiais (Souza Junior, 2022).

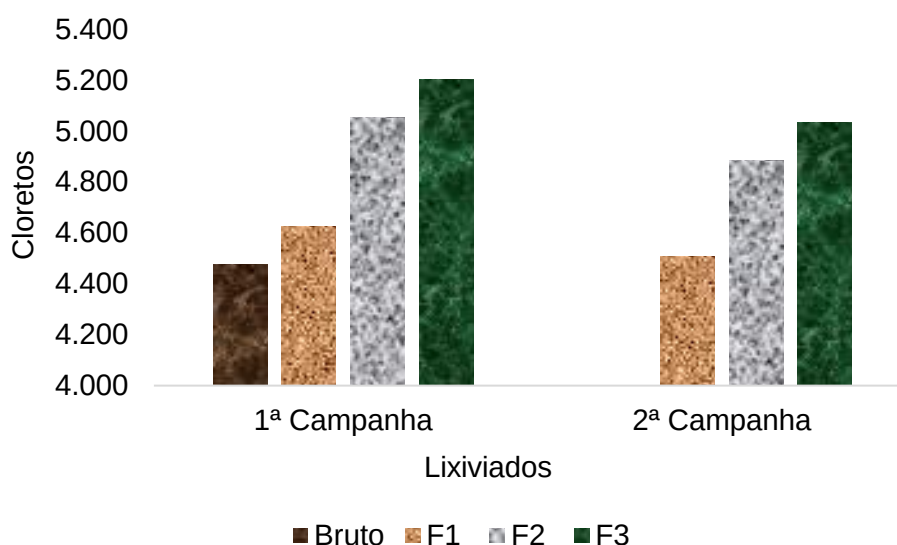
Em aterros sanitários, o cloreto não está sujeito a transformações químicas ou biológicas, o que possibilita sua passagem pelas camadas mais antigas sem qualquer atenuação significativa (Souto, 2009). Portanto, a remoção desse parâmetro, dentre outros, é considerado de extrema importância para um bom tratamento do lixiviado (Lebron *et al.*, 2021).

Os lixiviados brutos se mostrarem praticamente constantes entre as duas coletas (4.475,6 e 4.448,5 mg/L), observando-se uma discreta redução no segundo material coletado.

Na fase 1 do experimento, houve elevação do cloreto no lixiviado tratado, sendo esta elevação mais acentuada no F3 (100% cinzas), possivelmente em decorrência de algum residual de cloro do processo de desinfecção (etapa operacional realizada no incinerador estudado), Figura 22.

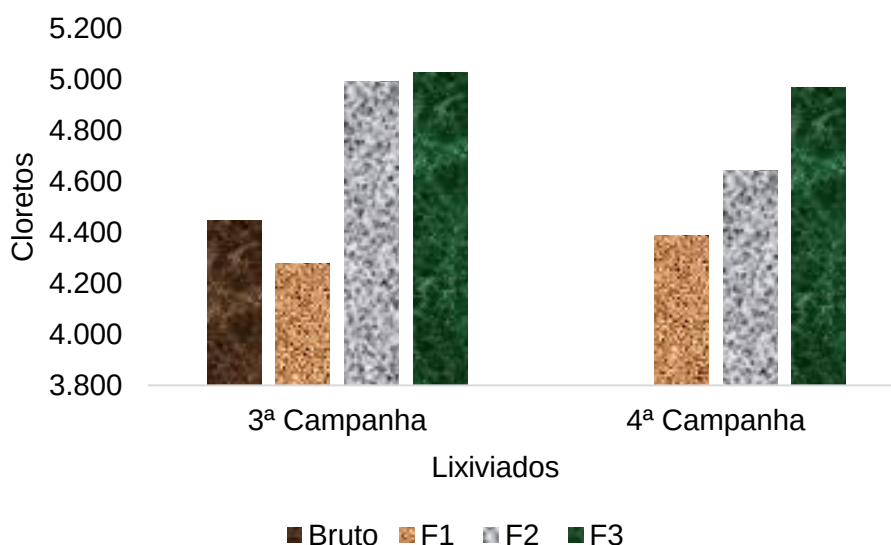
Na fase 2, os filtros F2 e F3 repetiram o comportamento que tiveram na fase anterior, elevação do parâmetro, contudo, o filtro F1 (100% areia) apresentou redução do parâmetro nas duas campanhas realizadas, Figura 23.

Figura 22 - Comportamento do parâmetro cloreto (fase 1 do experimento)



Fonte: Autora (2023).

Figura 23 - Comportamento do parâmetro cloreto (fase 2 do experimento)



Fonte: Autora (2023).

As normas (CONAMA e COEMA pertinentes) estabelecem limites apenas para o tetracloreto de carbono (1,0 mg/L) não havendo possibilidade de comparações diretas, no entanto, esse parâmetro foi adotado por ser um dos principais poluentes a serem reduzidos no tratamento de lixiviado (Souza Junior, 2022).

Bacelar (2010) conseguiu uma elevada redução da concentração de cloretos através da evaporação forçada de lixiviado a 500°C.

Rodrigues (2007), aplicando tratamento eletrolítico ao lixiviado de aterro sanitário, observou uma remoção de 16% do cloreto em relação ao lixiviado bruto, no entanto, ao adicionar sal ao efluente - antes do tratamento - os valores de cloreto aumentaram mais de 200%.

- Cor aparente

A cor aparente é um processo biológico que só ocorre quando há algum meio de transmissão da luz do sol pelo efluente, sendo considerado relevante no estudo da eficiência dos tratamentos (Godoi, 2019).

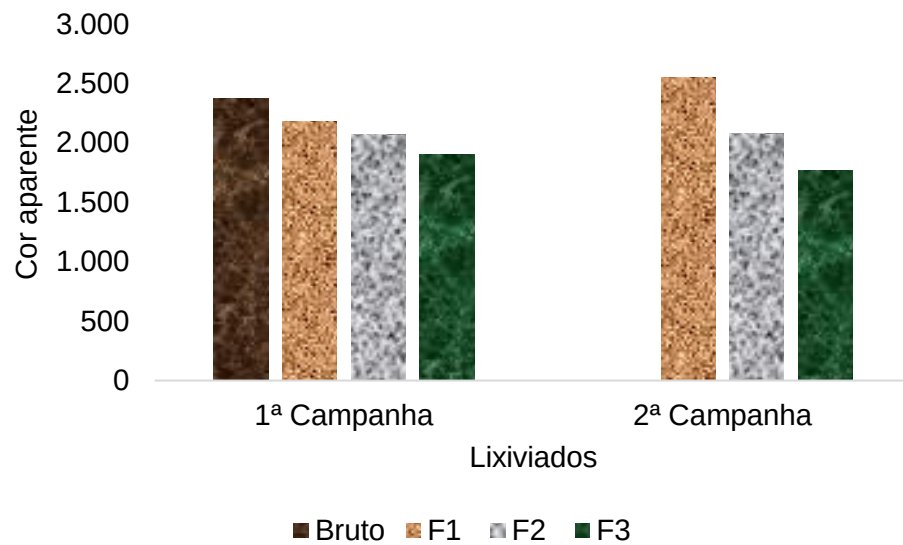
Houve uma significativa elevação (2.370 - 4.976,7 mg/L), representando 47,5% de aumento, entre o lixiviado bruto coletado na fase 1 e o coletado na fase 2.

Na fase 1, os três filtros removeram a concentração da cor aparente, em especial o F3 (100% cinzas), alcançando 25,3% de redução, Figura 24. O

comportamento dos filtros se mantivera na fase 2, à exceção do F1 que apresentou uma elevação na 3ª campanha, voltando a reduzir o parâmetro na 4ª campanha, Figura 25.

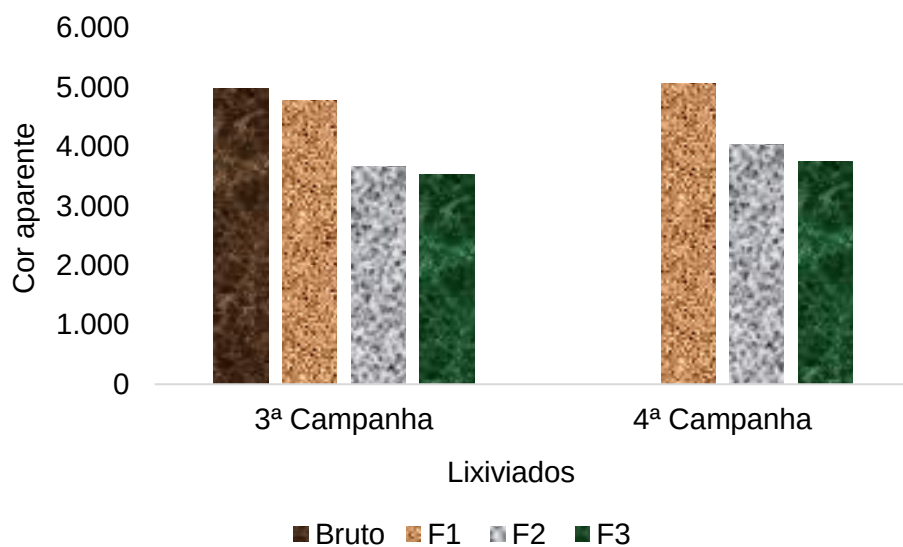
A remoção desse parâmetro físico (organoléptico) é de grande relevância, sendo almejado como resultado.

Figura 24 - Comportamento do parâmetro cor aparente (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 25 - Comportamento do parâmetro cor aparente (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

No tocante a exigência legal para o parâmetro, a COEMA 02/2017 determina que efluentes não sanitários só poderão ser lançados diretamente no corpo hídrico, resguardadas outras exigências cabíveis, quando não apresentem a presença de corantes e pigmentos. Portanto, apesar da redução obtida, essa exigência legal não foi alcançada pelo método utilizado neste estudo.

O tratamento aplicado por Carard (2018), ozonização fotocatalítica com dióxido de titânio, possibilitou a remoção de cor aparente do lixiviado de até 61%. Esse resultado foi mais de duas vezes superior ao resultado obtido nesta pesquisa para o Filtro 3.

Já Fujii *et al.* (2019) alcançaram remoção de até 99,7% através de ensaios de coagulação seguida de filtração ascendente em pedregulho como pós-tratamento.

- Fósforo

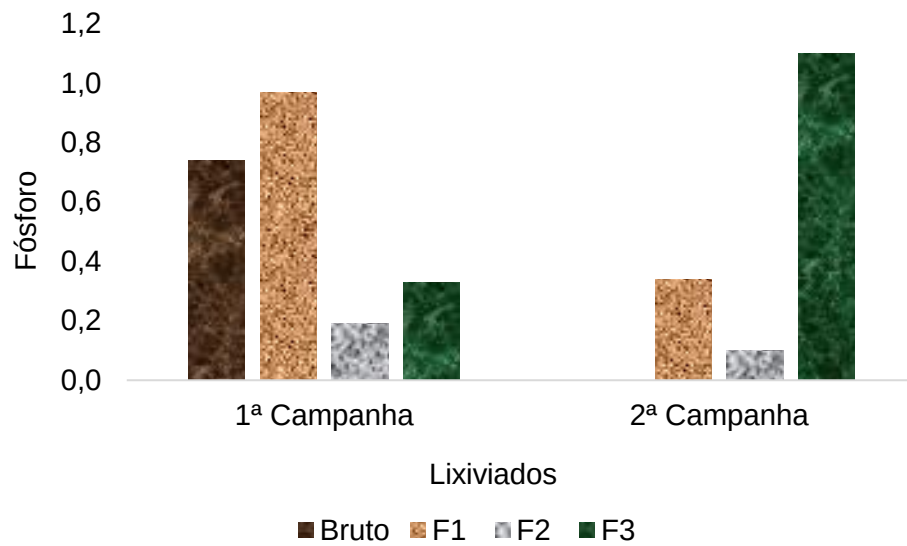
A quantidade do elemento químico fósforo, liberado na degradação da matéria orgânica presente em efluentes, tem origem principalmente antropogênica. É um elemento essencial para os seres vivos, pois compõe as membranas celulares, os ácidos nucleicos, os ossos e os dentes, no entanto, é um nutriente limitante no ambiente do aterro sanitário além de, quando presente em efluente e lançados em corpos receptores, pode acarretar eutrofização (Lôbo, 2006).

Os lixiviados brutos tiveram uma acentuada variação entre as duas fases, sofrendo uma elevação de 789,9% entre elas (0,7 - 434,4 mg/L).

Na primeira fase, entre os filtros, o F2 (areia + cinzas) teve o melhor comportamento: reduziu a concentração de fósforo nas duas campanhas (74,3 e 86,5% respectivamente), Figura 26.

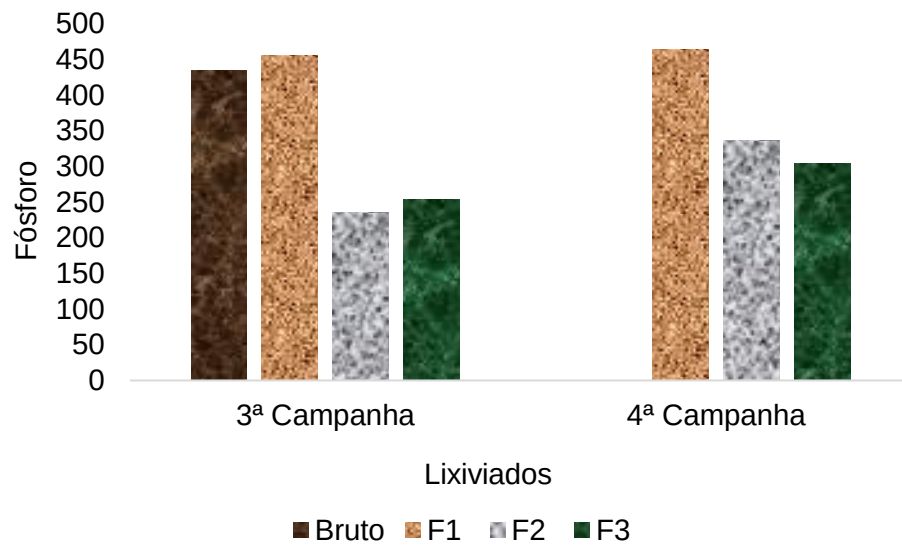
Na segunda fase, os filtros contendo cinzas, F2 e F3, apresentaram redução do parâmetro nas duas campanhas realizadas, 3ª e 4ª, sendo os valores de redução mais significativos observados na 3ª com 45,8% no F2 (areia + cinzas) e 41,5% no F3 (100% cinzas), Figura 27.

Figura 26 - Comportamento do parâmetro fósforo (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 27 - Comportamento do parâmetro fósforo (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

De acordo com a CONAMA n°430/2011, para o parâmetro fósforo, fica a critério do órgão ambiental competente definir padrões específicos para o lançamento de efluentes em corpos receptores com registro histórico de floração de cianobactérias, em trechos onde ocorra a captação para abastecimento público.

Reduções consideráveis nas concentrações de fósforo foram alcançados pelos tratamentos propostos por Carard (2018): 85,0% e Rodrigues (2007): de 50,6 a 90,1%.

Dentre as experiências no tratamento de lixiviados estudadas por Lebron *et al.* (2021), a precipitação química foi descrita como tendo os melhores resultados na redução de fósforo.

- DQO

A DQO é um indicador da degradação do resíduo ao longo do tempo; quanto mais reduzidos os valores encontrados de DQO, mais antigo é o resíduo. Ela mede a quantidade de matéria orgânica que pode ser oxidada quimicamente (Costa, 2021).

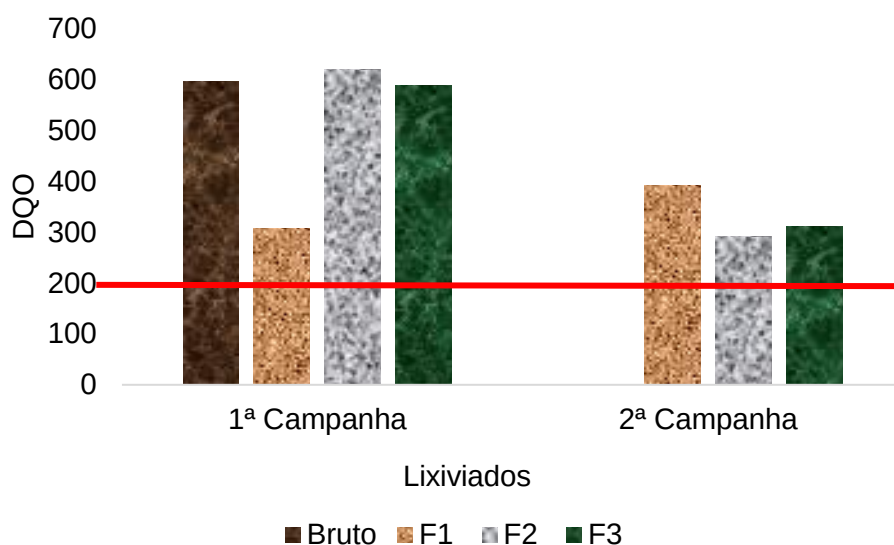
Vicente (2021) ressalta que as concentrações de DQO e amônia são consideradas os principais indicativos de toxicidade aguda em um efluente.

Os lixiviados brutos tiveram uma acentuada variação entre as duas fases, sofrendo uma elevação de 1.301,6% entre elas (594,8 – 8.338,8 mg/L).

Na fase 1, entre os filtros, o F1 (100% areia) e o F3 (100% cinzas) tiveram os melhores comportamentos: reduziram até 48,3% e 47,9% da DQO respectivamente. Provavelmente, os resultados com as cinzas não foram melhores em função da sua própria composição química, Figura 28.

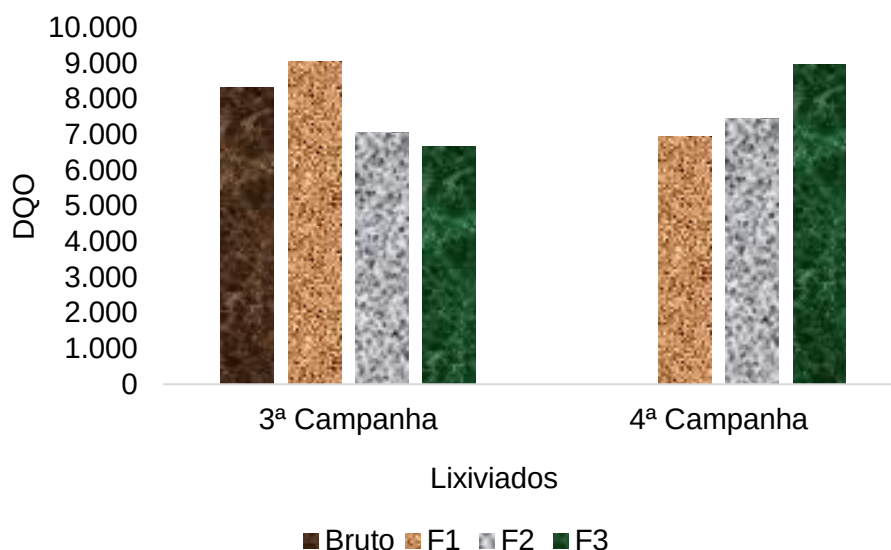
Na fase 2, o filtro F2 (areia + cinzas) apresentou redução do parâmetro nas duas campanhas, 3ª e 4ª, contudo, a maior redução percentual foi alcançada pelo F3 (100% cinzas) na 3ª campanha, sendo de 19,8%, Figura 29.

Figura 28 - Comportamento do parâmetro DQO (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 29 - Comportamento do parâmetro DQO (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

Lebron *et al.* (2021) observaram redução de DQO na ordem de 40% em tratamentos por lagoas de estabilização, 59% em sistemas de lodo ativado, 76% em filtros biológicos, de 60 a 81% em reator de biofilme de leito móvel e de 89,6% por biorreatores de membrana. Fujii *et al.* (2019) afirmaram ter alcançado, por meio de coagulação seguida da filtração, remoções de 82,4% de DQO.

As normas (CONAMA e COEMA, pertinentes) estabelecem como limite, para esse parâmetro, 200 mg/L, não tendo sido atendido por nenhum dos filtros.

- Materiais sedimentáveis

São materiais em suspensão que sedimentam por ação da gravidade. Pode ser considerado um indicador de poluição ou da eficácia do tratamento em efluentes, uma vez que, a presença de sólidos em suspensão nas águas, principalmente aqueles presentes no lixiviado, leva a um aumento da turbidez influenciando diretamente na entrada de luz e diminuindo o valor de saturação do oxigênio dissolvido (Moravia, 72010).

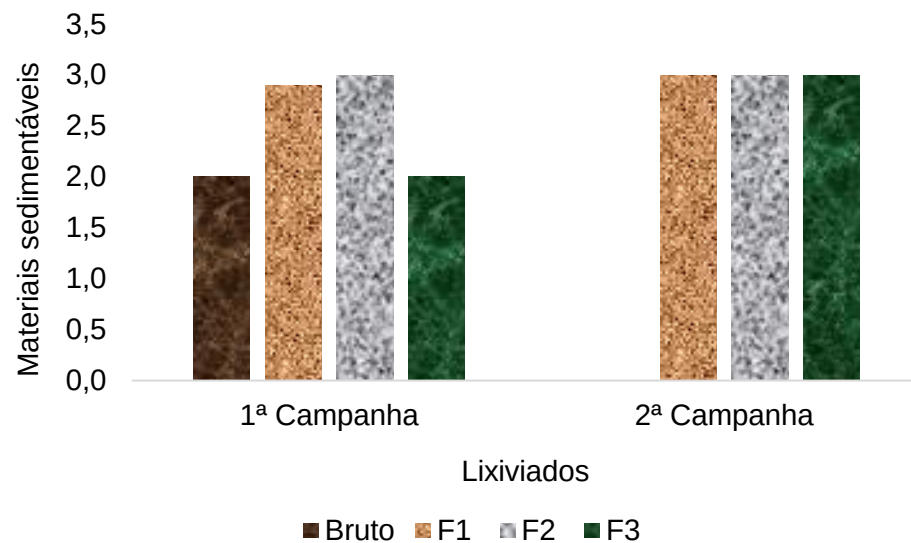
Os lixiviados brutos tiveram uma acentuada variação entre as duas fases, sofrendo uma redução de 95% entre elas (2 – 0,1 mg/L).

Na fase 1, os resultados obtidos demonstram uma elevação média de 50% em todos os filtros, com exceção para o F3 (1ª coleta, que não sofreu alteração).

Provavelmente, o lixiviado gerou uma desagregação dos elementos filtrantes utilizados, aumentando a presença de partículas soltas, Figura 30.

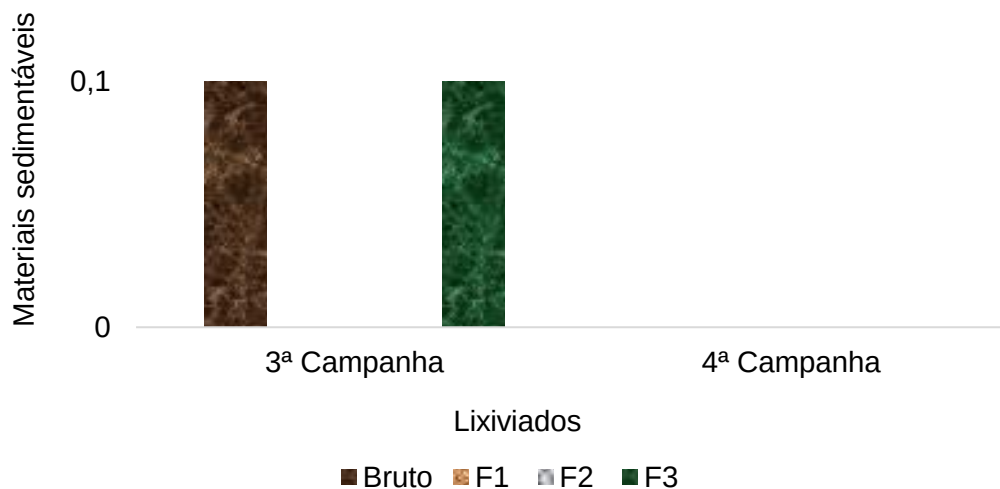
Na fase 2, todos os filtros, F1, F2 e F3, foram capazes de reduzir em 100% o parâmetro, exceto F3, 3ª campanha onde o parâmetro permaneceu igual ao apresentado para o lixiviado bruto, Figura 31.

Figura 30 - Comportamento do parâmetro materiais sedimentáveis (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 31 - Comportamento do parâmetro materiais sedimentáveis (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

O enquadramento nos padrões de lançamento admite 1 mL/L, exigindo ainda que, para lançamento em ambientes lênticos, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes. Desta forma, os filtros estudados atenderam aos padrões estabelecidos apenas na fase 2 (3ª e 4ª campanhas).

Mannarino *et al.* (2006), utilizando *wetland* como método de tratamento de lixiviados, obtiveram um percentual médio de remoção de 71%. Já Silva (2021) alcançou 99,6% de remoção com lagoas (anaeróbias, facultativa e seca) em um aterro sanitário.

- Sólidos dissolvidos

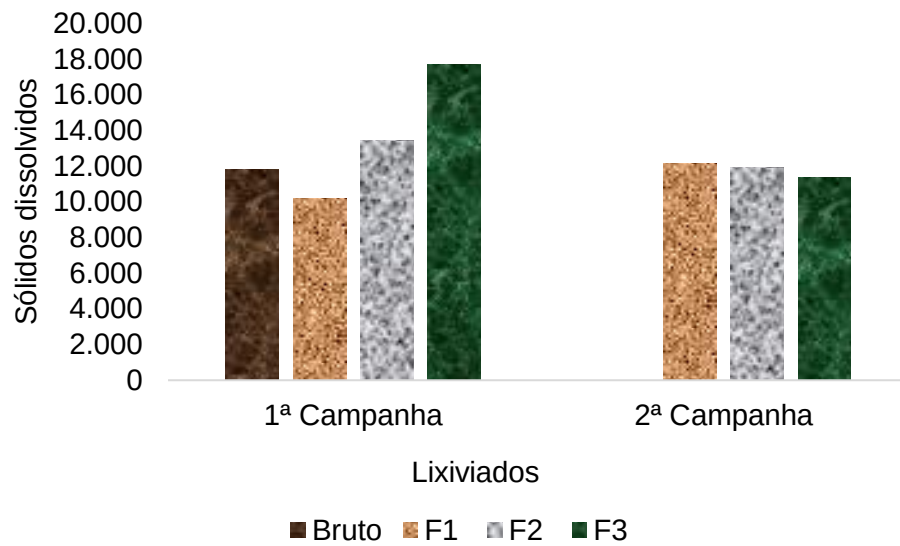
Esse parâmetro é constituído de alguns elementos incluídos na água, como bicarbonato e fósforo, que não sofrem decantação. Apesar de fundamentais para manutenção da vida, quando a concentração desses sólidos é elevada, a densidade da água pode ser prejudicada e influenciar diretamente no desenvolvimento de ambientes aquáticos. No lixiviado, a ação dos sólidos dissolvidos influencia diretamente a variabilidade dos íons presentes, interferindo, de forma também direta, na condutividade (Silva, C. 2017).

Os lixiviados brutos apresentaram uma variação de 17,9% (11.834 – 13.948 mg/L) entre as duas fases do experimento.

Na fase 1, o melhor desempenho na remoção desse parâmetro foi observado F1 (100% areia), primeira coleta (13,7%), Figura 32.

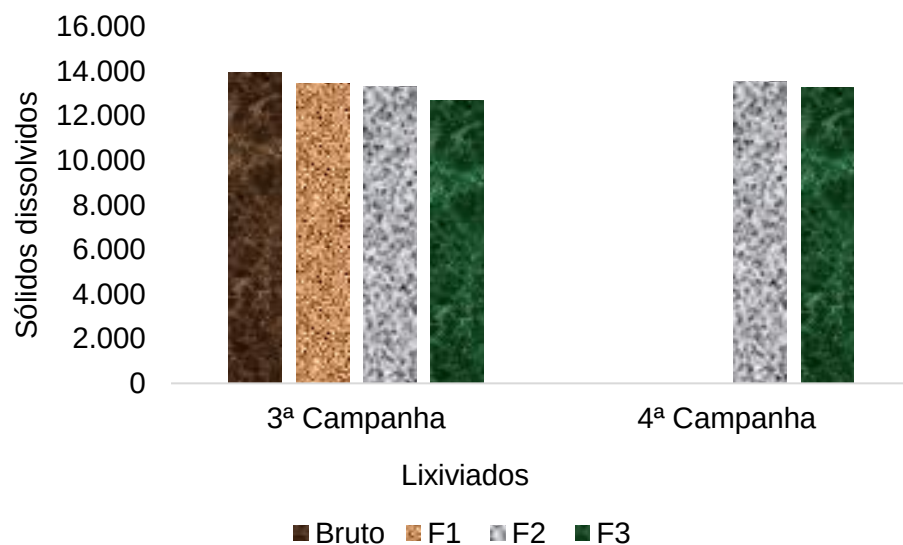
Na fase 2, todos os filtros do experimento foram capazes de reduzir o parâmetro, contudo, o melhor desempenho na remoção foi observado para F1 (100% areia), 4ª campanha (99,9%), Figura 33.

Figura 32 - Comportamento do parâmetro sólidos dissolvidos (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 33 - Comportamento do parâmetro sólidos dissolvidos (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

Utilizando integração de eletrólise com contator de carvão ativado, Ahsan *et al.* (2014), demonstraram que o método foi capaz de remover sólidos dissolvidos em até 72%.

A legislação vigente não estabelece um valor específico de lançamento para esse parâmetro.

- Nitrato

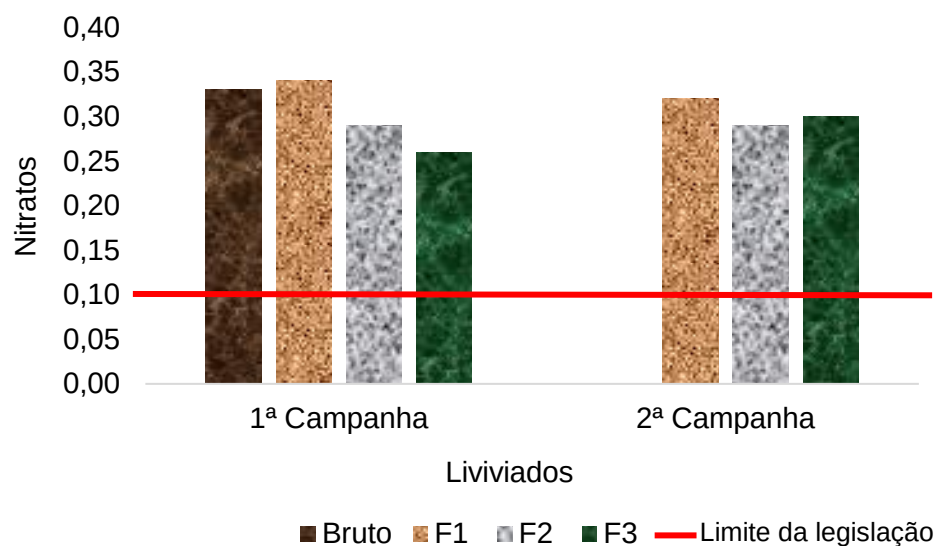
O nitrato forma-se a partir da oxidação do nitrito, possui grande solubilidade e é carregado para os corpos d'água através da lixiviação, contaminando os mesmos (Moreira, 2019).

Os lixiviados brutos tiveram uma acentuada variação entre as duas fases, sofrendo uma elevação de 24.742,42% entre elas (0,33 – 27,1 mg/L).

Na fase 1, o melhor desempenho na remoção desse parâmetro foi observado F3 (100% cinzas), primeira coleta (21,21%), Figura 34.

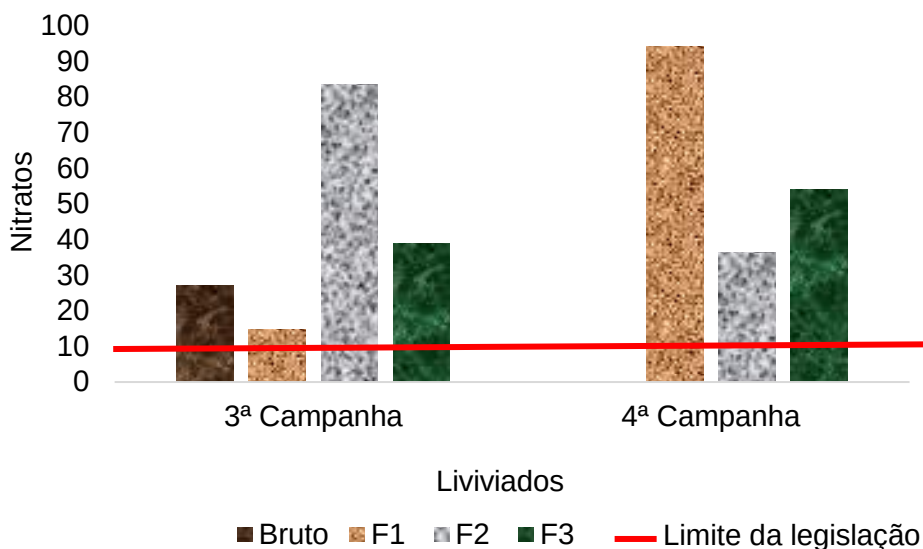
Na fase 2, ocorreu elevação do parâmetro em todos e filtros e campanha, exceto no filtro F1, 3ª campanha, que obteve redução de 45,6%, Figura 35.

Figura 34 - Comportamento do parâmetro nitrato (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 35 - Comportamento do parâmetro nitrato (fase 2)



Silva (2021) alcançou 78,2% de remoção com lagoas (anaeróbias, facultativa e seca) em um aterro sanitário. Fujii *et al.* (2019) obtiveram uma redução de 98% para este parâmetro ao aplicar o tratamento por *stripping* de amônia seguido do tratamento biológico ativado.

No estudo sobre a eficiência de processos avançados na remoção de toxicidade de lixiviado de aterro sanitário, por meio do uso de membranas de nanofiltração, Reis (2014) obteve uma eficiência na redução do nitrato de 47%.

O enquadramento nos padrões de lançamento admite 10 mg/L (COEMA nº 02/2017), resultado alcançado por todos os filtros desta pesquisa.

- Nitrito

Wang *et al.* (2018) advertem que o nitrito é um cancerígeno reconhecido, não devendo ser negligenciado nos tratamentos, sob pena, dos efeitos prejudiciais no meio ambiente serem substanciais. Concordantemente, a literatura científica aponta os nitritos como responsáveis pelo aumento da toxicidade em lixiviados, após sua degradação (Reis, 2014).

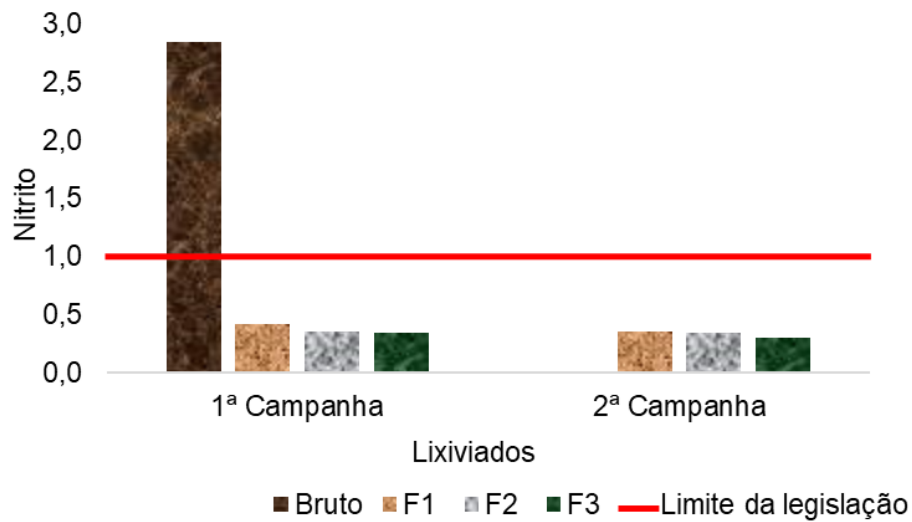
Os lixiviados brutos tiveram uma variação entre as duas fases, sofrendo uma redução de aproximadamente de 80% entre elas (2,8 – 0,6 mg/L).

Na fase 1, a remoção desse parâmetro apresentou elevada eficiência nos três

filtros em estudo, sendo o maior alcance obtido para o F3 (100% cinzas): 88,0 e 89,4% nas duas campanhas, Figura 36.

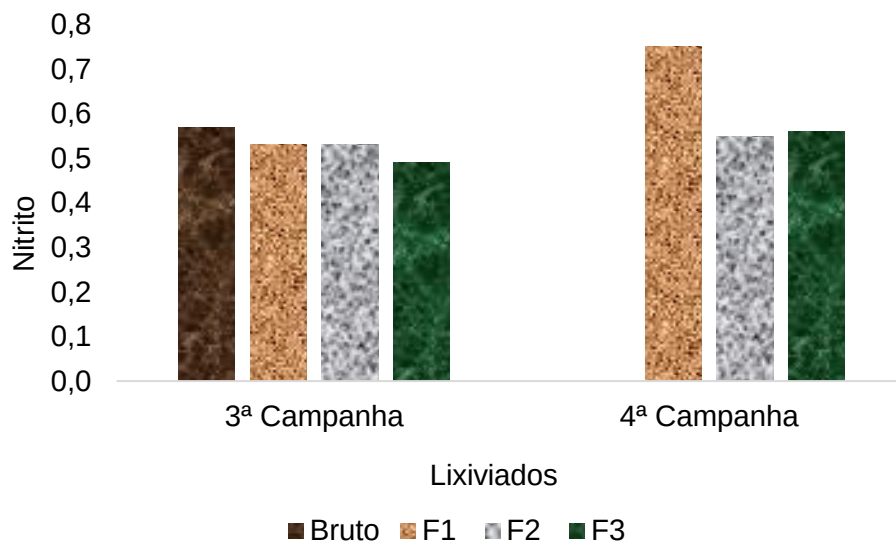
Na fase 2, com exceção do filtro F1 (100% areia), 4ª campanha, houve redução do parâmetro, contudo, com menor eficiência do que a observada na fase anterior (7% em média), Figura 37.

Figura 36 - Comportamento do parâmetro nitrito (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 37 - Comportamento do parâmetro nitrito (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

O valor máximo para lançamento estabelecido pelas resoluções pertinentes é de 1 mg/L, resultado alcançado pelos três filtros estudados, nas duas fases do experimento.

Após o tratamento por *stripping* de amônia seguido do tratamento biológico ativado, Fujii *et al.* (2019) alcançaram remoção de 96% de nitrito. Já Reis (2014) obteve uma redução média de 48% ao aplicar nanofiltração após biorreator com membranas inoculado com levedura.

- Nitrogênio amoniacal

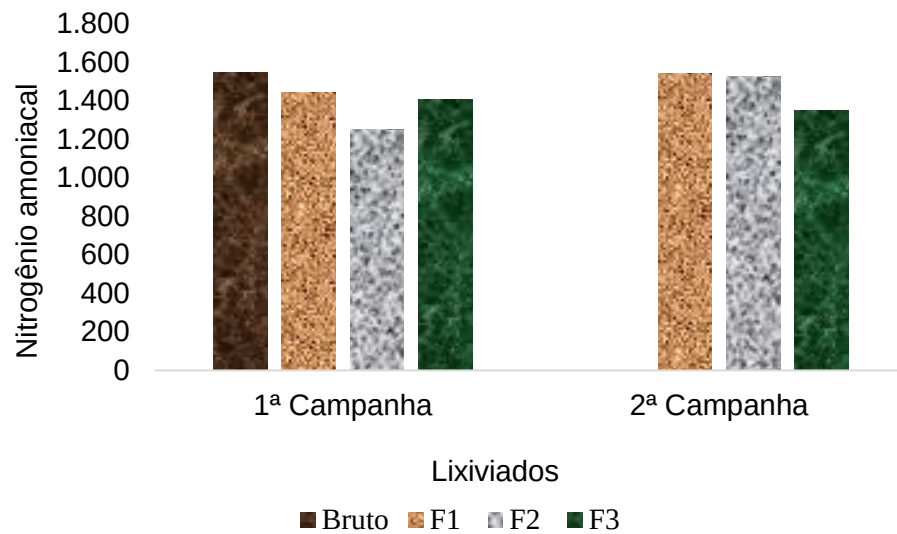
O nitrogênio amoniacal, presente no lixiviado de aterros sanitários, pode se constituir como um dos principais poluentes de longa duração, uma vez que, sua concentração aumenta com o tempo, podendo ser produzido por um longo período, mesmo após o encerramento das atividades nos aterros sanitários (Silva, 2020).

A redução observa entre os lixiviados brutos, foi de 27,6% (1.547,7 – 1.120,0 mg/L) entre as duas fases do experimento.

Na fase 1, todos os filtros apresentaram redução para este parâmetro, principalmente no F2 (areia + cinza): 19,1%. Apesar da redução alcançada pelos três filtros, não houve atendimento as exigências legais de lançamento (20 mg/L, para o pH em estudo), Figura 38.

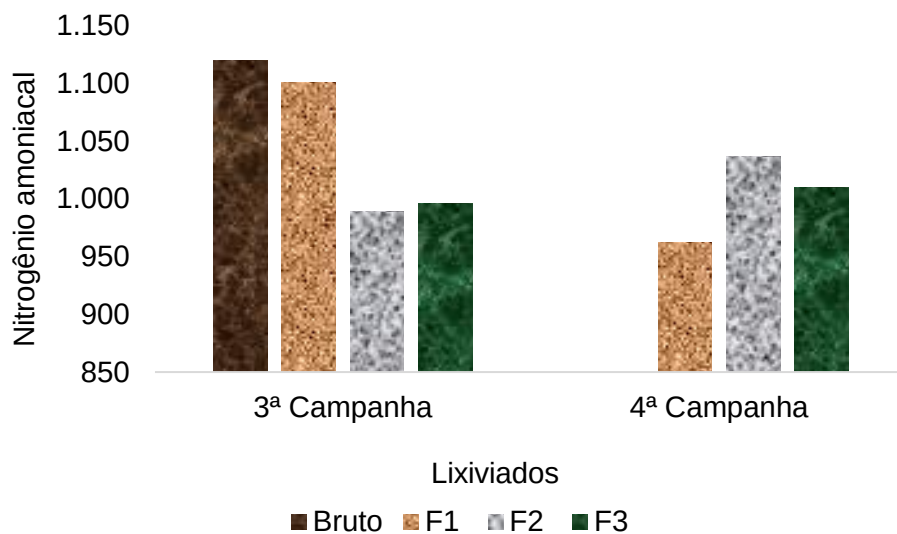
Na fase 2, houve redução do parâmetro em todos os filtros, F1, F2 e F3, com um nível de eficiência ligeiramente superior ao observado na fase 1 (8,2 e 9,3% de média de redução, fase 1 e 2, respectivamente). Nessa fase, o filtro F1 (100% areia) apresentou o maior percentual de redução do parâmetro (14, 1%, na 4ª campanha), dentre todos. Ainda assim, não houve o alcance quanto as exigências legais de lançamento, Figura 39.

Figura 38 - Comportamento do parâmetro nitrogênio amoniacal (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 39 - Comportamento do parâmetro nitrogênio amoniacal (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

Mannarino *et al.* (2006) utilizando o tratamento por *wetland* plantado com taboa, obteve uma redução de 51%. Redução de 96% foi alcançada por Fujii *et al.* (2019), ao aplicar o tratamento por *stripping* de amônia seguido do tratamento biológico ativado. O tratamento por ozonização fotocatalítica com dióxido de titânio, possibilitou a Carard (2018) obter uma redução máxima de 90% em seu estudo.

- Óleos e graxas (substâncias solúveis em hexano)

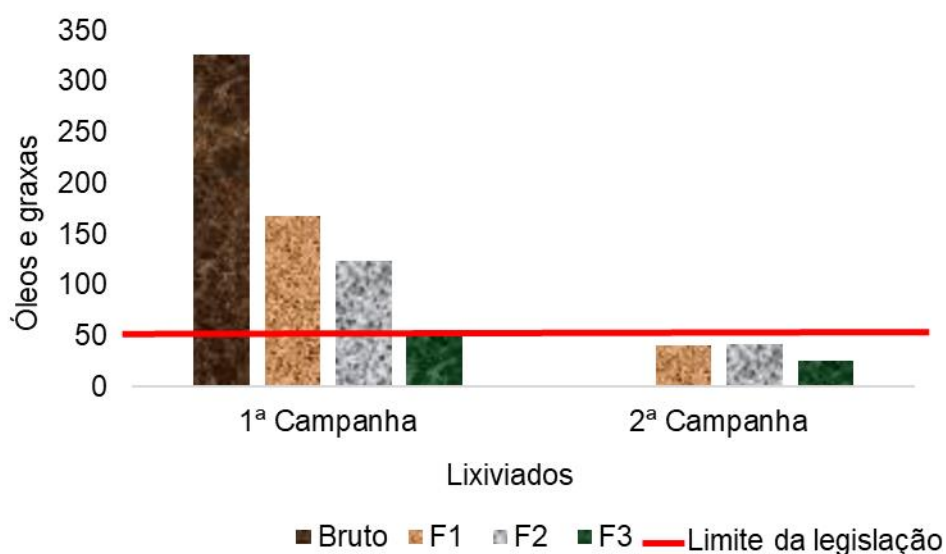
Óleos e graxas, um dos compostos orgânicos encontrados no chorume, pode ter origem animal, mineral ou vegetal, possuindo relação direta com os resíduos das cozinhas dos domicílios; quando encontrados em concentrações elevadas, aumentam a demanda biológica e química por oxigênio (Silva, 2021).

O lixiviado bruto da fase 1 apresentou concentração de 326 mg/L, enquanto o da fase 2, apresentou 118 mg/L, um valor 63,8% inferior ao primeiro.

Na fase 1, houve acentuada redução deste parâmetro em todos os filtros estudados, porém o F3 (100% cinzas) apresentou os melhores resultados: 84,7% para a coleta 1 e 92,0% para a coleta 2 (1ª e 2ª campanhas), Figura 40.

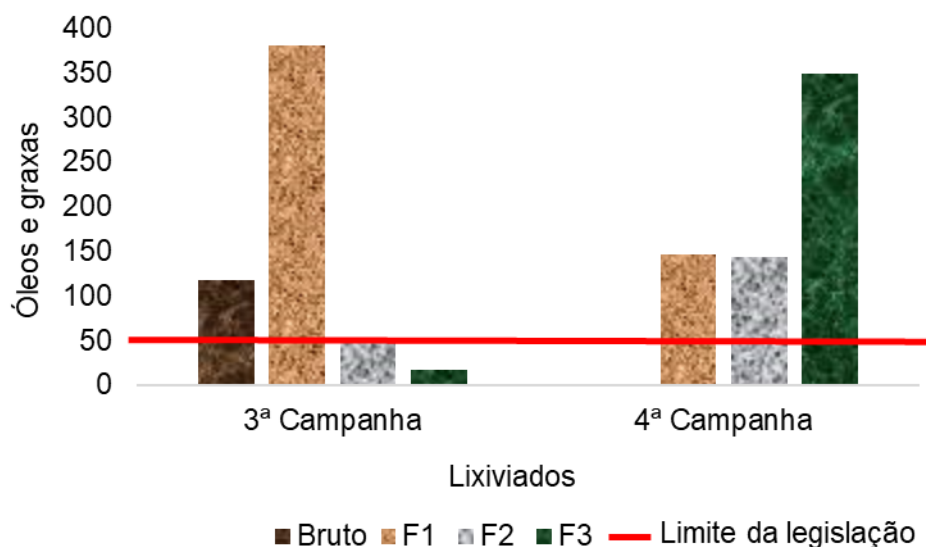
Na fase 2, houve alteração no comportamento dos filtros onde, apenas F2 e F3, 3ª campanha, conseguiram redução do parâmetro, continuando ser o filtro F3 (100% cinzas), com 85,2% de redução, portanto, o mais eficiente, Figura 41.

Figura 40 - Comportamento do parâmetro óleos e graxas (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 41 - Comportamento do parâmetro óleos e graxas (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

A resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece os limites de óleos e graxas de até 20 mg/L para óleos minerais e até 50 mg/L para óleos vegetais e gorduras animais. Como esta pesquisa lidou com lixiviado de um aterro sanitário, foi adotado - para efeito comparativo - o valor de 50 mg/L, estando o passante dos três filtros (F1, F2 e F3) da primeira fase, 2ª campanha, dentro dos limites estabelecidos.

Ao estudar a codigestão anaeróbia de lixiviado de aterro sanitário e glicerol, Silva, C. (2017), verificou a remoção de óleos e graxas na faixa de 12,7 a 97,7%. Silva (2021), ao avaliar a eficiência de remoção em lagoas (anaeróbias, facultativa e seca) de um aterro sanitário, verificou uma remoção de 93,12% para este parâmetro.

- Sulfato

O sulfato, assim como o fósforo, é liberado na degradação da matéria orgânica e em aterro sanitário, é um nutriente limitante. Em condições anaeróbias, é convertido em sulfeto (Souto, 2009).

Os valores para os lixiviados brutos das fases 1 e 2 foram respectivamente: 9,1 e 337 mg/L, portanto, observando-se uma elevação entre os dois de 3.604,4%

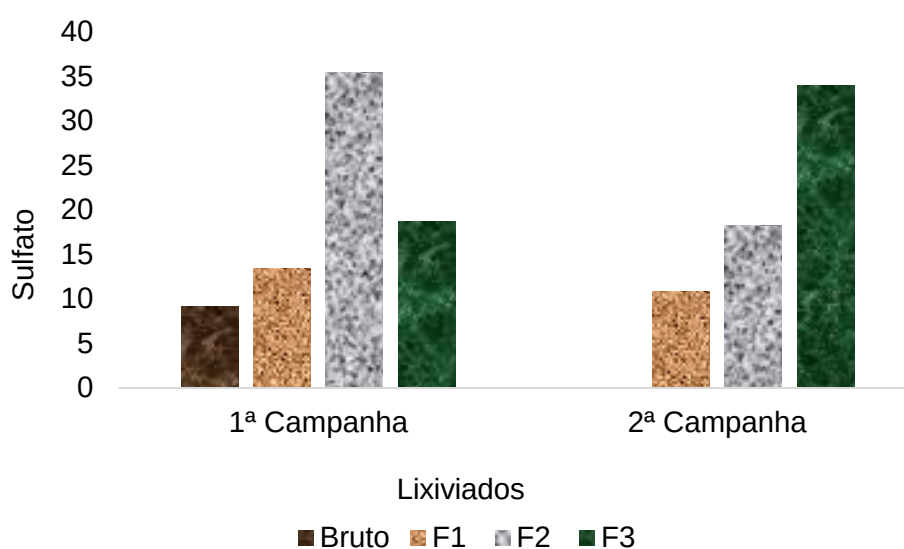
Na fase 1, a elevação deste parâmetro ocorreu nos três filtros estudados, com maior percentual de elevação observada na coleta 2 do F3 (272,3%).

Na fase 2, apenas o F1 (100% areia), 3ª campanha, conseguiu reduzir o

parâmetro. O maior percentual de elevação ocorreu no F2 (areia + cinzas), 3ª campanha, com uma elevação de 114,2%, Figura 42.

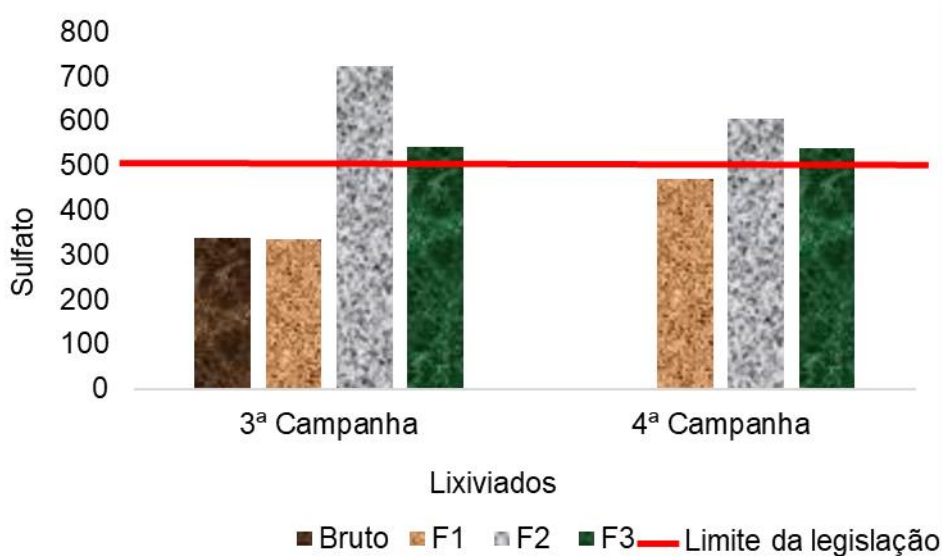
A exigência legal de lançamento para o sulfato é de até 500 mg/L, assim, tanto o lixiviado bruto quanto o tratado, da fase 1, se enquadram, apesar das elevações sofridas. O mesmo não ocorrendo para a fase 2, onde apenas o F1 (100% areia), além do lixiviado bruto, estiveram de acordo com os limites legalmente estabelecidos, Figura 43.

Figura 42 - Comportamento do parâmetro sulfato (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 43 - Comportamento do parâmetro sulfato (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

Colombo (2019), ao estudar o tratamento de lixiviados via processos foto-fenton e biológico, também percebeu uma elevação no sulfato total.

- Sulfeto

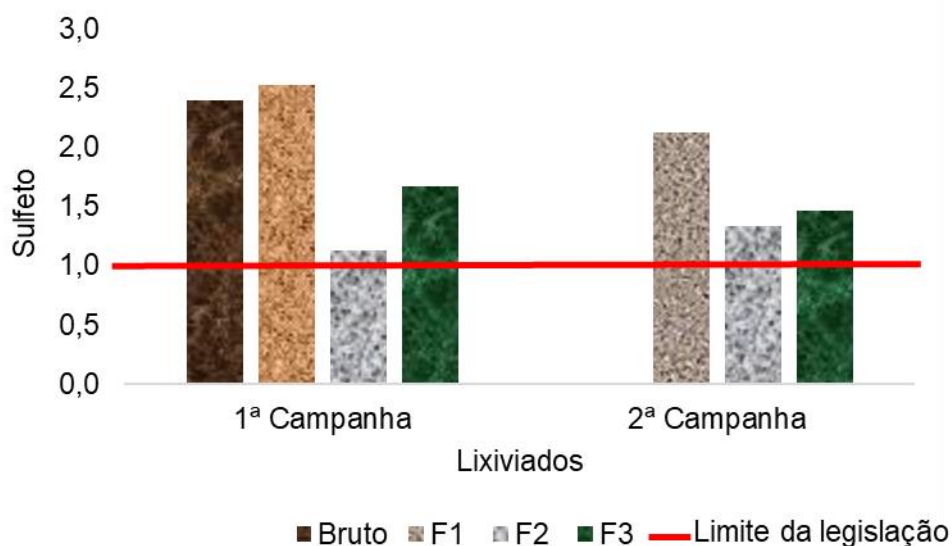
Os sulfetos, gerados pelas bactérias redutoras de enxofre, são compostos que conferem apreciável capacidade redutora ao meio, sendo úteis ao processo anaeróbio (FLECK, 2003).

Um percentual de aumento 275% foi observado entre os lixiviados brutos (2,4 e 9 mg/L, respectivamente), com relação a concentração do sulfeto.

Na fase 1, as melhores eficiências foram observadas nos filtros F2 (52,9% na 1ª campanha e 44,6% na 2ª campanha), Figura 44.

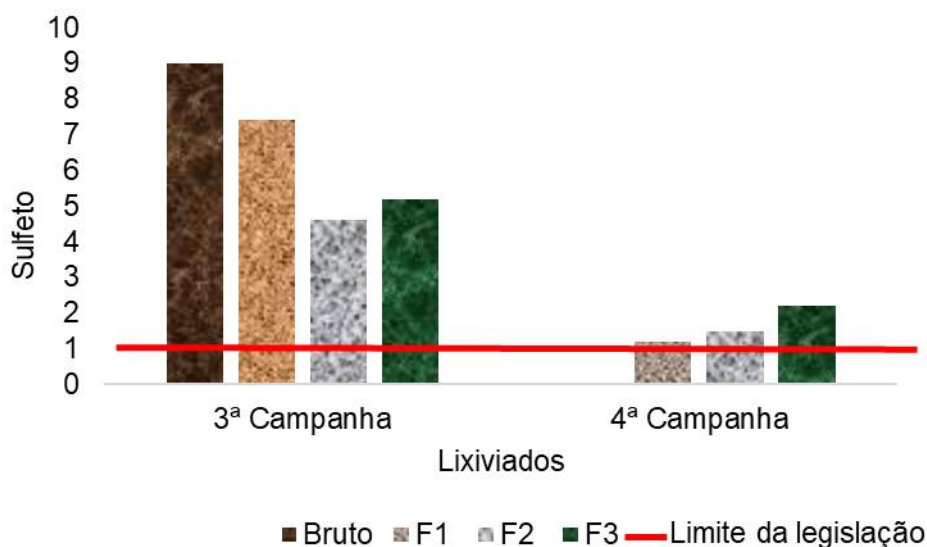
Na fase 2, todos os filtros, F1, F2 e F3, apresentaram eficiência quanto a redução do parâmetro, contudo, os filtros com percentuais de cinzas F2 (areia + cinzas) e F3 (100% cinzas), na 4ª campanha, foram os que mais reduziram (86,7 e 83,6%, respectivamente), Figura 45.

Figura 44 - Comportamento do parâmetro sulfeto (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 45 - Comportamento do parâmetro sulfeto (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

As exigências legais para lançamento desse parâmetro, estabelecem um limite de 1 mg/L, não tendo sido alcançado por nenhum dos filtros em estudo, nas duas fases do experimento, apesar das significativas reduções em relação ao lixiviado bruto.

Estudo desenvolvido por Silva (2021) obteve uma eficiência de remoção para o parâmetro de 86,4% com lagoas (anaeróbias, facultativa e seca) em um aterro sanitário.

- Turbidez

A turbidez é uma propriedade física dos fluidos que se traduz na redução da transparência devido a presença de materiais em suspensão, conferida pela presença de sólidos suspensos, de caráter tanto orgânico quanto inorgânico, e de microrganismos (Silva, 2020).

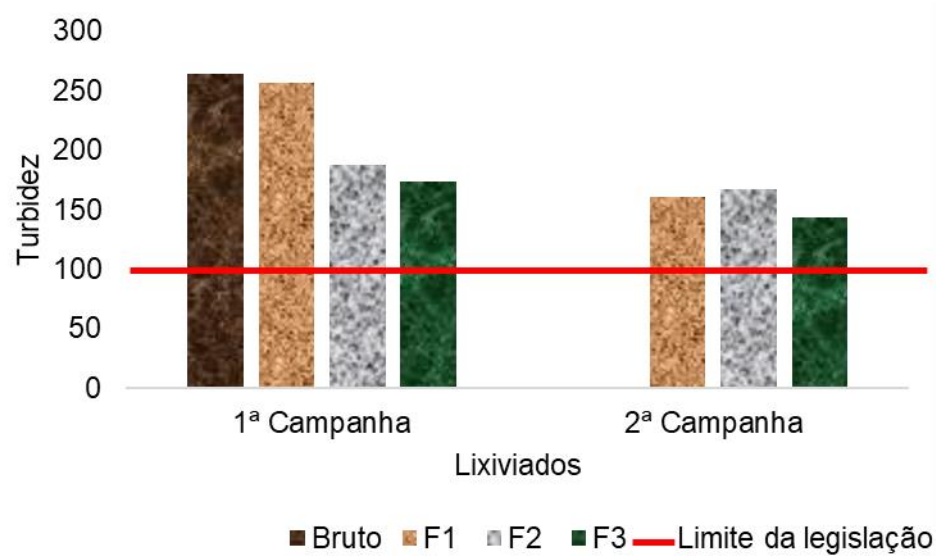
Houve um aumento de 27% entre as concentrações dos lixiviados brutos (264 – 335,3 uT), observado entre as duas fases do experimento.

Na fase 1, os três filtros em estudo apresentaram eficiência na redução da turbidez, tendo sido o maior alcance observado no F3 (100% cinzas), 2ª campanha, 45,7%, Figura 46.

Na fase 2, a tendência de redução do parâmetro pelos filtros se manteve, com exceção para o F1 (100% areia), o qual, teve elevação na 4ª campanha. O filtro F3

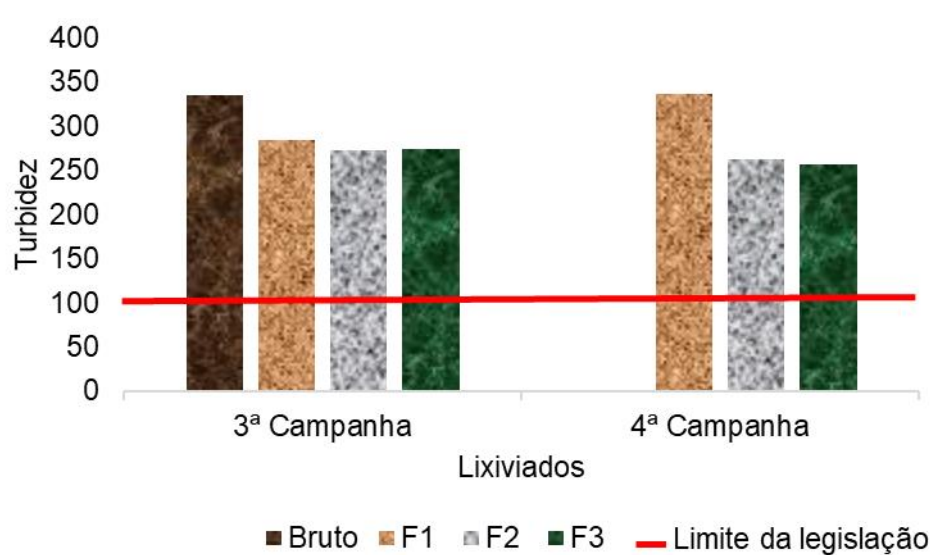
(100% cinzas), alcançou a maior redução, 23,4%, Figura 47.

Figura 46 - Comportamento do parâmetro turbidez (fase 1)



Fonte: Autora (2023).

Figura 47 - Comportamento do parâmetro turbidez (fase 2)



Fonte: Autora (2023).

Para o enquadramento da turbidez, observou-se o estabelecido pela Resolução CONAMA n° 357/2005, que determina que lançamentos em águas doces de classe 2 e 3 limitam a turbidez em até 100uT, portanto, o enquadramento não foi alcançado por nenhum dos filtros, em nenhuma das fases estudadas.

No estudo desenvolvido por Cunha (2022), por meio da combinação entre

adsorvente e coagulantes em dosagens específicas, obteve-se uma redução de 99,99% na turbidez.

Rocha, Lucena e Porto (2020) através do uso do processo foto-fenton, usando a luz solar para potencializar as reações de degradação, obtiveram remoção de turbidez maior que 90%.

Castilhos Junior, Dalsasso e Rohers (2010) perceberam um incremento na turbidez ao estudarem a filtração direta ascendente e coluna de carvão ativado, em pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Os autores atribuem esse fato ao transpasse de flocos ocasionado no meio filtrante.

6. CONCLUSÃO

Este estudo buscou avaliar a capacidade das cinzas provenientes da incineração de Resíduos Sólidos Perigosos (RSP) como elemento de filtração de lixiviados de aterros sanitários e demonstrou que as cinzas reduzem a concentração dos parâmetros físico-químicos do lixiviado, pois o Filtro 3 (100% de cinzas) foi o mais eficiente no quesito com 18 registros de redução (36% das reduções obtidas na 1ª fase).

A determinação em laboratório das características físicas e químicas das cinzas e a metodologia utilizada possibilitaram perceber que apesar de heterogênea, as cinzas estudadas apresentam resultados de granulometria, permeabilidade e compactação semelhantes às areias (um material amplamente utilizado em processos produtivos, sendo inclusive um dos elementos filtrantes mais empregados na atualidade, ou seja, essas semelhanças mostram a necessidade de estudar a possível substituição das areias - um agregado natural nobre - por cinzas, em diversos processos industriais).

Os teores de umidade tiveram grande variação entre as amostras, ao passo que a densidade real revelou dados com baixos coeficientes de variação, mostrando a necessidade de mais estudos de caracterização.

Do ponto de vista químico, as cinzas estudadas apresentaram 18 componentes elementares, com destaque para o percentual do óxido de cálcio (60,06%), dióxido de titânio (7,52%) e trióxido de enxofre (6,95%). Essa caracterização forneceu informações consistentes com as encontradas na literatura, guardadas as devidas proporções (local estudado, tecnologia empregada na unidade de incineração, composição e origem dos resíduos).

Quanto às fases, a análise cristalográfica identificou cristais de etringita, calcita, rutilo, hematita e quartzo.

As características físico-químicas do lixiviado bruto variaram de acordo com o parâmetro e período analisado. Foram observadas variações sutis no pH (8,3 - 8,7) e cloretos (4.475,6 - 4.448,5 mg/L) e bruscas no sulfato (9,1 - 337 mg/L) e nitrato (0,33 - 27,1 mg/L) e, ao serem submetidos ao sistema piloto de filtração, os melhores tratamentos ocorreram nos filtros com cinzas.

As cinzas foram especialmente capazes de reduzir 92% dos óleos e graxas (F3, 2ª campanha), 99,9% dos sólidos dissolvidos (F1, 4ª campanha) e 100% dos materiais

sedimentáveis (todos os filtros, 4ª campanha). Mesmo em menor escala, as cinzas também reduziram 0,1% de sulfato (F1, 3ª campanha), 0,3% de nitrogênio amoniacal (F1, 2ª campanha) e 1,3% de DQO (F3, 1ª campanha).

A pesquisa também permitiu concluir que apesar do intervalo de tempo entre as fases, a eficiência do tratamento do lixiviado com as cinzas se manteve, sendo uma descoberta muito importante.

A pesquisa ajudou a compreender as características físicas e químicas das cinzas do incinerador e seu comportamento como meio filtrante do lixiviado do Aterro de Caucaia, abrindo possibilidades para experimentos em maior escala. Uma possibilidade seria empregar as cinzas dentro de um sistema de filtração forçada como pré-tratamento do lixiviado bruto do aterro antes do sistema de osmose reversa.

A comparação dos resultados do lixiviado tratado no sistema proposto com o tratado em outras tecnologias ajudou a entender em que medida as colunas de cinzas geram lixiviados com parâmetros que se enquadram nos padrões de lançamento da CONAMA e COEMA.

Os dados da pesquisa, inéditos localmente, não apenas contribuem para o conhecimento técnico sobre o material, como também abrem perspectivas para valorização e uso das cinzas como substituto de matérias-primas em atividades produtivas.

Diante dos resultados alcançados, fica como sugestão para pesquisas futuras:

1. Avaliar qual a granulometria ideal das cinzas para ampliar a eficiência do tratamento;
2. Determinar qual seria o coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura das cinzas;
3. Avaliar quais alterações físicas e químicas serão observadas nas cinzas após contato com o lixiviado;
4. Avaliar o tratamento do lixiviado em sistema de filtração forçados;
5. Avaliar o tempo de colmatação dos filtros utilizando cinzas.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, B. et al. Utilização de cinzas volantes de incineração de RSU. 2002. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/19219/1/Lisboa.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- AHSAN, A. *et al.* Remoção de diversos poluentes do lixiviado utilizando técnica de baixo custo: integração de eletrólise com contator de carvão ativado. **Poluição da Água, do Ar e do Solo**, v. 1-9, 2014.
- ALAM, P.; SINGH, D.; KUMAR, S. Incinerated municipal solid waste bottom ash bricks: a sustainable and cost-efficient building material. **Materials Today: Proceedings**, v. 49, p. 1566-1572, 2022.
- ALENCAR, V. L. L. **Caracterização geotécnica de solo estabilizado com cimento e cinzas de resíduos sólidos da saúde**. 2022. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2022.
- ALLEGRINI, E. *et al.* Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash. **Journal of Environmental Management**, v. 151, p. 132-143, 2015.
- AL ROUSAN, T. M. **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system**. 2004. 229 f. Tese (Doutor de Filosofia), Texas A&M University, Texas, 2004.
- ANDRADE, C. E. S. **Análise e caracterização de cinzas do processo de incineração de resíduos de serviço de saúde para reaproveitamento**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. 2021. 53 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 6.458**: Solo - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. **NBR 7.181**: Método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 7.182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2020.
- _____. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 10007:** Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11174:** Armazenamento de resíduos classes ii - não inertes e iii - inertes. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 11175:** Incineração de resíduos sólidos perigosos - padrões de desempenho. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12235:** Armazenamento de resíduos sólidos perigosos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12677:** Análise química de produtos refratários por fluorescência de raios X (XRF) – Método do corpo de prova fundido. Rio de Janeiro, 2014.

AZNI, I. *et al.* Stabilization and Utilization of Hospital Waste as Road and Asphalt Aggregate. **J. Mater Cycles Waste Manag.**, v. 7, p. 33-37, 2005. Tese (PhD em Engenharia Civil), 2005.

BASTOS, J. B. S. *et al.* Composição Física e Química das Cinzas de Fundo de um Incinerador de Resíduos Sólidos Perigosos. *In.*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 31., 2021, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2021.

BOSMANS, A. *et al.* The crucial role of waste-to-energy technologies in enhanced landfill mining: A technology review. **Journal of Cleaner Production**, v. 55, p. 10-23, 2013.

BRASIL. Decreto nº 6.514, de 22 de julho de 2008. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 23 jul. 2008. p. 1.

_____. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 12 jan. 2022. p. 2.

_____. Fundação Nacional de Saúde – FUNASA. **Manual de saneamento**. 5. Ed. Brasília, DF, 2019. 545 p.

_____. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 03 ago. 2010. p. 2.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986**. Dispõe sobre os critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.

_____. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. **Resolução RDC nº 222, de 28 de março de 2018**. Regulamenta as boas práticas de

gerenciamento dos resíduos de serviços de saúde e dá outras providências. Disponível em:

http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2018/rdc0222_28_03_2018.pdf.

Acesso em: 14 out. 2022.

_____. **Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997.** Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental.

_____. **Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002.** Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.

_____. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

_____. **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

_____. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos. **Resíduos industriais.** 2023. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-industriais/>. Acesso em: 07/09/2023.

BRINCK, N. C. P. **Avaliação do tipo de material filtrante no comportamento hidráulico de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento.** 2009. 393 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARARD, R. F. **Tratamento de lixiviado de aterro por ozonização fotocatalítica com TiO₂.** 2018. 164 f. Dissertação (Mestrado em Inovações Tecnológicas) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

CARDOZO, B. C.; MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A. **Análise do monitoramento ambiental da incineração de resíduos sólidos urbanos na Europa e a necessidade de alterações na legislação brasileira.** Eng. Sanit. Ambient., v. 26, n. 1, jan/fev, p. 123-131, 2021.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; DALSSASSO, R. L.; ROHERS, F. Pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários por filtração direta ascendente e coluna de carvão ativado. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 15, n. 4, p. 385-392, 2010.

CEARÁ. **Resolução COEMA nº 02, de 02 de fevereiro de 2017.** Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as portarias SEMACE nº 154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 05 de abril de 2011, e altera a portaria SEMACE nº 151, de 25 de novembro de 2002.

CHÁVEZ-PORRAS, A.; RAMÍREZ-CONTRERAS, T.; CASALLAS-ORTEGA, N. Nitrificación en el tratamiento de lodos de lixiviados en un reactor biológico discontinuo secuencial – SBBR. **Revista Producción + Limpia**, v. 13, n. 1, p. 75-82, 2018.

CLAVIER, K. A. *et al.* Risk and performance assessment of cement made using municipal solid waste incinerator bottom ash as a cement kiln feed. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 146, p. 270-279, 2019.

COLOMBO, A. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário pela combinação dos processos foto-fenton e biológico**. 2019. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, 2019.

CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS. **Latest Eurostat Figures: Municipal Waste Treatment 2017**. 2019. Disponível em: <https://www.cewep.eu/municipal-waste-treatment-2017/>. Acesso em: 19 set. 2022.

CORREIA, R. R. S. **Comportamento de pisos intertravados de concreto elaborados com frações de cinzas de resíduos sólidos perigosos**. 2022. 56 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2013.

COSTA, A. F. **Análise de risco à saúde humana por uso do solo contaminado por chorume na área do antigo lixão de Maceió**. 2021. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.

COSTA, A. M.; ALFAIA, R. G. S. M.; CAMPOS, J. C. Landfill leachate treatment in Brazil - An overview. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 110-116, 2019.

COUTINHO, N. C.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização e incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 62, p. 249-255, 2016.

CUNHA, J. A. R. **Coagulação/floculação e adsorção de lixiviado de aterro sanitário na remoção de matéria orgânica e avaliação da toxicidade**. 2022. 43 f. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, 2021.

DIJKSTRA, J. J. *et al.* O significado geológico de novos materiais antropogênicos: Depósitos de resíduos industriais e subprodutos. **Antropoceno**, v. 28, p. 1-12, 2019.

DOURADO, I. N. **Avaliação da aplicabilidade de cinzas de fundo de resíduo sólido urbano (RSU) em camadas de pavimento**. 2013. 113 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FERREIRA, N. A. **Análise de processos de captação de biogás em aterro sanitário: digestão anaeróbia e incineração**. 2019. 34 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2019.

FLECK, E. **Sistema integrado por filtro anaeróbio, filtro biológico de baixa taxa e banhado construído aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário**.

2003. 323 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FORTALEZA. Lei nº 10.340, de 28 de abril de 2015. Altera os arts. 1º ao 33 da Lei 8.408, de 24 de dezembro de 1999, e dá outras providências. **Diário Oficial do Município**, Fortaleza, 28 abr. 2015.

FUJII, E. H. *et al.* Composição granulométrica do filtro ascendente para pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 24, n. 3, p. 525-535, 2019.

GHOULEH, Z.; SHAO, Y. Turning municipal solid waste incineration into a cleaner cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 268-279, 2018.

GODOI, M. C. S. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por meio do processo de eletrocoagulação e filtração**. 2019. 52 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

GUPTA, G. *et al.* Cinzas residuais de incineração de RSU (MIBA) como substituto de materiais convencionais em aplicações geotécnicas: um estudo de caracterização da Índia e comparação com a literatura. **Construção e Materiais de Construção**, v. 308, p. 1-17, 2021.

HU, Y. *et al.* Stabilization and separation of heavy metals in incineration fly ash during the hydrothermal treatment process. **Journal of Hazardous Materials**, v. 299, p. 149-157, 2015.

IWAI, C. K. **Tratamento de chorume através de percolação em solos empregados como material de cobertura de aterros para resíduos sólidos urbanos**. 2005. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2005.

LEBRON, Y. A. R. *et al.* A survey on experiences in leachate treatment: common practices, differences worldwide and future perspectives. **Journal of Environmental Management**, v. 288, p. 1-20, 2021.

LI, X. *et al.* Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in autoclaved aerated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 175-182, 2018.

LIN, W. Y. *et al.* Influência do teor de umidade e da temperatura no grau de carbonatação e efeito na lixiviação de Cu e Cr das cinzas pesadas da incineração. **Gestão de Resíduos**, v. 43, pág. 264-272, 2015.

LINO, T. L. L. **A incineração de resíduos sólidos perigosos em Fortaleza: um estudo de caracterização da composição das cinzas**. 2022. 59 f. Monografia (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2013.

LIU, Y. *et al.* Alkali-treated incineration bottom ash as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 371-378, 2018a.

LIU, Z. *et al.* Functionalizing bottom ash from biomass power plant for removing methylene blue from aqueous solution. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 760-768, 2018b.

LÔBO, E. M. P. S. **Estudo comparativo das características dos líquidos percolados gerados no Aterro Metropolitano – PB e no Aterro da Muribeca – PE.** 2006. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

MANNARINO, C. F. *et al.* Wetlands para tratamento de lixiviados de aterros sanitários - experiências no aterro sanitário de Piraí e no aterro sanitário de Gramacho (RJ). **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 11, n. 2, p. 108-112, 2006.

MANTONINI, P.; MAURO, G. **Incineração de resíduos urbanos** (tradução). 2013. 95 p.

MENDONÇA, F. L. **Caracterização das cinzas de incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde para inserção em ciclos produtivos e ambientais.** 2018. 27 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A. Estágio atual da incineração no Brasil. *In.*: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, 7., **Anais...** Curitiba, 2000.

MORAVIA, W. G. **Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas.** 2010. 237 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

MOREIRA, J. V. F. **DNA metabarcoding da microbiota do chorume do aterro sanitário da cidade de Foz do Iguaçu-PR visando os processos de biorremediação.** 2019. 58 f. Monografia (Graduação em Biotecnologia) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

PATRA, S.; WHAUNG, S. T.; KWAN, W. L. Analysis of heavy metals in incineration bottom ash in Singapore and potential impact of pre-sorting on ash quality. **Energy Procedia**, v. 143, p. 454-459, 2017.

PESSOA FILHO, J. S. **Tratamento térmico para aproveitamento energético de resíduos plásticos: análise experimental.** 2020. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

PINTO, B. H. A. **Estudo de argamassas com adição de cinzas do processo de incineração de resíduos sólidos dos serviços de saúde.** 2018. 24 f. Artigo Científico (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO - PROSAB. **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 360 p.

REIS, B. G. **Avaliação da eficiência de processos avançados na remoção de toxicidade de lixiviado de aterro sanitário**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

RENOU, S. *et al.* Tratamento de lixiviados de aterros sanitários: revisão e oportunidade. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, p. 468-493, 2008.

ROCHA, E. M.; LUCENA, L. G.; PORTO, C. A. Otimização do processo foto-fenton solar no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 16, n. 41, p. 202-215, 2020.

RODRIGUES, M. C. **Tratamento eletrolítico de lixiviado de aterro sanitário**. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

ROEHRS, F. **Tratamento físico-químico de lixiviado de aterro sanitário por filtração direta ascendente**. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

ROJAS-MANTILLA, H. D.; AYALA-DURAN, S. C.; NOGUEIRA, R. F. Pupo. Argila mineral não tronita N_{Au}-2 como suporte para hematita aplicada como catalisador em processos foto-Fenton heterogêneos. **Quimosfera**, v. 277, pág. 130258, 2021.

SÁ, L. F.; JUCÁ, J. F. T.; MOTTA SOBRINHO, M. A. Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destilador solar. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 7, n. 1, p. 204-217, 2012.

SAFFARZADEH, A.; ARUMUGAM, N.; SHIMAOKA, T. Aluminum and aluminum alloys in municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash: a potential source for the production of hydrogen gas. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, p. 820-831, 2016.

SCHALCH, V. *et al.* **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**. 2002. 93 p.

SILVA, B. L. *et al.* Pré-tratamento para redução dos parâmetros físicos-químicos do lixiviado gerado em aterros sanitários. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. 1-10, 2021.

SILVA, C. Z. **Codigestão anaeróbia de lixiviado de aterro sanitário e glicerol**. 2017. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2017.

SILVA, D. M. **Caracterização do sistema de tratamento de resíduos sólidos urbanos de um aterro sanitário no interior da Amazônia legal**. 2021. 59 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Faculdade de Educação e Meio Ambiente, Ariquemes, RO, 2021.

SILVA, M. C. C. P. **Remoção de nitrogênio e fósforo de lixiviado de aterro sanitário aplicado a *Chorella* sp. imobilizada em matriz de alginato de cálcio.** 2020. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2020.

SILVA, M. L.; LANGE, L. C. Caracterização das cinzas de incineração de resíduos industriais e de serviços de saúde. **Quím. Nova**, v. 31, n. 2, p. 199-203, 2008.

SILVA, RILTON B. L. **Caracterização físico-química preliminar dos efluentes da incineração de resíduos perigosos de Fortaleza-CE.** 2017. 79 f. Monografia (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2017.

SILVA, ROBERTO A. C. **Avaliação da evolução do comportamento geomecânico de aterros sanitários com base na realização de ensaios de laboratório e de campo.** 2017. 144 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SINGH, A. *et al.* Sustainable use of different size fractions of municipal solid waste incinerator bottom ash and recycled fine aggregates in cement mortar. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. 1-12, 2022.

SOARES, B. R. **Ensaio de permeabilidade de laboratório na areia da Praia de Ipanema e em uma amostra de microesferas de vidro.** 2021. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

SOUTO, G. D'A. B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping").** 2009. 371 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SOUZA JÚNIOR, L. **Tecnologias otimizadas para o tratamento de lixiviados com altas concentrações inorgânicas: Estudo de caso do Aterro Sanitário de Bénac, França.** 2022. 91 f. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

TANG, P.; FLOREA, M. V. A.; BROUWERS, H. J. H. Employing cold bonded pelletization to produce lightweight aggregates from incineration fine bottom ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1371-1384, 2017.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP. **MATERIAIS didáticos.** Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/>. Acesso em: 12 set. 2023.

VIANA, J. A. **Estimativa da quantidade de resíduos de serviços de saúde (RSS) incinerada por nove hospitais públicos de Fortaleza-CE.** 2013. 68 f. Monografia (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2013.

VICENTE, B. M. **Avaliação de processos para tratamento de lixiviados de aterros sanitários**: análise comparativa de estudos desenvolvidos na UFRJ. 2021. 110 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

WANG, F.; SMITH, D. W.; EL-DIN, M. G. Aplicação de métodos avançados de oxidação para tratamento de lixiviados em aterros sanitários – Uma revisão. **Revista de Engenharia e Ciência Ambiental**, v. 2, n. 6, p. 413-427, 2003.

WANG, K. *et al.* Treatment of landfill leachate using activated sludge technology: a review. **Archaea**, p. 1-10, 2018.

YIN, K. *et al.* Co-complexation effects during incineration bottom ash leaching via comparison of measurements and geochemical modeling. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, p. 155-168, 2018.

ZHU, W. *et al.* Characterization of calcium-containing phases in álcali-activated municipal solid waste incineration bottom ash binder through chemical extraction and deconvoluted Fourier transform infrared spectra. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 782-789, 2018a.

ZHU, W. *et al.* Lightweight aerated metakaolin-based geopolymer incorporating municipal solid waste incineration bottom ash as gas-forming agent. **Journal of Cleaner Production**, v.177, p. 775-781, 2018b.