



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA SELMA SILVA DO MONTE

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MINERALÓGICA E GEOTÉCNICA DO
LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA VISANDO APLICAÇÃO EM
OBRAS GEOTÉCNICAS

FORTALEZA

2024

ANA SELMA SILVA DO MONTE

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MINERALÓGICA E GEOTÉCNICA DO
LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA VISANDO APLICAÇÃO EM
OBRAS GEOTÉCNICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Recursos Hídricos. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadora: Profa. Dra. Mariana Vella Silveira

FORTALEZA

2024

ANA SELMA SILVA DO MONTE

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MINERALÓGICA E GEOTÉCNICA DO
LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA VISANDO APLICAÇÃO EM
OBRAS GEOTÉCNICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Recursos Hídricos. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 27/03/2024

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Mariana Vella Silveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Daniela Lima Machado da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC-Campus de Russas)

Profa. Dra. Miriam de Fátima Carvalho Machado
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

A minha querida tia Anita (*in memoriam*), que em toda minha jornada estudantil, foi lembrada como a primeira pessoa da família a se formar, em um cenário socioeconômico totalmente desfavorável. Sua breve vida sempre foi inspiração para superar os desafios ao longo de toda a jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Sempre que eu falava que estava fazendo um segundo mestrado, notava que isso causava certa estranheza. Essa decisão foi tomada considerando um cenário externo de pandemia, competitividade no mercado de trabalho, desemprego, etarismo e muitas inseguranças pessoais.

Agradeço aos colegas da turma, em especial Jéssica, Vitoria, Thiago, Bruna e Sávilla, pelos incentivos, pela troca de conhecimento, por me fazer acreditar em mim.

Agradeço a cada professor do programa que me fez perceber a riqueza de uma instituição plural, dos mais amigáveis aos mais exigentes, daqueles que se propõem a organizar uma aula de campo aos que nos forçam a escrever melhor, a estudar mais ou a sermos mais críticos. Cada um contribuiu para que eu me reconhecesse como uma estudante curiosa e questionadora. Aos poucos fui me percebendo, me aceitando, e me sentindo mais confiante para retornar ao mercado de trabalho.

A Prof. Dra. Mariana Vella Silveira, pelo acolhimento, pela excelente orientação, e por suas palavras, que eu levarei para toda vida, em cada situação de insegurança que eu sentir, lembrarei de não deixar o medo do fracasso me dominar, antes mesmo de tentar superá-lo.

Aos professores participantes da banca examinadora Anderson Borghetti, Daniela Lima e Miriam de Fátima pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A todos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, desde a colaboração e paciência na realização dos ensaios até a ajuda para ficar com meu filho, quando precisei leva-lo ao laboratório. Sem dúvida, conciliar a mãe, a estudante ou a profissional é sempre desafiador, e encontrar quem nos acolha em meio as dificuldades, torna a gratidão um sentimento imensurável dessa jornada.

A todos os técnicos e professores que colaboraram na realização e interpretação dos ensaios nos demais laboratórios da UFC, Central Analítica, Raio X, Agronomia, Fundação e de Materiais Avançados, e todos aqueles que contribuíram para o desenvolvimento deste estudo e apresentação escrita.

À Cagece, pelo convite para realizar os estudos, em especial, aos colaboradores da companhia, pela busca por melhoria nos seus processos, incentivando a parceria mais enriquecedora de todas, da prática com a teórica.

A Deus, o Grande Engenheiro do Universo, que de forma justa e perfeita sempre me iluminou e me deu forças para prosseguir nesta caminhada. Por vezes, tentei acreditar que

sem Ele, era possível alcançar o que se quisesse. Até admiro quem assim conquista o que deseja. Mas eu não consigo. Se até aqui cheguei novamente, foi graças a Ele.

Agradeço imensamente essa jornada no mestrado. Os novos desafios que surgirão profissionalmente encontrarão uma profissional muito mais resiliente. Cheguei no mestrado cabisbaixa, saio do mestrado fortalecida e confiante em quem sou, não por ter sido uma aluna excepcional, mas por ter conseguido dissipar muitas das inseguranças que me cercavam.

RESUMO

No processo de tratamento da água bruta nas estações de tratamento de água (ETA's) são geradas grandes quantidades de resíduos. Esse resíduo denominado lodo de ETA possui características que variam com a natureza da água bruta, com os processos unitários e com os produtos químicos utilizados no tratamento, apresentando grandes variações, tanto entre diferentes ETA's quanto ao longo do tempo em uma mesma ETA. O lodo da ETA-Oeste da Cagece tem como disposição final o descarte no aterro sanitário localizado no município de Caucaia. Motivados pela necessidade de dar a esse resíduo uma destinação final mais adequada tanto do ponto de vista ambiental como técnico e econômico, essa pesquisa tem como objetivo definir para esse rejeito as suas principais características mineralógica, física, química, ambiental e geotécnica, com o intuito de subsidiar estudos futuros quanto ao seu comportamento geotécnico e sua influência em misturas com outros materiais, além de definir as melhores alternativas de uso em obras geotécnicas. Para isso, o lodo coletado em dois momentos distintos (período seco e chuvoso) foi submetido a ensaios mineralógicos, físico-químico, ambientais e de caracterização geotécnica. Alguns resultados dos ensaios foram ao encontro dos resultados já obtidos na literatura científica, como a preponderante presença de matéria orgânica em sua composição. Verificou-se a formação de grumos cimentícios a medida que o lodo perdia umidade, e os impactos dessa formação nos ensaios geotécnicos. Foram empregadas várias concentrações do defloculante, além da preconizada no ensaio de sedimentação. Já nos ensaios de Limite de Liquidez e de Plasticidade, ao se realizar os ensaios próximos da umidade higroscópica observou-se a perda de afinidade do resíduo com a água. Para a obtenção de resultados nesses ensaios a metodologia convencional também precisou ser adaptada para contornar os desafios apresentados pela composição do lodo e pelo seu comportamento após secagem. Nos demais ensaios, pôde-se constatar ainda, na composição do lodo, a relação direta com a eutrofização e qualidade da água do manancial tratado, evidenciada nas imagens obtidas na microscopia, na termogravimetria, na composição química e nos ensaios de caracterização ambiental.

Palavras-chave: resíduos industriais; reuso de resíduos; soluções geotécnicas.

ABSTRACT

In the process of treating raw water in water treatment plants (WTPs) are generated large amounts of waste. This residue named ETA sludge has characteristics that vary with the nature of the raw water, with the unit processes and with the chemical products used in the treatment, presenting large variations, both between different ETA's and over time in the same ETA. The final disposition of the sludge from ETA-Oeste da Cagece is in the landfill located in the municipality of Caucaia. Motivated by the need to give this waste a more appropriate final destination, both from an environmental, technical and economic point of view, this research aims to define its main physical, chemical, environmental and geotechnical characteristics for this waste, with the aim of subsidizing future studies regarding its behavior and its influence in mixtures with other materials, in addition to defining the best alternatives for use in geotechnical works. For this, the sludge collected at two different times (dry period and winter) was subjected to physical-chemical, environmental tests, and geotechnical characterization tests. Some test results were in line with expected results, such as the massive presence of organic matter in its composition. The formation of cementitious lumps was verified as the sludge lost moisture, and the impact of this formation on geotechnical tests. In the sedimentation test, for example, various concentrations of the deflocculant were used, in addition to that recommended by the standard as alternatives to maintain the dispersion of the solution in the densimeter. In the Liquidity Limit and Plasticity tests, when carrying out the tests in hygroscopic humidity, a loss of affinity of the residue with water was observed. To obtain results in these tests, the conventional methodology also needed to be adapted to overcome the challenges presented by the composition of the sludge and its behavior after drying. In the other tests, the direct relationship with the eutrophication and water quality of the treated source can also be seen in the composition of the sludge, evidenced in the images obtained through microscopy, thermogravimetry, the chemical levels obtained and in the environmental characterization tests.

Keywords: industrial waste; waste reuse; geotechnical solutions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Detalhe de assentamento de tubulação em PEAD	33
Figura 2	– Sistema de Abastecimento de Água da RMF	36
Figura 3	– Vista aérea da ETA-Oeste Caucaia-CE	39
Figura 4	– a) Centrífuga e b) saída da centrífuga sobre caçamba estacionária	43
Figura 5	– Metodologias empregadas para caracterização do lodo da ETA-Oeste	44
Figura 6	– Etapas de secagem até a formação dos grumos cimentícios	44
Figura 7	– Resultados do DRX para as 03 amostras ensaiadas	52
Figura 8	– Microscopia eletrônica de Varredura coleta (I) e coleta (II)	54
Figura 9	– Amostra C TG-DSC – Ar sintético – Coleta (I)	57
Figura 10	– Amostra C TG-DSC – Ar nitrogênio (Coleta (I)	57
Figura 11	– Teor de umidade da coleta do período Seco x Período chuvoso (II)	62
Figura 12	– Densidade do lodo x Teor de Umidade <i>in situ</i>	64
Figura 13	– Lodo antes e após a queima da matéria orgânica a 440°C	65
Figura 14	– Ensaio de Limite de Liquidez e Plasticidade da primeira coleta (I)	66
Figura 15	– Ensaio de limite de Liquidez – amostras do período chuvoso (II)	67
Figura 16	– Ensaio de limite de plasticidade– amostras do período chuvoso (II)	67
Figura 17	– Curvas granulométricas – 1ª coleta período seco (I)	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Produção diária de lodo de ETA em diversas localidades	16
Tabela 2	– Variação das condutividades hidráulicas k da areia Botucatu e suas misturas com lodo em diferentes proporções (em m/s)	29
Tabela 3	– Requisitos para cobertura de aterro sanitário	31
Tabela 4	– Ensaio de caracterização química – Método EMBRAPA	47
Tabela 5	– Procedimentos e normas para os ensaios de caracterização geotécnica	48
Tabela 6	– Variação da concentração do defloculante x lodo no ensaio de sedimentação	50
Tabela 7	– Resultado dos ensaios de caracterização química	59
Tabela 8	– Resultado dos ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade	68
Tabela 9	– Parâmetros avaliados acima do limite tolerável	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATG	Análise termogravimétrica
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de tratamento de Água
FAAG	Filtros Ascendentes de Areia Grossa
FRD	Filtros Rápidos Descendentes
SEMA	Superintendência Estadual do Meio Ambiente
TAR	Tanque de Água Recuperada
TCA	Tanque de Clarificação e Adensamento
TLA	Tanque de Lodo Adensado
TRE	Tanque de Recepção e Equalização
UTR	Unidade de Tratamento de Resíduos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.2	Estrutura da dissertação	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Lodo de Estações de Tratamento de Água	16
2.1.1	<i>Composição</i>	<i>18</i>
2.1.2	<i>Caracterização mineralógica</i>	<i>18</i>
2.1.3	<i>Caracterização físico-química</i>	<i>19</i>
2.1.4	<i>Caracterização ambiental</i>	<i>21</i>
2.1.5	<i>Caracterização geotécnica</i>	<i>24</i>
2.2	Misturas de lodo com solo	27
2.3	Aplicações Geotécnicas	30
2.3.1	<i>Aterro sanitário</i>	<i>30</i>
2.3.2	<i>Reaterro de valas</i>	<i>32</i>
2.3.3	<i>Obras em aterro</i>	<i>33</i>
2.3.4	<i>Muros de solo reforçados com geossintéticos</i>	<i>34</i>
2.4	Características do Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF)	35
2.4.1	<i>ETA-Oeste</i>	<i>37</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Coleta das amostras	42
3.2	Metodologia dos Ensaios	43
3.2.1	<i>Obtenção da umidade e preparação da amostra</i>	<i>44</i>
3.2.2	<i>Caracterização mineralógica</i>	<i>45</i>
3.2.3	<i>Análise Termogravimétrica (ATG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</i>	<i>45</i>
3.2.4	<i>Caracterização química</i>	<i>46</i>
3.2.5	<i>Caraterização geotécnica</i>	<i>48</i>
3.2.6	<i>Caracterização ambiental</i>	<i>51</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	Caracterização mineralógica	52

4.1.1	<i>DRX</i>	52
4.1.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	54
4.2	<i>Análise termogravimétrica (TGA)</i>	57
4.3	<i>Caracterização química</i>	58
4.4	<i>Caracterização geotécnica</i>	62
4.4.1	<i>Teor de umidade</i>	62
4.4.2	<i>Massa específica dos grãos</i>	63
4.4.3	<i>Teor de matéria orgânica</i>	64
4.4.4	<i>Limite de liquidez e limite de plasticidade</i>	66
4.4.5	<i>Peneiramento fino</i>	68
4.5	<i>Caracterização ambiental</i>	70
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
5.1	Conclusões	73
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	75
	REFERÊNCIAS	76
	ANEXO A – RELATÓRIOS DE ENSAIOS	84

1 INTRODUÇÃO

Ao se aprofundar no tema sobre a escassez de água de qualidade, além da necessidade de mais água para os diversos usos múltiplos, pode-se associar como uma das suas causas a quantidade de esgotos lançados nos córregos, rios, represas e lagos, próximos às aglomerações, que aumenta com o crescimento desordenado das cidades. Esse aumento provoca, por consequência, o comprometimento da autodepuração dos cursos d'água, superada pela carga poluidora dos efluentes. Essa escassez, por sua vez, é potencializada considerando-se que a distribuição de água doce no mundo está longe de ser homogênea, e que não é mais possível considerar a água, como nos séculos anteriores, um bem público de quantidade infinita, à disposição do homem, considerada assim por muito tempo por se tratar de um recurso natural autossustentável em função da sua capacidade de autodepuração.

Como consequência, os efeitos da crescente má qualidade da água desencadeia nas Estações de Tratamento de Água (ETA) o aumento da produção de lodo, resíduo gerado neste processo, geralmente oriundo da lavagem de decantadores e filtros. O lodo oriundo das ETA's depende da qualidade do manancial a ser tratado, dos processos unitários, dos produtos químicos utilizados, variando ainda entre ETA's e até mesmo ao longo do tempo em uma mesma ETA.

Inclui-se, ainda, neste processo, um outro aspecto importante desta cadeia que é a disposição final do lodo de ETA. Pode-se dizer que é uma atividade importante e requer grande responsabilidade tanto pela entidade geradora deste resíduo como pela entidade encarregada da sua destinação, sendo que muitas vezes as duas atividades correspondem à mesma empresa. Desde muitos anos a maior parte dos lodos de estações de tratamento de água tem sido lançada nos cursos de água próximos ou na própria fonte de água que a estação processa. Isto leva à observação de que o lodo de ETA não tem sido tratado nem disposto da melhor maneira possível através do tempo, ressaltando-se que, segundo a resolução Conama 313/2002, tanto o lodo de ETA como aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição são considerados resíduos sólidos industriais, e sendo assim, deverão ser objeto de controle específico, como parte integrante do processo de licenciamento ambiental. Nestes últimos anos, citam-se outros métodos de destinação como, por exemplo, o lançamento em sistemas públicos de esgoto (são lançados na rede coletora) ou sua disposição em aterros sanitários. Além disso, existe alternativas como lagoas de estabilização com grande tempo de detenção, sua aplicação no terreno (esparramando-o no solo natural ou na agricultura), e seu aproveitamento em subprodutos como material para tijolos refratários, agente plastificador em cerâmica e na

produção de cimento (Richter, 2001).

O lodo produzido na ETA-Oeste da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece), localizada em Caucaia-CE, é um produto originário da lavagem dos filtros ascendentes e descendentes, seguido de tratamento prévio em sua Unidade de Tratamento de Resíduo (UTR). Estima-se que são produzidas diariamente cerca de 15 toneladas de lodo fresco que tem como disposição final o descarte no Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC) localizado no mesmo município e distante 10,2 km. Mesmo apresentando uma disposição final adequada, a busca de soluções economicamente viáveis e ambientalmente vantajosas para o tratamento e disposição final de lodos de ETA's continua sendo um desafio em vários países, principalmente no Brasil, onde o assunto é mais recente.

Diante dos desafios acima expostos, esta pesquisa pretende contribuir principalmente nos estudos para melhoramento dos processos de destinação do lodo oriundo do tratamento de água da ETA-Oeste, considerando o seu reaproveitamento como uma alternativa para aplicação na área da geotecnia, buscando contribuir com a preservação da qualidade da água bruta captada, assim como priorizando-se inicialmente os estudos que propiciem uma possível aplicação desse resíduo nas operações do aterro sanitário. Há, entretanto, outros usos em obras geotécnicas, como bases, sub-bases de pavimentos, reaterros de estruturas de contenção, preenchimento de valas e aterros em geral.

A caracterização do resíduo é, então, uma etapa fundamental para compreender seu comportamento e sua influência em misturas com outros materiais, além de definir as melhores alternativas de uso, sendo este estudo, a primeira etapa desta pesquisa experimental.

1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo caracterizar o lodo oriundo do tratamento de água da Estação ETA-Oeste, considerando seus aspectos físico, químico, mineralógico, ambiental e geotécnico, fornecendo os subsídios necessários para avançar nos estudos para aplicação do lodo em obras geotécnicas.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Obter as características geotécnicas como teores de umidade, limites de Atterberg, análise granulométrica, massa específica dos grãos e teor de matéria orgânica;
- b) Caracterizar o lodo quanto aos seus aspectos mineralógicos a partir das imagens obtidas pela Microscopia Eletrônica de Varredura, e a composição mineralógica

qualitativa por meio da Difração de Raio X;

- c) Verificar o comportamento do resíduo em relação a degradação da matéria orgânica a partir da Análise Termogravimétrica e da Calorimetria Exploratória Diferencial, observando-se os tipos de reação, a atmosfera mais eficiente e os teores de matéria orgânica degradada;
- d) Caracterizar quimicamente o resíduo a partir da obtenção de parâmetros básicos para misturas com o solo como pH, matéria orgânica, carbono orgânico, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, sódio e alumínio;
- e) Caracterizar ambientalmente, a partir da classificação do resíduo segundo a ABNT NBR 10.004:2004.

1.2 Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo de introdução este conteúdo foi dividido em 5 capítulos resumidamente apresentados:

No capítulo 2 é apresentada a Revisão Bibliográfica sobre o objeto desse estudo, o lodo de estação de tratamento de água: geração, características e aplicações em obras geotécnicas. Para subsidiar os próximos estudos com lodo, este capítulo também apresenta algumas referências da literatura científica sobre as misturas com solo e o seu comportamento geomecânico.

A metodologia é detalhada no Capítulo 3 e apresenta as características do material utilizado e os métodos adotados para obtenção dos parâmetros requeridos, enquanto que o Capítulo 4 apresenta os resultados e análises obtidos para caracterização do lodo.

As principais conclusões e recomendações estão no Capítulo 5 destinado às considerações pertinentes à questão principal com propostas de estudos futuros e ressalvas da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lodo de Estações de Tratamento de Água

Em geral, os sistemas de tratamento de água consistem em diversas etapas nas quais a água captada dos mananciais ou represas é convertida em própria para o consumo humano. Esses processos são realizados em local específico denominado Estação de Tratamento de Água (ETA) que pode ser gerido por empresas públicas ou privadas.

O ciclo de tratamento de água ocorre inicialmente com a captação e bombeamento da água bruta. Geralmente, para retirada das partículas sólidas, a água é canalizada para estruturas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção.

De maneira geral, nas Estações de Tratamento de Água a geração do lodo ocorre nos tanques decantadores e nos filtros, sendo removido durante a lavagem dos mesmos de forma manual, hidráulica ou com raspador mecânico (ABNT NBR 12.216:1992). Segundo Cabral (2013), a quantidade de lodo advindo dos decantadores é de aproximadamente, 60 a 95% do total de resíduo produzido pela ETA, sendo o restante oriundo do processo de filtração. Vale ressaltar que, o lodo da ETA-Oeste é oriundo basicamente da lavagem dos filtros ascendentes e descendentes, e estima-se que a produção corresponda a 2,2 ton/dia, em peso seco.

Na Tabela 1 apresenta-se a produção diária de lodo obtida na literatura para algumas ETA's, cuja variação de valores entre as estações e até em uma mesma ETA deve-se, principalmente a quantidade de sólidos em suspensão total (SST), turbidez, cor, coagulantes e aditivos (Katayma, 2012). Destaca-se a ETA-Taiaçupeba com 18,2 toneladas de lodo seco produzido diariamente, sendo também a de maior capacidade de geração de água potável dentre as ETA's analisadas.

Tabela 1 - Produção diária de lodo de ETA em diversas localidades

Localidade	Ton/dia (em peso seco)	Capacidade Média	Referência
ETA Illawarra (Austrália)	0,184	2,43 m³/s	Gharaibeh (2009)
ETA Illawarra (Austrália)	3,6	2,72 m³/s	Basim (1999)
ETA Casa Grande (SP – Brasil)	4,4	3,92 m³/s	Januário e Ferreira Filho (2007)
ETA Cubatão (SP – Brasil)	2,5 a 5,0	4,20 m³/s (*)	Katayama <i>et al</i> (2015) (*) Ribeiro e Cordeiro (2005)
ETA-Taiaçupeba (SP – Brasil)	18,2	9,60 m³/s	Januário e Ferreira Filho (2007)
ETA – Oeste (Fortaleza – Brasil)	2,20	5,0 m³/s	Serec (2012)

Fonte: adaptado de Ferreira (2020)

Observa-se que, com exceção da ETA-Taiaçupeba, com capacidade de produção de água potável de 15.000 L/s, que atendem as cidades de São Paulo, Arujá, Itaquaquecetuba, Poá, Ferraz de Vasconcelos, Suzano, Mogi das Cruzes e Guarulhos, a quantidade de lodo produzido por dia, em peso seco, nas demais ETA's varia de 0,18 a 4,4 ton/dia, e esta quantidade está associada ao seu teor de sólidos totais.

O teor de sólidos do lodo, por sua vez, depende da qualidade da água, e a sua alta variabilidade está associada a quantidade de sólidos suspensos retirados, equipamentos de agitação, método de desaguamento (remoção parcial da água) e tipo de coagulante adicionado (Raghu *et al.*, 1987). A ETA Cubatão, por exemplo, capta água de rio, enquanto as ETA's Taiaçupeba, e Oeste utilizam água de represa.

Considerando-se que o método de retirada dos resíduos dos decantadores e dos filtros é por lavagem, obtém-se um material praticamente em fase líquida, contendo 95% de seu volume em água (Montalvan, 2016), inviabilizando o seu transporte. A fim de garantir a redução no custo de transporte, existem alguns processos de desaguamento que reduzem substancialmente o volume para uso posterior.

Segundo Basim (1999), para diversas ETA's nos Estados Unidos (EUA), o teor de sólidos do lodo é da ordem de 1 a 2% antes do desaguamento. Após processos de desaguamento como em leitos de secagem e centrifugação, tanto para lodos de coagulantes de ferro como de alumínio, o percentual de sólidos se eleva para aproximadamente, 20 a 25% (Cornwell, 2006). No entanto, ressalta-se que os processos de secagem ao ar ou em estufa são ainda bastante prolongados e custosos.

Para entender essa variação de lodo, cita-se alguns autores como Gharaibeh (2009) que analisou o método de desaguamento de lodos de coagulante férrico por meio de leito de secagem a fim de prever e otimizar o tempo requerido para secagem assim como as áreas necessárias. Já Gruninger (1975) analisou outras possíveis alternativas de desaguamento a partir de alguns sistemas mecânicos presentes em três ETA's (Shoremont, Kodak e Sturgeon Point) no Oeste do estado de Nova Iorque (EUA), as quais utilizam alumínio como coagulante. Neste estudo, o autor conclui que os filtros a vácuo (em Kodak e Sturgeon Point) e as centrífugas (em Sturgeon Point) produziam concentrações de sólidos entre 20 a 30%, enquanto os filtros prensa (em Shoremont e Sturgeon Point) geravam lodo com teor de sólidos (TS) entre 40 e 50%. Em uma publicação mais recente, Avancini (2017) optou por analisar o método de desaguamento por sistemas de confinamento do lodo de ETA em bolsas ou tubos em geotêxtil. A autora verificou a influência do tipo e dosagem de aditivos durante o condicionamento químico no

desempenho do sistema. Para os dois lodos analisados, nos ensaios em bolsa de pequena dimensão (que simula o procedimento de desaguamento), o teor de sólidos final do lodo foi da ordem de 20%.

2.1.1 Composição

O lodo de ETA é constituído por materiais húmicos e minerais precipitados da água bruta em conjunto com compostos químicos incorporados no processo de tratamento, como sais de alumínio e ferro e polímeros, oriundos dos coagulantes e auxiliares de coagulação, e alcalinizantes ou acidificantes, utilizados no controle do pH (Katayama, 2012). Fazem parte do resíduo ainda, materiais inertes como argila e areia, materiais orgânicos em solução ou suspensão e microrganismos variados.

O lodo possui aspecto gelatinoso, alto teor de umidade e é altamente compressível, além de ser tixotrópico. A tixotropia é a redução da viscosidade a partir da agitação da amostra e aplicação de esforços de cisalhamento, a qual é recuperada quando a amostra está em repouso (Raghu *et al.*, 1987; Wang *et al.*, 1992; Xia, 1994; O’Kelly, 2010; Tsugawa; Pereira; Boscov, 2017).

Nota-se, contudo, segundo Ferreira (2020) que ocorrem variações significativas nos comportamentos mineralógicos, físico-químico e geotécnico desse resíduo de acordo com o coagulante utilizado no processo de floculação, da fonte da água bruta e do nível de desaguamento (perda parcial de água) ao qual foi submetido.

2.1.2 Caracterização mineralógica

Sendo o lodo composto basicamente por partículas de solo, produtos químicos, matéria orgânica e água, sua composição mineralógica está diretamente relacionada com as partículas coloidais suspensas dos corpos d’água dos quais a ETA recebe a água bruta para tratamento.

Xia (1994) relata os tipos de minerais mais abundantes nos lodos, descrevendo que o mineral carbonático mais abundante é a calcita (CaCO_3), que a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é encontrada em regiões mais áridas e que os minerais secundários mais importantes são os filossilicatos. Ressalta ainda, que os óxidos alofanos (mineralóide silicato de alumínio hidratado mal cristalizado) são também importantes constituintes, os quais podem ser compostos por Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 hidratados e possuir alta Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e superfície

específica. Filossilicatos, alofanos e aditivos químicos podem ter grande impacto nas propriedades geotécnicas dos resíduos de ETA, enquanto que a presença de argilominerais e outros coloides influenciam a plasticidade, coesão, expansibilidade e contração, e capacidade de troca catiônica (CTC) do lodo, sendo que os argilominerais normalmente não reagem quimicamente durante os processos de tratamento de água.

Santos *et al.* (2000), na caracterização de lodo da ETA São Leopoldo (RS), identificaram por Difração de Raios-X, além da presença de quartzo ou sílica (SiO_2), argilominerais do grupo das caulinitas ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), feldspato e traços de hematita (Fe_2O_3).

Oliveira *et al.* (2004), em análise do lodo proveniente da ETA Campos dos Goytacazes (RJ), encontraram além da caulinita, óxidos de silício, alumínio e ferro, compondo cerca de 80% do resíduo. Teixeira *et al.* (2006) identificaram do lodo da ETA Presidente Prudente (SP) caulinita e mica como os principais minerais presentes, além das fases montmorilonita, quartzo, óxido de titânio e gibsita, em menores concentrações.

Montalvan (2016) destaca que os sólidos do lodo são predominantemente partículas de solo. Nos resíduos analisados pelo autor, o quartzo esteve sempre presente (Basim, 1999; Roque; Carvalho, 2006; Teixeira *et al.*, 2011; Watanabe *et al.*, 2011).

2.1.3 Caracterização Físico-Química

A caracterização física do lodo é comumente obtida a partir da análise térmica que é largamente difundida no estudo do comportamento químico e físico de amostras e substâncias em função da temperatura. Alguns dos métodos de análise térmica mais comuns são a Termogravimetria (TG), que analisa a variação da massa com a temperatura, sua derivada primeira (DTG), que resulta em uma curva com picos mais definidos, e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), que avalia a variação de energia entre a amostra e uma referência. O ensaio é realizado em uma atmosfera específica, que pode ser de ar sintético, nitrogênio (N_2) ou até mesmo gás carbônico (CO_2).

Teixeira *et al.* (2006) apresentou em seu estudo com lodo da ETA de Presidente Prudente com coagulante férrico uma perda inicial de massa ($T < 100^\circ\text{C}$) da ordem de 8,3%, devido à água não estrutural (umidade). Em seguida, ocorreram duas perdas de massa: a primeira de aproximadamente 7,1% (entre 200 e 400°C) devido à queima de matéria orgânica, desidroxilação de hidróxidos (gibsita e goetita) e água interlamelar presentes em argilas 2:1, e a segunda de aproximadamente 7,3% (entre 450 e 600°C) devido à perda de hidroxila (água de constituição) principalmente pela caulinita. Acima de 600°C ocorre uma pequena perda de

massa de aproximadamente 1,5% devido à provável perda de hidroxilas pelas micas e/ou queima de matéria orgânica na forma de grafite. Este resultado confirmou a predominância da caulinita determinada em análise de difração de raios X, que é o principal argilomineral presente nos solos da região. A perda total de massa do lodo estudado foi da ordem de 25%.

A caracterização química dos lodos de ETA compreende a determinação do teor de sólidos (orgânicos e inorgânicos), capacidade de troca catiônica (CTC), composição química (para determinação dos metais presentes) e pH.

Basim (1999) ressalta que as partículas orgânicas podem ser adsorvidas intensamente nas superfícies dos minerais, podendo provocar mudanças nas propriedades tanto das partículas orgânicas como nas superfícies dos minerais. Considerando o seu alto teor de umidade, a matéria orgânica decomposta pode ser um sistema expansivo reversível, e com o seu alto grau de secagem, a reversibilidade cessa podendo reduzir os limites de Atterberg.

Teixeira (2017) salienta que a caracterização diferenciada de solos com altos teores de matéria orgânica destaca atributos que podem indicar diferenças em relação aos solos denominados minerais. Dentre as metodologias utilizadas nas avaliações dos solos com altos teores de matéria orgânica destacam-se aquelas que avaliam a interação entre o elevado teor de matéria orgânica e outros atributos do solo, como por exemplo, a quantificação de matéria orgânica por gravimetria (método de combustão em mufla), além da determinação do teor de carbono orgânico por métodos com Walkley e Black modificado ou analisador elementar.

Segundo Teixeira (2017) os cátions como cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), sódio (Na^+), alumínio (Al^{3+}), ferro (Fe^{2+}), manganês (Mn^{2+}) e cobre (Cu^{2+}) são mantidos no solo pela argila carregada negativamente e pelas partículas de matéria orgânica no solo por meio de forças eletrostáticas (partículas negativas do solo atraem os cátions positivos). A capacidade do solo para reter esses cátions à sua superfície é chamada de capacidade de troca catiônica (CTC).

A CTC é uma propriedade que indica a quantidade de cátions trocáveis do solo, e é expressa em meq/100g (miliequivalentes por 100 g de material seco) ou cmol_c/kg (centimoles de cátions por kg de material seco). Indica a presença de cargas negativas, atribuídas às partículas coloidais (argilominerais), com capacidade de retenção de água (moléculas polares) e cátions. De acordo com Hsieh e Ragh (1997), para lodos de ETA's norte americanas com diferentes coagulantes, foram registrados valores entre 2,20 e 13,48 cmol_c/kg. Já Oliveira *et al.* (2004) registraram para ETA Campos Goytacazes CTC igual a 0,99 cmol_c/kg.

Os coagulantes utilizados nos processos de tratamento da água são, em geral, o alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico e cal. Esses aditivos são utilizados para promover a

agregação coloidal pela destruição das forças que estabilizam as partículas coloidais. A floculação ocorre com o choque entre as partículas coloidais desestabilizadas, unindo-se durante os processos de sedimentação e desaguamento (Basim, 1999). Portanto, são comumente encontrados na análise química, de lodos de ETA's de tratamento convencional elementos como alumínio, ferro, cálcio e silício.

Alguns autores relataram as composições químicas de lodo, como, Santos *et al.* (2000) que identificaram a presença de titânio na ETA São Leopoldo (RS), enquanto Townsend *et al.* (2001) avaliaram quimicamente 28 lodos coletados dos leitos de secagem ou pilhas de estocagem de 26 ETA's no Estado da Flórida (EUA). Apesar da grande variação entre os valores encontrados, todos os 28 lodos coletados possuíam concentração de arsênio muito acima dos limites de exposição direta estipulados pela norma local (0,8 e 3,7 mg/kg para regiões residenciais e industriais, respectivamente).

Teixeira *et al.* (2006) encontraram na composição do lodo de ETA Presidente Prudente (SP), a base de coagulante férrico, os seguintes metais pesados: chumbo, cromo, zinco, manganês, alumínio, ferro e cobre. Em termos de pH, a variabilidade dos valores encontrados na literatura ocorre não apenas entre as ETA's analisadas, mas para lodos de uma mesma ETA em momentos diferentes. No entanto, em geral, como atestado por O'Kelly (2016) em compilação de alguns estudos, os valores de pH variam de 7 a 8. Os lodos com pH mais elevado (meio básico, $\text{pH} > 7$) propiciam a imobilização de metais pesados, que nesta condição se precipitam, e a biodegradação (em condições adequadas de temperatura, nutrientes e água) que nestas condições de pH favorecem a ação dos microrganismos. Por sua vez, um pH mais baixo (meio ácido, $\text{pH} < 7$) permite a lixiviação de materiais pesados (Raghu *et al.*, 1997; Usepa, 1986 *apud* Montalvan, 2016).

2.1.4 Caracterização Ambiental

A caracterização ambiental deve levar em consideração as legislações ambientais específicas como a ABNT NBR 10.004:2004 e a resolução CONAMA nº 430/2011. A primeira define o lodo proveniente de ETA como resíduo sólido e implica a necessidade de sua classificação como resíduo perigoso (classe I) ou não perigoso (classe II), de acordo com suas características quanto a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade e das concentrações dos constituintes lixiviados. Sendo classe II, é possível ainda, classificá-lo como inerte ou não inerte, conforme as concentrações dos constituintes solubilizados.

A resolução CONAMA nº 430/2011, por sua vez, além de dispor sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, proíbe a alteração das características originais do corpo receptor, classificado segundo a resolução CONAMA nº 397/2008. Além disso, especifica-se a carga máxima poluidora referente às substâncias que podem estar presentes nos efluentes, assim como valores de pH, temperatura, quantidade de óleos e graxas e DBO ideais aos efluentes a serem lançados. No caso de águas de classe especial, ou seja, aquelas destinadas ao consumo humano, à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e à preservação dos ambientes aquáticos em Unidades de Conservação de proteção integral, é proibido o lançamento de efluente ou disposição de resíduos domésticos, agropecuários, de aquicultura, industriais e de quaisquer outras fontes poluentes, mesmo que tratados. Hoppen *et al.* (2005) salientam que, mesmo a composição do lodo derivando apenas do processo erosivo do solo nos mananciais, o tratamento químico necessário para sua remoção nas ETA's demanda a destinação correta para não impactar negativamente o meio ambiente.

Segundo Li *et al* (2001), o ensaio de lixiviação de um solo contaminado é essencial para determinar seus possíveis riscos ao meio ambiente.

A lixiviação pode ser definida como a extração de um constituinte solúvel de um sólido através do fluxo de um fluido, geralmente uma fase aquosa, que contém ácidos, bases ou agentes complexantes, que são os agentes lixiviantes em diferentes condições. Esta extração, pode ser influenciada pelo pH, temperatura, complexidade dos compostos, oxidação e redução gradativa do potencial assim como a valência dos íons (Knop, 2003).

Os órgãos ambientais de cada país estabelecem testes de lixiviação com o objetivo de classificar os resíduos quanto à toxicidade e propõem recomendações e restrições quanto ao tipo de tratamento a ser empregado, quando necessário, visando à disposição final (Silva, 2002). No Brasil, o ensaio de lixiviação mais utilizado é realizado de acordo com a norma ABNT NBR 10.005:2004, que assim como muitos métodos já existentes, exigem certo tipo de agitação para estimular o contato entre o sólido e o fluido lixiviante, para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas que se encontram no resíduo sólido por meio da dissolução no meio extrator. Quer dizer, o potencial de impactar em solos e águas subterrâneas, e no caso da solubilização, o potencial dos resíduos de liberar seus componentes constituintes para a água pura.

Segundo Suthersan (1997), o transporte do contaminante é influenciado por alguns fatores, tais como: composição química do contaminante, propriedades físicas, gradiente hidráulico, polaridade da solução lixiviante, condições de oxidação-redução e reações cinéticas,

difusão química do contaminante com a matriz, concentração de compostos reativos e acumulação de contaminantes em solução nos poros da superfície da partícula.

Knop (2003) cita que diversos procedimentos de lixiviação têm sido desenvolvidos tanto para ensaiar rejeitos como solos encapsulados ou não, entre estes está o ensaio de lixiviação em coluna, descrito na norma americana ASTM D 4874 (1995). Este método, diferente do descrito na norma brasileira, procura eliminar o efeito da solubilização e simular um maior tempo de exposição do lixiviado com a amostra. Este ensaio é considerado como um simulador de fluxo de percolação do nível de água através dos poros do material granular. No estudo realizado por Knop (2003), onde foram comparados os ensaios de lixiviação de acordo com a norma brasileira e com a norma americana, chegou-se à conclusão de que o ensaio de lixiviação em coluna se mostrou mais consistente, uma vez que simula as condições reais de campo e também é capaz de analisar duas variáveis: massa de contaminante lixiviado e volume total de fluido percolado.

Os ensaios ambientais se propõem a identificar a ocorrência da liberação de metais pesados que possam contaminar a área em que o lodo será disposto. Raghu *et al.* (1987) concluíram que para o lodo da ETA Jersey (EUA) não foram encontrados no lixiviado quantidades acima do recomendado para metais pesados e matéria orgânica, habilitando o resíduo para uso em cobertura de aterro sanitário do ponto de vista ambiental.

Silveira, Koga e Kuroda (2013) analisaram lodos de coagulante de ferro e alumínio e atestaram que o extrato lixiviado apresentou parâmetros ainda aceitáveis pela ABNT NBR 10.004:2004. Já no extrato solubilizado, o manganês e fenóis totais ficaram acima do limite exigido, classificando os resíduos das ETA's Cafezal e Tibagi (PR) como classe II A – não inertes. Santos *et al* (2000) obtiveram a mesma classificação para o lodo da ETA São Leopoldo, mas sugerem que o material possa ser utilizado na construção civil por não apresentar características de periculosidade e não ser patogênico.

O estudo de Townsend *et at.* (2001) atestou concentrações de manganês e íons inorgânicos no lixiviado acima das normas de concentrações de água subterrânea da Flórida (EUA) em alguns dos 28 lodos analisados, além da concentração substancial de ferro e alumínio, já esperados devido ao uso dos coagulantes nos processos de tratamento de água. Não foram excedidos, no entanto, os limites correspondentes aos sólidos orgânicos, voláteis ou semivoláteis.

2.1.5 Caracterização geotécnica

A caracterização geotécnica compreende os ensaios para obtenção dos limites de Atterberg, da curva granulométrica e da massa específica dos grãos. Além disso, o comportamento mecânico é estimado pelos ensaios de compactação, adensamento, resistência ao cisalhamento e permeabilidade, estes últimos a serem realizados em uma segunda etapa da pesquisa.

Xia (1994) embasa que o comportamento geotécnico do lodo de ETA depende não apenas dos sólidos, como também da quantidade e composição química da fase líquida. Entendendo-se as diferentes formas com que a água pode estar ligada aos sólidos do lodo de ETA (livre, no interior de flocos, capilar e adsorvida), a variação no teor de umidade pode causar alteração da estrutura de flocos, no tamanho das partículas, na concentração de íons e na formação de complexos. Portanto, quando a estrutura e o teor de sólidos se alteram, ocorrem interações entre as fases sólida e líquida, como a cimentação, as quais afetam as propriedades geotécnicas.

Raghu *et al.* (1987) analisaram o lodo da ETA Jersey (EUA) na saída do filtro prensa para verificar o seu uso em cobertura de aterro. O resíduo, de coagulante de alumínio, é composto pelas frações granulométricas areia e silte e apresenta massa específica dos grãos igual a $1,9 \text{ g/cm}^3$. Nesse estudo, não foi possível determinar os limites de Atterberg devido à baixa trabalhabilidade do resíduo. O teor de umidade ótimo foi estimado em 70% e a massa específica aparente seca máxima em $0,82 \text{ g/cm}^3$ na energia normal. A permeabilidade (k) variou de $2,5 \times 10^{-6}$ a $2,0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ para índices de vazios (e) entre 1,43 a 1,76. A relação entre os parâmetros $\log k$ versus e é linearmente crescente.

Nos estudos de Wang *et al.* (1992) para três lodos norte-americanos, sendo um de coagulante férrico e dois de alumínio, os autores obtiveram limite de liquidez (LL) para os lodos de coagulante de alumínio de 423 e 550%, enquanto o de cloreto férrico foi de 108%, indicando a elevada compressibilidade dos resíduos, classificados como MH. O índice de compressão (C_c) para os lodos de coagulante alumínio foi de 5,29 a 6,69 e para o lodo de coagulante férrico foi de 1,99. Os parâmetros de resistência, por outro lado, foram bastante similares: a coesão efetiva dos três lodos ficou entre 6,89 a 8,27 kPa e o ângulo de atrito efetivo entre 42,3 a 44,0° para teores de sólidos entre 10% a 40%. Já em termos da relação umidade-densidade, o lodo de coagulante férrico exibiu a típica curva de compactação convexa (teor de umidade ótimo de 45% e massa específica aparente seca máxima de $1,13 \text{ g/cm}^3$), enquanto o lodo de alumínio não

demonstrou curva no formato de sino, impedindo a obtenção dos parâmetros de compactação no ponto ótimo.

Wang *et al.* (1992) analisaram também a estabilidade de um talude de aterro sanitário com diferentes declividades e alturas hipotéticas a fim de verificar a viabilidade da disposição do lodo como material de cobertura. Considerando as propriedades de resistência do lodo (coesão, ângulo de atrito e resistência não-drenada), buscou-se determinar o teor de sólidos mínimo necessário para garantir a estabilidade da estrutura. Concluiu-se que, no caso do lodo de coagulante férrico, seria necessária maior quantidade de sólidos do que para o de alumínio. Para altura do talude igual a 12,2 metros e declividade de 12,5%, o primeiro exigiu teor de sólidos mínimo igual a 47%, enquanto o segundo, apenas de 18 a 25%.

Wang e Tseng (1993) investigaram a influência da estabilização de um lodo de coagulante de alumínio com cal cinza volante (*flyash*) na proporção de 60% de aditivo em massa seca. Inicialmente, as amostras de lodo foram retiradas do processo de desaguamento por centrífuga e caracterizadas geotecnicamente. As frações granulométricas do lodo correspondem a silte e argila, LL igual a 550% e LP igual a 239%, além de massa específica dos grãos de 2,26 g/cm³, sendo classificado como CH. As misturas de lodo-cal e lodo-*flyash* apresentaram LL igual a 272 e 305%, respectivamente.

Os autores analisaram ainda a variação do coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios através do ensaio de adensamento. Conclui-se que a permeabilidade do lodo estabilizado (com cal ou *flyash*) é consideravelmente maior do que o lodo não estabilizado. Segundo os autores, o aumento da permeabilidade com a adição dos estabilizantes ocorre devido à formação de uma estrutura mais flocada (mais aberta), a qual eleva o índice de vazios. Para o lodo não estabilizado, obtiveram-se índices de vazios entre 7 e 17 e coeficientes de permeabilidade variando entre 3×10^{-6} m/s e 8×10^{-4} m/s. Para índice de vazios igual a 7, a permeabilidade do lodo não estabilizado e estabilizado (com cal ou *flyash*) são, respectivamente 4×10^{-6} e 2×10^{-4} m/s. Obteve-se, também, relação linear entre log k versus e para ambos os casos.

O'Kelly (2016) em seu estudo de caracterização de lodos com diferentes coagulantes concluiu que há significativa diferença entre os limites de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) para lodos de coagulante férrico (LL=110% e IP=60%) e de coagulante de alumínio (LL=200 a 600% e IP = 100 a 300%). O autor atribuiu a maior plasticidade e alta capacidade de retenção de água do segundo caso à presença do aluminato de cálcio hidratado e sulfato de alumínio hidratado.

Xia (1994) analisou as características geotécnicas de 10 lodos de diferentes ETA's norte-americanas e para os valores densidade relativa dos grãos (Gs), obteve-se um intervalo

entre 1,87 a 2,71 ($2,51 \pm 0,27$, $n=10$), enquanto observa-se que para os argilominerais, Gs varia de 2,70 a 2,85, com média 2,75. Portanto, os lodos estudados apresentaram Gs inferior ao dos argilominerais, provavelmente devido à presença de matéria orgânica (sugerida pelos valores elevados de perda ao fogo e compostos voláteis) e aditivos químicos.

O estudo de Xia (1994) engloba ainda resultados de compactação, resistência ao cisalhamento direto e à compressão simples e adensamento. As curvas de compactação indicaram massas específicas secas máximas entre 0,54 e 1,46 g/cm³ e teores de umidade ótimos entre 50 a 80% para energia normal, sendo que quatro dos dez lodos ensaiados não apresentaram curvas de compactação usuais, mas apenas uma relação linear crescente entre a massa específica seca e teor de umidade de compactação. O autor atribui esse fato ao fenômeno da cimentação. Durante a secagem, a água é removida gradativamente dos espaços onde se encontra, havendo perda da interação entre as partículas nesses locais e o surgimento de novas forças intermoleculares, associadas à adsorção de íons (Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , etc) antes dissolvidos na água, que causam o aumento no tamanho das partículas. As novas partículas, que não são separadas com a adição de água por ser um processo irreversível, possuem maiores massas específicas secas, modificando o formato usual da curva de compactação. A resistência ao cisalhamento mostrou relação diretamente proporcional com o teor de sólidos e inversamente proporcional com a elasticidade. Os coeficientes de permeabilidade obtidos em ensaios de adensamento variaram de 7×10^{-6} a 9×10^{-4} m/s. As curvas de adensamento não apresentaram o comportamento típico de solos, aparentemente com elevado adensamento secundário, o que dificultou a determinação dos parâmetros. Os valores estimados do índice de compressão variaram de 0,10 a 4,48, de não compressíveis a altamente compressíveis.

Segundo Wang, Hull e Jao (1992), as informações sobre resistência ao cisalhamento do lodo concentram-se majoritariamente na determinação da resistência não drenada através do ensaio de palheta (vane test). Alguns estudos obtiveram relações diretas entre a resistência não drenada e o teor de sólidos (Novak; Calkins, 1975; Huang, 1979 *apud* Wang; Hull; Jao, 1992; Silva; Hems, 2018). Wang, Hull e Jao (1992) determinaram a resistência ao cisalhamento por meio do ensaio do cone de laboratório triaxial adensado não drenado (CU – *consolidated undrained*), e atestaram que o lodo possuía alto valor de ângulo de atrito interno efetivo (42°) e baixa resistência não drenada (1 kPa, que pode ser elevada a 20 kPa com o aumento do teor de sólidos de 13 para 25%).

Roque e Carvalho (2006) analisaram o lodo de uma ETA em Portugal, em que foram utilizadas amostras com teor de umidade residual (3-4%), obtido por secagem em estufa a 50-60°C, para os ensaios geotécnicos, e em teor de umidade natural, retiradas diretamente do

filtro correia (*belt filter*), para os ensaios de lixiviação. A caracterização geotécnica constatou 21% de fração argilosa, 65% siltosa e 14% arenosa. O material foi classificado como MH, LL igual a 108% e LP igual a 82%.

No ensaio de compactação Proctor Normal, Roque e Carvalho (2006) determinaram massa específica aparente seca máxima de 0,63 g/cm³ e teor de umidade ótimo de 84%. Além disso, o coeficiente de permeabilidade obtido com os parâmetros de Proctor Normal foi igual a 10⁻⁷ m/s. O ensaio triaxial adensado não-drenado (CU) resultou em coesão efetiva de 77 kPa e ângulo de atrito igual a 44%.

Nos ensaios de lixiviação realizados para verificar a possibilidade de impacto ambiental, os autores concluíram que o resíduo pode ser usado como material geotécnico por suas propriedades e por não ser fonte de poluição.

Silva e Hemsli (2018) observaram diferenças significativas nos limites de Atterberg do lodo da ETA Cubatão (SP) coletados em março (LL=156% e LP=85%) e setembro de 2016 (LL=228% e LP=75%). Os autores atribuíram este fato à variação das concentrações de coagulantes férrico. A curva de compactação do lodo de março mostrou-se altamente dependente do procedimento do ensaio, isto é, com ou sem secagem prévia. O lodo seco ao ar até a umidade hidrosscópica $w_i = 26\%$ e compactado por molhagem apresentou massa específica aparente seca máxima de 1,39 g/cm³ e teor de umidade ótimo de 38%. Já com a secagem até $w_i = 100\%$ e compactação a partir do ramo úmido por secagem sucessiva, a curva de compactação não se apresentou em formato de sino e a massa específica aparente seca, correspondente ao teor de umidade de 38%, é igual a 1,10 g/cm³.

2.2 Misturas de lodo com solo

Este tópico aborda os resultados obtidos em estudos considerando as misturas de lodo com solo, já que devido aos altos teores de umidade, a elevada compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento, a utilização direta de lodo de ETA torna-se técnica e economicamente inviável (Raghu *et al.*, 1997). Já as misturas do lodo com solos abrem a possibilidade de amplo uso em obras geotécnicas. O lodo pode ser aproveitado em coleta direta dos filtros e decantadores ou após algum processo de desaguamento.

Wang, Hull e Jao (1992) realizaram ensaios de adensamento com uma mistura de solo : lodo na proporção 1:1,67 em massa seca para utilização como material de aterro para pavimentação ou diques. O solo utilizado foi uma areia argilosa (SC). O lodo provinha da ETA de Chesapeake (Virginia- EUA), onde era utilizado coagulante à base de alumínio. O índice de

compressão (C_c) da mistura, igual a 4,04 corresponde a solos altamente compressíveis. A resistência não drenada da mistura solo : lodo (2,07 kPa) foi 28% menor que a do solo (2,90 kPa).

Raghu *et al.* (1997) estudaram a influência da adição do lodo no solo utilizando dois lodos de ETA's do Canadá. O solo ensaiado possuía massa específica dos grãos igual a 2,58 g/cm³, LL=42%, LP=28%, 86% de finos e foi classificado como CL. O lodo foi adicionado ao solo nas porcentagens de 10%, 30% e 50%, em massa seca, por meio de mistura em betoneira, variando-se assim o teor de sólidos (TS) das misturas. Observou-se que a adição de lodo reduziu o valor da massa específica dos grãos e aumentou os limites de Atterberg. Para o traço intermediário e TS da mistura igual a 25%, a massa específica dos grãos média foi igual a 2,50 g/cm³, LL=55%, LP=38% e 78% de finos.

Nos ensaios de adensamento, Raghu *et al.* (1997) obtiveram índices de compressão muito similares entre as misturas, da ordem de 0,10. O coeficiente de adensamento elevou-se levemente com o aumento do acréscimo de lodo, com valores ainda próximos ao coeficiente de adensamento do solo ($3,4 \times 10^{-7}$ m²/s). Para as três porcentagens de lodo (TS igual a 60%) foram obtidos os valores de $5,1 \times 10^{-7}$, $7,8 \times 10^{-7}$, $8,3 \times 10^{-7}$ m²/s, respectivamente.

Aldeeb *et al.* (2003) analisaram a viabilidade de usar misturas de solo residual argiloso e lodo proveniente da ETA de Arlington (Texas – EUA) como cobertura de aterro sanitário. O lodo passava pelos processos de sedimentação, desaguamento e secagem, atingindo teor de sólidos final igual a 60%. A adição de solo ao lodo provocou aumento da massa específica dos grãos, da resistência à compressão simples, do ângulo de atrito e da coesão pelo ensaio de cisalhamento direto. Observou-se, ainda, redução dos limites de Atterberg e dos teores de umidade. No ensaio de compactação houve redução do teor de umidade ótimo e aumento da massa específica aparente seca. Os autores concluíram que a melhor combinação obtida ocorreu com a mistura em massa seca de 20% de resíduo e 80% de solo natural, no teor de umidade ótimo.

Estudos com lodos mais secos indicam elevado potencial de uso, apesar de haver um custo de secagem intrinsecamente associado. Montalvan (2016) buscou viabilizar a utilização geotécnica de lodo saído de centrífugas (teor de sólidos entre 20-25%). A metodologia experimental compreendeu a caracterização e a determinação de propriedades geotécnicas de misturas de solo arenoso fino de Botucatu (SP) e lodo de ETA Cubatão em diversas proporções (3;1; 4;1 e 5;1 em massa úmida). Os resultados mostraram que, com a adição de lodo, o ângulo de atrito efetivo aumentou de 34° (solo) a 37° (mistura 3;1), e a coesão diminuiu de 22 kPa (solo) a 10 kPa (mistura 3;1). Por outro lado, o índice de compressão (C_c)

aumentou de 0,07 para o solo a 0,19 para a mistura 3:1, indicando que as misturas são mais compressíveis do que o solo. O índice de recompressão (Cr) não variou, mantendo-se igual a 0,02 mesmo com a adição de lodo.

Observou-se também que a secagem prévia da mistura resulta em um aumento da massa específica seca máxima e diminuição do teor de umidade ótimo de compactação. Os parâmetros de compactação foram obtidos por correlação linear com o teor de umidade após secagem (Montalvan; Boscov, 2016).

Em um trabalho mais recente, ainda utilizando solo arenoso proveniente de Botucatu (SP) e lodo da ETA Cubatão nas mesmas proporções, Montalvan e Boscov (2018) observaram nos ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede flexível, que os valores de condutividade hidráulica das misturas 5:1 e 4:1 são ligeiramente menores que a do solo, conforme Tabela 2:

Tabela 2 – Variação das condutividades hidráulicas k da areia Botucatu e suas misturas com lodo em diferentes proporções (em m/s)

Tensão confinante (kPa)	gradiente hidráulico (i)	Condutividade hidráulica (k)			
		Areia Botucatu	M 5:1	M 4:1	M 3:1
30	5	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-9}$
	10	$7,0 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-6}$	-
60	5	$4,0 \times 10^{-7}$	$9,0 \times 10^{-7}$	$8,0 \times 10^{-8}$	-
	10	$4,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	-

Fonte: Montalvan e Boscov (2018)

A mistura 3:1, a de maior proporção de lodo, apresentou a condutividade hidráulica mais baixa, de $7,0 \times 10^{-9}$ m/s sob tensão confinante de 30 kPa e gradiente igual a 5. Neste caso, ao se elevar o gradiente para 10 e a tensão confinante para 60 kPa, a condutividade hidráulica da mistura 3:1 diminuiu até cessar a percolação, provavelmente devido à colmatção dos poros do solo e do filtro. Os autores apontam que a mistura 3:1, em massa úmida tem potencial para utilização como material de revestimento de fundo (camada de impermeabilização) em aterros sanitários, uma vez que a permeabilidade é baixa e essa mistura pode com o tempo colmatar meios porosos adjacentes impedindo a percolação d'água.

Gonçalves *et al.* (2016) também avaliaram a utilização de mistura de solo e lodo como material de barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. O lodo é proveniente da ETA Cafezal (Londrina-PR) e foi desaguado em leito de drenagem. Esta ETA utiliza cloreto férrico hexahidratado como coagulante. Os solos argiloso (LL=52% e IP=38%) e arenoso (LL=31% e IP=15%) são do interior do estado do Paraná (Londrina e Mandaguaçu, respectivamente) e

constituíram traços solo : lodo de 1:0,5 e 1:1 para o solo argiloso e 1:0,25 para o arenoso, todos em massa úmida. Os principais ensaios geotécnicos realizados foram compactação e permeabilidade.

A adição de lodo no solo arenoso reduziu a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) de 1,86 g/cm³ (solo natural) para 1,80 g/cm³ (traço 1:1) e elevou o teor de umidade ótimo ($w_{\acute{o}ti}$) de 14,0% para 14,5%, respectivamente. No caso do solo argiloso, $\rho_{dm\acute{a}x}$ aumentou de 1,43 g/cm³ (solo natural) para 1,45 g/cm³ (traço 1:1), enquanto que $w_{\acute{o}ti}$ diminuiu de 32,4% para 31,8%, respectivamente. O coeficiente de permeabilidade de todas as amostras, naturais ou misturas, apresentou-se na faixa de 10^{-10} e 10^{-9} m/s. Considerando o critério de permeabilidade, há grande potencial de utilização do solo como parte das barreiras impermeabilizantes, contribuindo para impedir a percolação dos líquidos gerados no aterro sanitário para o subsolo.

2.3 Aplicações Geotécnicas

Roque e Carvalho (2006) destacam diversas obras geotécnicas onde a aplicação do lodo pode ser possível e vantajosa, considerando-se as suas propriedades após secagem em estufa, ou seja, em forma de agregado: aterros sanitários (cobertura diária, intermediária ou de fundo), infraestrutura rodoviária e viárias, aterro sobre solos moles, cobertura final de aterro sanitário e barragem de rejeitos. Essas indicações acabam impulsionando os estudos para misturas solo-lodo, que podem tornar o lodo *in natura* um material com propriedades geotécnicas adequadas.

Serão apresentadas a seguir algumas dessas alternativas de utilização do lodo de ETA a partir dos parâmetros mínimos requeridos a cada uma delas. Os parâmetros referem-se, de forma geral, as características geotécnicas, físico-químicas e geoambientais.

2.3.1 Aterro sanitário

Os aterros sanitários são obras que, em geral, utilizam volumes de solos originados de jazidas naturais para cobertura diária, revestimento de fundo e cobertura final. Estima-se que o volume de solo no aterro chegue a 20% do volume total (Benvenuto; Boscov, 2013). A utilização das misturas solo: lodo para cobertura diária, que é uma camada sem função estrutural, cujo objetivo é impedir a proliferação de vetores, espalhamento dos resíduos no entorno e redução dos odores, é a ideia mais promissora e com maior facilidade de aceitação por parte do órgão ambiental regulador – SEMA – e pela opinião pública.

Do ponto de vista econômico, a aplicação do lodo nas camadas de aterro sanitário reduz a necessidade de áreas de empréstimo de solo natural para cobertura dos resíduos sólidos urbanos, compensando o transporte do lodo até o aterro. Do ponto de vista ambiental, impediria o descarte do mesmo em mananciais, nos casos extremos de descarte inadequado.

Quanto as propriedades geotécnicas das camadas de coberturas, pode-se citar a ABNT NBR 13.896:1997 na qual se recomenda que a cobertura final do aterro deva “minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita à erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir coeficiente de permeabilidade inferior ao do solo natural da área do aterro”.

Ferreira (2020) reforça que sejam observadas como recomendações para as camadas de coberturas diárias que o material não seja poluente, de trabalhabilidade adequada para espalhamento, que forme camada protetora em relação ao espalhamento de resíduos no entorno do aterro e ao acesso de vetores, que não constitua camada potencial de ruptura e que evite o aporte de líquido ao interior do maciço sanitário.

A Tabela 3 apresenta parâmetros geotécnicos quantitativos definidos por distintos autores para cobertura de aterros sanitários, considerando critérios que englobam tanto as camadas de base (inferior) como de coberturas (superior). Destaca-se que, se a porcentagem passante na peneira #200 (0,075 mm) for maior que 50% o solo já é considerado fino (silte ou argila) pelo Sistema de Classificação Unificada de Solos (ASTM D2487-11).

Tabela 3 – Requisitos para cobertura de aterro sanitário

Parâmetro	Referência				
	ROCCA <i>et al</i> (1993)	U.S. EPA (1993)	QASIM E CHIANG (1994)	ABNT NBR 13896/97	QIAN KOERNER e GRAY (2002)
SUCS (*)	CL, CH, SC ou OH	-	-	-	Solo rico em areia com argilas (SC)
% P #200 (**)	> 30%	-	> 40%	-	-
k (***)	< 10^{-7} cm/s	< 10^{-5} cm/s	< 10^{-7} cm/s	< 5×10^{-5} cm/s	< 10^{-7} cm/s
LL (***)	> 30%	-	> 25%	-	-
IP (***)	> 15%	-	> 10%	-	< 50%

(*) Sistema de Classificação Unificada de Solos;

(**) Porcentagem passante na peneira #200 (0,075mm);

(***) k = condutividade hidráulica; LL = Limite de Liquidez e IP = índice de Plasticidade

Fonte: Pimentel (2012)

Pimentel (2012) comenta que o principal parâmetro considerado nas coberturas finais é a permeabilidade, pois solo com baixa permeabilidade reduz as possibilidades de contaminação do aquífero. Quanto maior o percentual de argilas, menos permeável será o solo. Sobre esse critério, ressalta-se, entretanto, que solos muito argilosos podem gerar grandes problemas porque apresentam processos de trincamentos que devem ser considerados, por permitir entrada de água de chuva no maciço assim como escape dos gases produzidos no aterro sanitário.

No revestimento de fundo de aterros sanitários, é comum a utilização de camada de argila compactada (CCL – *compacted clay liner*), geralmente associada a geomembrana. Para que um solo argiloso seja considerado adequado para a impermeabilização de base de aterros, as seguintes características devem ser atendidas: resistência ao cisalhamento e deformabilidade compatíveis com o peso de aterro a ser suportado, condutividade hidráulica baixo (menor que 10^{-9} m/s) quando compactado, compatibilidade química em longo prazo com o lixiviado produzido na massa de resíduos, alta capacidade de adsorção e baixo coeficiente de difusão (ISSMGE, 2006).

Conclui-se, portanto, que a permeabilidade é um parâmetro importante a ser considerado em qualquer revestimento (fundo ou cobertura final) do aterro sanitário, já que a baixa permeabilidade reduz as possibilidades de contaminação de aquífero e infiltração de água no maciço sanitário. Já na cobertura diária, a baixa permeabilidade pode impedir o movimento do percolado em direção ao dreno de fundo, ocasionando a formação de bolsões ou “lençóis suspensos” de lixiviado. O aumento da fração fina está diretamente relacionado à redução da permeabilidade, dessa forma, a adição de finos inerentes ao lodo é favorável no caso dos revestimentos impermeabilizantes, desde que não favoreçam os trincamentos da camada.

2.3.2 Reaterro de Valas

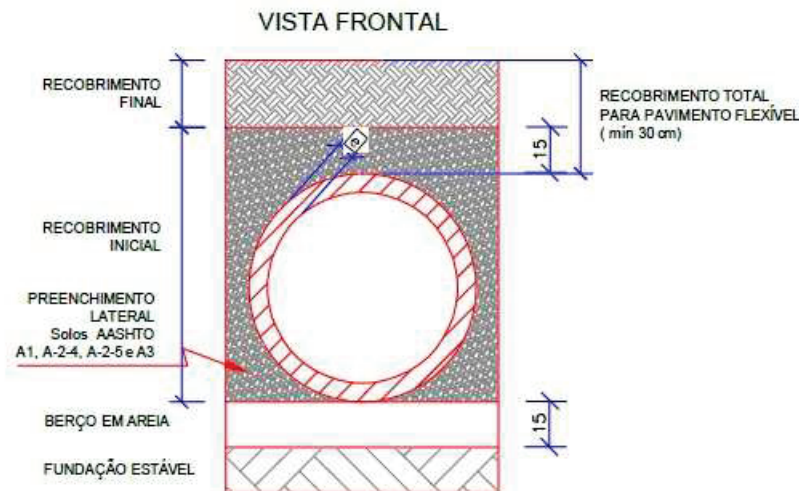
Outra alternativa para o uso das misturas: lodo é a utilização em reaterro de valas. Fortes (2009) apresentou um estudo da estabilização de lodo oriundo da ETA Taiaçupeba-SP para utilização com material em reaterro de valas, e mostrou que, apesar das reações químicas entre o lodo úmido e o solo serem complexas, a mistura entre os dois pode ser eficaz para a sustentabilidade do reaterro de valas. Fortes (2009), concluiu em seu estudo que o material (solo e lodo) foi estabilizado após a adição de 3% de cal hidratada e de cimento, e que este percentual é viável, uma vez que não agride o meio ambiente. Ademais, suas características mecânicas atendem satisfatoriamente as especificações locais, com valores de

capacidade de suporte Califórnia de 17% no teor de umidade ótimo ou de 12%, após quatro dias de imersão, com expansão de 0,25%.

Dependendo das solicitações a que será submetido o material na vala reaterrada, as misturas de solo e lodo podem ser materiais viáveis. Segundo DEP/PR (2006), o solo para reaterro deve possuir *California Bearing Ratio*, $CBR \geq 2\%$, expansão $< 4\%$, possuir pouca ou nenhuma matéria orgânica e de qualidade superior ao terreno adjacente. Além disso, a compactação do material deve ser realizada no ponto ótimo da curva de compactação Proctor Normal, com variação do teor de umidade aceitável de -2% a +1% e grau de compactação mínimo de 95%

A Figura 1 detalha o assentamento de tubulações em PEAD considerando desenho da vala segundo ASTM D2321-20 e seção 30 da AASHTO para materiais granulares, em que estudos com o lodo em forma de agregados também podem ser analisados para adequação as características para preenchimento lateral indicadas.

Figura 1 – Detalhe de assentamento de tubulação em PEAD



Fonte: AASHTO (2002)

2.3.3 Obras em Aterro

As propriedades geotécnicas principais requeridas para projeto e análise de desempenho do lodo na construção de aterros compactados são compressibilidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento (Wang; Hull; Jao, 1992). Gruninger (1975) ressalta sobre a importância do teor de sólidos do lodo para que este possa ser facilmente manipulado por equipamentos de movimentação e escavação de terra. Em seus estudos com lodos de quatro ETA's do estado de Nova Iorque (EUA) que utilizam alumínio como

coagulante, este autor constatou que com teor de sólidos igual a 20% (em massa), a consistência do resíduo se assemelha à de uma argila mole. Já para teores entre 40 e 50% (em massa), a consistência observada no campo era similar à de uma argila muito dura.

Silva e Hemsí (2018), com o objetivo de quantificar o efeito do teor de sólidos na resistência não drenada, confirmaram experimentalmente para o lodo da ETA Cubatão a relação exponencial entre esses parâmetros sugerida por Wang *et al.* (1992). Ademais, adotando o valor de referência de resistência não drenada (10 kPa) sugerido por Wang *et al.* (1992) para uso em obras de terraplenagem em termos de trabalhabilidade, os autores estimaram para o lodo da ETA Cubatão o valor mínimo necessário de teor de sólidos igual a 47%, correspondente a 112% de teor de umidade.

Misturas solo-lodo, no entanto, possivelmente terão menos problemas de espalhamento e compactação do que somente o lodo, segundo indicam os resultados de Raghu *et al.* (1997), Montalvan e Boscov (2016), Wanh, Hull e Jao (1992) e Aldeeb *et al.* (2003).

2.3.4 Muros de solo reforçados com geossintéticos

Segundo Gonçalves (2016), a recomendação mais comum internacionalmente para a construção de muros de solos reforçados com geossintéticos (MSRG) é a utilização de solos granulares (AASHTO, 2002; FHWA, 1998 e BS8006, 1995). Nesse contexto, entendendo-se que o lodo não se assemelha geotecnicamente com solos granulares, ressalta-se, segundo o autor, que a utilização de solos finos vem sendo bem-sucedida no Brasil desde 1984. A constatação de que os solos finos lateríticos, formados em clima tropical, possuem resistência mais elevada e menor expansibilidade em contato com a água do que solos de igual classificação geotécnica formados em clima temperado, é apresentada pelo autor como contraponto à limitação normativa internacional.

Nesta mesma linha, Nogami e Villibor (1995) mostram que os solos lateríticos podem apresentar bom comportamento geotécnico, com elevada resistência ao cisalhamento, baixa compressibilidade e baixa expansibilidade. Solos LG' (laterítico e argiloso), quando compactados possuem CBR sem imersão e baixa perda por imersão, baixa expansão, média a elevada contração e baixo coeficiente de permeabilidade. O sucesso de muros de solos reforçados com geossintéticos utilizando solos finos tropicais pode ser ampliado com misturas desses solos com lodo em proporções adequadas mantendo-se os parâmetros de resistência e deformabilidade.

Gonçalves (2016) analisou a influência da coesão e ângulo de atrito na estabilidade de um muro a partir da modelagem numérica para solos de diversos tipos (SC, SM, ML, MH e CL). No caso do solo CL (coesão de 15 kPa e ângulo de atrito de 28°), a altura limite foi de 7 metros para reforços com rigidez de 11 kN/m, característico de geotêxtil não tecido. Já para reforços com geotêxtil tecido (rigidez de 100 kN/m), a altura limite foi superior a 15 metros. Os ábacos apresentados por Ehrlich e Becker (2009) para dimensionamento de muros reforçados com geossintéticos contemplam a necessidade de ângulo de atrito entre 30 e 40°. Ferreira (2020) analisou em seu estudo, que a adição de lodo ao solo provoca redução da coesão e aumento do ângulo de atrito, sendo assim, para a utilização dos ábacos sugeridos o ideal é que se priorize um traço na mistura em que o ângulo de atrito se mantenha na faixa indicada.

2.4 Características do Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF)

Complementa-se esse capítulo que até aqui explanou os diversos estudos de caracterização geotécnica do lodo, com uma breve apresentação do Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) com a finalidade de caracterizar o manancial tratado, entender os desafios ambientais, sociais e econômicos que se entrelaçam com a qualidade desse manancial para fins de abastecimento urbano, e como se relaciona a qualidade do manancial com a composição do lodo oriundo do seu tratamento.

Conforme Ceará (2015), para a água bruta chegar às estações de tratamento do Sistema Hídrico Metropolitano são percorridos mais de 200 km. Isso porque a RMF não possui mananciais de grande porte em sua abrangência geográfica, ficando dependente das estruturas de transposição dos grandes mananciais no interior do estado. Entre eles, destacam-se os açudes Castanhão e Orós, distantes 216,54 km e 283,81 km, respectivamente, conforme se observa a Figura 2.

O suprimento de água para a RMF, inicialmente, era realizado pelo sistema integrado Pacoti-Riachão-Gavião. Em 1993, com a criação do Canal do Trabalhador, as águas do açude Orós e rio Jaguaribe passaram a ser transportadas para o açude Pacajus e aduzidas para o sistema integrado acima citado.

Em 2004, com a conclusão das obras do Castanhão, o rio Jaguaribe passou a ser perenizado, e em 2012, com a conclusão do Eixão das Águas, o sistema Pacoti-Riachão-Gavião

passou a receber, também, volume direto do açude Castanhão. Esses reservatórios são interligados por meio de rios perenizados, canais, sifões, túneis e adutoras.

Figura 2 - Sistema de Abastecimento de Água da RMF



Fonte: Adaptado da SRH (2002)

A maior parte da água distribuída na RMF se dá por meio de um macrossistema que abastece, aproximadamente, 3,2 milhões de pessoas em Fortaleza e sedes de Caucaia, Eusébio, Maracanaú e a localidade de Pedras, no município de Itaitinga.

Para entender como se constitui o Sistema de Abastecimento para a Região Metropolitana de Fortaleza, o Plano de Segurança Hídrica detalha que:

O macrossistema possui duas Estações de Tratamento de Água: a ETA Gavião, em Pacatuba e a ETA Oeste, em Caucaia. A maior estação, a ETA Gavião, foi fundada em 1981, e está situada às margens do açude Gavião. Abastece, aproximadamente, 90% da população da RMF e tem capacidade para tratar até 10 m³ de água por segundo.

Já a ETA Oeste, com primeira etapa ativada em 2012, é responsável pelo abastecimento das zonas oeste e norte da RMF. Após tratada, a água potável é encaminhada por meio das adutoras e redes de distribuição.

A transferência de água tratada da ETA Gavião é feita pelas adutoras do Ancuri, que alimentam dois reservatórios apoiados com capacidade de armazenagem de 40.000 m³ cada, e uma terceira adutora que conduz água para Maracanaú e parte da zona oeste de

Fortaleza.

Já a transferência da água tratada da ETA Oeste é realizada por meio de uma adutora de 1.500 mm até o reservatório do Pici, com capacidade para 20.000 m³. Outra adutora leva água para Caucaia e adjacências.

2.4.1 ETA-Oeste

Para compreender a origem do lodo produzido na ETA-Oeste, este tópico caracteriza primeiramente um dos principais mananciais que compõe o sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza, apresentando alguns parâmetros utilizados para avaliar a qualidade da água. Em seguida, discorre-se sobre o tipo de tecnologia empregado na ETA, e os principais produtos que são adicionados ao longo do tratamento.

Segundo a Cogerh (2011) a bacia hidrográfica do Açude Pacajus é uma das alternativas para o reforço do sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza. Possui como principal contribuinte o rio Choró, destacando-se como o maior dentre as bacias que compõe a Região Hidrográfica Metropolitana.

A Cogerh (2011) discorre que o principal rio da bacia, o rio Choró, que na totalidade de seus afluentes, possui cursos d'água com características intermitentes em médios e baixos cursos, pode ser perene nos altos cursos e, ainda, possuir padrão dendrítico de escoamento, podendo ser localmente controlados por estruturas geológicas. Dentro dessa situação hídrica local, os empreendimentos antrópicos fazem com que haja uma diferenciação na evolução hídrica e mudança nos cursos d'água, principalmente com ações como alterações do relevo natural, plantio agrícola, desmatamento (ciliar), pequenas barragens e drenagens.

O uso dos recursos hídricos tem, portanto, dependência direta desses fatores e dos modos de captação, sobre as drenagens, diretamente no período de excedentes e escoamento, ou sobre o acumulado em barragens ou ainda por captações subterrâneas.

No que diz respeito às chuvas, são consideradas dispersas, principalmente na sua face leste, devido, quase que exclusivamente, ao efeito orográfico, sua geologia, geomorfologia, solos e vegetação.

O inventário apresentado pela Cogerh (2011) sobre o açude Pacajus, ressalta que o açude apresenta importantes restrições aos usos pela influência de ações antrópicas na bacia hidrográfica, alterando demasiadamente os valores dos parâmetros avaliados. O ponto analisado do açude no período do inventário classificou o nível da qualidade da água como classe 4, tanto para abastecimento público como para irrigação, podendo ser destinado conforme as classes estabelecidas pelo CONAMA à navegação ou à harmonia paisagística.

A Cogerh (2011) concluiu que os fatores significativos que afetam negativamente o açude Pacajus estão relacionados principalmente com a sua eutrofização. A imensa maioria dos açudes localizados no semiárido sofre com a eutrofização, processo intimamente relacionado com o aporte de nutrientes em decorrência de atividades antrópicas, e que pode ser agravado com a incapacidade do açude em renovar a sua massa de água. Está também diretamente associada à ocupação da área de drenagem da bacia do açude, seja pelo desmatamento, urbanização, agropecuária ou indústria. O desmatamento provoca a erosão do solo; a urbanização influencia pela contribuição dos dejetos dos moradores; a indústria em função dos seus efluentes e a agropecuária, com os excrementos do gado bovino, suíno e de aves, além da ração utilizada nas gaiolas submersas no açude em que são criados os peixes. Os solos contêm, naturalmente, ou proveniente da adubação, o nitrogênio e o fósforo, principais responsáveis pelo enriquecimento da água e a consequente eutrofização.

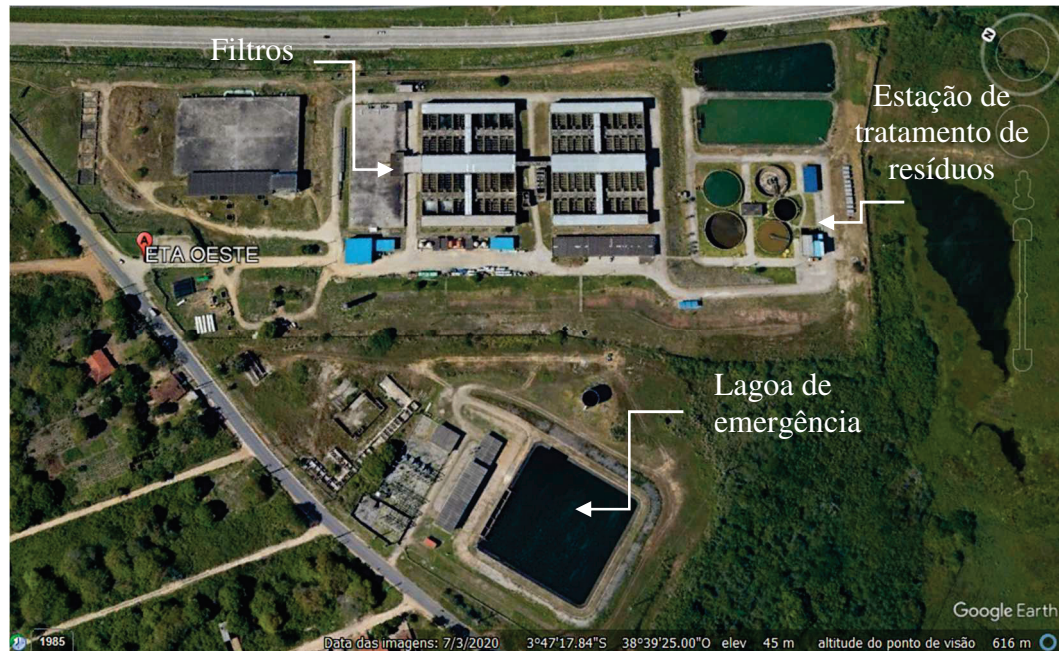
Com os desafios descritos sobre a qualidade do manancial a ser tratado, a escolha do tipo de tecnologia a ser utilizada na ETA exigiu uma análise crítica dos processos já convencionalmente utilizados quando se iniciou o processo de elaboração do projeto da ETA-Oeste, cuja primeira etapa foi ativada em 2012.

Para definição do tipo de tecnologia a ser empregada, a projetista considerou o histórico observado pela experiência da Cagece com o tratamento dessas águas. Sales (2004), ressalta que a companhia relatou que as tecnologias que se utilizam do processo de sedimentação, normalmente formam flocos nessas águas com baixíssima velocidade de sedimentação. Já, a adoção da filtração direta como tecnologia de tratamento seria uma medida arriscada, considerando que uma eficiência satisfatória da coagulação pelo mecanismo de adsorção/neutralização parcial de cargas utilizado na filtração direta, somente é atingida com a utilização de um pré-oxidante. Atualmente, já são bastante conhecidos os inconvenientes que a oxidação da água bruta pode acarretar.

Sendo assim, a Estação de Tratamento de Água da ETA-Oeste depois de considerados alguns estudos em ensaios de bancada e em ensaios em instalação piloto, adotou como tecnologia de tratamento a dupla filtração ascendente e descendente, que quando comparada com a filtração direta, apresenta vantagens tais como: permitir o tratamento de água com pior qualidade, possibilitar o uso de taxas de filtração mais elevadas no filtro ascendente, oferecer maior segurança do ponto de vista operacional em relação às variações bruscas de qualidade da água bruta, maior remoção global de microrganismos, aumentando a segurança em relação a desinfecção final, e não haver necessidade do descarte do efluente do filtro

ascendente no início da carreira de filtração, pois essa água será filtrada no filtro descendente (Sales, 2004).

Figura 3 – Vista aérea da ETA-Oeste Caucaia-CE



Fonte: adaptado de Google Maps (2023).

A Figura 3 ilustra uma vista aérea da ETA-Oeste, destacando-se o conjunto de filtros, a estação de tratamento dos resíduos gerados a partir da lavagem dos filtros, e a lagoa de emergência utilizada como alternativa para lançamento dos efluentes, em função de atividades de manutenção ou necessidades eventuais na operação da ETA.

Além dos 03 sistemas destacados na Figura 3, a ETA-Oeste é constituída ainda por câmara de chegada e mistura rápida, unidades de processo, constituída por módulos de dupla filtração, filtros ascendentes de areia grossa seguidos de filtros rápidos descendentes, câmara de contato, onde é realizada a desinfecção através da aplicação de produto químico, reservatório e estação elevatória de água para lavagem dos filtros assim como reservatório pulmão e estação elevatória de água tratada e reservatório elevado para abastecimento da ETA. É composta ainda por uma Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR) e por um sistema de produtos químicos, composto por sistema de aplicação de hidróxicloreto de alumínio, polímero catiônico, hidróxido de sódio, cloro e ácido fluossilícico;

De acordo com Serec (2012), o fluxograma de operação da ETA se caracteriza da seguinte maneira: a câmara de chegada recebe tanto a água bruta como a água recuperada, após tratamento das águas utilizadas na lavagem dos filtros da estação, provenientes da Unidade de

Tratamento de Resíduos (UTR). É nesta câmara que as águas recebem uma pré-cloração. A unidade de mistura contém cinco câmaras, cada uma com um agitador mecânico do tipo turbina de fluxo radial. A mistura do coagulante (hidróxicloreto de alumínio) é efetuada nas três primeiras câmaras, e a mistura do polímero catiônico nas quarta e quinta câmaras. Após a última câmara de mistura, a água coagulada é encaminhada por meio de um canal sob pressão às câmaras de carga, permitindo a alimentação de cada filtro ascendente e seu isolamento quando necessário.

Cada módulo de tratamento tem seis câmaras de carga, cada uma delas alimentando um filtro ascendente. Cada câmara de carga possui duas partes, uma de entrada de água, e outra de alimentação dos filtros propriamente dito. A água coagulada verte de uma câmara à outra através de um vertedor *Creager*. O nível de água na 2ª câmara de carga varia desde um valor mínimo, quando o Filtro Ascendente de Areia Grossa - FAAG encontra-se limpo, até um valor máximo, quando deve ser retirado de operação para sua lavagem.

Para cada módulo de tratamento foram previstos seis Filtros Ascendentes de Areia Grossa - FAAG, funcionando com taxa constante e carga hidráulica variável. Os filtros ascendentes são constituídos por duas câmaras filtrantes, com calhas superiores conectadas a um canal central para coletar a água filtrada e a água de lavagem, durante as operações de limpeza do meio filtrante. Em cada carreira de filtração os filtros sofrem cerca de seis descargas de fundo intermediárias. A entrada de água para lavagem é individual para cada câmara, para redução da vazão necessária. Essas tubulações individuais também são usadas para execução das descargas de fundo. A água para aplicação na interface pedregulho/areia (por ocasião de descargas de fundo intermediárias ou finais) entra em seção inferior do canal central, e é distribuída por tubulações perfuradas localizadas na camada superior de pedregulho.

Nessas condições, são usadas duas bombas (1 de reserva) de água para lavagem e aplicação de água na interface com a mesma vazão, pois, quando é realizada uma descarga de fundo, as duas câmaras filtrantes recebem água na interface. A água de lavagem do FAAG é descarregada em canal situado entre os filtros ascendentes e os filtros descendentes.

Para cada módulo de tratamento foram previstos seis Filtros Rápidos Descendentes (FRD), operando com taxa constante e carga hidráulica variável, desde um valor mínimo, quando o filtro estiver limpo, até um valor máximo quando o filtro deve ser retirado de operação para lavagem.

Cada FRD é constituído de duas câmaras filtrantes, contendo calhas transversais destinadas à coleta de água de lavagem, descarregando em um canal central. A água de lavagem desse canal escoar para o canal de descargas situado entre os FAAG's e FRD's. O fundo dos

FRD's é constituído por blocos de polietileno, especiais para lavagem com ar e água, tendo-se a camada de pedregulho disposta sobre os mesmos e suportando o meio filtrante de areia. A lavagem com ar é efetuada concomitantemente nas duas câmaras, com diminuição do nível de água no interior do filtro, por meio de abertura da válvula da tubulação de drenagem.

A lavagem com água das duas câmaras do FRD é simultânea e efetuada por bombeamento com a mesma vazão de lavagem de uma câmara do FAAG, devendo resultar em expansão da ordem de 30 a 40 %.

Os efluentes da ETA são conduzidos para uma Unidade de Tratamento de Resíduos – UTR, composta pelas seguintes unidades:

- Dois tanques de recepção e equalização – TRE;
- Dois tanques de clarificação e adensamento – TCA;
- Um tanque de lodo adensado – TLA;
- Um tanque de água recuperada – TAR e
- Uma unidade de desaguamento com dois decantadores centrífugos.

Os resíduos líquidos gerados na ETA, provenientes das lavagens dos filtros, são encaminhados, em frequências variadas, em função da qualidade da água a ser tratada e da etapa de funcionamento, por tubulação seguida de canal para o Tanque de Recepção e Equalização. Cada tanque é provido de misturadores para homogeneização dos efluentes e são interligados aos Tanques de Clarificação e Adensamento através de um sistema de bombeamento contínuo da vazão regularizada. Durante o recalque de água regularizada dos TER's para os TCA's é feita aplicação de polímero catiônico FO4140 PWG. Dos TCA's, projetados para tempo de detenção da ordem de 2,7 horas, a água clarificada verte radialmente e é conduzida continuamente, por gravidade, até o Tanque de Água Recuperada.

O lodo é enviado para o tanque de lodo adensado também por gravidade, através de descargas periódicas dos TCA's, através de válvulas elétricas. Do tanque, o lodo é encaminhado por recalque, através de bombas helicoidais, para as centrífugas, onde é desidratado. Em seguida, o lodo é coletado por caçambas estacionárias que são descarregadas no Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC), distante 10,2 km da ETA-Oeste.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos itens seguintes, apresentam-se os conceitos estabelecidos para as coletas do lodo realizadas na ETA-Oeste, detalham-se as referências para os métodos escolhidos bem como descrevem-se as adaptações que foram realizadas para contornar os desafios para a realização dos ensaios, principalmente os geotécnicos.

3.1 Coleta das amostras

Foram realizadas duas principais coletas: a primeira, caracterizando o período seco, em agosto/2022, (I) e uma outra, caracterizando o período chuvoso, janeiro/2023 (II) para que fosse possível avaliar as diferenças de parâmetros obtidos nessas distintas estações do ano.

Para a classificação ambiental foi realizada uma coleta específica em maio/202, no último mês da quadra chuvosa, caracterizada por tanto como coleta do período chuvoso (II). Entretanto, os ensaios ambientais não foram realizados no período seco (I) para análise comparativa dos resultados.

Para os ensaios de caracterização física, química, mineral e geotécnica, a coleta das amostras ficou definida da seguinte maneira: foram retiradas ao longo de uma semana 2,5 kg de lodo diariamente em cada uma das centrífugas, preferencialmente coletadas na saída da centrífuga, vedando-se a tampa da bombona com saco plástico imediatamente após a retirada da amostra, e armazenando-a em local protegido do sol e em ambiente climatizado, até que se completasse o ciclo de coleta de 7 dias. O material foi então, transportado até o laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) pela Cagece.

A Figura 4a indica uma das centrífugas instalada sobre laje elevada, responsáveis por reduzir a umidade do lodo, e na Figura 4b a saída da centrífuga sobre caminhão estacionário.

Figura 4 – a) Centrífuga e b) saída da centrífuga sobre caçamba estacionária



a) vista da centrífuga utilizada para secagem do lodo



b) coleta do lodo em caminhão estacionário

Fonte: Elaborada pela autora

3.2 Metodologia dos Ensaios

Os ensaios de caracterização do lodo da ETA-Oeste foram divididos em 05 partes: caracterização mineralógica, caracterização física, caracterização química, caracterização geotécnica e caracterização ambiental.

Para a realização dos ensaios geotécnicos na coleta (I), referente ao período seco, foram adotadas metodologias semelhantes as utilizadas por Roque *et al* (2021) na caracterização do lodo da ETA de Taiaçupeba-SP. Algumas adaptações foram realizadas nos métodos adotados conforme detalhado nos tópicos seguintes.

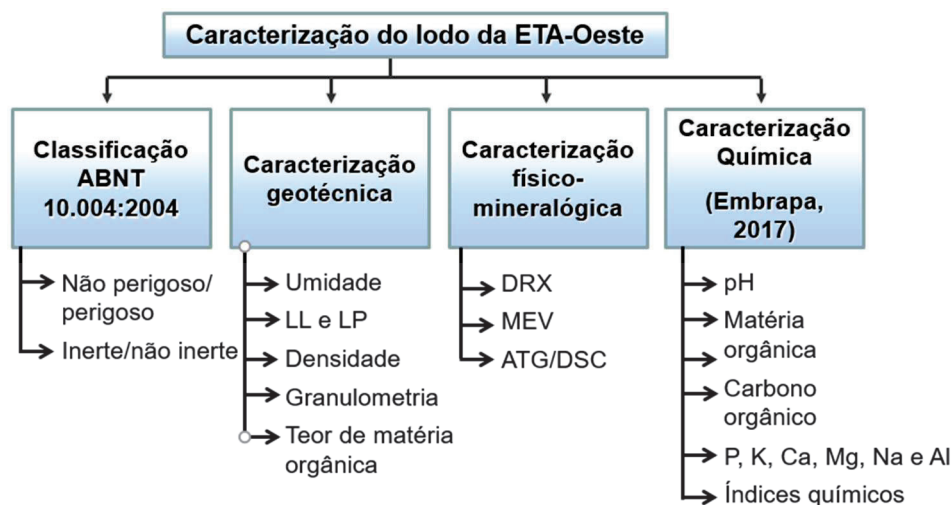
Já os métodos empregados na coleta (II), do período chuvoso, para os referidos ensaios, foram conduzidos de forma diferente em relação a do período seco em função das dificuldades encontradas na obtenção dos resultados encontrados na primeira coleta.

Os ensaios de TGA, MEV e químicos foram conduzidos utilizando os mesmos métodos em ambas as coletas (I) e (II), enquanto o DRX foi ensaiado com amostras lavadas da coleta (I) e *in natura* da coleta (II).

Já a classificação ambiental segundo a ABNT NBR 10.004:2004 foi obtida por meio de coleta específica e única, e envio direto para o laboratório H₂OAnalysis.

A Figura 5 indica o detalhamento dos ensaios realizados no lodo da ETA-Oeste:

Figura 5 – Metodologias empregadas para caracterização do lodo da ETA-Oeste



Fonte: Elaborada pela autora

3.2.1 Obtenção da Umidade e preparação da amostra

O lodo coletado no período seco foi disposto em bandejas, levadas ao sol e o material revolvido diariamente, enquanto eram retiradas amostras periódicas para determinação de sua umidade (uma retirada por período). Já o lodo do período chuvoso, em função das chuvas diárias, foi disposto em bandejas, revolvida e seca à sombra, protegido da chuva na maioria dos dias, tendo sido levado ao sol, apenas nos dias possíveis. Nessa condição, a umidade periódica foi obtida pela média de oito amostras retiradas de diversas regiões da bandeja, considerando a variação da umidade ao ser seca à sombra.

Ao se obter teor de umidade próximo da higroscópica, o material foi sendo destorroado com almofariz de porcelana e mal de gral recoberta de borracha e posterior secagem em estufa a 65°C. A Figura 6 apresenta as etapas que se sucederam no processo de perda da umidade:

Figura 6 – Etapas de secagem até a formação dos grumos cimentícios



a) início do processo de secagem ao sol

b) percepção da perda de umidade – redução visual do volume

c) seco e peneirado nº10 (2,00mm) – grumos cimentícios

Fonte: Elaborada pela autora

3.2.2 Caracterização mineralógica

A análise mineralógica foi efetuada a partir de dois ensaios: a Difractometria de Raios X (DRX) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A Difractometria de Raios X (DRX) foi realizada com detector sensível a posição, através do método do pó, com o objetivo de identificar as fases cristalinas no material. Foram submetidas ao ensaio 03 tipos de amostras dispostas em microtubos de 1,5ml:

DE001: pó obtido da coleta referente ao período chuvoso (II) *in natura* após processo de secagem detalhado no item anterior;

DE002: pó obtido da coleta referente ao período seco (I), extraída do percentual de material retido na peneira 0,6mm após a lavagem realizada no ensaio de granulometria detalhado nos ensaios geotécnicos.

DE003: pó obtido da coleta referente ao período seco (I), extraída do percentual de material passante na peneira 0,15mm após a lavagem realizada no ensaio de granulometria detalhado nos ensaios geotécnicos.

As amostras DE002 e DE003 foram obtidas a partir da lavagem no ensaio de granulometria em razão das variáveis quanto a sua composição, e medidas preventivas na submissão das amostras no equipamento para realização do ensaio. Não se detectando problemas operacionais, partiu-se para realização do ensaio na amostra DE001 *in natura*.

Procedeu-se a caracterização mineralógica por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) obtendo-se imagens com o intuito de tornar possível visualizar as fases cristalinas do lodo, os seus principais componentes e características físicas como presença ou não de matéria orgânica e a identificação de fases da amostra plastificada por produtos químicos aplicados na ETA.

O ensaio de DRX e o MEV foram realizados em parceria com os laboratórios de Raio X e Central Analítica, respectivamente, ambos pertencentes a UFC.

3.2.3 Análise Termogravimétrica (ATG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Estes ensaios foram realizados com a finalidade de se avaliar o comportamento de queima do lodo da ETA-Oeste ao ser submetido a taxa de aquecimento do forno constante e a duas atmosferas distintas, identificando suas possíveis fases ao longo do aquecimento. Nesse ensaio é possível determinar o teor de matéria obtido pela análise térmica quando a amostra é

submetida a queima em atmosferas com ar sintético e nitrogênio, possibilitando ainda, comparar com os resultados obtidos no ensaio de teor de matéria orgânica (ensaio geotécnicos) e na concentração de matéria orgânica extraída nos ensaios químicos.

A análise termogravimétrica (ATG) e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) foram feitas no intervalo de temperatura entre 25 °C a 800 °C, no equipamento STA Jupiter 449 F3 da marca NETZSCH em cadinho parcialmente aberto de Al₂O₃, sob atmosfera de N₂ com fluxo de 50 mL min⁻¹ e taxa de aquecimento do forno de 10 °C/min e em atmosfera de ar sintético (80/20) com fluxo de 50 mL min⁻¹ e taxa de aquecimento do forno de 10 °C/min.

Em ambas as coletas (I) e (II) o ensaio se realizou, inicialmente, escalonando a granulometria da amostra, e lavando-a como medida preventiva acerca de danos ao equipamento em que foram realizados os ensaios. A medida que os ensaios com amostra lavada foram sendo realizados sem sofrer nenhum tipo de imprevisto, partiu-se para o ensaio com a amostra em pó *in natura*. Assim sendo, efetuou-se a execução do ensaio com as seguintes amostras:

A: A primeira amostra ensaiada se caracterizou por granulometria mais fina extraída do percentual de material passante na peneira 0,15mm após a lavagem realizada no ensaio de granulometria detalhado nos ensaios geotécnicos.

B: A segunda amostra ensaiada foi extraída do percentual de material retido na peneira 0,6mm após a lavagem realizada no ensaio de granulometria detalhado nos ensaios geotécnicos.

C: E por último, realizou-se o ensaio reproduzindo o perfil granulométrico obtido no ensaio de granulometria, sem lavagem da amostra, *in natura*.

Essas amostras foram acondicionadas em microtubos de 1,5 ml cada um.

Na coleta do período chuvoso (II), além das amostras A e B optou-se por realizar o ensaio da amostra C em triplicata. Este ensaio foi realizado nos laboratórios de Fundição e de Materiais Avançados da UFC.

Serão apresentados os resultados obtidos a partir da amostra C de ambas as coletas.

3.2.4 Caracterização química

A caracterização química do lodo da ETA-Oeste foi realizada com o objetivo de obter os parâmetros básicos para misturas com o solo como: pH, matéria orgânica, carbono orgânico, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, sódio e alumínio.

Seguiu-se a mesma metodologia utilizada por Roque *et al* (2021) para a caracterização química, conforme os métodos estabelecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) tanto para a coleta realizada no período seco (I) quanto para a coleta referente ao período chuvoso (II).

Os parâmetros obtidos como pH, matéria orgânica, tipos de nutrientes e/ou metais (fósforo, potássio, cálcio, magnésio, sódio, alumínio) e os métodos para determinar as suas concentrações além de parâmetros como acidez potencial, Capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação, encontram-se detalhados na Tabela 4.

Tabela 4 – Ensaio de caracterização química – Método EMBRAPA

Parâmetro	Método/Definição
pH	em H ₂ O
Matéria orgânica	Método da titulometria
Carbono orgânico	
Fósforo	por extração com Mehlich 1 e determinação por colorimetria
Potássio	por extração com Mehlich 1 e determinação em espectrofotômetro de emissão atômica
Cálcio	em KCl 1 mol L ⁻¹
Magnésio	em KCl 1 mol L ⁻¹ por extração com cloreto de potássio 1 mol L ⁻¹ e determinação por titulometria
Sódio	por extração com Mehlich 1 e determinação por fotômetro de chama.
Alumínio	por extração com Cloreto de Potássio 1 mol L ⁻¹ e determinação por titulometria
Acidez potencial	acidez potencial (H ⁺ +Al ³⁺) por extração com Acetato de Cálcio e determinação por titulometria
Capacidade de troca catiônica (CTC)	a CTC de um solo representa a quantidade total de cátions trocáveis que o solo pode adsorver
Soma das bases trocáveis (Valor S)	CTC efetiva = Valor S + Al ³⁺ Valor S = Ca ²⁺ + Mg ²⁺ + Na ⁺ + K ⁺
Saturação de CTC por bases – Valor V (%)	$\text{Valor V(\%)} = \frac{\text{Valor S}}{\text{Valor T}} \cdot 100$
Saturação por alumínio - m	$m = \frac{\text{Al}^{3+}}{(\text{Valor S} + \text{Al}^{3+})} \cdot 100$

Fonte: Adaptado de Roque *et al* (2021)

Ressalta-se o ensaio realizado para obtenção do teor de matéria orgânica obtido pela caracterização química, determinado pelo método do carbono orgânico seguindo o procedimento do Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (Teixeira, 2017). O teor de carbono orgânico é determinado por oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, usando o sulfato de prata como catalisador, sendo o excesso de dicromato após a oxidação, dosado por titulação com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal, utilizando

difenilamina como indicador. O teor de carbono assim obtido foi multiplicado por 1,724 obtendo-se o teor de matéria orgânica. Esse valor foi comparado com os resultados obtidos na análise termogravimétrica e no teor de matéria orgânica obtido por queima a 440°C na caracterização geotécnica do material em estudo.

Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Química da Agronomia por disponibilizarem das soluções para extração dos elementos conforme preconizado pelo método EMBRAPA.

3.2.5 Caracterização geotécnica

A caracterização geotécnica foi realizada com a finalidade de compreender o comportamento do lodo e sua influência em misturas com outros materiais.

Em função das peculiaridades do material, ao se realizar ensaios geotécnicos com lodo de ETA buscou-se consultar publicações similares, com o objetivo de adaptar a realização dos ensaios a partir de experimentos já realizados.

Roque *et al* (2021) realizaram ensaios similares aos propostos nesta pesquisa, e assim as metodologias propostas pelas autoras foram replicadas ou adaptadas de sua publicação original, conforme se descreve a seguir:

A caracterização geotécnica do lodo compreendeu ensaios de teor de umidade (w), análise granulométrica, massa específica dos grãos (ρ_s), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e teor de matéria orgânica, realizados, quando possível, de acordo com as normas (Tabela 5). Algumas adaptações nos procedimentos normalizados foram necessárias devido às características peculiares do lodo.

Tabela 5 - Procedimentos e normas para os ensaios de caracterização geotécnica

Procedimento	Norma
Preparação de amostras	NBR 6.457 (ABNT, 2016)
Teor de umidade	NBR 6.457 (ABNT, 2016) / D2974-20e1 (ASTM, 2020)
Análise granulométrica	NBR 7.181 (ABNT, 2017)*
Limite de Liquidez	NBR 6.459 (ABNT, 2016 a)
Limite de Plasticidade	NBR 7.180 (ABNT, 2016 b)
Massa específica dos grãos	NBR 6.458 (ABNT, 2016)
Teor de matéria orgânica	NBR 13.600 (ABNT, 1996)
Classificação SUCS	D2487-17 (ASTM, 2017)

Fonte: Adaptado de Roque *et al* (2021)

Para a primeira coleta referente ao período seco (I), os limites de Atterberg seguiram a recomendação da ABNT NBR 6459:2016 e ABNT NBR 7180:2016 para limite de liquidez e limite de plasticidade, respectivamente. Para a coleta do período chuvoso (II) optou-se por adaptar a metodologia apresentada nas normas brasileiras, e realizar estes ensaios à medida que o lodo ganhava mais consistência, com a secagem, sem atingir, entretanto, o limite em que a secagem do lodo comprometa a sua afinidade com a água.

Para a determinação do teor de umidade adotou-se a temperatura de 65°C, conforme recomendação da ABNT NBR 6.457:2016 para a secagem de solos orgânicos, turfosos ou contendo gipsita a $60 \pm 5^\circ\text{C}$. Ressalta-se, todavia que a literatura científica apresenta uma alternativa quando se analisa teor de umidade de solos orgânicos: Roque *et al* (2021), por exemplo, salientaram que a D2974-20e1 (ASTM, 2020) e a US EPA (2001) recomendam a secagem de solos orgânicos a $110 \pm 5^\circ\text{C}$. O'Kelly e Sivakumar (2014) demonstraram que a secagem em estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ de lodos de ETA também é adequada para determinações rotineiras do teor de umidade, uma vez que leva a menores variações que amostras secas a temperaturas inferiores.

Para determinação da massa específica dos grãos, realizou-se o ensaio conforme preconizado pela ABNT NBR 6.458:2016, em quadruplicata, prevendo possíveis variações nos resultados obtidos. Na coleta (II) foram realizados 03 ensaios durante o processo de secagem da amostra (26/jan/21, 02/fev/21, 08/fev/21), medindo-se a umidade em que o lodo se encontrava para se avaliar a variação da densidade com a umidade. Cada ensaio também foi realizado em quadruplicata.

Para determinação da curva granulométrica observou-se a metodologia utilizada por Roque *et al* (2021) em sua caracterização, verificando-se que foram realizados diversos ensaios de sedimentação com alterações em relação ao procedimento normalizado, em razão da não dispersão dos sólidos durante esta etapa. Roque *et al* (2021) reforça, inclusive, que autores como Hsieh e Raghu (1997) e Vandermeijden e Cornwell (1998) também encontraram dificuldades nas análises granulométricas, contornadas com a utilização de 10g de material, em vez de 50g, e com a eliminação da etapa de secagem anterior à sedimentação.

Roque *et al* (2021) detalha ainda a eficiência dos defloculantes na dispersão de solos discutida por diferentes autores. Foi reportado o uso de soluções dos defloculantes Silicato de Sódio 40° Baumé, Daxad 23 (produto comercial à base de sais de sódio polimerizados de Ácido Sulfônico) e Pirofosfato de Sódio ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$), fornecendo resultados satisfatórios para muitas argilas (Lambe, 1951). Este autor recomenda que a seleção do defloculante e a definição da quantidade a ser utilizada se deem por tentativas. Wintermyer e Kinter (1955), realizando ensaios de sedimentação com 19 diferentes defloculantes e 16 solos, sob condições rigorosamente controladas, concluíram que vários agentes, como Carbonatos, Hidróxidos e Oxalato de Sódio, produziram um alto grau de dispersão em alguns solos, mas falharam em estabilizar as

suspensões de outros. Polifosfato de Sódio e Tripolifosfato de Sódio foram altamente e igualmente eficazes para todos os experimentos com solos representativos dos Estados Unidos. Hexametáfosfato de Sódio e Tetrafosfato de Sódio foram ligeiramente menos eficazes. Nenhum desses quatro fosfatos foi capaz de estabilizar a suspensão do solo laterítico vermelho e ferruginoso ensaiado, o qual, entretanto, foi altamente disperso por Fosfato Trissódico e Pirofosfato Tetrassódico, que são geralmente ineficazes com os outros grupos de solos. Para solos residuais, Blight (1997) recomenda, se necessário, o uso de Hexametáfosfato de Sódio em concentrações duas vezes a convencional e, se este defloculante se mostrar ineficiente, o uso de Fosfato Trissódico. Head (2006) apresenta uma lista de diversas substâncias utilizadas como defloculantes, muitas delas muito bem-sucedidas para a maior parte dos solos. Segundo o autor, o hexametáfosfato convencionalmente utilizado pode não ser totalmente eficaz para alguns solos tropicais residuais. Nesses casos, Fosfato Trissódico e Tetrassódico, em concentrações de 2 a 3 vezes mais fortes que o padrão, se mostraram mais efetivos.

Por conta das considerações acima elencadas, definiu-se primeiramente por adotar somente o defloculante convencionalmente utilizado, isto é, o Hexametáfosfato de Sódio, pois o intuito da pesquisa não é identificar o defloculante com maior eficiência na dispersão do lodo em estudo, mas descrever as características geotécnicas do lodo, inclusive aquelas que o lodo não apresenta comportamento semelhante aos resultados esperados em solos. Prevendo, entretanto, encontrar dificuldades semelhantes às relatadas por esses autores foram realizados ensaios modificando-se a quantidade de amostra utilizada, tomando-se o material úmido, em quantidades correspondentes a 40 g e 20 g em massa seca e mantendo-se a concentração de 45,7 g.L⁻¹ do defloculante Hexametáfosfato de Sódio, indicada na ABNT NBR 7.181:2017. Demais tentativas levaram em conta a concentração do defloculante, que foi sendo aumentada gradativamente para cada nova amostra conforme procedimento adotado por Roque *et al* (2021). Repetiu-se o mesmo ensaio, ainda, substituindo o defloculante por água destilada e álcool 98°C. As modificações adotadas para o ensaio de sedimentação, nas tentativas de que o defloculante atuasse com eficiência na dispersão dos sólidos apresenta-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Variação da concentração do defloculante x lodo no ensaio de sedimentação

Soluções	Concentração da solução de defloculante		Quantidade de lodo <i>in natura</i> utilizada (g)
	(g.L ⁻¹)	(%)	
Hexametáfosfato de Sódio	45,70	4,57	40,00
	91,40	9,14	40,00
	137,10	13,71	40,00
	182,80	18,28	40,00
	45,70	4,57	20,00
	91,40	9,14	20,00
Água	-	-	40,00
Álcool etílico 98°C	-	-	40,00

Fonte: Adaptado Roque *et al* (2021)

Para a coleta do lodo realizada no período seco (I), a sedimentação foi realizada após secagem ao sol, que provocou a formação dos grumos fortemente cimentícios (resistentes

ao destorroamento com mão de gral), inviabilizando o ensaio de granulometria fina. Já na coleta do período chuvoso (II), após análise dos resultados obtidos com a coleta (I), optou-se por realizar somente o ensaio de sedimentação com amostra *in natura*.

Para os ensaios realizados com hexametáfosfato, água e álcool, deixou-se 120 g de material imerso em água e lavou-se após 24 horas na peneira 2.0mm.

Todos os ensaios geotécnicos acima descritos foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará.

3.2.6 Caracterização Ambiental

O lodo de ETA foi classificado seguindo a norma ABNT NBR 10.004:2004 – Resíduos sólidos, com a finalidade de catalogar o resíduo quanto aos riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

Segundo a norma ABNT NBR 10.004:2004 a classificação de resíduos sólidos envolve a identificação de seus constituintes e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

Os ensaios da amostra de lodo da ETA-Oeste foram realizados pelo Laboratório H₂OAnalysis. As amostras foram preparadas segundo a norma ABNT NBR 10.007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos. O ensaio de lixiviação foi realizado seguindo a ABNT NBR 10.005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, e o ensaio de solubilização foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 10.006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização do lodo da ETA-Oeste: caracterização mineralógica, caracterização física, caracterização química, caracterização geotécnica e caracterização ambiental.

4.1 Caracterização mineralógica

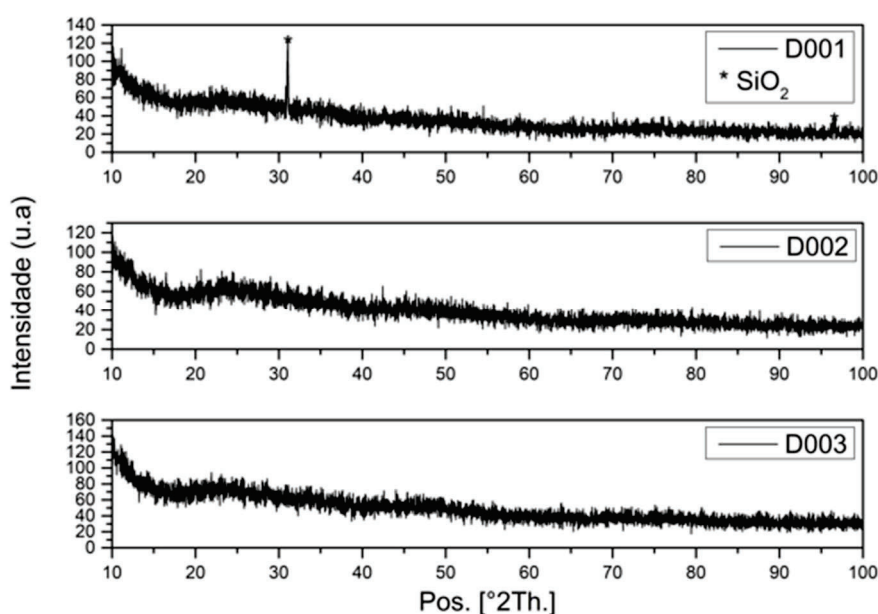
4.1.1 DRX

As informações obtidas de cada pico são a intensidade, a posição angular ou distância interplanar e o perfil. Cada composto cristalino apresenta um padrão difratométrico característico, permitindo sua identificação através das posições angulares e intensidades relativas dos picos difratados.

No método do pó a identificação das substâncias cristalinas é obtida através da comparação do difratograma com padrões difratométricos de fases individuais disponibilizados pelo *International Center for Diffraction Data* (ICDD), antigo *Joint Committee of Powder Diffraction Standards* (JCPDS).

A Figura 7 a seguir apresenta os perfis obtidos para as 03 amostras ensaiadas.

Figura 7 – Resultados do DRX para as 03 amostras ensaiadas



Fonte: Elaborada pela autora

A amostra D001 indicou uma intensidade de frequência compatível com quartzo (SiO_2), oriunda provavelmente da lavagem dos filtros, em que há eventuais perdas dos materiais granulares constituintes da camada filtrante. As demais amostras D002 e D003 não apresentaram esse pico de intensidade, muito provavelmente por terem sido amostras lavadas previamente.

Portanto, de maneira geral, os gráficos apresentados não indicaram picos de intensidades que pudessem caracterizar qualitativamente os minerais presentes nas amostras.

De acordo com diversos autores que relataram a presença de material amorfo em outros lodos de ETA (Ramirez *et al.*, 2018; Suman *et al.*, 2018; Abo-El-Enein *et al.*, 2017; Ahmad *et al.*, 2016; Delgado, 2016; Cabral, 2013), a presença desse material em DRX ocasiona ausência de picos de difração nítidos e presença de bandas largas com baixas intensidades, indicando partículas mal ordenadas e não cristalinas.

De acordo com O’Kelly (2016), as composições mineralógicas dos lodos de ETA’s são determinadas pela origem da água bruta, pelo tipo e extensão dos processos de tratamento, pelas quantidades de íons, sólidos em suspensão e materiais coloidais removidos e os tipos de produtos químicos adicionados nos processos de tratamento.

Conclui-se então, que os resultados obtidos no ensaio de DRX confirmaram o caráter amorfo da amostra de lodo.

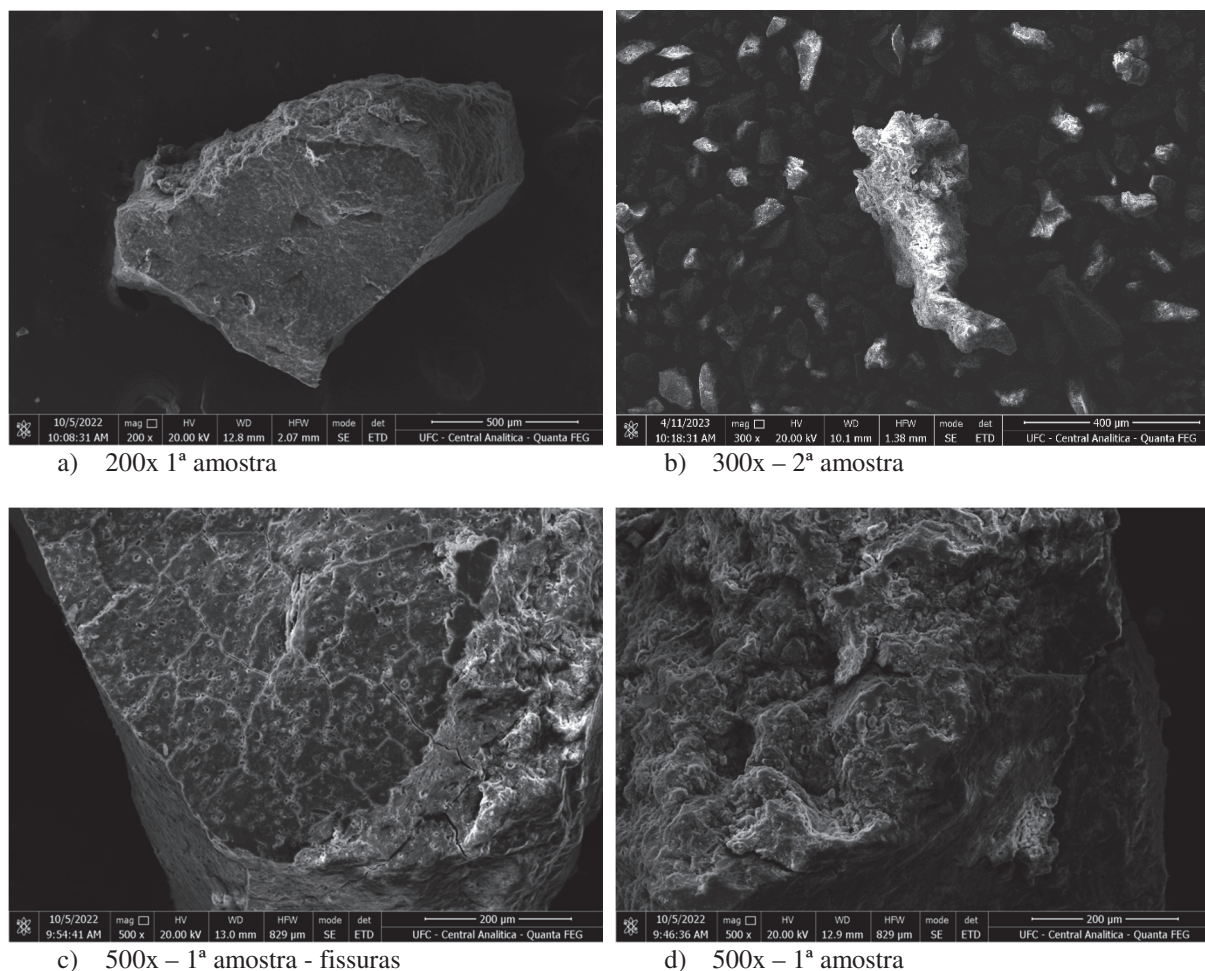
Quanto a metodologia utilizada, considerando-se que uma das amostras foi submetida ao ensaio *in natura*, que a lavagem do material nas outras duas amostras não agregou aos resultados obtidos, e que a presença de material amorfo inibe os picos de difração, recomenda-se como procedimento para a realização de novos ensaios, submeter previamente a amostra a ser examinada ao ensaio de determinação do teor de matéria orgânica, a fim de reduzir o teor de matéria orgânica da amostra, e permitir que as intensidades dos minerais de interesse de estudo possam se sobrepor no ensaio de DRX, conforme recomendação do laboratório que realizou os ensaios.

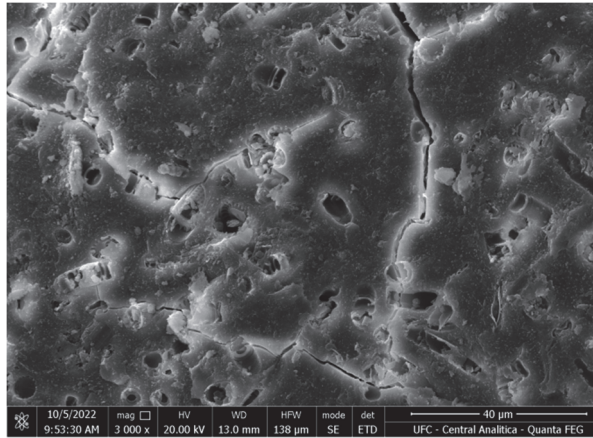
Já Roque *et al* (2021) obteve resultados de DRX após oxidação da matéria orgânica com H_2O_2 , que sinalizaram uma matriz amorfa com possível presença de fase cristalina composta por gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), não tendo mais sido detectada a presença possível de quartzo.

4.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

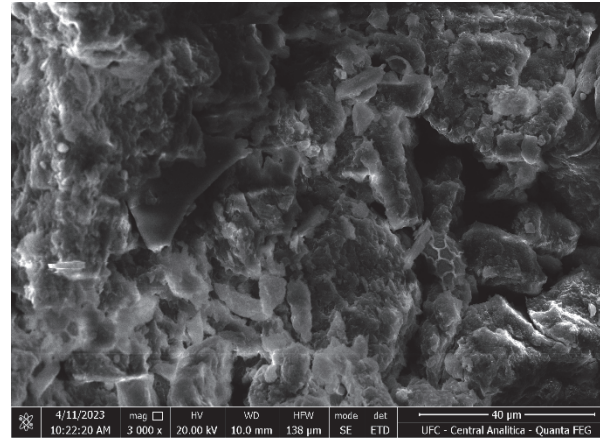
A Figura 8 apresenta as imagens obtidas no ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Observa-se nas imagens referentes a primeira coleta (I) a superfície dos elementos notadamente caracterizada por fissuras, as quais não foram evidenciadas na segunda coleta (II), seca à sombra. Essas fissuras podem indicar a ação dos polímeros utilizados no tratamento da água, e o efeito da retração em função da secagem direta ao sol, o que explicaria a ausência na coleta (II). Já os materiais amorfos, presentes nas imagens de ambas as coletas (I) e (II), indicam a presença de uma espécie de diatomácea, componente de fitoplanctons de lagos, lagoas e rios eutróficos, denominada *Aulacoseira ambígua*, também encontrada por Roque *et al* (2021) e Muchimbane (2016), e que corrobora com o manancial eutrofizado que hoje abastece a região metropolitana de Fortaleza, conforme descrição do material no item 3.1.

Figura 8 – Microscopia eletrônica de Varredura coleta (I) e coleta (II)

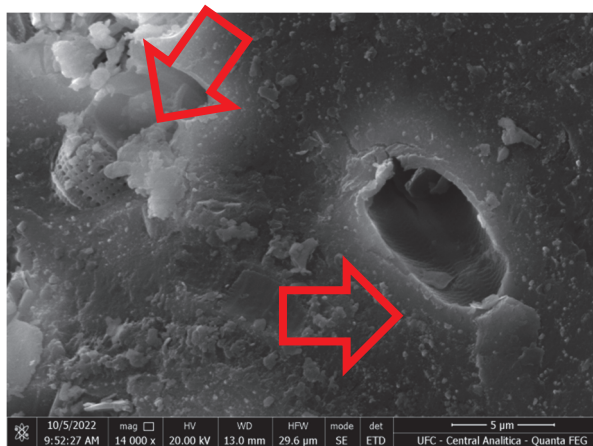




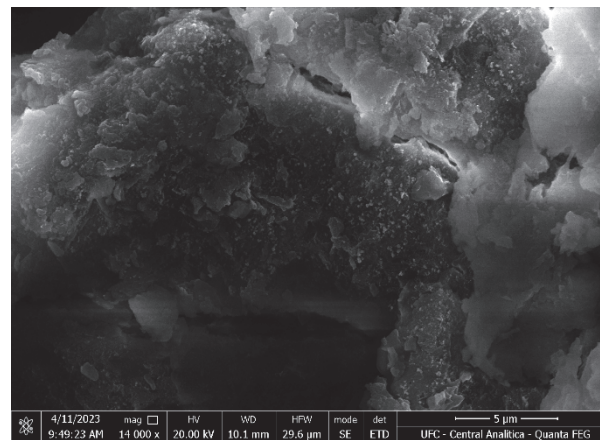
e) 3.000x – 1ª amostra – fissuras



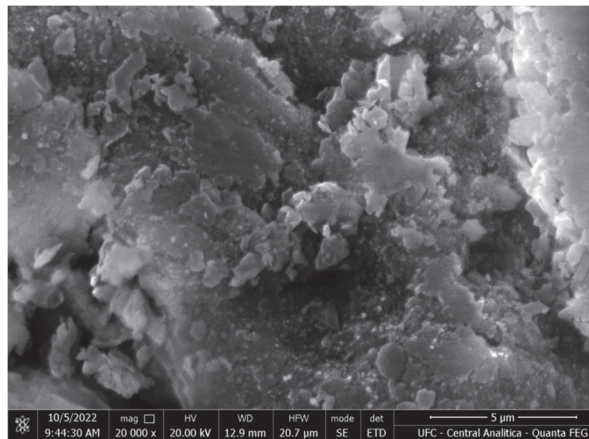
f) 3.000x – 2ª amostra – material amorfo



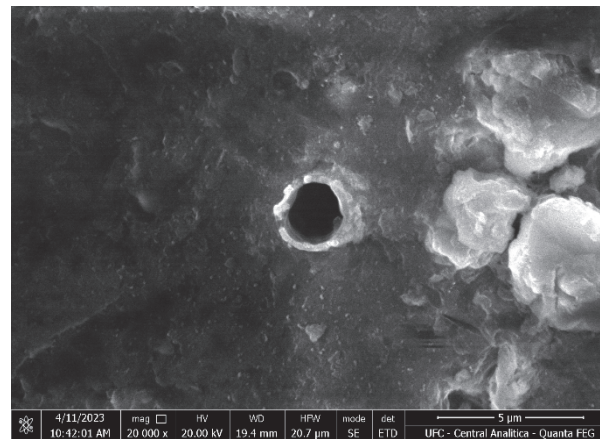
g) 14.000x - 1ª amostra - diatomáceas



h) 14.000x – 2ª amostra – material amorfo



i) 20.000x – 1ª amostra – material amorfo



j) 50.000x – 2ª amostra – material amorfo

Fonte: Elaborada pela autora

Muchimbane (2016), descreve a superfície das frústulas diatomáceas como escamosas com orifícios retangulares visíveis formando um padrão colmeia (Figura 8g), que confere ao material uma elevada propriedade filtrante. Já na Figura 8h com a mesma ampliação de imagem (14.000x), observa-se materiais sem forma distinta, provavelmente componentes da matriz amorfa citada.

A presença de material amorfo tem sido relatada em outros lodos de ETA (Ramirez *et al.*, 2018; Suman *et al.*, 2018; Abo-El-Enein *et al.*, 2017; Ahmad *et al.*, 2016; Delgado, 2016; Cabral, 2013). Na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), o lodo apresenta-se com complexa morfologia, com partículas sem forma ou forma distinta (Buselatto *et al.*, 2019), que sugerem a ausência da fase cristalina. Em solos, os compostos húmicos são a fração formada pela decomposição de plantas e animais com ou sem a assistência de microrganismos (Tan, 2011). Nos lodos de ETA's, fazem parte do material amorfo compostos húmicos e óxidos e hidróxidos de alumínio e/ou ferro não-cristalinos. Os óxidos e hidróxidos são os produtos da reação dos sais utilizados como coagulantes e auxiliares de coagulação com a água, formando espécies hidrolisadas com carga positiva e precipitados do metal (ferro ou alumínio) amorfo (ou não-cristalino).

Em outros tipos de lodos de ETA's com tratamento convencional, a fase amorfa pode ser atribuída ainda aos produtos como óxido de alumínio (Al_2O_3) e hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) advindos da adição de coagulantes.

Brazetti (1998), Rodríguez (2010) e Azzam (2013) em estudos sobre a influência da adição de polímeros nas características micromorfológicas, mineralógicas, hidráulicas e geotécnicas de solos, concluíram que a adição dos polímeros impossibilitou a visualização dos agregados naturais do solo, formando uma massa homogênea e plástica, com presença de fissuras (como na Figura 8c e 8e). Brazetti (1998) constatou a formação de uma espécie de plasma seboso e considerou esta cerosidade a mais importante característica observada, relacionada à ação dos polímeros na fração argilosa do solo.

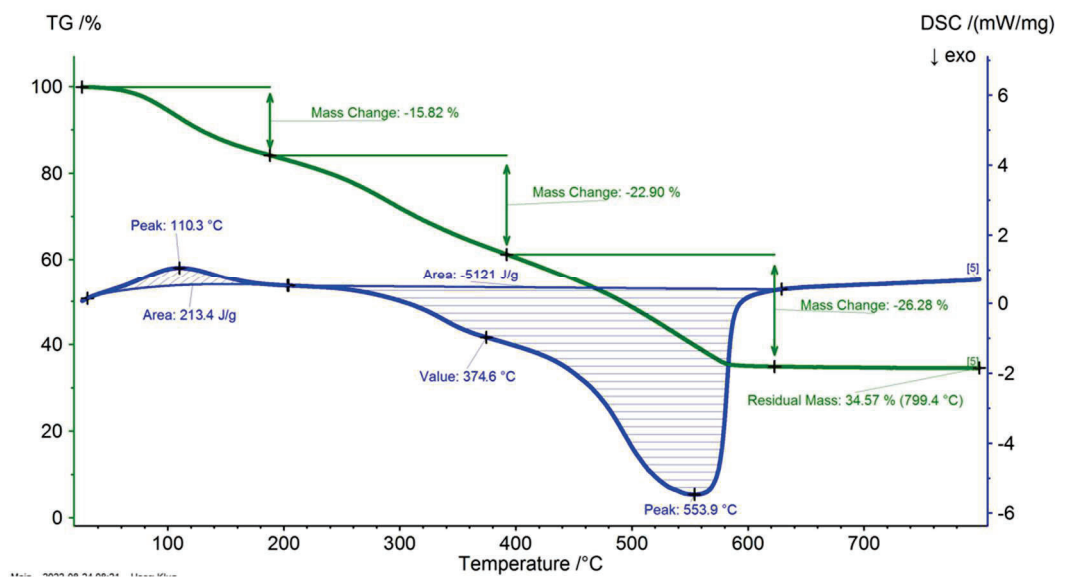
No lodo da ETA-Oeste, portanto, pode-se concluir que a fase amorfa observada nas imagens extraídas da MEV pode ser atribuída tanto ao elevado teor de matéria orgânica como a adição dos produtos químicos utilizados no tratamento da água e do lodo.

Roque *et al* (2021) para contornar o excesso de matéria orgânica, efetuou tratamento preliminar da amostra, extraíndo a matéria orgânica com a utilização de Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2) (30% de concentração) e aquecimento a $60\pm 5^\circ\text{C}$ por três horas, de acordo com os procedimentos especificados pela Teixeira (2017) e pela D7928-17 (ASTM, 2017 a). Outra alternativa seria a realização dos ensaios de DRX e MEV com a amostra submetida preliminarmente ao ensaio de perda ao fogo a 440°C , conforme recomendação indicada pelo Laboratório de Raio X.

4.2 Análise termogravimétrica (TGA)

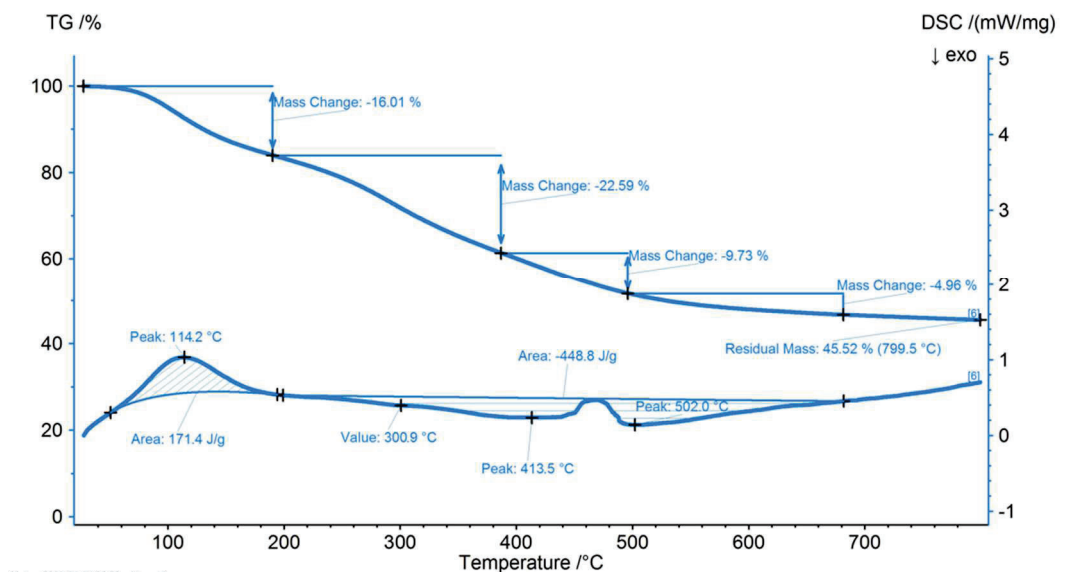
As Figuras 9 e 10 apresentam os resultados obtidos na Análise Termogravimétrica (TGA) e na Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) no ensaio realizado na amostra C referente ao lodo in natura da coleta (I), já que as amostras A e B foram submetidas como procedimento preliminar de segurança e conservação dos equipamentos do laboratório:

Figura 9 – Amostra C TG-DSC – Ar sintético – Coleta (I)



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 10 – Amostra C TG-DSC – Ar nitrogênio (Coleta I)



Fonte: Elaborada pela autora

Tanto na amostra A, B e C os ensaios apresentaram um pico no gráfico do DSC caracterizado pela perda de água ainda presente na massa do material, equivalente a 15% de perda de massa e a uma temperatura máxima de reação que girou em torno dos 115°C.

Para os ensaios realizados com ar sintético, verifica-se mais 02 picos, e estes associados a degradação da matéria orgânica por oxidação, cujas temperaturas máximas variaram no primeiro pico entre 350°C a 375°C com perda de massa variando entre 15% nas amostras lavadas e chegando a 23% na amostra *in natura*, resultado previsto, por se esperar que se apresentasse maior quantidade de massa a ser degradada. Já no terceiro pico, as temperaturas máximas variaram entre 510 e 568°C com perda de massa entre 18 e 27%.

Os ensaios sob a atmosfera de nitrogênio se caracterizaram por degradação da matéria orgânica por reação de pirólise. Apresentaram-se menos eficientes na degradação da matéria orgânica do que com ar sintético ao se observar a curva de DSC mais suave. Verifica-se que o residual de matéria orgânica se apresentou sempre maior que os valores obtidos com ar sintético. Observa-se na Figura 10 picos distintos, que aparentam ser de reações endotérmicas. Todavia não é possível afirmar, pois podem representar também sobreposição de gráficos de degradação da matéria orgânica constituída por materiais diferentes, e que seriam melhores interpretados com os resultados dos ensaios mineralógicos, que só identificaram essencialmente a fase amorfa, impossibilitando definir quais seriam os compostos responsáveis pelas mudanças de fases definidas pela mudança de curvatura observada nas Figuras 9 e 10.

Pelos gráficos acima pode-se obter os teores de degradação da matéria orgânica, desconsiderando a primeira fase que representa os percentuais por perda da água estrutural, cujos valores variaram de 35 a 50% por ar sintético e 35% a 40% por nitrogênio.

A energia liberada nesse processo de degradação da matéria orgânica por ar sintético atingiu valores entre 3.600 J/g a 5.120 J/g, equivalente a 20 a 27% da energia liberada na queima da madeira a título de referência.

4.3 Caracterização química

A Tabela 07 apresenta os resultados dos ensaios químicos obtidos na primeira e na segunda coleta, assim como os resultados obtidos por Roque *et al.* (2021) em seus estudos para fins comparativos:

Tabela 7 – Resultado dos ensaios de caracterização química

Ensaio		Resultados		Valor de referência ETA-Taiacupeba
Parâmetros	unidade	1ª Coleta (I)	2ª Coleta (II)	
pH	-	7,7	7,8	6,4
Matéria orgânica	g/kg	142,64	315,70	267,0
Carbono orgânico	g/kg	82,74	183,12	155,0
Nitrogênio	g/kg	9,97	11,26	-
Fósforo	mg/kg	45	47	4,2
Potássio	mmol/kg	3,5	15,1	2,5
Cálcio	mmol/kg	72,0	103,0	32,0
Magnésio	mmol/kg	19,0	32,0	4,0
Sódio	mmol/kg	18,8	22,9	14,8
Alumínio	mmol/kg	0,0	1,0	1,0
Acidez potencial	mmol/kg	1,7	3,3	20,0
Capacidade de troca catiônica (CTC)	mmol/kg	113,0	180,1	73,3
Soma das bases trocáveis (Valor S)	mmol/kg	113,0	179,1	53,3
Saturação de CTC por bases – Valor V (%)	%	99	98	73,0
Saturação por alumínio - m	%	0,0	1,0	2,0

Fonte: Elaborada pela autora

O valor médio de pH (H₂O) foi igual a 7,8, indicando meio levemente básico do material. Muchimbane (2016), para as três amostras ensaiadas do mesmo lodo, obteve valor médio do pH (H₂O) de 6,6 e Roque *et al* obtiveram pH (H₂O) de 6,4. Outros lodos provenientes de tratamentos de água com diferentes defloculantes, obtiveram valores de pH variando de ácido a básico: 5 a 8 (Zhao *et al.*, 2018); 7,0 a 8,0 (O’Kelly, 2016); 6,0 a 8,0 (Babatunde; Zhao, 2007); 5,6 a 8,4 (Dayton; Basta, 2001); lodos de alumínio entre 6,5 e 7,8 (Hsieh; Raghu, 1997). Altos valores de pH favorecem a imobilização de metais e inibem a biodegradação da matéria orgânica, valores muito abaixo de 5,0 podem favorecer a lixiviação de metais do lodo (com possíveis efeitos indesejáveis) e a biodegradação ocorre num pH próximo do neutro e com condições favoráveis de nutrientes, temperatura e água conforme relatado por Hsieh e Raghu (1997).

Hsieh e Raghu (1997) apresentaram relações entre as concentrações de matéria orgânica e carbono orgânico e o local de captação da água bruta, indicando que lodos advindos do tratamento de água bruta de rios apresentam baixas concentrações de sólidos orgânicos, de 3 a 17%, e altas concentrações de inorgânicos, enquanto lodos produzidos no tratamento de água de reservatórios ou lagoas apresentam elevadas concentrações de sólidos orgânicos, entre

14 a 63%, e baixas concentrações de inorgânicos. Já Montalvan (2016) obteve teor de matéria orgânica de 2,6% no lodo proveniente do tratamento da água do Rio Cubatão, enquanto a ETA-Taiaçupeba, que trata água da Represa Taiaçupeba, apresentou resíduo com alto teor de matéria orgânica (26,7%) e carbono orgânico (15,5%). Para duas das três amostras do lodo Taiaçupeba analisadas por Muchimbane (2016), os teores de matéria orgânica não apresentaram variação elevada, com 29,5% e 24,1%, enquanto uma das amostras apresentou teor bem mais baixo, de 13,9%, aproximando-se do valor obtido para o lodo da ETA-Oeste (14,3%). Na literatura, os teores de matéria orgânica de lodos de ETA variaram entre 0,39% e 68,9% (Buselatto *et al.*, 2019; Godoy *et al.*, 2019; Oliveira, 2015; Cabral, 2013; Delgado, 2013; Richter, 2001) e os teores de carbono orgânico entre 0,85% e 14,9% (Yang *et al.*, 2006; Dayton; Basta, 2001; Elliott; Dempsey, 1991).

A CTC, definida como a soma dos cátions trocáveis, expressa a capacidade do solo de manter e trocar cátions e, normalmente, quanto maior, maior a capacidade de reter contaminantes (Hsieh; Raghu, 1997). A CTC é estimada pela soma das quantidades trocáveis dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ e Al^{3+} , depende do tipo e quantidade de argila e matéria orgânica no solo e é fortemente influenciada pelo pH do meio. No caso do lodo da ETA-Taiaçupeba, a contribuição dos argilominerais para a CTC é mínima, se comparada à de matéria orgânica (Muchimbane, 2016). A CTC obtida para o lodo da ETA-Oeste foi de 113,0 mmolc.kg⁻¹ valor muito próximo dos encontrados por Muchimbane (2016) (111, 144 e 119 mmolc.kg⁻¹). Para diferentes lodos, foram encontrados os seguintes valores de CTC: 73,3 mmolc.kg⁻¹ (Roque *et al.*, 2021) 69,3 a 255,2 mmolc.kg⁻¹ (Montalvan, 2016; Cabral, 2013; Oliveira *et al.*, 2004); 229,6 a 1357,5 mmolc.kg⁻¹ (Hsieh; Raghu, 1997); 136 a 565 mmolc.kg⁻¹ (Dayton; Basta, 2001).

A acidez potencial é a soma da acidez trocável (íons H^+ e Al^{3+} retidos na superfície dos coloides por forças eletrostáticas) com a acidez não trocável (resultado da dissociação dos íons H^+ dos grupos funcionais da matéria orgânica, das bordas dos argilominerais e da superfície dos óxidos de ferro e alumínio) (Teixeira, 2017). Esta propriedade é prejudicial ao crescimento das plantas e sua quantificação representa a quantidade de base necessária para neutralizá-la, ou seja, a quantidade de calcário a ser adicionado no solo. A acidez potencial do lodo da ETA-Oeste foi de 1,7 mmolc.kg⁻¹ enquanto que para o lodo da ETA-Taiaçupeba (Roque *et al.*, 2021) foi de 20 mmolc.kg⁻¹ (19,3 mmolc.kg⁻¹). Nas três amostras Muchimbane (2016) obteve 49, 61 e 52 mmolc.kg⁻¹, Montalvan (2016), 3,0 mmolc.kg⁻¹ e Oliveira *et al.* (2004), 28,7 mmolc.kg⁻¹.

A soma de bases trocáveis é dada pela CTC, excluindo-se os cátions permutáveis H^+ e Al^{3+} . A soma de bases trocáveis obtida foi de 113,0 mmolc.kg⁻¹ para a primeira amostra e

de 180,0 mmolc.kg⁻¹ para a segunda amostra, enquanto que Roque *et al.* (2021) obteve um resultado de 53,3 mmolc.kg⁻¹, Muchimbane (2016) obteve 62, 83 e 67 mmolc.kg⁻¹, Montalvan (2016), 252,2 mmolc.kg⁻¹ e Oliveira *et al.* (2004), 69,8 mmolc.kg⁻¹.

Comparando-se os resultados obtidos para a coleta (I) e (II) verifica-se que os resultados obtidos na caracterização química da amostra coletada no período chuvoso (II) apresentaram teores maiores do que na amostra coletada no período seco (I) de matéria orgânica, carbono e demais nutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e sódio. Essas concentrações maiores legitimam a relação que se estabelece com o carreamento de matéria orgânica e contaminantes pela chuva até o manancial onde é captada a água para tratamento. Já os solos argilosos e ricos em matéria orgânica tendem a apresentar uma CTC mais elevada devido à maior quantidade de cargas negativas em suas partículas ou coloides, por isso na coleta (II) com teor de matéria orgânica maior que na coleta (I), a CTC obtida apresentou maior valor que na coleta (I) evidenciada principalmente pelo teor de matéria orgânica obtido, sendo que não foi possível identificar pelos ensaios mineralógicos a influência dos argilominerais presentes nas amostras analisadas.

De maneira geral, esses resultados apresentados e comparados aos de outros estudos comprovam a grande variedade na composição química de um lodo, variando inclusive para uma mesma estação de tratamento, como pode se observar. Enfatiza-se, como evidencia o teor de matéria orgânica que se apresentou bem maior para o lodo coletado no período do inverno, justificado, muito provavelmente, pelo escoamento superficial da chuva, carreando para o manancial os solos com alto teor de matéria orgânica advindo das atividades agropecuárias, desmatamento, da urbanização descontrolada como já detalhado nas características do material.

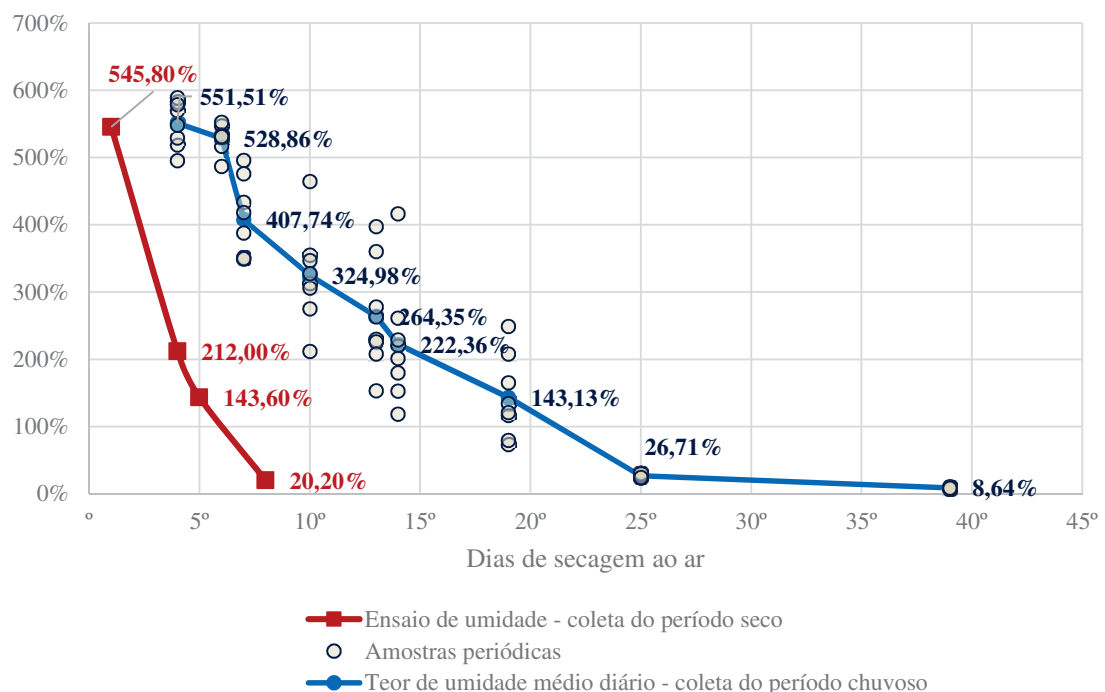
4.4 Caracterização geotécnica

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização geotécnica.

4.4.1 Teor de umidade

Observa-se na Figura 11 que o lodo coletado no período seco (I) apresentou uma perda de umidade acentuada durante uma semana em que o material foi submetido a secagem ao sol diariamente quando comparada a curva de teor de umidade do lodo coletado no período chuvoso (II). Verifica-se uma umidade elevada do material até o quinto dia de secagem, chegando-se ao oitavo dia, ao teor de umidade próximo a umidade higroscópica. Na prática, confirmou-se a formação de grumos fortemente cimentados, que inviabilizaram os resultados de LL, LP e sedimentação.

Figura 11 – Teor de umidade da coleta do período Seco x Período chuvoso (II)



Fonte: Elaborada pela autora

Já para o lodo da segunda coleta (II) verifica-se umidade inicial similar a da primeira coleta, mas em virtude das chuvas diárias que impossibilitaram a secagem da amostra ao sol, este lodo demorou aproximadamente 25 dias para se obter umidade semelhante a alcançada na coleta (I) em apenas 8 dias de secagem ao sol.

Observou-se também que nos primeiros ensaios de umidade realizados, os resultados para as oito coletas diárias apresentaram maior variação do que nos percentuais de umidade obtidos no período final do ensaio.

Um resultado intrigante que foi obtido, refere-se a análise da umidade higroscópica do lodo. Entende-se por umidade higroscópica aquela em que mesmo que se deixe a amostra secar por um longo período, sempre permanecerá uma umidade residual. Ora, quando o lodo da segunda coleta (II) apresentou teor de umidade de 26,71%, próximo do último teor de umidade obtido para a coleta (I), concluiu-se por análise tátil-visual ter-se atingido a umidade higroscópica do lodo. Para comprovar essa análise, realizou-se um ensaio de umidade no 39º dia para validar a umidade em torno de 20% como a umidade higroscópica do lodo, mas o que se verificou é que o lodo continuou perdendo umidade, obtendo-se um valor médio de 8,64%. Esse valor pode ser compreendido quando se entende a umidade higroscópica como a umidade de equilíbrio higroscópico na qual a pressão de vapor d'água no resíduo é igual à do ar que o envolve, não existindo nenhum tipo de troca entre eles, e dependerá da composição do lodo.

4.4.2 Massa específica dos grãos

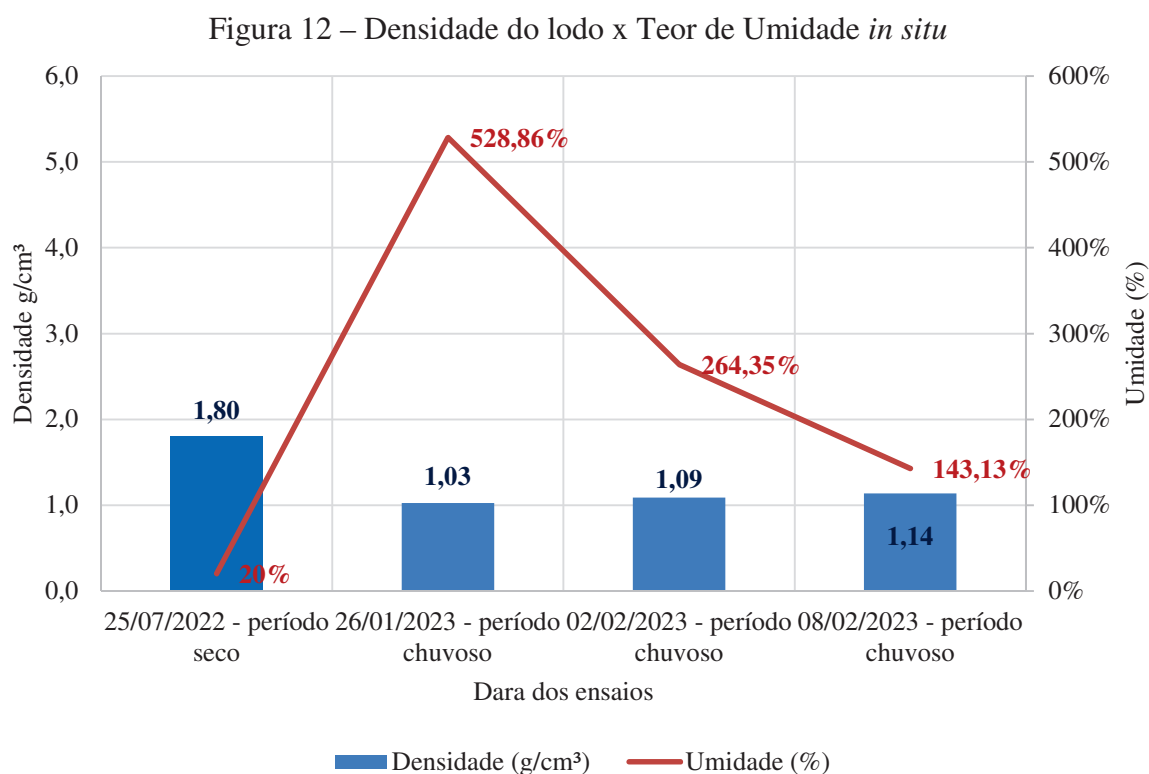
Vandermeiden e Cornwell (1998) obtiveram valores entre 2,05 e 2,94 g/cm³, Watanabe *et al.* (2011), entre 2,40 e 2,61 g/cm³ e Hsieh e Raghu (1997), entre 1,87 e 2,30 g/cm³. Segundo Xia (1994) e O'Kelly (2016), a massa específica dos sólidos de lodos de ETA se relacionam inversamente com o teor de matéria orgânica, ou seja, um elevado teor de matéria orgânica tende a diminuir a massa específica.

Os resultados obtidos neste ensaio não refletem a massa específica dos grãos. Nos ensaios realizados com a coleta do período seco (I), após a completa secagem da amostra, observou-se a formação dos grumos cimentícios com a elevada resistência dos grãos ao destorroamento, atribuída a composição química do lodo em função da adição dos produtos para o tratamento da água e dos resíduos do tratamento. O resultado de 1,80 g/cm³ obtido neste ensaio reflete a densidade dos grãos que foram formados após a secagem, e não apenas do constituinte sólido do lodo. Esse resultado é menor que a de solos em geral, e comum em solos orgânicos

Na amostra do período chuvoso (II), realizou-se o ensaio de determinação da massa específica dos grãos com a amostra *in natura*, em determinadas umidades ao longo do período de secagem, para que o resultado refletisse a densidade do lodo antes da formação dos grumos. Já neste caso, como a amostra ainda estava úmida, dispor do material no picnômetro com massa suficiente para determinação da massa apenas dos sólidos não refletiu o resultado almejado.

Com esses resultados, obteve uma densidade do lodo que, quanto maior a quantidade de umidade da amostra mais próximo é a sua densidade da água, e a medida que vai perdendo umidade a densidade tende a aumentar. Conclui-se, em conjunto com a densidade obtida na primeira coleta do período seco (II), que depois de totalmente seco, o lodo em estudo tem baixa densidade, e seu valor até a formação dos grumos não passou de $1,80 \text{ g/cm}^3$.

A Figura 12 relaciona as densidades dos grãos com as suas respectivas umidades:



Fonte: Elaborada pela autora

4.4.3 Teor de matéria orgânica

O teor de matéria orgânica foi obtido por meio de três ensaios: por queima a 440°C , no ensaio de TGA sob as atmosferas de ar sintético e nitrogênio e nos ensaios químicos.

Por queima a 440° obteve-se para o lodo coletado no período seco (I) 58,0% de

matéria orgânica, enquanto que para o lodo do período chuvoso (II) obteve-se 37%.

De acordo com O'Kelly (2016), que no ensaio de perda ao fogo a 440°C, os resíduos perdem quantidades significativas de água estrutural e hidroxilas associadas ao coagulante Sulfato de Alumínio, que representa entre 5-15% do peso do lodo (Wang et al., 1992). Ressalta-se, entretanto, que o produto químico utilizado na ETA-Oeste é o Hidróxi-cloreto de alumínio aplicado na primeira câmara de mistura rápida.

Para confrontar os resultados obtidos no ensaio de perda ao fogo, analisou-se os resultados dos ensaios de TGA, e verificou-se que os teores de degradação da matéria orgânica, desconsiderando a primeira fase que representa os percentuais por perda da água estrutural variaram de 35 a 50% por ar sintético e 35% a 40% por nitrogênio.

Embora os ensaios acima tenham obtidos resultados aproximados, a estimativa mais confiável do teor de matéria orgânica para lodos de ETA pode ser melhor estimada pelo método de Walkley e Black (BSI, 1990), que emprega oxidação com Dicromato de Potássio e determina o parâmetro denominado teor de carbono orgânico.

Pela análise química realizada por este método verificou-se percentual de matéria orgânica de 14,3% e 31,6% no lodo do período seco (I) e do chuvoso (II), respectivamente.

Conclui-se que os resultados foram bem variados conforme o método para determinação desse teor.

A Figura 13 ilustra as amostras de lodo após serem submetidas ao ensaio de perda ao fogo a 440°C.

Figura 13 – Lodo antes e após a queima da matéria orgânica a 440°C



a) Antes da queima da matéria orgânica



b) Após a queima da matéria orgânica

Fonte: Elaborada pela autora

4.4.4 Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade

Para a primeira coleta correspondente ao período seco (I) os limites de Atterberg seguiram conforme ABNT NBR 6459:2016 e a ABNT NBR 7180:2016, não se obtendo valores para LL e LP, uma vez que a secagem altera as características do lodo de ETA já observado por Watanabe *et al.* (2011), Basim (1999), Xia (1994), formando grumos fortemente cimentados.

Alguns autores descrevem que lodos de ETA quando sujeitos a variações na temperatura, perdem não apenas a plasticidade, mas também a afinidade com a água, provocando uma redução drástica em suas plasticidades (O'Kelly, 2008; Basim, 1999; Xia, 1994). Para contornar essa situação, na coleta do período chuvoso (II) optou-se em realizar o ensaio de LL e LP durante o processo de secagem, a fim de identificar em qual teor de umidade o material começa a perder a afinidade com a água, e os limites de liquidez e plasticidades não são mais obtidos

A Figura 14 indica a realização do ensaio na primeira coleta (I). O brilho na amostra de lodo indica a exsudação da água, por perda de afinidade do lodo com água.

Figura 14 - Ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade da primeira coleta (I)



a) brilho na preparação da amostra indica a falta de afinidade do lodo com a água



b) tentativa de moldar o cilindro do ensaio de limite plasticidade

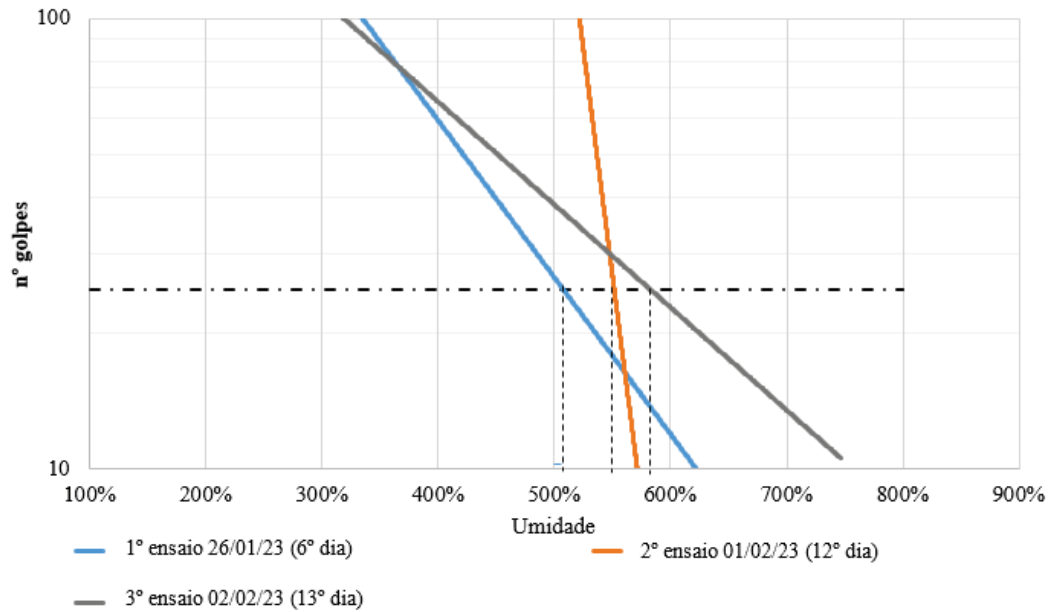


c) tentativa de fechar a ranhura no ensaio de limite de liquidez

Fonte: Elaborada pela autora

Já na segunda coleta referente ao período chuvoso (II), realizando ensaios ao longo da secagem, obteve-se os seguintes resultados apresentados nas Figuras 15 e 16:

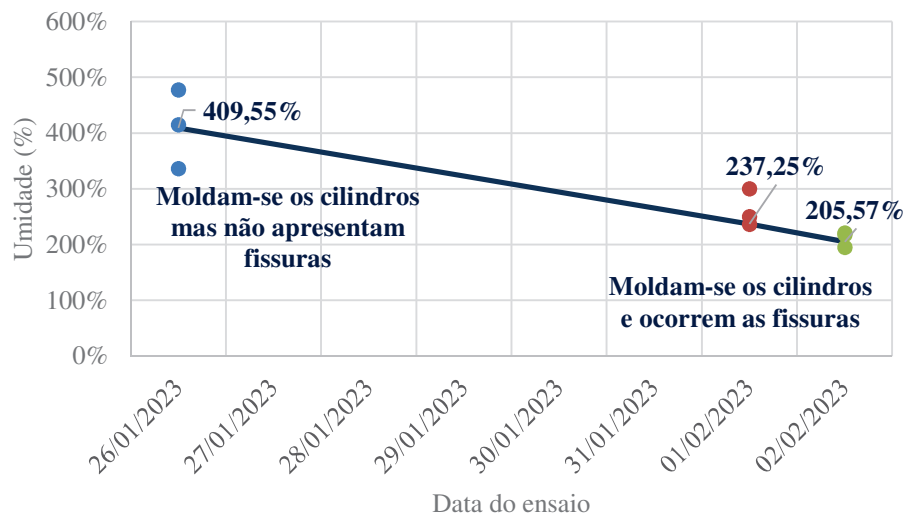
Figura 15 – Ensaio de limite de Liquidez – amostras do período chuvoso (II)



Fonte: Elaborada pela autora

Verifica-se que o LL obtido para o primeiro ensaio realizado no 6º dia foi de 506,67% e os resultados obtidos para o 12º e o 13º dia foram de 550,00% e 579,33%, respectivamente, com resultados mais aproximados.

Figura 16 - Ensaio de limite de plasticidade– amostras do período chuvoso (II)



Fonte: Elaborada pela autora

O valor de 409,55% apresentado na Figura 16 indica que nesta úmida *in natura* lodo ainda não apresenta características para determinar o seu limite de plasticidade, pois apresenta maleabilidade suficiente para moldagem dos corpos de prova, mas o suficiente para sua retração e fissuração. Portanto, este valor não foi considerado como teor para LP. Já os valores obtidos nos ensaios de 01 e 02 de fevereiro, foram moldados até a formação das fissuras nos cilindros.

Comparou-se os valores obtidos com os da ETA Taiacubeba, material de estudo de Roque *et al* (2021), principal referência de metodologia para esse estudo, e observou-se valores bastante semelhantes de LL, LP e IP conforme Tabela 8:

Tabela 8 – Resultado dos ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade

Amostra	LL	LP	IP
1ª amostra 26/01/23 (6º dia)	506,67%	-	-
2ª amostra 01/02/23 (12º dia)	550,00%	237,25%	312,75
3ª amostra 26/01/23 (13º dia)	579,33%	205,57%	373,76
Média	545%	221%	343%
ETA-Taiacubeba	536%	236%	300%

Fonte: Elaborada pela autora

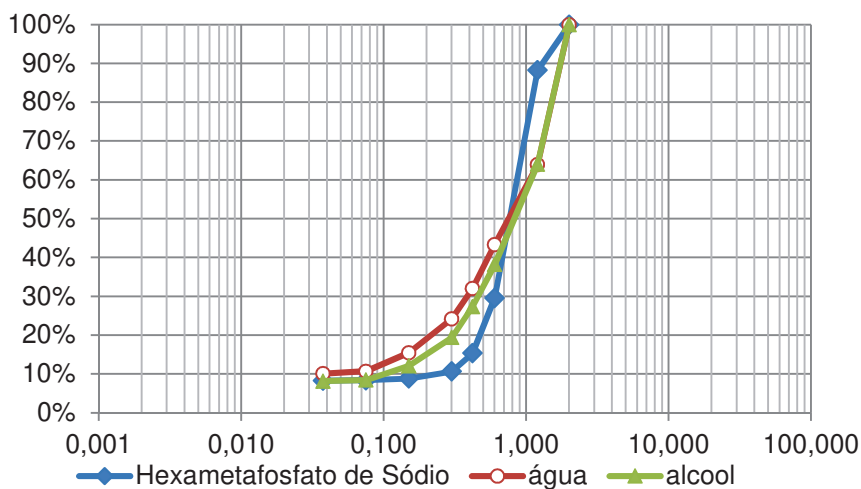
Consultando os resultados obtidos nos teores de umidade realizados periodicamente (Figura 11), verifica-se que a umidade *in natura* da amostra coletada para realização dos ensaios de LL e LP no período entre o 12º e 14º dia corresponde a um intervalo de umidade variando entre 222 e 260%. Enquanto no lodo coletado no período seco (I), não se obteve êxito na determinação dos limites de Atterberg, no lodo do período chuvoso (II) pode-se concluir que os ensaios podem ser realizados no intervalo de umidade *in situ* entre 222 e 260%.

4.4.5 Peneiramento fino

Para os ensaios realizados com hexametáfosfato, água e álcool, deixou-se 120 g de material imerso em água e lavou-se após 24 horas na peneira 2.0mm, obtendo-se 64,30% do material passando por esta peneira. Já nos ensaios realizados com o hexametáfosfato de sódio 88,25% do material passou por esta peneira.

A Figura 17 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o lodo analisado no período seco (I) de acordo com o tipo de solução utilizada no ensaio de sedimentação.

Figura 17 – Curvas granulométricas – 1ª coleta período seco (I)



Fonte: Elaborada pela autora

Sobre os ensaios de sedimentação, o lodo não se manteve disperso na solução, e a densidade da suspensão não diminuiu com o tempo, havendo algumas situações, inclusive, em que o densímetro acusou aumento na densidade, fato também observado nos estudos de Delgado (2016).

Delgado (2016), por sua vez, optou por adaptar o ensaio para a caracterização granulométrica, verificando que as bibliografias caracterizam a granulometria dos lodos como fina, e realizou a lavagem na peneira #200 (0,075mm) retirando-se uma pequena quantidade de lodo da bombona, com alta porcentagem de umidade, procedendo-se a lavagem com ajuda de água destilada em um béquer. Desta forma, todo o lodo passou pela peneira #200, ou seja, o ensaio não foi realizado após secagem ao ar.

Sendo assim, para o lodo do período chuvoso (II), seguindo a sugestão de (Watanabe *et al.*, 2011; Basim, 1999; Xia, 1994) realizou-se o ensaio com a umidade *in natura*, em vez de previamente secas, uma vez que a secagem altera as características do lodo de ETA, formando grumos fortemente cimentados.

Ainda assim, mesmo aumentando-se as concentrações de defloculante em cada amostra, o resultado em relação a dispersão do lodo na solução foi o mesmo das amostras do período seco (I), com a diferença apenas que o lodo ainda não tinha formado os grumos.

Roque *et al.* (2021) também não obtiveram resultados satisfatórios nos ensaios de sedimentação realizados na ETA-Taiáçupeba, e submeteu a sua amostra ao ensaio de granulometria a laser. Muchimbane (2016), analisou granulometricamente as três amostras do lodo da ETA-Taiáçupeba, por meio da associação dos métodos de peneiramento e pipetagem

propostos por Suguio (1973), e classificação utilizando o Diagrama de Flemming (2000), para sedimentos lamosos (lama é a somada frações de argila e silte), e o Diagrama de Shepard (1954). Por Fleming, uma amostra foi classificada como silte argiloso, enquanto as demais como lama levemente arenosa siltosa; já por Shepard, as três amostras foram classificadas como silte argiloso.

Nessa análise, optou-se por não indicar a classificação do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), uma vez que, a curvas granulométricas obtidas na Figura 17 refere-se na verdade ao perfil dos grumos cimentícios, e não de fato do lodo, cuja granulometria, sabe-se que se caracteriza por ser fina. Outra questão, é que o perfil granulométrico indicado pode não refletir a granulometria dos grumos, considerando-se que, o destorroamento pode variar com a intensidade e o tempo de aplicação da força, fragmentando os grumos em grãos cada vez menores.

4.5 Caracterização ambiental

Quanto a caracterização ambiental, o laudo do laboratório H₂OAnalysis em que as amostras foram submetidas aos ensaios de lixiviação e solubilização conforme ABNT NBR 10.005:2004 e ABNT NBR 10.006:2004 respectivamente, apontou a presença de DNA de E.coli O157e Shiguella.

Segundo a ABNT NBR 10.004:2004 (Classificação de resíduos) um resíduo é caracterizado como patogênico, se uma amostra representativa dele, obtida segundo a ABNT NBR 10.007:2004 (amostragem de resíduos sólidos), contiver ou se houver suspeita de conter, micro-organismos patogênicos, proteínas virais, DNA ou RNA recombinantes, organismos geneticamente modificados, plasmídios, cloroplastos, mitocôndrias ou toxinas capazes de produzir doenças em homens, animais ou vegetais.

Seguindo esse critério, o resíduo foi classificado como classe I – Perigoso em função dos achados identificados acima.

Sobre os compostos solubilizados: surfactantes aniônicos, alumínio solubilizado, ferro e manganês solubilizado apresentaram-se com valores acima do tolerável pela ABNT NBR 10.004:2004 conforme Tabela 9:

Tabela 9 – Parâmetros avaliados acima do limite tolerável

Substância	Resultado	ABNT NBR 10.004
Alumínio Solubilizado	3,549 mg/L	até 0,200 mg/L
Ferro	2,011 mg/kg	até 0,300 mg/L
Manganês Solubilizado	4,157 mg/L	até 0,100 mg/L
Surfactantes Aniônicos	0,63 mg/L	até 0,500 mg/L

Fonte: Adaptado do Laudo da H₂OAnalysis

Sobre a classificação como resíduo perigoso, Classe I, o resultado obtido se contrapõe as expectativas conforme consultas bibliográficas realizadas anteriormente ao ensaio:

Roque *et al.* (2021) cita que de maneira geral os lodos de ETA's são classificados como resíduos sólidos da classe II-A, não perigosos e não-inertes pela ABNT NBR 10.004:2004, exigindo, portanto, a destinação ambientalmente adequada exigida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, sendo, portanto, proibido seu descarte sem tratamento prévio.

Já Andreoli (2006) relata que em diversas ETA's do Brasil foram realizados ensaios de caracterização ambiental, os quais assinalaram este resíduo como Classe II-A, não perigosos e não inertes, em função de alguns elementos solubilizados nos ensaios de classificação estarem em níveis acima dos limites tolerados para classificá-lo como inerte.

Gervasoni (2014) justifica que, sendo o lodo oriundo do tratamento nas ETA's, proveniente dos decantadores ou flotadores, além da água de lavagem dos filtros e rejeitos de limpeza dos tanques e de preparo de suspensões de produtos químicos. Composto, geralmente, pelas sujidades da água bruta, coagulante, auxiliar de coagulação, alcalinizantes e polímeros empregados na etapa de desaguamento, tem-se, enquadrado como resíduo sólido - Classe II-A - não inerte, segundo a ABNT NBR 10.004:2004.

Januário (2007) descreve que as caracterizações realizadas em alguns estudos (SABESP, 2002) enquadraram os lodos das ETA's da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) como Classe II-A (não inerte)

Bosco (2008) reforça que no Brasil, de acordo a ABNT NBR 10004:2004 Resíduos sólidos – Classificação, item 3.1, os lodos são classificados como “resíduo sólido”, não sendo permitido seu lançamento in natura em coleções de águas superficiais, devendo ser tratado e disposto conforme exigência dos órgãos reguladores. As leis Nº 9.433/1997 (Política Nacional de Recursos Hídricos) e Nº 9.605/1998 (Crimes Ambientais) exigem uma nova postura dos gerentes dos sistemas de tratamento de águas, efluentes e resíduos. Várias pesquisas sobre caracterização e classificação apontam para o enquadramento do lodo de ETA segundo a ABNT NBR 10.004:2004 como classe II-A – um resíduo não inerte, o que determina a sua disposição final em aterro sanitário.

Ressalta-se que a resolução Conama nº 313 inclui na definição de resíduo sólido industrial os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.

Entende-se, que a classificação como resíduo perigoso exige uma reavaliação do seu uso em obras geotécnicas, principalmente no aterro sanitário para onde já é destinado, onde pode-se apresentar alguma flexibilidade dos órgãos ambientais competentes.

Recomenda-se, ainda, a realização de um novo ensaio, visto que os achados encontrados foram fragmentos de DNA de micro-organismos considerados patogênicos. Segundo o H₂OAnalysis, o procedimento interno para determinação de patogenicidade foi revisado em meados de 2023 (após a conclusão dos ensaios em 31/05/2023) que modificou o método analítico obtido a partir de grupos de bactéria e vírus para quantificação somente de células viáveis de Salmonella e enterovírus. Neste caso, o laboratório nos informou que o lodo analisado não apresentou as referidas células viáveis. Cabe aqui, uma outra discussão sobre a metodologia proposta não ser padronizada, e variar inclusive de laboratório para laboratório.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Apresentam-se os principais resultados obtidos nos ensaios de caracterização do lodo da ETA-Oeste cujo objetivo principal foi fornecer as características físicas, químicas, mineralógicas, geotécnicas e ambientais para subsidiar novos estudos com o uso do lodo em obras geotécnicas a partir de misturas de solo e lodo.

5.1 Conclusões

- Verifica-se que a primeira coleta realizada no período seco serviu de protótipo para uma análise mais robusta sobre a caracterização geotécnica do lodo na etapa seguinte. Verificou-se com essa primeira análise, que o comportamento do lodo muda enquanto perde umidade, formando grumos cimentícios com alta resistência ao destorroamento, e com perda de afinidade com a água. Com isso, os ensaios de granulometria, sedimentação e limites de liquidez e plasticidade não refletiram o comportamento do lodo em si, mas dos grumos formados após a sua secagem ao ar.
- Para contornar as dificuldades encontradas na obtenção dos resultados dos ensaios supracitados adotou-se como estratégia na segunda coleta referente ao período chuvoso, identificar essas variações na realização dos ensaios durante o processo de secagem do material. Correlacionou-se a densidade do lodo com umidade natural, verificando-se que a sua densidade aumenta à medida que a amostra perde água, chegando a valores que variaram de próximos de $1,0\text{g/cm}^3$ (lodo com 528% de umidade) até $1,80\text{ g/cm}^3$ com a umidade próxima da higroscópica e com a formação dos grumos. Constatou-se, após ensaios de LL e LP ao longo da secagem do lodo, que os limites de Atterberg podem ser determinados se a umidade natural do lodo estiver entre 220 e 260%. Ou seja, nessa umidade, o lodo ainda não formou os grumos e ainda não perdeu a sua afinidade com água, permitindo a determinação desses parâmetros. Já no ensaio de granulometria por sedimentação, mesmo realizando o ensaio com o lodo *in natura*, não se obteve êxito, em função da dificuldade de se encontrar um defloculante que mantenha a dispersão dos grãos.
- Para ensaios de DRX verificou-se apenas um indicativo de SiO_2 , na amostra triplicata, corroborando com o que a literatura preconiza, que a adição dos polímeros impossibilita a visualização dos agregados naturais do solo (Brazetti, 1998; Azzam, 2013). Esse fato, além de observado no DRX, em que não foi possível identificar os

principais minerais e nem o nível de cristalinidade, foi também constatado nos ensaios de Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV), em que as imagens que se sobressaíram foram preponderantemente da fase amorfa, originada da sua composição essencialmente formada por matéria orgânica. Um achado importante nessa análise foi a presença de uma espécie de diatomácea, componente de fitoplanctons de lagos, lagoas e rios eutróficos, denominada *Aulacoseira ambígua*, que corrobora com as características dos açudes, em geral, utilizados para o sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza.

- O teor de matéria orgânica foi analisado por três métodos distintos: nas análises química e termogravimétrica e no ensaio da perda ao fogo da matéria orgânica a 440°C, na caracterização geotécnica. Verificou-se, segundo as referências bibliográficas, que o método químico tem maior precisão e variou entre 15% e 30% em ambas amostras, enquanto que os resultados obtidos nos demais ensaios se apresentaram entre 30 a 50%.
- Já na caracterização ambiental, o resultado foi determinado pela presença de DNA de *E.coli O157e Shiguella*, sendo classificado como resíduo perigoso, classe I. Entretanto, ressalta-se que a classificação do resíduo como classe I não inviabiliza o uso, uma vez que, recomenda-se avaliar a patogenicidade desses achados e o devido cuidado no manuseio do lodo. Obteve-se também alguns compostos com concentrações acima dos limites estabelecidos na ABNT NBR 10.004:2004. Sendo assim, a classificação do lodo da ETA-Oeste como resíduo perigoso exige uma reavaliação para o seu uso em obras geotécnicas, supondo-se que seu reaproveitamento nas coberturas diárias possa ser flexibilizado pelos órgãos ambientais competentes.

A análise global dos resultados aponta como desafio a realização de novo ensaio de caracterização ambiental para que o lodo possa ser estudado em misturas de solo-lodo e assim, viabilizar a sua aplicação em alguns tipos de obras geotécnicas. A aplicação como cobertura final e revestimento de fundo no próprio aterro sanitário para o qual se destina deve ser de mais fácil aceitação tanto por parte dos órgãos ambientais, como pelos principais beneficiários do seu possível reaproveitamento: ou seja, pela Cagece que fomentará uma utilização sustentável de um resíduo que hoje representa um passivo ambiental com custos de operação para ser ambientalmente destinado como pela empresa responsável pela operação do aterro sanitário

que poderá reaproveitar um material que atualmente encontra-se subutilizado.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras:

- Para novos trabalhos com a realização de ensaios de DRX e MEV, para análise mineralógica da fase cristalina do lodo, recomenda-se retirar a amostra de pó após o material se submeter a queima da matéria orgânica a 440° conforme ABNT NBR 13.600 (ABNT, 1996) ou ainda, como adotado por Roque *et al* (2021) efetuar-se a extração da matéria orgânica com a utilização de Peróxido de Hidrogênio (H₂O₂).
- Para determinação da composição mineralógica do lodo sugere-se ainda a caracterização pelo ensaio do Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (FRX), com método para determinação quantitativa utilizando os parâmetros fundamentais (FP).
- Para os ensaios de granulometria e sedimentação recomenda-se repetir o ensaio sem o uso de defloculante.
- Recomenda-se repetir o ensaio de caracterização ambiental, na nova metodologia específica do laboratório responsável pelos ensaios, que, em meados de 2023, alterou o método para quantificação somente de células viáveis de Salmonella e enterovírus. Cabe aqui, uma reflexão sobre a não padronização dos ensaios específicos, e a variação de resultados que isso pode acarretar de laboratório para laboratório.

Ressalta-se, ainda, que a tomada de decisão para incorporação do lodo de ETA em qualquer obra geotécnica deve considerar além das análises técnicas aqui explanadas as condições econômicas e ambientais.

E por fim, demonstra-se um desejo por mais estudos que viabilizem alternativas sustentáveis para o reaproveitamento de resíduos gerados no processo de tratamento de água. Esses estudos devem ser amplamente motivados em diversas áreas, visto que, recentemente, em 2012, a Região Metropolitana de Fortaleza já enfrentou um plano de contingência por escassez hídrica no seu principal reservatório, o açude Castanhão, agravado pelo comprometimento da qualidade da água por fatores antrópicos, o qual também se refletiu nos resultados apresentados neste trabalho, por eutrofização e elevadas concentrações de nutrientes na caracterização do lodo.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. **Standard Specifications for Highway Bridges**. 17th ed. Washington: AASHTO, 2002. 829p.
- ABO-El-Enein, S. A.; SHEBL, A.; ABO EL-DAHAB, S. A. Drinking water treatment sludge as an efficient adsorbent for heavy metals removal. **Applied Clay Science**, [s. l.], n. 146, p. 343-349, 2017.
- AHMAD, T. *et al.* Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], n. 182, p. 606-611, 2016.
- ANDREOLI, C. V. **4BIOSSÓLIDOS**: alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: ABES, 2006.
- ALDEEB, A. A. *et al.* Physical and engineering properties of treatment plant residuals and disposal. **Journal AWWA**, [s. l.], v. 95, n. 8, p. 127-137, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for underground installation of thermoplastic pipe for sewers and other gravity-flow applications**: D 2321-20. Philadelphia: [s. n.], 2020a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Unified Soil Classification System**: D 2487-11. Philadelphia: [s. n.], 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes**: D 2487-17. Philadelphia: [s. n.], 2017b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes**: D 2974-20e1. Philadelphia: [s. n.], 2020b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Leaching Solid Material in a Column Apparatus**: D 4874-95. Philadelphia: [s. n.], 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer)**: D 7928-17. Philadelphia: [s. n.], 2017. Volume 04.08.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm. Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos Sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10005**: Lixiviação de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10006**: Solubilização de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.600**: Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AVANCINI, L. L. S. **Análise do desaguamento do lodo de estações de tratamento de água em sistemas de confinamento em geotêxtil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) Instituto Tecnológico de Aeronáutico, São José dos Campos, 2017.

AZZAM, W. Behavior of Modified Clay Microstructure using Polymer Nanocomposites Technique. **Alexandria Engineering Journal**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 143-150, 2013.

BABATUNDE, A. O.; ZHAO, Y. Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 129-164, 2007.

BASIM, S. C. **Physical and Geotechnical Characterization of Water Treatment Plant Residuals**. 1999. PhD Thesis - New Jersey Institute of Technology, New Jersey, 1999.

BENVENUTO, C.; BOSCOV, M. E. G. **A importância da geotecnia no projeto, licenciamento e operação de aterros sanitários**. São José dos Campos: ITA, 2013. Palestra.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de Letras. 2008.

BRAZETTI, R. **Considerações sobre a influência de distintos aditivos orgânicos nas características micromorfológicas, mineralógicas, físicas, mecânicas e hidráulicas de um**

solo laterítico. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS8006**: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fill. Londre: BSI, 1995.

BUSELATTO, D. M. *et al.* Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. **Matéria**, [s. l.], v. 24, n. 1, 2019.

CABRAL, V. A. L. **Avaliação da incorporação de lodo de ETA UFV na manufatura de tijolos de solo-cimento**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Plano de Segura Hídrica – Região Metropolitana de Fortaleza**. Ceará: COGERH, 2015.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário Ambiental – Açude Pacajus**. Fortaleza: COGERH, 2011.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Eixo de Integração Castanhão**. Fortaleza: SRH: 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n. 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 maio 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n. 397, de 3 de abril de 2008. 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 7 abril 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n. 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 maio 2011.

CORNWELL, D. A. **Water Treatment Residuals Engineering**. [S. l.]: AWWA, 2006.

DAYTON, E. A.; BASTA, N. T. Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute. **Water Environment Research**, [s. l.], v. 73, n. 1, p. 52-57, 2001.

DELGADO, J. V. C. **Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

EHRLICH, M. E.; BECKER, L. **Muros e taludes de solo reforçado**: projeto e execução. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

ELLIOTT, H. A.; DEMPSEY, B. A. Agronomic Effects of Land Application of Water Treatment Sludges. **Journal AWWA**, [s. l.], p. 126-131, 1991.

FERREIRA, Kemmylle Sanny de Matos. **Comportamento geotécnico de misturas de argila laterítica com lodo de estação de tratamento de água para uso em obras de terra**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020

FLEMMING, B. W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis ternary diagrams. **Continental Shelf Research**, [s. l.], p. 1125-1137, 2000.

FORTES, R. M. *et al.* Study of dry sludge stabilization from water treatment plant (WTP) in Taiacupeba to use as compacted soil in earthwork ditches. Bearing Capacity of Roads, *In*: TUTUMLUER, E.; AL-QADI, I. L. **Bearing Capacity of Roads: railways and airfields**. London: CRC Press, 2009.

FHWA. **Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design and construction guidelines: FHWA-SA-96-071**. Washington: FHWA, 1998.

GERVASONI, Ronald. **Caracterização e avaliação do potencial de destinação do lodo de estações de tratamento de água do Estado do Paraná**. 2014. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GHARAIBEH, A. M. **Drying of potable water treatment plant residual**. 2009. Thesis (Doctor of Philosophy) - School of Civil, Mining and Environmental Engineering. Faculty of Engineering. University of Wollongong, Wollongong, 2009. Disponível em: <http://ro.uow.edu.au/theses/3199>. Acesso em 23 maio 2023.

GODOY, L. G. G. *et al.* Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 223, p. 939-950, 2019.

GONÇALVES, F. *et al.* Incremento de lodo de eta em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista DAE**, [s. l.]. 2016.

GRUNINGER, R. M. Disposal of waste alum sludge from water treatment plants. **Journal (Water Pollution Control Federation)**, [s. l.], v. 47, n. 3, part 1, p. 543-552, mar. 1975. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/25038662>. Acesso em: 20 mar. 2023.

HOPPEN, C. *et al.* Codisposição de lodo centrifugado de estação de tratamento de água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, [s. l.], v. 51, n. 318, 2005.

HSIEH, H. N.; RAGHU, D. **Criteria development for water treatment plant residuals monofills**. [S. l.]: American Water Works Association, 1997.

HUANG, J. C. **Sludge characterization and dewatering**. 1979. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Missouri, Columbia, 1979.

ISSMGE. **Report of the ISSMFE Technical Committee TC-5 on Environmental Geotechnics**. [S. l.]: ISSMGE, 2006.

JANUÁRIO, G. F.; FERREIRA FILHO, S. S. Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da Região Metropolitana de São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 117-126, abr./jun. 2007.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. São Paulo, 2012. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, 2012.

KATAYAMA, V. T. *et al.* Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 559-569, 2015.

KNOP, A. **Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

LAMBE, T. W. **Soil Testing for Engineers**. New York: John Wiley, 1951.

LI, X. D. *et al.* Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], p. 215-230, 2001.

MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. **Geotechnical Characterization of a Soil-Water Treatment Sludge Mixture**. [S. n.: s. l.], 2016.

MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Comportamento geotécnico de misturas de areia argilosa laterítica com lodo da Estação de Tratamento de Água do município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: ABMS, 2018.

MUCHIMBANE, Aníbal Bem David Albino. **Avaliação da influência da disposição de lodo gerado por estação de tratamento de água (ETA) sobre a qualidade do solo e da água subterrânea na área da barragem Taiaçupeba, Suzano, SP**. 2016. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995.

NOVAK, J. T.; CALKINS, D. C. Sludge dewatering and its physical properties. **Journal AWWA**, [s. l.], v. 67, n. 1, p. 42-45, 1975.

O'KELLY, B. C. Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporating a coagulant. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 45, n. 5, p. 715-725. 2008.

- O'KELLY, B. C. Landfill disposal of alum water treatment residues: some pertinent geoenvironmental properties. **Residuals Science and Technology**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 95-113, 2010. Disponível em: <http://dpi-journals.com/index.php/JRST/article/view/1371>. Acesso em: 20 mar. 2023.
- O'KELLY, B. C.; SIVAKUMAR, V. Water content determinations for peat and other organic soils using the oven-drying method. **Drying Technology: An International Journal**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 634-643, Apr. 2014.
- O'KELLY, B. C. Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling. **Geotechnical Research**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 148-179, 2016.
- OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [s. l.], v. 50, 2004.
- PIMENTEL, F. J. G. **Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de esgoto em camada de cobertura de aterro sanitário**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- QASIM, S. R.; CHIANG, W. **Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment**, Lancaster: Technomic, 1994.
- QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical aspects of landfill design and construction**. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- RAGHU, D. et al. Water treatment plant sludge as landfill liner. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**, [s. l.], p. 744-758, 1987.
- RAGHU, D. *et al.* Physical characterization of water treatment plant residual and top soil mixtures. **ASTM Special Technical Publication**, [s. l.], v. 1275, 1997.
- RAMIREZ, K. G. *et al.* Physicochemical characterization of centrifuged sludge from the Tamanduá water treatment plant (Foz do Iguaçu, PR). **Matéria**, [s. l.], v. 23, n. 3, 2018.
- RIBEIRO, R. E. Y.; CORDEIRO, J. S. Gestão operacional em estações de tratamento de água de ciclo completo: estudo de caso da ETA Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais [...]**. Campo Grande: ABES, 2005.
- RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Edgard Blucher, 2012.
- ROCCA, A. C. C.; IACOVONE, A. M. M.; BARROTTI, A. J. **Resíduos sólidos industriais**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993.
- RODRÍGUEZ, N. H. *et al.* Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, p. 778-786, 2010.

ROQUE, A. J.; CARVALHO, M. Possibility of using the drinking water sludge as geotechnical material. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS*, 5., 2006, Cardiff. **Proceedings** [...] Cardiff: BGA, 2006.

ROQUE, Aline; MONTALVAN, Edy L. T.; BOSCOV, Maria E. G. Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da Estação de Tratamento de Água Taiaçupeba. **Geotecnia**, [s. l.], n. 151, p. 33-52, mar. 2021.

SALES, M.V. *et al.* Estudo de tratabilidade para definição de parâmetros de dimensionamento de uma futura estação de tratamento de água para a região metropolitana de Fortaleza. *In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL*, 29., 2004, São Paulo. **Anais** [...] São Paulo: AIDIS, 2004.

SANTOS, I. S. S. *et al.* A. Caracterização e identificação do resíduo: lodo da estação de tratamento de água do município de São Leopoldo. *In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL*, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais** [...] Porto Alegre: AIDIS, 2000.

SEREC. **Projeto executivo da estação de tratamento de água/adutora na zona Oeste de Fortaleza**. Fortaleza: SEREC, 2012

SHEPARD, F. P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. **Journal of Sedimentary Research**, [s. l.], v. 24, n. 3, 1954.

SILVA, Angélica dos Santos; HEMSI, Paulo Scarano. Efeito do Teor de Sólidos na Resistência ao Cisalhamento de um Lodo de ETA Visando seu Uso em Cobertura Diária de Aterros Sanitários. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 19., 2018. Salvador. **Anais** [...] Salvador: ABMS, 2018.

SILVA, T. V. *et al.* Estudo comparativo de normas de lixiviação aplicadas a resíduos perigosos solidificados/estabilizados em cimento. *In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL*, 28., 2002, Cancún. **Anais** [...] Cancún: AIDIS, 2002.

SILVEIRA, Cristiane; SATIE KOGA, Daniele; KIYOMI KURODA, Emília. Estudo da viabilidade de disposição final dos lodos de Etas em aterros sanitários. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 9, n. 11, 2013.

SUGUIO, K. **Introdução a sedimentologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1973.

SUMAN, A.; AHMAD, K.; INAMULHAQ. Water treatment plant sludge characterization, recovery of coagulant and its reuse. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 7, n. 7, July 2018.

SUTHERSAN, Suthan. S. **Remediation engineering: design concepts**. [S. l.]: CRC Press, 1997

TAN, K. H. **Principles of soil chemistry**. 4th ed. [S. l.]: CRC Press, 2011.

- TEIXEIRA, S. R. *et al.* Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**, [s. l.], São Paulo, v. 52, n. 323, p. 215-220, 2006.
- TEIXEIRA, S. R. *et al.* The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 53, n. 4, 2011.
- TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.
- TOWNSEND, T. G. *et al.* **Characterization of drinking water sludges for beneficial reuse and disposal**. Florida: Florida Department of Environmental Protection, 2001.
- TSUGAWA, J. K.; PEREIRA, K. F. S.; BOSCOV, M. E. G. **Thixotropy of sludge from Cubatão Water Treatment Plant, Brazil**. **Geotechnical Frontiers 2017**, Proceedings, pp. 842- 851, Orlando, 2017.
- USEPA. **Hazardous Waste Management System**. Washington: USEPA, 1986.
- USEPA. **Criteria for solid waste disposal facilities**. Washington: USEPA, 1993.
- USEPA. **Total, fixed, and volatile solids in water, solids, and biosolids**. Washington: USEPA, 2001.
- VANDERMEYDEN, C.; CORNWELL, D. A. **Nonmechanical dewatering of water plant residuals**. Denver: AWWA, 1998.
- WANG, M. C.; HULL, J. Q.; JAO, M. Stabilization of water treatment plant sludge for possible use as embankment material. **Transportation Research Record**, [s. l.], n. 1345, p. 36-43, 1992.
- WANG, M. C.; TSENG, W. Permeability behavior of a water treatment sludge. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 119, n. 10, October 1993.
- WATANABE, Y. *et al.* Batch leaching test focusing on clod size of drinking water sludge and applicability to long-term prediction using column leaching test. *In*: GEO-FRONTIERS CONGRESS, 2011. **Anais [...]**. [S. l.]: ASCE, 2011.
- XIA, Z. **Geotechnical characterization of water treatment plant residuals**. 1994. M.Sc. Thesis, New Jersey Institute of Technology, New Jersey, 1994
- YANG, Y. *et al.* Dewatered alum sludge: a potential adsorbent for phosphorus removal. **Water Science & Technology**, v. 54, n. 5, p. 207-213, 2006.
- ZHAO, Y. *et al.* Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals - An explicit and comprehensive review. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], n. 353, p. 717-726, 2018.

ANEXO A – RELATÓRIOS DE ENSAIOS



Rua Chico Lemos, 1250 | Bairro Cidade dos Funcionários
 CEP 60.822-785 | Tel.: (85) 3021-2094 | contato@h2oanalysis.com.br
 CNPJ: 11.071.357/0001-87 | Insc. Mun.: 248259-2

Relatório de Ensaios Nº: 10223.2023.A- V.0

Dados Contratação:			
Solicitante:			
Razão Social:	CAGECE - COMPANHIA DE AGUA E ESGOTO DO CEARA CAGECE		
Proposta Comercial:	1244.2023.V4		
CNPJ/CPF:	07.040.108/0001-57		
Endereço:	R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto - Fortaleza/CE CEP: 60422700		
Contato:	Sr. João da Silva Cavalcante E-mail: joao.cavalcante@cagece.com.br		
Dados da Amostra fornecida pelo Cliente:			
Descrição da Amostra:	RESÍDUO SÓLIDO		
Endereço Amostragem:	R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto Cidade: Fortaleza/CE CEP: 60422700		
Responsável pela Amostragem:	Solicitante		
Plano Amostragem:	2922.2023.V0		
Matriz e Origem Amostra:	Resíduo Sólido - Extrato Lixiviado		
Data de Amostragem:	09/05/2023 10:19:00	Característica da Amostra:	Simplex
Data Recebimento:	09/05/2023 16:50:00	Data Conferência:	06/06/2023 10:04:19
		Responsável pela Conferência:	marília.mota
Data Início Amostra:	16/05/2023 09:00:21	Data Conclusão Amostra:	26/05/2023 16:00:19

Resultados

Parâmetros	Resultados	Un Trab	ABNT NBR 10004	Un	L.Q.	Metodologia	Início Ensaio
1,1-dicloroetileno	<0,001	mg/L	até 3,000	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
1,2-dicloroetano	<0,001	mg/L	até 1,000	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
1,4-diclorobenzeno	<0,001	mg/L	até 7,500	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
2,4,5-T	<0,00005	mg/L	até 0,20000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
2,4,5-TP	<0,00005	mg/L	até 1,00000	mg/L	0,00005	ABNT NBR 10005:2004/EPA 3510 C:1996/EPA 8270 D:2014	17/05/2023
2,4,5-Triclorofenol	<0,00005	mg/L	até 400,00000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
2,4,6-Triclorofenol	<0,00005	mg/L	até 20,00000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
2,4-D	<0,00005	mg/L	até 3,00000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
2,4-Dinitrotolueno	<0,001	mg/L	até 0,130	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Aldrin+Dieldrin	<0,00001	mg/L	até 0,00300	mg/L	0,00001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Arsênio	<0,001	mg/L	até 1,000	mg/L	0,001	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Bário	1,162	mg/L	até 70,000	mg/L	0,051	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Benzeno	<0,001	mg/L	até 0,500	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Benzo(a)pireno	<0,00005	mg/L	até 0,07000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023

Relatório N.:10223.2023.B- V.0

Parâmetros	Resultados	Un Trab	ABNT NBR 10004	Un	L.Q.	Metodologia	Início Ensaio
Cádmio	<0,0005	mg/L	até 0,5000	mg/L	0,0005	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Chumbo	<0,005	mg/L	até 1,000	mg/L	0,005	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Clordano (cis + trans)	<0,00001	mg/L	até 0,02000	mg/L	0,00001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Cloreto de vinila em mg/L	<0,0005	mg/L	até 0,5000	mg/L	0,0005	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Clorobenzeno (Monoclorobenzeno)	<0,001	mg/L	até 100,000	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Clorofórmio	<0,001	mg/L	até 6,000	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Cresóis	<0,0001	mg/L	até 200,0000	mg/L	0,0001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Cromo	<0,005	mg/L	até 6,000	mg/L	0,005	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
DDD	<0,00005	mg/L	até 0,20000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
DDE	<0,00005	mg/L	até 0,20000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
DDT	<0,00005	mg/L	até 0,20000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Determinação de pH para potenciometria (Lixiviado)	5,100		N.A		-	PR-Tb-FQ 177/ABNT NBR 10005:2004	25/05/2023
Endrin	<0,00001	mg/L	até 0,06000	mg/L	0,00001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Fluoretos	<0,100	mg/L	até 150,000	mg/L	0,100	PR-Tb FQ 176/PR-Tb FQ 358/ABNT NBR 10006:2004/ABNT NBR 10005:2004	26/05/2023
Heptacloro epóxido + Heptacloro	<0,00001	mg/L	até 0,00300	mg/L	0,00001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Hexaclorobenzeno	<0,001	mg/L	até 0,100	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Hexaclorobutadieno	<0,001	mg/L	até 0,500	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Hexacloroetano	<0,001	mg/L	até 0,001	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Lindano	<0,00001	mg/L	até 0,20000	mg/L	0,00001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
m-cresol	<0,00005	mg/L	até 200,00000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Mercúrio	<0,0001	mg/L	até 0,1000	mg/L	0,0001	PR-Tb IN 010/ ABNT NBR 10006:2004/ ABNT NBR 10005:2004	16/05/2023
Metiletilcetona (2-Butanona)	<0,001	mg/L	até 200,000	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Metoxicloro	<0,00005	mg/L	até 2,00000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023

Relatório N.:10223.2023.B- V.0

Parâmetros	Resultados	Un Trab	ABNT NBR 10004	Un	L.Q.	Metodologia	Início Ensaio
Nitrobenzeno	<0,001	mg/L	até 2,000	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
o-cresol	<0,00005	mg/L	até 200,00000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
p-cresol	<0,00005	mg/L	até 200,00000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Pentaclorofenol	<0,00005	mg/L	até 0,90000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Piridina	<0,001	mg/L	até 5,000	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Prata	<0,001	mg/L	até 5,000	mg/L	0,001	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Selênio	<0,005	mg/L	até 1,000	mg/L	0,005	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Tetracloroeto de carbono	<0,001	mg/L	até 0,200	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Tetracloroetileno	<0,001	mg/L	até 4,000	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023
Toxafeno	<0,00005	mg/L	até 0,50000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Tricloroeteno (Tricloroetileno TCE)	<0,001	mg/L	até 7,000	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	25/05/2023

As opiniões e interpretações expressas abaixo não fazem parte do escopo da acreditação deste laboratório.

Conclusão: OS PARÂMETROS AVALIADOS APRESENTARAM-SE EM CONFORMIDADE COM A ABNT NBR 10004 ELABORADA PELA COMISSÃO DE ESTUDO ESPECIAL TEMPORÁRIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS (ABNT/CEET-00:001.34).

DE ACORDO COM A(S) LEGISLAÇÃO(ÕES) ABNT NBR 10004:2004 - RESÍDUOS - CLASSIFICAÇÃO, ABNT NBR 10005:2004 - RESÍDUOS - LIXIVIAÇÃO E ABNT NBR 10006:2004 - RESÍDUOS - SOLUBILIZAÇÃO, FICA CONSTATADO QUE O RESÍDUO CLASSIFICA-SE COMO CLASSE I - PERIGOSO. **Legislação:** Valores de referência estabelecidos conforme ABNT NBR 10004:2004, relatórioEnsaio_classe Extrato Lixiviado

Referência(s) Normativa(s): EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004, EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004, ABNT NBR 10005:2004/EPA 3510 C:1996/EPA 8270 D:2014, PR-Tb FQ 176/PR-Tb FQ 358/ABNT NBR 10006:2004/ABNT NBR 10005:2004, PR-Tb IN 010/ ABNT NBR 10006:2004/ ABNT NBR 10005:2004, PR-Tb-FQ 177/ABNT NBR 10005: 2004, SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004,

Relatório de Ensaios tipo A - Ensaios Acreditados conforme ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005

Legenda

mg/L - Miligrama por Litro L.Q. - Limite de Quantificação, VMP - Valor Máximo Permitido, N.A. - Não Aplicável

2. Informações Complementares:

- 1) Interpretação dos Resultados: Comparando os resultados obtidos para a amostra com valores estabelecidos pela Norma/Legislação.
- 2) Este Relatório Analítico só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma modificação.
- 3) Os resultados apresentados se referem somente aos itens ensaiados.
- 4) Procedimento de Amostragem conforme: IT-225.00-00 - Instrução de trabalho para coleta.

5) A H2OANALYSIS utiliza como regra de decisão para expressar os resultados obtidos: informar quando solicitado a incerteza da medição do método, entretanto esta não considera a(s) incertezas na elaboração da declaração da conformidade, ficando a critério do contratante a aplicabilidade das incertezas no cálculo final do resultado expresso no relatório.

Código de Verificação: 0009900144125009599000202300000

Francisco Edson Oliveira Holanda

Caroline Batista Leite Marques

Francisco Edson Oliveira Holanda
CRQ 10.200.621 - X REGIÃO
Responsável Técnico(a)

Caroline Batista Leite Marques
CRQ 10.200.789 - X REGIÃO
Coordenador(a) Técnico(a)

Relatório de Ensaios Nº: 10223.2023.B- V.0

Dados Contratação:			
Solicitante:			
Razão Social:	CAGECE - COMPANHIA DE AGUA E ESGOTO DO CEARA CAGECE		
Proposta Comercial:	1244.2023.V4		
CNPJ/CPF:	07.040.108/0001-57		
Endereço:	R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto - Fortaleza/CE CEP: 60422700		
Contato:	Sr. João da Silva Cavalcante E-mail: joao.cavalcante@cagece.com.br		
Dados da Amostra fornecida pelo Cliente:			
Descrição da Amostra:	RESÍDUO SÓLIDO		
Endereço Amostragem:	R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto Cidade: Fortaleza/CE CEP: 60422700		
Responsável pela Amostragem:	Solicitante		
Plano Amostragem:	2922.2023.V0		
Matriz e Origem Amostra:	Resíduo Sólido - Extrato Lixiviado		
Data de Amostragem:	09/05/2023 10:19:00	Característica da Amostra:	Simplex
Data Recebimento:	09/05/2023 16:50:00	Data Conferência:	06/06/2023 10:04:19
		Responsável pela Conferência:	marília.mota
Data Início Amostra:	16/05/2023 09:00:21	Data Conclusão Amostra:	26/05/2023 16:00:19

Resultados

Parâmetros	Resultados	Un Trab	ABNT NBR 10004	Un	L.Q.	Metodologia	Início Ensaio
Lixiviado - Massa Utilizada	60,806		N.A	-	-	ABNT NBR 10004:2004	16/05/2023
Tempo de Lixiviação	18,000		N.A	-	-	ABNT NBR 10004:2004	16/05/2023

Conclusão: OS PARÂMETROS AVALIADOS APRESENTARAM-SE EM CONFORMIDADE COM A ABNT NBR 10004 ELABORADA PELA COMISSÃO DE ESTUDO ESPECIAL TEMPORÁRIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS (ABNT/CEET-00:001.34).

DE ACORDO COM A(S) LEGISLAÇÃO(ÕES) ABNT NBR 10004:2004 - RESÍDUOS - CLASSIFICAÇÃO, ABNT NBR 10005:2004 - RESÍDUOS - LIXIVIAÇÃO E ABNT NBR 10006:2004 - RESÍDUOS - SOLUBILIZAÇÃO, FICA CONSTATADO QUE O RESÍDUO CLASSIFICA-SE COMO CLASSE I - PERIGOSO.

Legislação: Valores de referência estabelecidos conforme ABNT NBR 10004:2004, relatórioEnsaio_classe Extrato Lixiviado

Referência(s) Normativa(s): Associação Brasileira de Normas Técnicas,

Relatório de Ensaios tipo B

Relatório de Ensaios tipo B

Legenda

mg/L - Miligrama por Litro L.Q. - Limite de Quantificação, VMP - Valor Máximo Permitido, N.A. - Não Aplável

2. Informações Complementares:

- 1) Interpretação dos Resultados: Comparando os resultados obtidos para a amostra com valores estabelecidos pela Norma/Legislação.
- 2) Este Relatório Analítico só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma modificação.
- 3) Os resultados apresentados se referem somente aos itens ensaiados.
- 4) Procedimento de Amostragem conforme: IT-225.00-00 - Instrução de trabalho para coleta.

5) A H2OANALYSIS utiliza como regra de decisão para expressar os resultados obtidos: informar quando solicitado a incerteza da medição do método, entretanto esta não considera a(s) incertezas na elaboração da declaração da conformidade, ficando a critério do contratante a aplicabilidade das incertezas no cálculo final do resultado expresso no relatório.

Código de Verificação: 0009900144125009599000202300000

Francisco Edson Oliveira Holanda

Caroline Batista Leite Marques

Francisco Edson Oliveira Holanda
 CRQ 10.200.621 - X REGIÃO
 Responsável Técnico(a)

Caroline Batista Leite Marques
 CRQ 10.200.789 - X REGIÃO
 Coordenador(a) Técnico(a)

Relatório de Ensaios Nº: 10224.2023.A- V.0
Dados Contratação:
Solicitante:

Razão Social: CAGECE - COMPANHIA DE AGUA E ESGOTO DO CEARA CAGECE
Proposta Comercial: 1244.2023.V4
CNPJ/CPF: 07.040.108/0001-57
Endereço: R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto - Fortaleza/CE CEP: 60422700
Contato: Sr. João da Silva Cavalcante **E-mail:** joao.cavalcante@cagece.com.br

Dados da Amostra fornecida pelo Cliente:

Descrição da Amostra: RESÍDUO SÓLIDO
Endereço Amostragem: R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto **Cidade:** Fortaleza/CE **CEP:** 60422700
Responsável pela Amostragem: Solicitante
Plano Amostragem: 2922.2023.V0
Matriz e Origem Amostra: Resíduo Sólido - Extrato Solubilizado
Data de Amostragem: 09/05/2023 10:19:00 **Característica da Amostra:** Simples
Data Recebimento: 09/05/2023 16:50:00 **Data Conferência:** 06/06/2023 10:08:47
Responsável pela Conferência: marilia.mota
Data Início Amostra: 16/05/2023 09:00:21 **Data Conclusão Amostra:** 31/05/2023 16:00:01

Resultados

Parâmetros	Resultados	Un Trab	ABNT NBR 10004	Un	L.Q.	Metodologia	Início Ensaio
2,4,5-T	<0,00005	mg/L	até 0,00200	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
2,4,5-TP Solubilizado	<0,00005	mg/L	até 0,03000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
2,4-D Solubilizado	<0,00005	mg/L	até 0,03000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Aldrin+Dieldrin	<0,00001	mg/L	até 0,00003	mg/L	0,00001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Alumínio Solubilizado	3,549	mg/L	até 0,200	mg/L	0,050	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Arsênio	<0,001	mg/L	até 0,010	mg/L	0,001	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Bário	0,065	mg/L	até 0,700	mg/L	0,051	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Cádmio	<0,0005	mg/L	até 0,0050	mg/L	0,0005	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Chumbo	<0,005	mg/L	até 0,010	mg/L	0,005	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Cianetos	<0,050	mg/L	até 0,070	mg/L	0,050	PR-Tb FQ 175/PR-Tb FQ 358/ABNT NBR 10006:2004/ABNT NBR 10005:2004	29/05/2023
Clordano (cis + trans)	<0,00001	mg/L	até 0,00020	mg/L	0,00001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Cloretos	38,020	mg/Kg	até 250,000	mg/L	5,000	PR-Tb FQ 164/PR-Tb FQ 358/ABNT NBR 10006:2004/ABNT NBR 10005:2004	29/05/2023
Cobre	<0,015	mg/Kg	até 2,000	mg/L	0,015	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023

Relatório N.:10224.2023.A- V.0

Parâmetros	Resultados	Un Trab	ABNT NBR 10004	Un	L.Q.	Metodologia	Início Ensaio
Cromo	<0,005	mg/L	até 0,050	mg/L	0,005	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
DDD	<0,00005	mg/L	até 0,00200	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
DDE	<0,00005	mg/L	até 0,00200	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
DDT	<0,00005	mg/L	até 0,00200	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Determinação de pH para potenciometria (Solubilizado)	8,070		N.A		-	PR-Tb-FQ 177/ABNT NBR 10006:2004	24/05/2023
Endrin	<0,00001	mg/L	até 0,00060	mg/L	0,00001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Fenóis Totais	<0,00005	mg/L	até 0,01000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Ferro	2,011	mg/Kg	até 0,300	mg/L	0,014	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Fluoretos	<0,100	mg/L	até 1,500	mg/L	0,100	PR-Tb FQ 176/PR-Tb FQ 358/ABNT NBR 10006:2004/ABNT NBR 10005:2004	24/05/2023
Heptacloro epóxido + Heptacloro	<0,00001	mg/L	até 0,00003	mg/L	0,00001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Hexaclorobenzeno	<0,001	mg/L	até 0,001	mg/L	0,001	EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Lindano	<0,00001	mg/L	até 0,00200	mg/L	0,00001	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Manganês Solubilizado	4,157	mg/L	até 0,100	mg/L	0,013	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Mercurio	<0,0001	mg/L	até 0,0010	mg/L	0,0001	PR-Tb IN 010/ ABNT NBR 10006:2004/ ABNT NBR 10005:2004	16/05/2023
Metoxicloro	<0,00005	mg/L	até 0,02000	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Nitrato como N	9,300	mg/L	até 10,000	mg/L	0,450	PR-Tb FQ 170/ PR-Tb FQ 358/ ABNT NBR 10006:2004/ ABNT NBR 10005:2004	26/05/2023
Prata	<0,001	mg/L	até 0,050	mg/L	0,001	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Selênio	<0,005	mg/L	até 0,010	mg/L	0,005	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Sódio	7,676	mg/Kg	até 200,000	mg/L	0,050	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023
Sulfato	<3,820	mg/Kg	até 250,000	mg/L	3,820	PR-Tb FQ 180/PR-Tb FQ 358/ABNT NBR 10006:2004/ABNT NBR 10005:2004	31/05/2023
Surfactantes Aniônicos	0,630	mg/L	até 0,500	mg/L	0,100	SMEWW 22ª Ed. 2012 Método 5540 B/C	30/05/2023
Toxafeno	<0,00005	mg/L	até 0,00500	mg/L	0,00005	EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004	17/05/2023
Zinco	0,082	mg/Kg	até 5,000	mg/L	0,066	SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004	16/05/2023

As opiniões e interpretações expressas abaixo não fazem parte do escopo da acreditação deste laboratório.

Conclusão: OS PARÂMETROS AVALIADOS SURFACTANTES ANIÔNICOS, ALUMÍNIO SOLUBILIZADO, FERRO E MANGANÊS SOLUBILIZADO

Relatório N.:10224.2023.A- V.0

APRESENTARAM-SE EM DESCONFORMIDADE COM A ABNT NBR 10004 ELABORADA PELA COMISSÃO DE ESTUDO ESPECIAL TEMPORÁRIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS (ABNT/CEET-00:001.34).

DE ACORDO COM A(S) LEGISLAÇÃO(ÕES) ABNT NBR 10004:2004 - RESÍDUOS - CLASSIFICAÇÃO, ABNT NBR 10005:2004 - RESÍDUOS - LIXIVIAÇÃO E ABNT NBR 10006:2004 - RESÍDUOS - SOLUBILIZAÇÃO, FICA CONSTATADO QUE O RESÍDUO CLASSIFICA-SE COMO CLASSE I - PERIGOSO. **Legislação:** Valores de referência estabelecidos conforme ABNT NBR 10004:2004, relatórioEnsaio_classe Extrato Solubilizado

Referência(s) Normativa(s): EPA Method 3510 C:1996, 8270 E:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004, EPA Method 5021 A:2014, 8260 D:2018, ABNT NBR 10005:2004, 10006:2004, PR-Tb FQ 164/PR-Tb FQ 358/ABNT NBR 10006:2004/ABNT NBR 10005:2004, PR-Tb FQ 170/ PR-Tb FQ 358/ ABNT NBR 10006:2004/ ABNT NBR 10005:2004, PR-Tb FQ 175/PR-Tb FQ 358/ABNT NBR 10006:2004/ABNT NBR 10005:2004, PR-Tb FQ 176/PR-Tb FQ 358/ABNT NBR 10006:2004/ABNT NBR 10005:2004, PR-Tb FQ 180/ PR-Tb FQ 358/ ABNT NBR 10006:2004/ ABNT NBR 10005:2004, PR-Tb IN 010/ ABNT NBR 10006:2004/ ABNT NBR 10005:2004, PR-Tb-FQ 177/ABNT NBR 10006: 2004, SMEWW 22ª Ed. 2012 Método 5540 B/C, SMWW 23ª edição, Método 3120 B, ABNT NBR 10006:2004, 10005:2004,

Relatório de Ensaio tipo A - Ensaio Acreditado conforme ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005

Legenda

mg/L - Miligrama por Litro L.Q. - Limite de Quantificação, VMP - Valor Máximo Permitido, N.A. - Não Aplicável

2. Informações Complementares:

- 1) Interpretação dos Resultados: Comparando os resultados obtidos para a amostra com valores estabelecidos pela Norma/Legislação.
- 2) Este Relatório Analítico só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma modificação.
- 3) Os resultados apresentados se referem somente aos itens ensaiados.
- 4) Procedimento de Amostragem conforme: IT-225.00-00 - Instrução de trabalho para coleta.

5) A H2OANALYSIS utiliza como regra de decisão para expressar os resultados obtidos: informar quando solicitado a incerteza da medição do método, entretanto esta não considera a(s) incertezas na elaboração da declaração da conformidade, ficando a critério do contratante a aplicabilidade das incertezas no cálculo final do resultado expresso no relatório.

Código de Verificação: 0009900144125009599010202300000

Francisco Edson Oliveira Holanda

Francisco Edson Oliveira Holanda
CRQ 10.200.621 - X REGIÃO
Responsável Técnico(a)

Caroline Batista Leite Marques

Caroline Batista Leite Marques
CRQ 10.200.789 - X REGIÃO
Coordenador(a) Técnico(a)

Relatório de Ensaios Nº: 10225.2023.B- V.0
Dados Contratação:
Solicitante:

Razão Social: CAGECE - COMPANHIA DE AGUA E ESGOTO DO CEARA CAGECE
Proposta Comercial: 1244.2023.V4
CNPJ/CPF: 07.040.108/0001-57
Endereço: R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto - Fortaleza/CE CEP: 60422700
Contato: Sr. João da Silva Cavalcante **E-mail:** joao.cavalcante@cagece.com.br

Dados da Amostra fornecida pelo Cliente:

Descrição da Amostra: RESÍDUO SÓLIDO
Endereço Amostragem: R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto **Cidade:** Fortaleza/CE **CEP:** 60422700
Responsável pela Amostragem: Solicitante
Plano Amostragem: 2922.2023.V0
Matriz e Origem Amostra: Resíduo Sólido - Massa Bruta
Data de Amostragem: 09/05/2023 10:19:00 **Característica da Amostra:** Simples
Data Recebimento: 09/05/2023 16:50:00 **Data Conferência:** 06/06/2023 10:10:50
Responsável pela Conferência: marilia.mota
Data Início Amostra: 16/05/2023 09:00:21 **Data Conclusão Amostra:** 31/05/2023 16:00:39

Resultados

Parâmetros	Resultados	Un Trab	ABNT NBR 10004	Un	L.Q.	Metodologia	Início Ensaio
Cianetos	<0,400	mg/Kg	até 250,000	mg/kg	0,050	PR-Tb-FQ 175	16/05/2023
Sulfeto	<2,000	mg/Kg	até 500,000	mg/kg	0,100	Método para Sulfeto - Freitag - PR-Tb FQ 181	16/05/2023
Umidade	85,300	%	N.A	%	0,010	PR-Tb-FQ 024	16/05/2023

Conclusão: OS PARÂMETROS AVALIADOS APRESENTARAM-SE EM CONFORMIDADE COM A ABNT NBR 10004 ELABORADA PELA COMISSÃO DE ESTUDO ESPECIAL TEMPORÁRIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS (ABNT/CEET-00:001.34).

DE ACORDO COM A(S) LEGISLAÇÃO(ÕES) ABNT NBR 10004:2004 - RESÍDUOS - CLASSIFICAÇÃO, ABNT NBR 10005:2004 - RESÍDUOS - LIXIVIAÇÃO E ABNT NBR 10006:2004 - RESÍDUOS - SOLUBILIZAÇÃO, FICA CONSTATADO QUE O RESÍDUO CLASSIFICA-SE COMO CLASSE I - PERIGOSO.

Legislação: Valores de referência estabelecidos conforme ABNT NBR 10004:2004, relatórioEnsaio_classe MASSA BRUTA

Referência(s) Normativa(s): Método para Sulfeto - Freitag - PR-Tb FQ 181,PR-Tb-FQ 024,PR-Tb-FQ 175,

Relatório de Ensaio tipo B

Legenda

mg/kg - miligrama por quilograma, % - Porcentagem L.Q. - Limite de Quantificação, VMP - Valor Máximo Permitido, N.A. - Não Aplíavel

2. Informações Complementares:

- 1) Interpretação dos Resultados: Comparando os resultados obtidos para a amostra com valores estabelecidos pela Norma/Legislação.
- 2) Este Relatório Analítico só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma modificação.
- 3) Os resultados apresentados se referem somente aos itens ensaiados.
- 4) Procedimento de Amostragem conforme: IT-225.00-00 - Instrução de trabalho para coleta.

5) A H2OANALYSIS utiliza como regra de decisão para expressar os resultados obtidos: informar quando solicitado a incerteza da medição do método, entretanto esta não considera a(s) incertezas na elaboração da declaração da conformidade, ficando a critério do contratante a aplicabilidade das incertezas no cálculo final do resultado expresso no relatório.

Código de Verificação: 0009900144125009599020202300000

Francisco Edson Oliveira Holanda

Francisco Edson Oliveira Holanda
 CRQ 10.200.621 - X REGIÃO
 Responsável Técnico(a)

Caroline Batista Leite Marques

Caroline Batista Leite Marques
 CRQ 10.200.789 - X REGIÃO
 Coordenador(a) Técnico(a)

Relatório de Ensaios Nº: 10226.2023.A- V.0
Dados Contratação:
Solicitante:

Razão Social: CAGECE - COMPANHIA DE AGUA E ESGOTO DO CEARA CAGECE
Proposta Comercial: 1244.2023.V4
CNPJ/CPF: 07.040.108/0001-57
Endereço: R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto - Fortaleza/CE CEP: 60422700
Contato: Sr. João da Silva Cavalcante **E-mail:** joao.cavalcante@cagece.com.br

Dados da Amostra fornecida pelo Cliente:

Descrição da Amostra: RESÍDUO SÓLIDO
Endereço Amostragem: R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto **Cidade:** Fortaleza/CE **CEP:** 60422700
Responsável pela Amostragem: Solicitante
Plano Amostragem: 2922.2023.V0
Matriz e Origem Amostra: Resíduo Sólido - Resíduo
Data de Amostragem: 09/05/2023 10:20:00 **Característica da Amostra:** Simples
Data Recebimento: 09/05/2023 16:50:00 **Data Conferência:** 06/06/2023 10:35:19
Responsável pela Conferência: Ana Claudia
Data Início Amostra: 15/05/2023 09:00:21 **Data Conclusão Amostra:** 31/05/2023 16:00:37

Resultados

Parâmetros	Resultados	Un Trab	ABNT NBR 10004	Un	L.Q.	Metodologia	Início Ensaio
Aspecto	Homogêneo		N.A		-	PR-Tb-FQ 017	16/05/2023
Densidade	0,800	g/ml	N.A	g/ml	-	PR-Tb-FQ 017	16/05/2023
Determinação de pH para potenciometria	7,470		N.A		-	PR-Tb-FQ 177/PR-T -FQ 358	17/05/2023
Teor de Sólidos Secos	14,700	%	N.A	%	-	PR-Tb-FQ 024	18/05/2023

As opiniões e interpretações expressas abaixo não fazem parte do escopo da acreditação deste laboratório.

Conclusão: ANÁLISE DE INTERESSE ESPECÍFICO DO CLIENTE.

DE ACORDO COM A(S) LEGISLAÇÃO(ÕES) ABNT NBR 10004:2004 - RESÍDUOS - CLASSIFICAÇÃO, ABNT NBR 10005:2004 - RESÍDUOS - LIXIVIAÇÃO E ABNT NBR 10006:2004 - RESÍDUOS - SOLUBILIZAÇÃO, FICA CONSTATADO QUE O RESÍDUO CLASSIFICA-SE COMO CLASSE I - PERIGOSO. **Legislação:** Valores de referência estabelecidos conforme ABNT NBR 10004:2004

Referência(s) Normativa(s): PR-Tb-FQ 017, PR-Tb-FQ 024, PR-Tb-FQ 177/PR-T -FQ 358,

Relatório de Ensaios tipo A - Ensaios Acreditados conforme ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005

Legenda

g/ml - Grama por mililitro, % - Porcentagem L.Q. - Limite de Quantificação, VMP - Valor Máximo Permitido, N.A. - Não Aplíavel

2. Informações Complementares:

- 1) Interpretação dos Resultados: Comparando os resultados obtidos para a amostra com valores estabelecidos pela Norma/Legislação.
- 2) Este Relatório Analítico só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma modificação.
- 3) Os resultados apresentados se referem somente aos itens ensaiados.
- 4) Procedimento de Amostragem conforme: IT-225.00-00 - Instrução de trabalho para coleta.

5) A H2OANALYSIS utiliza como regra de decisão para expressar os resultados obtidos: informar quando solicitado a incerteza da medição do método, entretanto esta não considera a(s) incertezas na elaboração da declaração da conformidade, ficando a critério do contratante a aplicabilidade das incertezas no cálculo final do resultado expresso no relatório.

Código de Verificação: 0009900144125009599030202300000

Francisco Edson Oliveira Holanda

Francisco Edson Oliveira Holanda
 CRQ 10.200.621 - X REGIÃO
 Responsável Técnico(a)

Caroline Batista Leite Marques

Caroline Batista Leite Marques
 CRQ 10.200.789 - X REGIÃO
 Coordenador(a) Técnico(a)

Relatório de Ensaios Nº: 10226.2023.B- V.0
Dados Contratação:
Solicitante:

Razão Social: CAGECE - COMPANHIA DE AGUA E ESGOTO DO CEARA CAGECE
Proposta Comercial: 1244.2023.V4
CNPJ/CPF: 07.040.108/0001-57
Endereço: R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto - Fortaleza/CE CEP: 60422700
Contato: Sr. João da Silva Cavalcante **E-mail:** joao.cavalcante@cagece.com.br

Dados da Amostra fornecida pelo Cliente:

Descrição da Amostra: RESÍDUO SÓLIDO
Endereço Amostragem: R LAURO VIEIRA CHAVES ,1030 Aeroporto **Cidade:** Fortaleza/CE **CEP:** 60422700
Responsável pela Amostragem: Solicitante
Plano Amostragem: 2922.2023.V0
Matriz e Origem Amostra: Resíduo Sólido - Resíduo
Data de Amostragem: 09/05/2023 10:20:00 **Característica da Amostra:** Simples
Data Recebimento: 09/05/2023 16:50:00 **Data Conferência:** 06/06/2023 10:35:19
Responsável pela Conferência: Ana Claudia
Data Início Amostra: 15/05/2023 09:00:21 **Data Conclusão Amostra:** 31/05/2023 16:00:37

Resultados

Parâmetros	Resultados	Un Trab	ABNT NBR 10004	Un	L.Q.	Metodologia	Início Ensaio
Corrosividade	Ausência		N.A		-	ABNT NBR 10004:2004	16/05/2023
Determinação do Ponto de fulgor	>25,000	°C	N.A	°C	-	PR-Tb-FQ 403	17/05/2023
Inflamabilidade	Ausência		N.A		-	PR-Tb-FQ 403/ ABNT NBR 10004:2004	17/05/2023
Líquidos livres	Ausência		N.A		-	ABNT NBR 10004:2004	16/05/2023
Patogenicidade	Presença		N.A		-	ABNT NBR 10004:2004	31/05/2023
Reatividade	Ausência		N.A		-	ABNT NBR 10004:2004	31/05/2023
Toxicidade	Não Tóxico		N.A		-	ABNT NBR 10004:2004	17/05/2023
Vírus Entéricos (Enterovírus)	Ausência		N.A		-	SMWW 23ª edição, Método 9510 B, C, F e G / PR-Tb MB 107	15/05/2023

Conclusão: ANÁLISE DE INTERESSE ESPECÍFICO DO CLIENTE.

DE ACORDO COM A(S) LEGISLAÇÃO(ÕES) ABNT NBR 10004:2004 - RESÍDUOS - CLASSIFICAÇÃO, ABNT NBR 10005:2004 - RESÍDUOS - LIXIVIAÇÃO E ABNT NBR 10006:2004 - RESÍDUOS - SOLUBILIZAÇÃO, FICA CONSTATADO QUE O RESÍDUO CLASSIFICA-SE COMO CLASSE I - PERIGOSO.

Legislação: Valores de referência estabelecidos conforme ABNT NBR 10004:2004

Referência(s) Normativa(s): Associação Brasileira de Normas Técnicas, PR-Tb-FQ 403, PR-Tb-FQ 403/ ABNT NBR 10004:2004, SMWW 23ª edição, Método 9510 B, C, F e G / PR-Tb MB 107,

Relatório de Ensaios tipo B

Legenda

g/ml - Grama por mililitro, % - Porcentagem, °C - Graus Celsius L.Q. - Limite de Quantificação, VMP - Valor Máximo Permitido, N.A. - Não Aplíavel

2. Informações Complementares:

- 1) Interpretação dos Resultados: Comparando os resultados obtidos para a amostra com valores estabelecidos pela Norma/Legislação.
- 2) Este Relatório Analítico só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma modificação.
- 3) Os resultados apresentados se referem somente aos itens ensaiados.
- 4) Procedimento de Amostragem conforme: IT-225.00-00 - Instrução de trabalho para coleta.

5) A H2OANALYSIS utiliza como regra de decisão para expressar os resultados obtidos: informar quando solicitado a incerteza da medição do método, entretanto esta não considera a(s) incertezas na elaboração da declaração da conformidade, ficando a critério do contratante a aplicabilidade das incertezas no cálculo final do resultado expresso no relatório.

Código de Verificação: 0009900144125009599030202300000



Francisco Edson Oliveira Holanda
 CRQ 10.200.621 - X REGIÃO
 Responsável Técnico(a)



Caroline Batista Leite Marques
 CRQ 10.200.789 - X REGIÃO
 Coordenador(a) Técnico(a)