



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL**

**THIAGO MENDES DE BRITO**

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS EM ETA DE  
FILTRAÇÃO DIRETA EM ESCALA REAL**

**Orientação:** Prof. Dr. André Luís Calado Araújo  
**Coorientação:** Prof. Dr. Marco A. Calazans Duarte

**Natal – RN  
Fevereiro de 2019**

**THIAGO MENDES DE BRITO**

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS EM ETA DE  
FILTRAÇÃO DIRETA EM ESCALA REAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Calado Araújo.

Coorientador: Prof. Dr. Marco A. Calazans Duarte.

**Natal – RN**

**Fevereiro de 2019**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Brito, Thiago Mendes de.

Caracterização de resíduos gerados em ETA de filtração direta em escala real / Thiago Mendes de Brito. - 2019.  
53f.: il.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal, 2019.

Orientador: Dr. André Luís Calado Araújo.

Coorientador: Dr. Marco Antônio Calazans Duarte.

1. Água de lavagem de filtros - Dissertação. 2. Filtração direta - Dissertação. 3. Lagoa de sedimentação - Dissertação. 4. Recirculação - Dissertação. 5. Reúso - Dissertação. I. Araújo, André Luís Calado. II. Duarte, Marco Antônio Calazans. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628

**THIAGO MENDES DE BRITO**

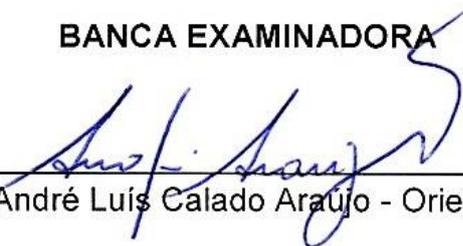
**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS EM ETA DE  
FILTRAÇÃO DIRETA EM ESCALA REAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Calado Araújo.

Coorientador: Prof. Dr. Marco A. Calazans Duarte.

**BANCA EXAMINADORA**



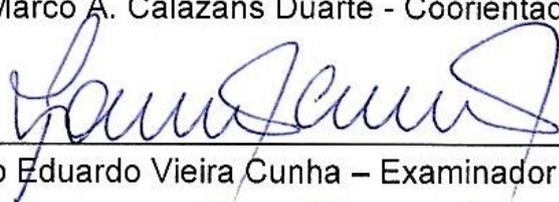
---

Dr. André Luís Calado Araújo - Orientador



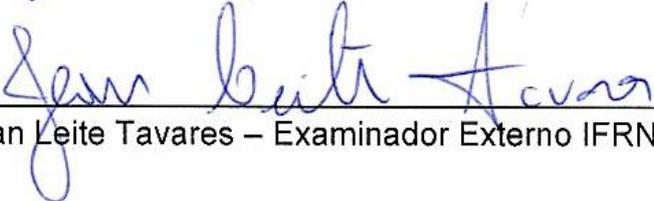
---

Dr. Marco A. Calazans Duarte - Coorientador



---

Dr. Paulo Eduardo Vieira Cunha – Examinador UFRN



---

Dr. Jean Leite Tavares – Examinador Externo IFRN

**Natal – RN**

**Fevereiro de 2019**

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.”*

*Marthin Luther King*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de trilhar por caminhos de tamanho saber, que me permitiram inúmeras descobertas, não apenas no âmbito científico, do conhecimento, mas principalmente no autoconhecimento, durante o período em que estive envolvido no estudo e pesquisa que resultou nesta produção científica.

Sou grato imensamente ao meu orientador André Calado, que se mostrou durante todo o tempo não ser apenas um doutor com vasto conhecimento científico e vivência acadêmica, mas essencialmente um mestre na compreensão e no trato humano. Agradeço ainda a oportunidade que me foi dada pelo professor em poder participar do grupo de pesquisa atrelado indiretamente aos objetivos da minha dissertação, o que facilitou imensamente a viabilidade das coletas, análises e o andamento prático da pesquisa. Participar de reuniões periódicas com o grupo de estudantes e pesquisadores sempre me clareava as ideias ao logo do processo. Por isso e principalmente por ter-me abertos os olhos para a aventura ímpar que seria essa jornada no universo acadêmico, sou e sempre serei grato.

Ao meu coorientador, Marco Calazans, meu muito obrigado pela eterna disposição em me levar a executar ou pelo menos cogitar novas ideias, em sugerir novos caminhos para situações já estabelecidas, ainda durante os momentos de definição do que viria a se tornar essa pesquisa. À sua contínua disposição em nortear e conduzir à ação, minha sincera gratidão.

Agradeço à Fundação CAPES pelo fomento e apoio ao desenvolvimento científico também à nível de mestrado, do qual pude usufruir e vivenciar os ônus e bônus na condição de aluno bolsista e ainda assim, chegar ao fim com a consciência de ter sido um suporte indispensável que me permitiu realizar mais essa etapa acadêmica na minha vida.

Ao CNPq, minha gratidão por poder fazer parte durante esse período de um projeto de pesquisa que extrapolava os limites epistemológicos desse trabalho e que bem por isso teve grande importância para a compreensão do cenário, das inúmeras variáveis e relações interdisciplinares existentes.

Meus sinceros agradecimentos aos colaboradores da ETA Extremoz (CAERN) que contribuíram diretamente para que a coleta de dados e de material durante os meses de trabalho fluísse de forma tranquila, sem percalços.

Aos professores, mestres e doutores do curso de Gestão Ambiental do IFRN, minha gratidão por terem me conferido o devido preparo para que fosse possível percorrer caminhos mais aprofundados no mundo da ciência. Aos amigos que fiz por lá: Custódio Silva, Wagna Dantas, professor Ronaldo Diniz, dentre tantos outros, minha gratidão moral, pois foram essenciais para que minha motivação se mantivesse em alta no dia-a-dia da pesquisa.

Minha gratidão aos professores do PPgESA, em especial ao professor Cícero Onofre (*in memoriam*), pelos conhecimentos adquiridos e pelas vivências compartilhadas, pois formaram a base do que é hoje meu saber sobre Engenharia Sanitária e demonstraram que o conhecimento é algo dinâmico, um caminho sem volta, uma estrada sem fim, pois não há conhecimento pré-estabelecido que não possa ser desenvolvido, alterado, confirmado ou refutado.

Agradecimento especial à professora Vanessa Becker pela conduta, exemplo e dedicação na coordenação do PPgESA e pela inspiração em sempre guiar o olhar para o objetivo ao longo do caminho.

À minha família, meus pais e em especial à minha namorada, sempre presente quando mais importava, minha total gratidão pela compreensão e pela paciência com meus momentos de oscilação, de questionamento, mas principalmente por estarem verdadeiramente presentes na minha vida, dando o incentivo necessário para que eu me mantivesse com a mente tranquila nos momentos mais difíceis.

Por fim, agradeço aos meus colegas de curso, em especial à Mislainy, Maria Helena e Leonel, por terem sido presentes durante o curso das disciplinas e por terem tornado esse período mais leve e mais divertido. Além de um colega, vocês ganharam um amigo.

## RESUMO

As estações de tratamento de água para abastecimento geram resíduos que necessitam de uma gestão eficiente e eficaz, de forma que se lhes dê devida destinação e tratamento e se adeque tal geração aos instrumentos regulatórios vigentes, trazendo soluções que causem os mínimos impactos possíveis ao ambiente e à saúde humana. Nesse contexto, percebe-se a lacuna existente no que se refere aos estudos que relacionem as características dos resíduos gerados com parâmetros operacionais de ETA. Dessa forma, a realização de uma caracterização qualitativa e quantitativa dos resíduos gerados em ETA de filtração direta em escala real possibilita que os resultados obtidos e consequente dados gerados sirvam de referência para estudos correlatos acerca da geração de resíduos em cenários com similaridade climática, técnica e tecnológica. O estudo apresenta os resultados das análises do resíduo gerado na seção sobre caracterização qualitativa, bem como traduz as implicações da composição do resíduo já adensado e acumulado há décadas em uma lagoa de sedimentação. Os dados da caracterização quantitativa complementam a qualitativa e amplificam as possibilidades de se avaliar a viabilidade técnica das etapas envolvidas na geração e tratamento de resíduos na ETA, bem como possibilitaram a proposição de alternativa tecnológica. A presente pesquisa demonstra que, através da caracterização quali-quantitativa é possível correlacionar parâmetros físico-químicos dos resíduos com parâmetros operacionais da ETA, ampliando a compreensão acerca do cenário avaliado e propondo ajustes e melhorias que trariam benefícios de ordem técnica, financeira, sanitária e ambiental. A esse respeito, a pesquisa revela o valor da contribuição que a proposta de uma caracterização traz como material científico para estudos complementares mais específicos.

**Palavras-chave:** água de lavagem de filtros, filtração direta, lagoa de sedimentação, recirculação, resíduos de ETA, reuso.

## ABSTRACT

Drinking Water Treatment Plants generate residual streams that claim for an efficient management, in a way that it's given proper treatment and destination, both accordingly to the present regulatory instruments, bringing solutions that generate the least possible impacts for the environment and human health. In this context, there is a noticeable gap regarding studies that correlate an eventual DWTP residual stream with its operational parameters. Thus, the accomplishment of a qualitative and quantitative characterization for the residual stream generated by a full-scale direct filtration DWTP allows the gathered results and subsequent generated data to be reference to correlated studies about the residuals generation in sceneries with such technical, technological and climatic similarities. The study presents the physical-chemical analysis results from the generated residual stream at the qualitative characterization section, such as translates the forthcoming implications based on the composition of thickened sludge layer samples from the bottom of a sedimentation lagoon, operated for decades at the DWTP facilities. The quantitative characterization data supplies the qualitative one and amplifies the various possibilities for evaluation of technical feasibility of the steps involved in the DWTP residual stream generation and treatment. The current research demonstrates through the quali-quantitative characterization that it's possible to correlate physical-chemical parameters from generated residuals to the DWTP operational parameters, extending comprehension of the evaluated scenario and proposing adjustments and improvements that could bring technical, financial, sanitary and environmental gains and benefits. In this respect, the research reveals the greatest contribution that such a proposal of characterization might bring as valuable scientific material for more specific upcoming studies.

**Keywords:** direct filtration, DWTP residual stream, filter backwash water , recirculation, reuse, sedimentation lagoon.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Fluxograma da ETA Extremoz .....	17
<b>Figura 2.</b> Vista superior dos filtros da ETA Extremoz. ....	18
<b>Figura 3.</b> Estratificação interna de cada filtro da ETA.....	19
<b>Figura 4.</b> Linha de recirculação da ALF tratada (ECL). ....	20
<b>Figura 5.</b> Imagem aérea da ETA Extremoz e Lagoas de sedimentação. ....	21
<b>Figura 6.</b> Avaliação quali-quantitativa dos resíduos gerados na ETA Extremoz.....	22
<b>Figura 7.</b> Pontos de medição de vazão e coleta de amostras. ....	23
<b>Figura 8.</b> Presença de macrófitas na entrada da lagoa. ....	25
<b>Figura 9.</b> Detalhes do coletor de lodo desenvolvido durante a pesquisa.....	26
<b>Figura 10.</b> Box plot - ST e SST para as amostras de ALF.....	29
<b>Figura 11.</b> Anova OneWay – Clorofila ‘a’ para as amostras de ECL e ALF.....	31
<b>Figura 12.</b> Anova OneWay – Clorofila ‘a’ para as amostras de ALF e AB.....	31
<b>Figura 13.</b> Anova OneWay - Turbidez para as amostras de AB e ALF5. ....	33
<b>Figura 14.</b> Comparativo entre parâmetros para análise temporal da ALF. ....	34
<b>Figura 15.</b> Box Plot - SST (mg/L) e Turbidez (uT) das amostras de ALF x ECL.....	35
<b>Figura 16.</b> Anova OneWay - SST para amostras de ALF dos filtros F1 a F4. ....	36
<b>Figura 17.</b> Medidor de vazão proporcional. ....	37
<b>Figura 18.</b> Cortes transversal e longitudinal da Lagoa de Sedimentação.....	39
<b>Figura 19.</b> Vista lateral do protótipo de adensador cilíndrico por gravidade. ....	44

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Composição granulométrica das camadas de material filtrante.....	18
<b>Tabela 2.</b> Composição granulométrica das camadas suporte dos filtros. ....	19
<b>Tabela 3.</b> Parâmetros de monitoramento, pontos de coleta e frequência de amostragem. ....	24
<b>Tabela 4.</b> Estatística descritiva dos parâmetros Turbidez, ST e SST para AB, ECL e ALF MIX. ....	28
<b>Tabela 5.</b> Estatística descritiva dos parâmetros Cor, CLA e OC/MON para AB, ECL e ALF.....	30
<b>Tabela 6.</b> Estatística descritiva dos parâmetros Turbidez, Cor-A, ST e SST da ALF minuto a minuto.....	32
<b>Tabela 7.</b> Matriz de correlação entre os parâmetros Turbidez, Cor-A, ST e SST da ALF.....	34
<b>Tabela 8.</b> Parâmetros usuais de projeto de adensadores por gravidade e resultados obtidos.....	43
<b>Tabela 9.</b> Parâmetros de projeto de adensadores por gravidade e resultados do novo reator.....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>AB</b>	Água Bruta
<b>ALF</b>	Água de Lavagem de Filtros
<b>ALF MIX</b>	Água de Lavagem de Filtros Composta
<b>ANOVA</b>	Análise de Variância
<b>CC</b>	Ciclo Completo
<b>CLA</b>	Clorofila a
<b>Cor-A</b>	Cor Aparente
<b>CV</b>	Coeficiente de Variação
<b>ECL</b>	Efluente Clarificado da Lagoa de Sedimentação
<b>ETA</b>	Estação de Tratamento de Água
<b>FD</b>	Filtração Direta
<b>GRH</b>	Gestão de Recursos Hídricos
<b>OC/MON</b>	Oxigênio Consumido por Matéria Orgânica Natural
<b>PAC23</b>	Cloreto de Poli Alumínio com 23% de Alumina ( $Al_2O_3$ )
<b>Q<sub>ECL</sub></b>	Vazão de ECL efluente à Lagoa de Sedimentação
<b>Q<sub>LF</sub></b>	Vazão de ALF afluyente à Lagoa de Sedimentação
<b>RH</b>	Recursos Hídricos
<b>SAA</b>	Sistema de Abastecimento de Água
<b>SST</b>	Sólidos Suspensos Totais
<b>ST</b>	Sólidos Totais
<b>TAS</b>	Taxa de Aplicação Superficial
<b>TDH</b>	Tempo de Detenção Hidráulica
<b>TFS</b>	Taxa de Fluxo de Sólidos

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1. LOCAL DO ESTUDO</b> .....	<b>16</b>
2.1.1. Dados operacionais, Pré-oxidação e Coagulação .....	16
2.1.2. Floculação e Decantação .....	17
2.1.3. Filtração descendente em areia .....	18
2.1.4. Tratamento de resíduos.....	20
<b>2.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3. COLETA DE AMOSTRAS E ANÁLISES LABORATORIAIS</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4. COLETA DO LODO ADENSADO</b> .....	<b>26</b>
<b>3. RESULTADOS</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1. CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2. CARACTERIZAÇÃO QUANTITATIVA</b> .....	<b>36</b>
3.2.1. Produção estimada de lodo.....	40
3.2.2. Análise do lodo adensado .....	41
3.2.3. Proposta de tecnologia alternativa .....	43
<b>4. CONCLUSÕES</b> .....	<b>45</b>
<b>5. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>47</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos (GRH), em escala mundial, ainda demanda por práticas cada vez mais eficazes e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes no tratamento de efluentes e resíduos gerados em sistemas de tratamento de esgoto e de água, de modo que a conseqüente carga de poluentes gere o menor impacto possível na degradação dos corpos hídricos que serão, eventualmente, utilizados para o consumo humano.

Em se tratando dos sistemas de abastecimento de água (SAA), o ciclo é iniciado pela captação de água bruta dos mananciais (com graus variados de degradação), passando por diversos processos de tratamento até que sua potabilidade seja garantida. Nesse contexto, percebe-se que, à medida que a qualidade da água bruta decai, mais complexos e, portanto, dispendiosos se mostram os níveis de tratamento necessários para que a água tratada atinja os parâmetros de potabilidade.

Qualquer tecnologia de tratamento de água resulta na geração de algum tipo de resíduo. Mesmo considerando a otimização dos processos e operações envolvidos e a utilização das tecnologias mais adequadas para tratar cada tipo de água bruta, a quantidade de resíduos gerados na etapa de tratamento tem se mostrado um efeito direto da ineficácia da GRH, e por conseqüência, do decaimento na qualidade da água bruta.

No século passado, desde a década de 40, estudos vêm sendo realizados sobre a caracterização dos resíduos gerados em estações de tratamento de água (ETA) (FABER, 1969; LIN; GREEN, 1987). Isso indica que em países mais desenvolvidos, a visão acerca de qualidade da água e disponibilidade hídrica, considerando a geração de resíduos nos processos de tratamento, é mais avançada e preventiva quando comparado ao cenário brasileiro, tendo em vista que à época dos referidos estudos a disponibilidade de recursos hídricos não se mostrava um fator limitante para a sociedade, quando comparado ao cenário atual.

O lançamento dos resíduos de ETA no ambiente, sem tratamento prévio, embora ilegal (BRASIL, 2010), ainda se apresenta, em estudos recentes (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013), como prática comum no Brasil. Quando descartados em rios e mares, além do crítico desperdício de água e energia, tais resíduos

contribuem para a sua degradação devido à alta concentração de substâncias orgânicas e inorgânicas.

A água de lavagem dos filtros (ALF) e o lodo dos decantadores e flotores, representam geralmente entre 1 a 10% da vazão operacional da ETA (RAJ et al., 2008; PEREIRA et al., 2016). No caso de ETA de filtração direta (FD), as impurezas presentes na água bruta, após processo de coagulação, são retidas nos filtros e posteriormente descartadas por ocasião do processo de lavagem dos mesmos. A quantidade de resíduo gerada em ETA de FD tende a ser menor, quando comparada com a produzida em ETA de CC e em ambos os casos há relação intrínseca da geração de resíduos com a qualidade da água bruta (BOURGEOIS; WALSH; GAGNON, 2004; VERRELLI, 2008; AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016).

O manejo adequado dos resíduos de ETA, principalmente da ALF, inclui a separação dos sólidos da fase líquida. Esta é geralmente recirculada na própria ETA (WALSH et al., 2008), de modo que não seja desperdiçada. No Brasil, algumas ETA já apresentam em suas instalações operacionais uma etapa de recirculação da água de lavagem dos filtros (DI BERNARDO et al., 2012). No RN, apenas as ETA Pau dos Ferros, Extremoz, Maxaranguape e Assu possuem a referida etapa em seu fluxo operacional. Em regiões de clima semiárido, onde o balanço hídrico ao longo do ano costuma ser negativo, havendo maior demanda do que disponibilidade hídrica, a importância em se praticar o reuso aumenta consideravelmente.

Quando a água natural apresenta baixa turbidez, verifica-se uma menor concentração de sólidos suspensos e sedimentáveis e o mecanismo da coagulação passa a atuar nas partículas coloidais existentes, otimizando o processo de filtração direta e realçando a importância de se recircular a ALF após clarificação (MCCORMICK; PORTER; WALSH, 2010; ZHOU et al., 2012).

No entanto, o reaproveitamento da ALF sem tratamento pode vir a comprometer a qualidade da água tratada, devido à maior concentração de patógenos em relação à água bruta, como cistos e oocistos de protozoários, principalmente *Giardia* e *Cryptosporidium parvum* (GOTTFRIED et al., 2008; MCCORMICK; PORTER; WALSH, 2010). Por outro lado, o procedimento pode otimizar os processos de coagulação, floculação e conseqüentemente a separação dos sólidos da fase líquida, seja por decantação, filtração ou flotação, aumentando a eficiência do

tratamento, como mostram Suman, Singh e Sulekh (2012) e Bourgeois, Walsh e Gagnon (2004), gerando dessa forma uma água tratada de melhor qualidade. A ALF possui em sua composição, resíduos do coagulante na forma de partículas desestabilizadas, que podem auxiliar na coagulação de partículas em suspensão na água bruta quando promovida a recirculação da ALF, configurando-se como uma das potenciais vantagens do processo (GOTTFRIED et al., 2008).

Os coagulantes à base de alumínio são largamente utilizados desde os anos 80 (LIN; GREEN, 1987). Estudos demonstram que os resíduos à base de alumínio possuem elevada umidade (97 a 99,5%) e baixo teor de sólidos, demonstrando o potencial de clarificação da ALF. No entanto, considerando a necessidade de caracterização e do devido tratamento dos resíduos gerados em ETA antes da recirculação ou disposição final, a clarificação da ALF se configura como etapa essencial de tratamento, em especial quando há necessidade de redução da turbidez da água bruta para os padrões determinados pela legislação (BRASIL, 2017b).

No que tange a escolha da tecnologia de tratamento, Faber e Nardozi (1972) identificaram que fatores hidráulicos, ambientais e características dos resíduos gerados influenciam diretamente na elaboração do projeto e na definição da tecnologia a ser adotada, tais como taxa de sedimentação dos sólidos do lodo, quantidade do lodo gerado, frequência de retirada do lodo, área requerida, características do efluente clarificado e do lodo desidratado, além de equipamentos e tecnologias disponíveis. Richter (2001) afirma que lagoas de sedimentação configuram-se como o principal método não mecânico de tratamento do lodo gerado em ETA, juntamente com os leitos de secagem.

A adoção de lagoas de sedimentação, para tratamento de resíduos gerados em ETA, tem por objetivos clarificar o afluente antes da recirculação e adensar os sólidos sedimentáveis presentes no lodo de descarte para posterior desidratação e disposição final (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). O uso de lagoas visando a clarificação da ALF previamente à recirculação tem se mostrado uma tecnologia eficiente, pois apresenta boa remoção de turbidez (BOURGEOIS; WALSH; GAGNON, 2004) e também se revela como solução tecnicamente viável, especialmente em climas tropicais, onde a radiação solar é intensa, promovendo a evaporação de parte da água residuária e atuando como bactericida nas camadas mais superficiais. Apesar de existirem soluções técnicas distintas que apresentem melhores índices de

adensamento ou maior eficiência no tratamento de resíduos gerados em ETA (RICHTER, 2001), a opção por lagoa traz vantagens quando se dispõe de condições topográficas e climáticas favoráveis e disponibilidade de área, pois apresenta baixos custos de implantação, operação e manutenção (OLINGER, 2002). Um dos riscos potenciais associado ao uso de lagoas de sedimentação está na proliferação de algas e cianobactérias, devido à alta insolação e presença de nutrientes como nitrogênio e fósforo. Esses microrganismos podem representar riscos à saúde humana quando presentes em altas concentrações e dependendo da espécie podem produzir toxinas, o que se traduz por alterações de odor, sabor e no estímulo à presença de subprodutos da desinfecção na água potável, como trihalometanos (MCCORMICK; PORTER; WALSH, 2010; VENEU et al., 2015). Em vista do potencial risco sanitário existente quando se trata da presença de algas e cianobactérias em água para consumo humano, novas pesquisas acerca da relação entre a concentração desses microrganismos e o risco à saúde humana envolvido se mostram essenciais para o complemento do presente trabalho.

Apesar de exibir vantagens que justificam o uso de lagoas de sedimentação como etapa de tratamento de resíduos gerados em ETA, a tecnologia ainda demanda estudos mais aprofundados, uma vez que tem sido pouco estudada ou avaliada (USEPA, 2002; AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016). Uma das formas de ampliar o conhecimento e domínio tecnológico dos processos envolvidos está na caracterização dos resíduos gerados por ETA que fazem uso de lagoas de sedimentação como tecnologia de tratamento, visando comparar os dados obtidos com os até então apresentados pela literatura, bem como identificar parâmetros que apresentem correlação entre si.

Além disso, é importante que sejam avaliadas, em conjunto com os estudos de caracterização dos resíduos em escalas distintas, alternativas de reuso de constituintes presentes no lodo adensado, fase de resíduos não recirculada. O destino mais usual para o lodo, quando existe sistema ou processo de tratabilidade para o mesmo, é a desidratação seguida de disposição final em aterros sanitários (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016; HIDALGO et al., 2016). Conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), esse tipo de disposição final do lodo apesar de estar previsto em lei, não se revela como alternativa sustentável; outras alternativas mais sustentáveis vêm sendo utilizadas para o aproveitamento de percentual da fase

sólida do lodo como a produção de materiais como blocos de vedação para a construção civil (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016) ou ainda o aproveitamento dos nutrientes contidos no lodo, porém essa última apresenta restrições e condições específicas para que se torne viável. Além dessas, a recuperação do coagulante tem sido amplamente estudada nos últimos anos (KYNCL, 2008; EVUTI; LAWAL, 2011; NAIR; AHAMMED, 2014; KEELEY et al., 2016).

Pesquisas têm demonstrado que maiores concentrações de residuais de coagulante são encontradas no lodo de descarte em comparação às concentrações no efluente clarificado (VERRELLI, 2008; ZHOU et al., 2012), uma vez que o coagulante age na aglutinação das impurezas, formando flocos, que por sua vez são adensados formando o lodo.

O objetivo geral da presente pesquisa é caracterizar qualitativa e quantitativamente os resíduos gerados em ETA de filtração direta em escala real. Como objetivos específicos, o estudo avaliou a eficiência de uma lagoa de sedimentação como tecnologia de tratamento de resíduos, apresentando como contraponto uma proposta de tecnologia alternativa e, ainda nesse contexto, buscando avaliar as características do lodo adensado e o potencial de recirculação da ALF.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Local do estudo**

O estudo foi realizado na ETA Extremoz (RN) que se localiza a cerca de 20 km do centro de Natal (coordenadas UTM 25M 247204 m Leste e 9366615 m Sul). Gerida pela Companhia de Águas e Esgotos do RN (CAERN), a ETA operava, durante o período de estudo (outubro de 2017 a maio de 2018), com uma vazão afluyente de água bruta em torno de 670 L/s (34% acima da vazão de projeto 500 L/s).

#### *2.1.1. Dados operacionais, Pré-oxidação e Coagulação*

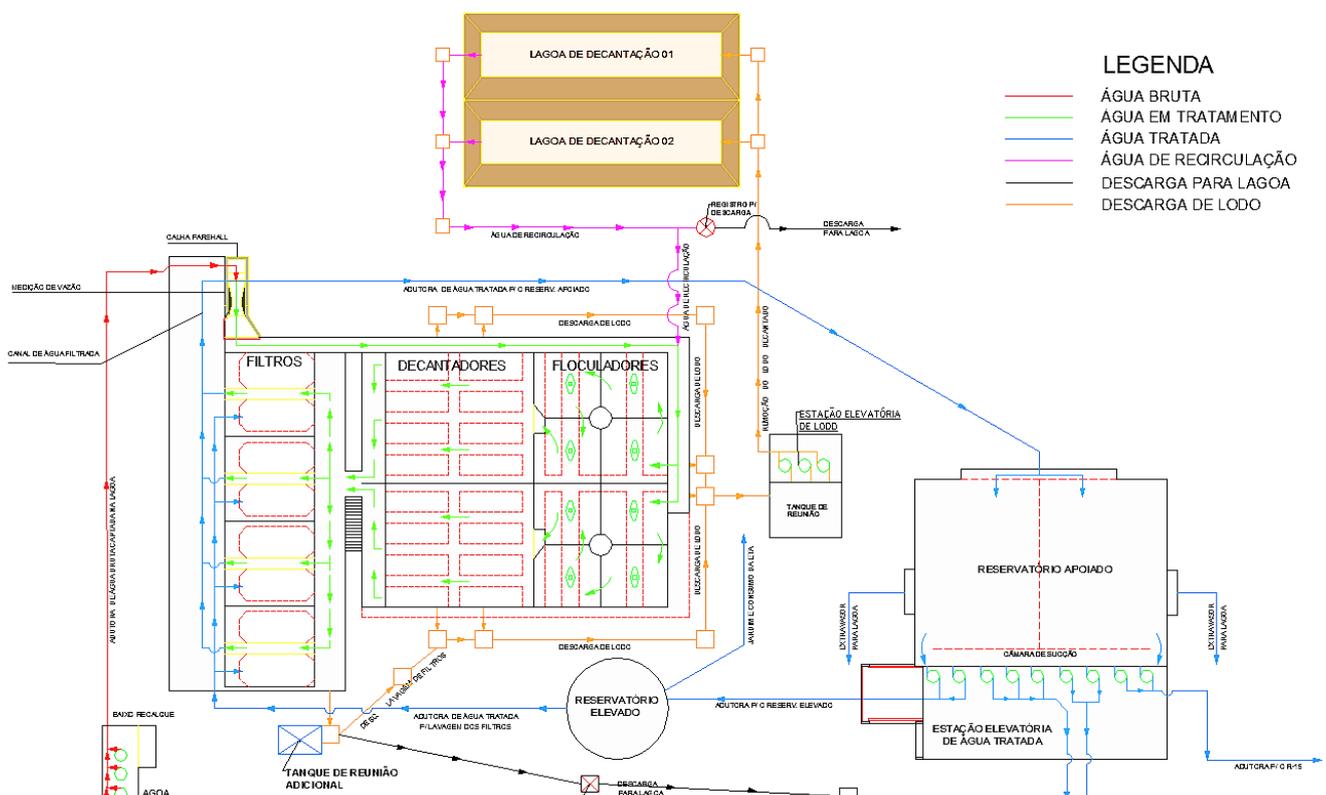
O tratamento é iniciado pela etapa de pré-oxidação, realizada no canal de montante à calha Parshall, com a aplicação inicial de cloro gasoso em uma dose aproximada de 1 mg/L. A vazão operacional de 670 L/s é medida ao passar pela calha Parshall, onde ocorre o ressalto hidráulico, após o qual se percebe um aumento de turbulência. Em virtude do regime hidráulico turbulento, adequado à operação de

mistura rápida, é realizado o processo de coagulação com a adição do coagulante hidróxido de alumínio líquido (23% em massa do composto alumina  $Al_2O_3$ ), comercialmente conhecido como PAC23, em uma dose estimada de 1 mg/L, após análises laboratoriais terem demonstrado que a formação de flocos na ETA variando-se a dose do coagulante entre 1 e 10 mg/L era equivalente.

### 2.1.2. Floculação e Decantação

A água segue o fluxo de tratamento ao passar por dois flocladores com 4 câmaras cada, seguindo para dois decantadores de fluxo vertical e então chegar aos filtros. Ressalta-se que desde o ano de 2001, as unidades de floculação e decantação não estão sendo operadas, pois embora tenha sido projetada para operar como ETA de ciclo completo (Figura 1), as características da água bruta, em especial a baixa turbidez, têm sido preponderantes para que a ETA venha sendo operada como de filtração direta. Tal comportamento operacional adveio da dificuldade de formação de flocos suficientemente grandes e densos nos flocladores, de modo a sedimentarem devidamente nos decantadores. Dessa forma, os pequenos flocos formados vêm sendo retidos nos filtros, caracterizando um ciclo de filtração direta em linha.

Figura 1. Fluxograma da ETA Extremoz



Fonte: adaptado de Freitas (2016)

A Figura 1 ilustra o fluxograma da ETA (detalhado no Anexo A) onde é possível perceber os fluxos de água bruta, água em processos de tratamento, água recirculada, água tratada, ALF + lodo de decantador (descarga de lodo).

### 2.1.3. Filtração descendente em areia

O processo de filtração na ETA é realizado por quatro filtros rápidos descendentes (Figura 2) com meio filtrante de areia quartzosa em três camadas que perfazem 60 cm de altura, como ilustra e detalha a Tabela 1.

**Figura 2.** Vista superior dos filtros da ETA Extremoz.



**Tabela 1.** Composição granulométrica das camadas de material filtrante.

Estratificação vertical	Espessura da camada	$\phi$ efetivo	$\phi$ mínimo	$\phi$ máximo
<b>Topo (10)</b>	30 cm	1,0 mm	0,5 mm	1,42 mm
<b>Intermediária (9)</b>	15 cm	1,5 mm	0,84 mm	1,5 mm
<b>Base (8)</b>	15 cm	2,4 mm	1,5 mm	3,2 mm

**Fonte:** CAERN (2014).

Na base do filtro, funcionando como camadas suporte, são dispostas sete camadas de pedregulho que perfazem 45 cm de forma tal que as camadas superiores apresentam granulometria decrescente (7-6-5), do topo ao centro e as inferiores apresentam granulometria crescente (3-2-1) do centro à base, com a camada, cujo material apresenta menor granulometria, disposta na posição central, conforme se observa na Tabela 2. O resumo de toda a estratificação no interior de cada filtro, desde

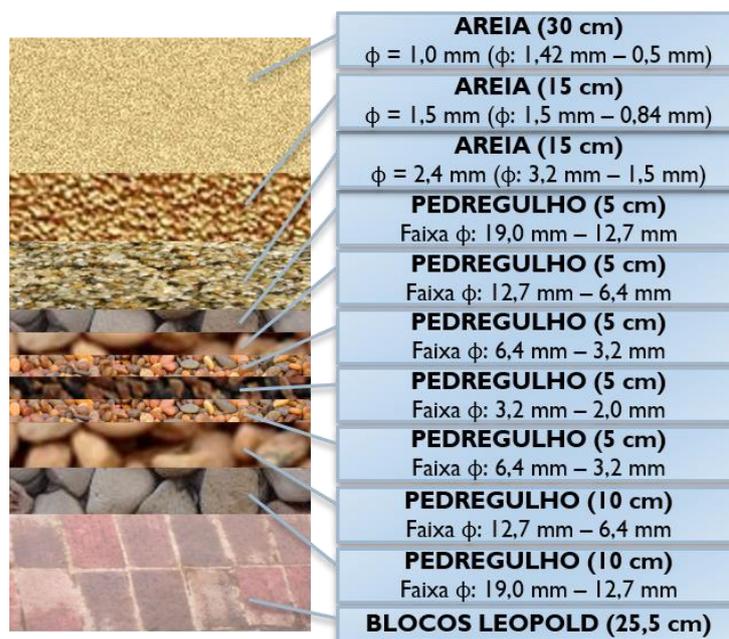
as camadas superiores de material filtrante até as camadas suporte na base é ilustrado na Figura 3.

**Tabela 2.** Composição granulométrica das camadas suporte dos filtros.

Estratificação vertical	Espessura da camada	$\phi$ mínimo	$\phi$ máximo
(7)	5 cm	12,7 mm	19,0 mm
(6)	5 cm	6,4 mm	12,7 mm
(5)	5 cm	3,2 mm	6,4 mm
(4)	<b>5 cm</b>	<b>2,0 mm</b>	<b>3,2 mm</b>
(3)	5 cm	3,2 mm	6,4 mm
(2)	10 cm	6,4 mm	12,7 mm
(1)	10 cm	12,7 mm	19,0 mm

Fonte: CAERN (2014).

**Figura 3.** Estratificação interna de cada filtro da ETA.



Fonte: CAERN (2014).

As características granulométricas do material filtrante e da camada suporte são fundamentais para o entendimento das características qualitativas da ALF, a partir da relação entre o tamanho do floco formado e a composição intersticial do material filtrante.

Após a filtração, a água tratada é enviada para um reservatório apoiado de 1500 m<sup>3</sup> que a distribui para o consumo e também para o reservatório elevado de lavagem dos filtros (RLF) com capacidade de 350 m<sup>3</sup>.

Os filtros eram operados (durante o período do estudo) segundo uma carreira de filtração de 24 horas. Nesse contexto, a retrolavagem dos filtros era realizada a cada 6 horas (intercalando-se os filtros) utilizando-se água tratada advinda do RLF por gravidade através de válvulas semi-automatizadas acionadas durante o procedimento. Com duração de 5 minutos, estimava-se até então que a lavagem consumiria entre 1 a 1,5% da água tratada na ETA. Esses números se traduzem em uma vazão de lavagem de 650 L/s e um volume de água consumido de 200 m<sup>3</sup> (NG, 2017) a cada procedimento. Como parte da caracterização quantitativa proposta nos objetivos da pesquisa, as vazões envolvidas no processo de lavagem dos filtros foram medidas (e estão expostas na seção de resultados), visando comparar e eventualmente legitimar os resultados de trabalhos anteriores com os dados obtidos neste estudo.

A ALF segue para um tanque de reunião, sendo então encaminhados para a estação elevatória de lodo, que por sua vez recalca a ALF para a entrada das lagoas de sedimentação (ver Figura 1). O efluente clarificado da lagoa retorna para a ETA por gravidade junto à entrada dos floculadores e dessa forma é recirculada a ALF tratada, misturada à água bruta pré-oxidada e coagulada (Figura 4).

**Figura 4.** Linha de recirculação da ALF tratada (ECL).



#### 2.1.4. Tratamento de resíduos

O sistema de tratamento de resíduos existente na ETA é composto por duas lagoas de clarificação de ALF, das quais apenas uma se encontra em funcionamento

desde o início da operação da ETA, em 1992. O projeto das lagoas foi idealizado prevendo-se apenas a contribuição de descargas de lodo de decantadores, o que não se verificou na prática em virtude das características naturais da água bruta já mencionadas. À época, a ALF clarificada era encaminhada diretamente para o manancial. Em meados de 2011 foi instalada na ETA a linha de recirculação do efluente clarificado da lagoa de sedimentação (ECL). É bem provável que o projeto da lagoa de sedimentação tenha sido superdimensionado, pois além de não haver formação de flocos sedimentáveis na água coagulada, a quantidade de sólidos presente no resíduo gerado com a lavagem dos filtros (ALF) se apresenta de forma tal que desde o início da operação da ETA até os dias atuais, nunca houve necessidade de dragagem do lodo de fundo da lagoa de sedimentação, mesmo após a implantação da linha de recirculação do ECL. Tal característica qualitativa do resíduo gerado é ressaltada e justificada na seção resultados.

O terreno no qual a ETA foi construída, como se pode perceber na Figura 5, favorece o uso de lagoas de sedimentação como etapa de tratamento de resíduos, uma vez que há disponibilidade de área.

**Figura 5.** Imagem aérea da ETA Extremoz e Lagoas de sedimentação.



**Fonte:** Google (imagem de 2018).

Outro ponto de destaque em favor da opção por lagoas como tecnologia de tratamento relaciona-se com o clima da região, com temperaturas elevadas devido à alta incidência solar e, por consequência, altas taxas de evaporação na maior parte do ano.

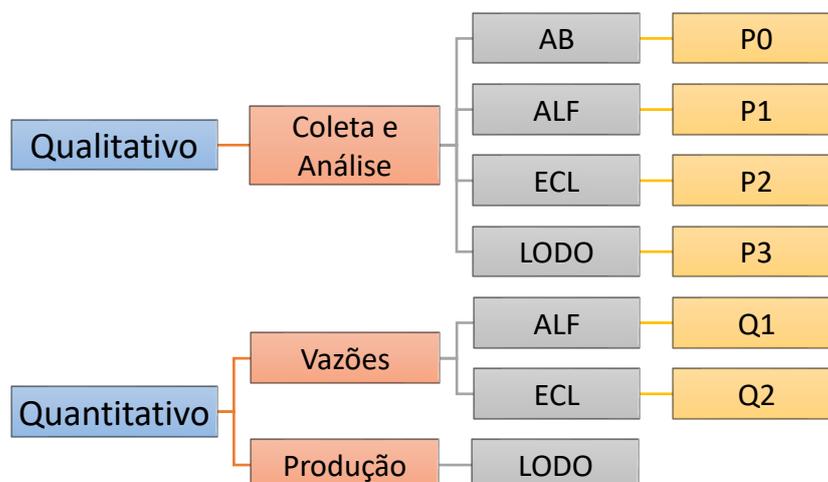
A lagoa de sedimentação apresenta relação comprimento:largura em torno de 4:1, indicando um fluxo pistão da ALF, o que confere maior eficiência ao processo de clarificação e redução da carga orgânica afluente de resíduos (Di Bernardo et al., 2012). O tempo de detenção hidráulica (TDH) na lagoa foi estimado em 7 dias e também foi aferido na etapa de caracterização quantitativa dos resíduos na seção resultados. Nenhum tipo de polímero ou coagulante têm sido utilizado especificamente na etapa de clarificação na lagoa. Segundo USEPA (2002), o uso de polímeros em lagoas de sedimentação é uma prática comum quando se necessita de um maior potencial de clarificação no efluente. A decisão pela não aplicação de polímero, entretanto, é justificada e compreendida com mais propriedade na seção resultados.

Importante ressaltar que os dados de vazões que alimentam os sistemas de tratamento e recirculação dos resíduos gerados e de consumo de água para lavagem dos filtros na ETA foram estimativas fornecidas pela CAERN ou apresentadas em outros trabalhos (SILVA, 2016; FREITAS, 2017; NG, 2017). Dessa forma, devido ao caráter científico da pesquisa, fez-se necessário aferir as vazões que possuem correlação com a geração de resíduos.

## 2.2. Delineamento Experimental

Com base no objetivo geral da pesquisa e nas condições operacionais da ETA em escala real apresentadas, o delineamento experimental da pesquisa prevê a caracterização dos resíduos gerados na ETA, conforme o organograma da Figura 6.

**Figura 6.** Avaliação quali-quantitativa dos resíduos gerados na ETA Extremoz.



**LEGENDA:**

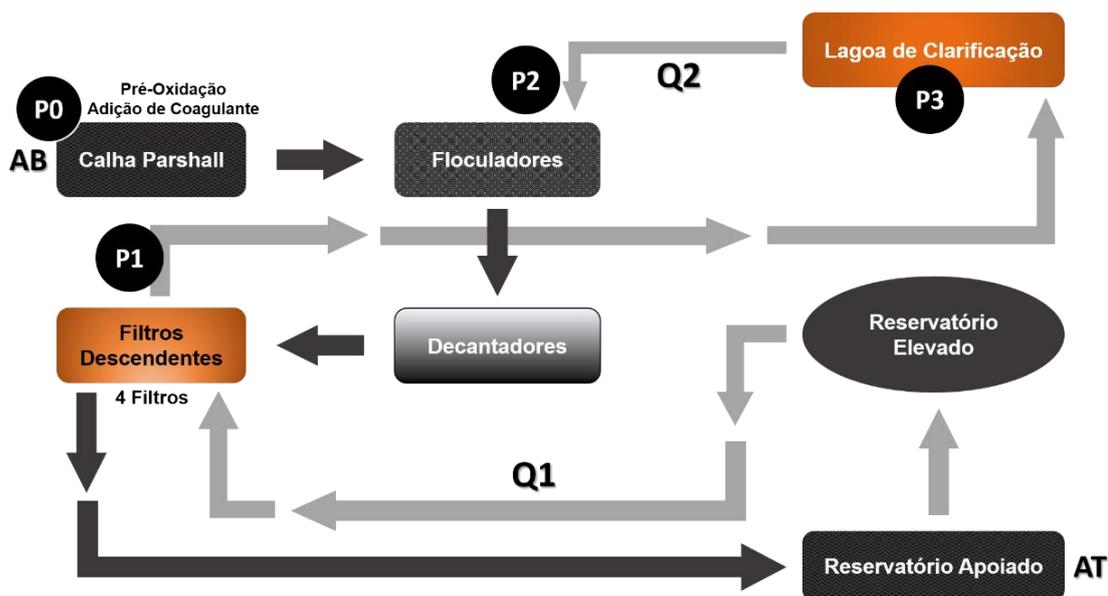
- |     |                               |                |  |
|-----|-------------------------------|----------------|--|
| AB  | Água Bruta                    | LODO           | Lodo de fundo da lagoa de sedimentação |
| ALF | Água de lavagem dos filtros   | P <sub>N</sub> | Ponto de coleta                        |
| ECL | Efluente clarificado da lagoa | Q <sub>N</sub> | Vazão medida                           |

A primeira fase dos experimentos compreendeu a caracterização de resíduos gerados na ETA e o fluxograma que ilustra os fluxos e pontos de interesse está representado pela Figura 7. Visando a caracterização qualitativa inicial foram coletadas amostras de AB (P0), de ALF (P1 - calha de coleta de água de lavagem do filtro) e de ECL (P2 - tubulação de recirculação da ALF na entrada dos flocladores).

Na fase final da caracterização qualitativa foram coletadas amostras pontuais de lodo adensado em P3 (Figura 7 - detalhado no Apêndice A), visando medir as concentrações de metais presentes no lodo (alumínio e ferro) bem como avaliar o volume de lodo adensado existente na lagoa e seu respectivo potencial de adensamento quando comparado à ALF não adensada.

Para a caracterização quantitativa dos resíduos foram verificadas as vazões que envolvem o processo de lavagem dos filtros em dois fluxos específicos: Q1 (vazão de AT advinda do reservatório elevado que alimenta por gravidade cada filtro durante o processo de retrolavagem) e Q2 (vazão de ECL medida em P2). A estimativa de produção de lodo foi realizada quantificando-se os sólidos sedimentáveis, através de ensaios de sedimentação utilizando cones Imhoff em bancada, aliando esses resultados com os resultados de SST. Todos os pontos e vazões de interesse são ilustrados no fluxograma da Figura 7.

**Figura 7.** Pontos de medição de vazão e coleta de amostras.



A vazão Q1 foi verificada junto à CAERN através de dados do hidrômetro instalado em um medidor de vazão proporcional em trecho reto de tubo. Com os dados

de Q1 associado à frequência de lavagem dos filtros foi possível determinar o real TDH da lagoa de sedimentação.

A ALF foi coletada em P1 (Figura 7), no interior do filtro durante processo de lavagem, com o auxílio de uma bomba submersível de 300 W de potência que opera com vazões entre 450 a 1450 L/h, a depender da altura manométrica. O volume de ALF retirado do filtro durante o processo de lavagem era armazenado temporariamente em um reservatório de 40 litros, sendo a vazão da bomba submersível controlada, de modo que não ultrapasse os 475 L/h. O uso da bomba para captar ALF diretamente da calha de lavagem no interior do filtro permitiu que fossem obtidas amostras compostas contínuas e não discretizadas da ALF durante o período de lavagem (5 minutos) e ao mesmo tempo que se retirassem alíquotas representativas reais de cada minuto (desde o instante inicial, totalizando 6 alíquotas), sem mistura e acumulação com instantes anteriores como ocorreria na coleta em um tanque de reunião à jusante da descarga de ALF. A coleta de amostras minuto a minuto visou avaliar a curva de sedimentabilidade da ALF.

### 2.3. Coleta de amostras e análises laboratoriais

Para a caracterização qualitativa dos resíduos, foram realizadas análises dos principais parâmetros físico-químicos (Tabela 3).

**Tabela 3.** Parâmetros de monitoramento, pontos de coleta e frequência de amostragem.

Parâmetro	Unid	Método	Protocolo	Ponto de Coleta	Frequência
Absorbância 254 nm	cm <sup>-1</sup>	Espectrofotométrico	5610 B (APHA; AWWA; WEF, 2012)	P1 e P2	Semanal
Sólidos Totais (ST)	mg/L	Gravimétrico	2540 B (APHA; AWWA; WEF, 2012)	P1, P2 e P3	Semanal / Única (P3)
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg/L	Fotométrico	2540 D (APHA; AWWA; WEF, 2012)	P1 e P2	Semanal
Sólidos Sedimentáveis (SS)	ml/L	Volumétrico	2540 F (APHA; AWWA; WEF, 2012)	P1 e P3	Semanal / Única (P3)
pH	--	Potenciométrico	4500 B (APHA; AWWA; WEF, 2012)	P1 e P2	Semanal
Turbidez	uT	Nefelométrico	2130 B (APHA; AWWA; WEF, 2012)	P1 e P2	Semanal
Cor Aparente	uH	Colorimétrico	2120 B (APHA; AWWA; WEF, 2012)	P1 e P2	Semanal
Cor Real	uH	Colorimétrico	2120 B (APHA; AWWA; WEF, 2012)	P1 e P2	Semanal
Clorofila a	µg/l	Espectrofotométrico	10200 H (APHA; AWWA; WEF, 2012)	P2	Semanal
Oxigênio Consumido (MON/OC)	mg O <sub>2</sub> /l	Titulométrico	NBR 10739	P1 e P2	Semanal
Alumínio e Ferro	mg/L	Espectrofotométrico de absorção atômica	3113 B (APHA; AWWA; WEF, 2012)	P3	Única

As amostras foram coletadas na calha de coleta de ALF de cada um dos quatro filtros durante processo de lavagem (Figura 7 – P1), no ponto de descarga do ECL (linha de recirculação) na entrada dos flocladores da ETA (Figura 7 - P2) e na lagoa de sedimentação (Figura 7 – P3).

Foram previstas coletas pontuais semanais durante quatro meses para os pontos P1 e P2. As variáveis analisadas e respectivos métodos analíticos estão relacionados na Tabela 3 juntamente com os pontos e a frequência de coleta. Em P1, a cada dia de coleta, eram coletadas 7 amostras de ALF sendo 6 amostras de 2 L coletadas uma a uma, minuto a minuto, desde o instante inicial (minuto 0) até o término da lavagem (minuto 5) e 1 amostra composta da ALF, coletada no reservatório de 40 L após o término do período de retrolavagem. Em P2 foi coletada uma amostra de 2 L a cada dia de coleta. No P3 foram coletadas 03 amostras de lodo adensado em 03 pontos representativos, próximos ao centro do reservatório, e armazenadas em frascos de 5 L.

O parâmetro *clorofila a* foi analisado nas amostras do ponto P2 (Figuras 6 e 7), uma vez que na lagoa de sedimentação verifica-se a presença de macrófitas e a provável ocorrência de fitoplâncton devido à concentração de nutrientes e radiação solar (Figura 8), podendo apresentar concentração de algas no ECL, vindo a comprometer a qualidade da água tratada. A determinação de sólidos sedimentáveis não foi realizada em P2 devido à sedimentação promovida na lagoa. Os sólidos no efluente clarificado foram quantificados nas análises de SST e ST.

**Figura 8.** Presença de macrófitas na entrada da lagoa.

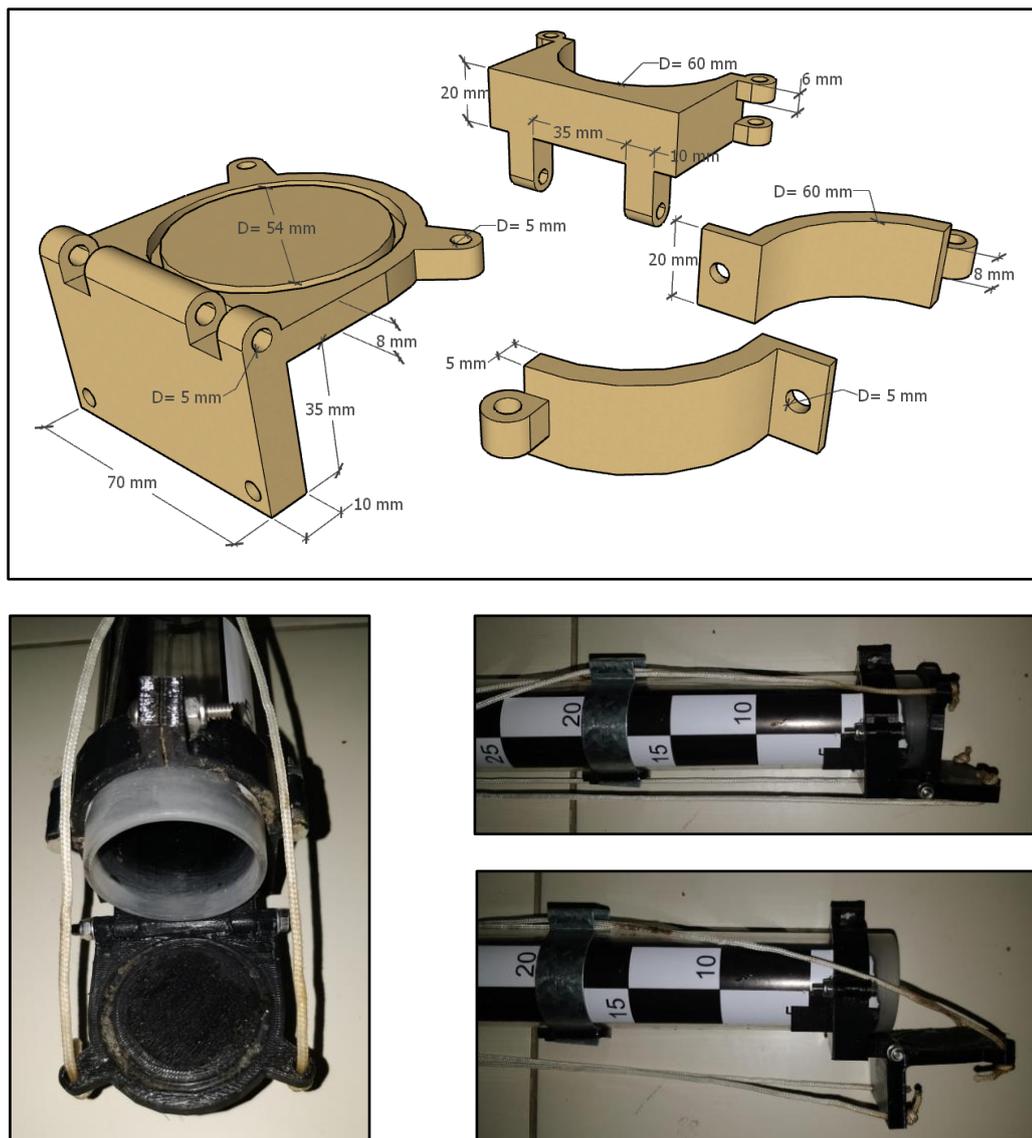


As análises físico-químicas foram realizadas no mesmo dia de coleta em sua maioria, restando para o dia seguinte as que possibilitavam devida preservação e acondicionamento. Todas as análises seguiram os padrões de procedimentos descritos em APHA, AWWA e WEF (2012).

#### 2.4. Coleta do lodo adensado

O potencial de adensamento e o volume real de lodo adensado só poderiam ser determinados através de coletas de amostras *in loco* na lagoa de sedimentação para a avaliação da altura da camada adensada e conseqüente volume correspondente no interior do reservatório. A partir dessa demanda, foi projetada e desenvolvida uma ferramenta para tal finalidade. A Figura 9 ilustra componentes do coletor em fase de projeto e em sua versão final.

Figura 9. Detalhes do coletor de lodo desenvolvido durante a pesquisa.



O coletor cilíndrico transparente graduado em acrílico possui em uma das extremidades o dispositivo de vedação articulado, fabricado por meio da tecnologia de impressão 3D em ABS preto de alta densidade, por empresa sediada no IMD/UFRN. O diâmetro interno do coletor é de 54 mm e sua altura útil 2000 mm, o que gera uma capacidade volumétrica de armazenamento de 4,58 L. A localização exata dos 3 (três) pontos de coleta do lodo adensado, representados por P3 na Figura 7, é detalhada no Apêndice A. Os pontos de coleta foram definidos com base na acessibilidade do interior da lagoa e levando em consideração uma variação espacial tanto nos sentidos do comprimento e da largura, partindo da margem em direção ao centro do reservatório.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Caracterização Qualitativa**

As características do resíduo gerado (ALF) são bastante peculiares e seus parâmetros físico-químicos apresentam elevada variabilidade. Após a composição de todos os resultados das análises laboratoriais do grupo amostral composto por AB, ECL e ALF MIX, foi realizada uma avaliação inicial através da estatística descritiva dos dados.

Os valores médios de turbidez do ECL se mostram consideravelmente menores do que a média de turbidez da ALF MIX, inclusive quando comparados à média de turbidez para a AB (Tabela 4), o que se permite inferir que a tecnologia de tratamento de resíduos da ETA Extremoz apresenta além de alta redução de turbidez (85,1 % de 53,0 para 7,9 uT) a garantia de que a turbidez da AB não será comprometida (14,6 uT para a AB e 7,9 uT para o ECL) pelo processo de recirculação do ECL, ainda mais se considerarmos relação entre a vazão operacional da ETA e a vazão de recirculação (a ser analisada detalhadamente na seção sobre caracterização quantitativa).

Ao se considerar a forte correlação existente entre turbidez e concentração de sólidos em determinada amostra de água natural, tratada ou residuária, nota-se que AB e ECL são equivalentes (168,5 mg/L na AB e 174,0 mg/L no ECL de ST) quanto ao referido parâmetro, corroborando a análise primária da viabilidade de recirculação do ECL (Tabela 4).

**Tabela 4.** Estatística descritiva dos parâmetros Turbidez, ST e SST para AB, ECL e ALF MIX.

Parâmetros/ Amostras		AB	ECL	ALF MIX
TURBIDEZ (uT)	Média	<b>14,6</b>	<b>7,9</b>	<b>53,0</b>
	Desvio Padrão	4,9	2,7	20,1
	CV (%)	33,2	34,7	37,9
	Mediana	<b>14,4</b>	<b>7,4</b>	<b>51,9</b>
SÓLIDOS TOTAIS (mg/L)	Média	<b>168,5</b>	<b>174,0</b>	<b>234,8</b>
	Desvio Padrão	29,6	23,8	32,5
	CV (%)	17,6	13,7	13,8
	Mediana	<b>158,8</b>	<b>168,9</b>	<b>230,0</b>
SÓLIDOS SUSP TOT (mg/L)	Média	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>	<b>67,1</b>
	Desvio Padrão	2,9	3,3	24,8
	CV (%)	48,6	55,3	37,0
	Mediana	<b>6,0</b>	<b>4,0</b>	<b>60,3</b>

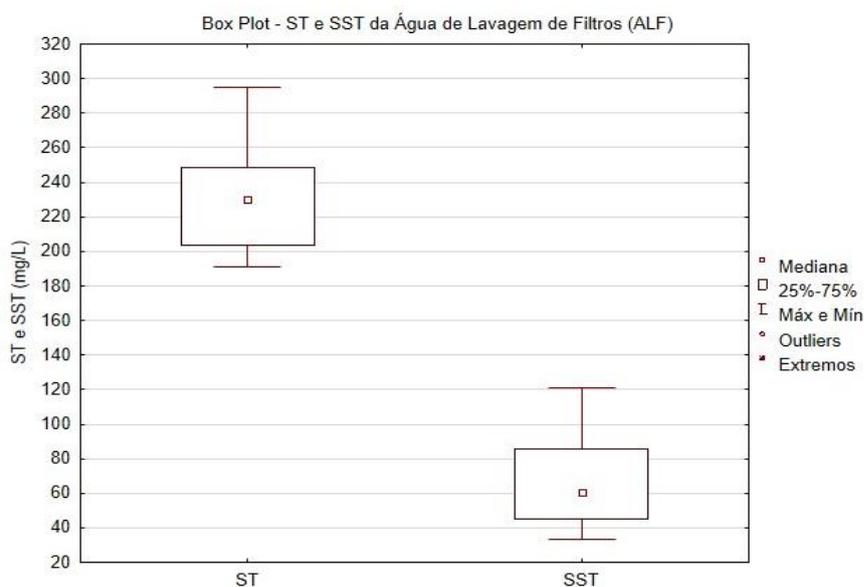
Na análise da variabilidade amostral, ainda no âmbito da estatística descritiva dos dados, é possível perceber que o Coeficiente de Variação (CV na Tabela 4), que se dá pela razão entre o desvio padrão e a média da amostra, pode ser considerado elevado para alguns parâmetros, tal como SST (CV de 55,3% para o ECL) ou ainda a Turbidez da ALF MIX (CV igual a 37,9 %). Tal fato, entretanto, pode ser justificado por alteração na qualidade da água bruta, oscilações climáticas ou ainda devido a questões operacionais da própria ETA, como perdas de carga não previstas associadas a variações na distribuição de vazão na entrada dos filtros (analisadas em detalhe na seção acerca da caracterização quantitativa).

USEPA (2002) e Richter (2001) destacam que resíduos de ETA de filtração direta que operam sob o uso de coagulantes à base de sais de alumínio, costumam apresentar acima de 60% da carga de sólidos de sua composição na parcela dos sedimentáveis, ou seja, os que vêm a formar camada de lodo adensado em bacias de sedimentação como a avaliada na presente pesquisa. O que os resultados de ST e SST demonstram para o cenário avaliado, no entanto, é que a ALF apresenta baixo teor de SST (67,1 mg/L – 28,5%) e, portanto, uma carga reduzida de SS. Além disso, a diferença entre ST e SST da AB (162,5 mg/L) se mantém em valores equivalentes na ALF MIX (167,7 mg/L), demonstrando que o aumento na carga de ST se deu majoritariamente na parcela de SST.

A Figura 10 demonstra as características do resíduo gerado quanto à carga de sólidos e expõe a lacuna (de sólidos dissolvidos - SD) que há entre a parcela de SST

e as concentrações de ST. Nesse aspecto, o elevado percentual de SD na ALF pode estar associado à presença de matéria orgânica. No entanto, uma avaliação dos compostos orgânicos presentes nos sólidos dissolvidos da ALF, apesar de apresentar grande importância do ponto de vista sanitário (devido ao risco potencial dos subprodutos da desinfecção, como os trihalometanos), demanda por estudos mais detalhados no âmbito da microbiologia, que destoariam do foco físico-químico que foi dado à caracterização qualitativa do presente estudo.

**Figura 10.** Box plot - ST e SST para as amostras de ALF



Com valores máximos de ST próximo aos 300 mg/L, mínimo em torno de 190 mg/L e uma mediana de 230 mg/L, a ALF pode ser considerada um resíduo com baixa carga de sólidos, principalmente quando considerada a parcela de 28,5% de SST com mediana de 60,3 mg/L, máximo além dos 120 mg/L e mínimo abaixo dos 40 mg/L.

Os resultados apresentados na Tabela 5 traduzem as análises realizadas apenas para as amostras de AB, ECL e ALF MIX, visando avaliar ainda que indiretamente a presença de matéria orgânica e fitoplâncton.

Inicialmente, percebe-se que o nível de oxigênio consumido pela matéria orgânica natural (OC/MON) sofre um aumento significativo entre a AB e a ALF MIX (de 5,6 para 11,9 mg/L, Tabela 5). Tal fato pode ser justificado pela oxidação ocorrida na ALF, uma vez que a retrolavagem dos filtros é realizada com AT, que possui cloro em sua composição. Por outro lado, a redução de OC/MON da ALF para o ECL (de 11,9 para 5,6 mg/L, Tabela 5), para níveis equivalentes aos da AB, indica a ocorrência e término das reações de oxidação no interior da lagoa de sedimentação e reforça os

benefícios sanitários em face da recirculação. Através da análise comparativa da cor verdadeira das amostras de AB (17,2 mg/L), ECL (18,1 mg/L) e ALF MIX (16,3 mg/L) é possível perceber valores que mesmo equivalentes, se mostram sutilmente superiores no ECL, indicando o que a análise de CLA viria confirmar em seguida.

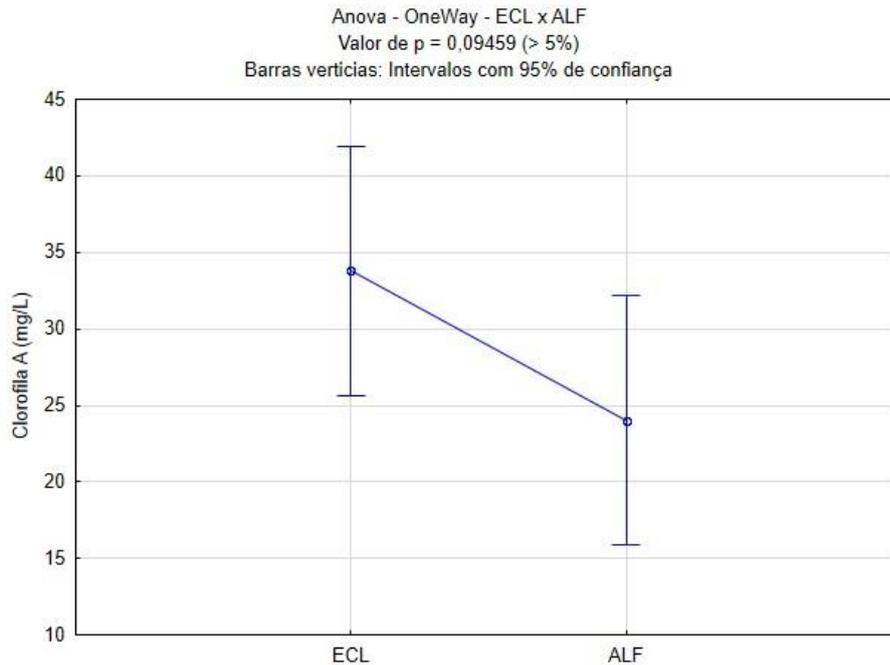
**Tabela 5.** Estatística descritiva dos parâmetros Cor, CLA e OC/MON para AB, ECL e ALF.

Parâmetros / Amostras		AB	ECL	ALF MIX
<b>COR VERDADEIRA (uH)</b>	Média	<b>17,2</b>	<b>18,1</b>	<b>16,3</b>
	Desvio Padrão	4,4	4,5	3,5
	CV (%)	25,6	24,9	21,9
	Mediana	<b>16,7</b>	<b>17,6</b>	<b>15,9</b>
<b>CLOROFILA A (µg/L)</b>	Média	<b>12,5</b>	<b>33,8</b>	<b>24,0</b>
	Desvio Padrão	5,0	17,2	15,8
	CV (%)	39,7	50,8	65,8
	Mediana	<b>12,3</b>	<b>30,9</b>	<b>20,0</b>
<b>OC/MON (mg/L)</b>	Média	<b>5,6</b>	<b>5,6</b>	<b>11,9</b>
	Desvio Padrão	0,7	1,1	2,5
	CV (%)	12,8	19,3	20,6
	Mediana	<b>5,6</b>	<b>5,4</b>	<b>11,1</b>

A análise inicial das amostras do ECL e ALF MIX (Tabela 5) acerca dos resultados do parâmetro CLA sugerem o desenvolvimento de fitoplâncton no interior da lagoa de sedimentação (CLA variou de 24,0 µg/L na ALF para 33,8 µg/L no ECL) devido à alta incidência de radiação solar e por se apresentar como um ecossistema lântico (SCHEFFER; VAN NES, 2007).

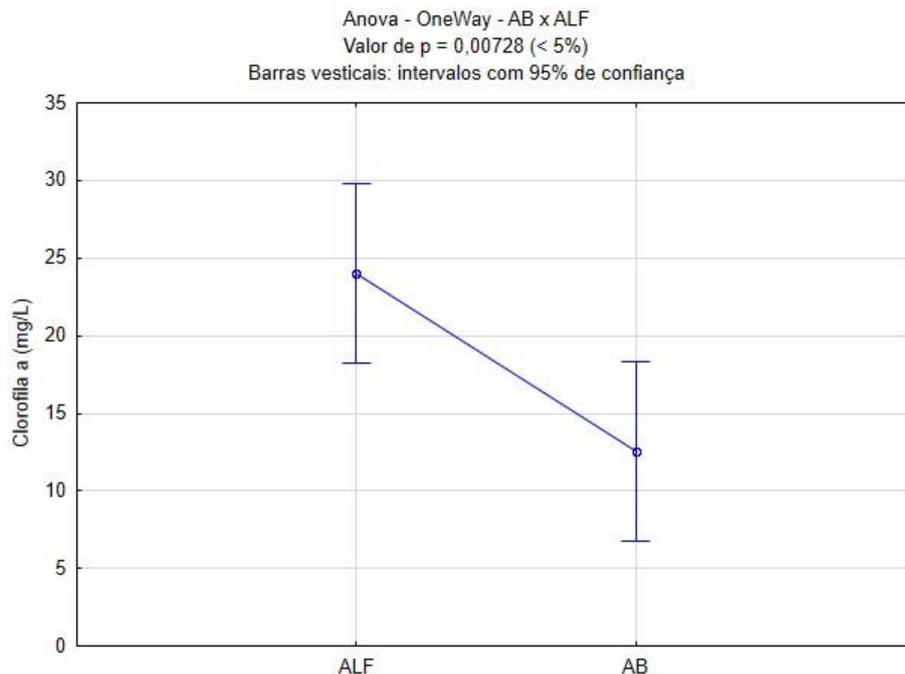
Para que fosse possível, entretanto, avaliar se entre as amostras afluente e efluente à lagoa de sedimentação havia significativo desenvolvimento de fitoplâncton com base nas concentrações de CLA, foi realizado um teste de ANOVA (Figura 11) entre as amostras de ALF e ECL, sob a ótica do parâmetro CLA. O resultado do teste demonstrou que as amostras são estatisticamente equivalentes para o parâmetro avaliado (valor de  $p > 5\%$ ) e que, portanto, apesar da expectativa contrária (CLA se eleva em média de 24,0 mg/L na ALF para 33,8 mg/L no ECL), o desenvolvimento de fitoplâncton no interior da lagoa de sedimentação não se revelou significativo. Ainda assim, havia suspeita de provável retenção de algas pelos filtros, o que dificultaria por sua vez a percepção do aumento real do parâmetro CLA nas amostras de ECL a partir da análise comparativa direta entre amostras de ALF e ECL.

**Figura 11.** Anova OneWay – Clorofila ‘a’ para as amostras de ECL e ALF



Em face do exposto, foram comparadas amostras de AB e ALF e o aumento das concentrações de CLA no interior dos filtros (em mais de 90% passando de AB – 12,5 mg/L – e a ALF – 24,0 mg/L – Tabela 5), quando realizada nova análise de variância, confirmou a expectativa, revelando um crescimento significativo de fitoplâncton no interior da ETA (potencializado pela recirculação do ECL), com base nas concentrações de CLA (Figura 12) uma vez que o valor de p foi inferior a 5%.

**Figura 12.** Anova OneWay – Clorofila ‘a’ para as amostras de ALF e AB



Em geral, Di Bernardo *et al.* (2011) já demonstravam através do estudo de 4 ETA (sendo 3 de ciclo completo e 1 de filtração direta ascendente) que as características dos resíduos variavam de acordo com o tipo de tecnologia de tratamento, tipo de lavagem, método de filtração e tipo de coagulante utilizado. No estudo, os autores relacionam resultados que demonstram uma turbidez da ALF composta variando entre 58 e 171 uT, enquanto que o SST atingiu números entre 59 e 313 mg/L. O que os autores por fim afirmam como uma das conclusões do estudo e que a presente pesquisa ratifica é que as características do resíduo gerado possuem de fato relação intrínseca com as características da AB, bem como com as variantes técnicas, tecnológicas e operacionais, como demonstrado anteriormente. Outra pesquisa recente (FREITAS, 2017), que avaliou amostras de AB e ECL da ETA de Extremoz, já revelava a alta variabilidade das características de AB e do ECL e os consequentes efeitos na composição da ALF.

Por fim, em termos de caracterização qualitativa, mostra-se imperativo realizar análise das características do resíduo gerado (ALF) durante o período de lavagem (minuto a minuto). A Tabela 6 traz os resultados dos parâmetros Turbidez, Cor Aparente, ST e SST para as amostras de ALF do instante inicial ao término da lavagem (minutos 0 a 5).

**Tabela 6.** Estatística descritiva dos parâmetros Turbidez, Cor-A, ST e SST da ALF minuto a minuto.

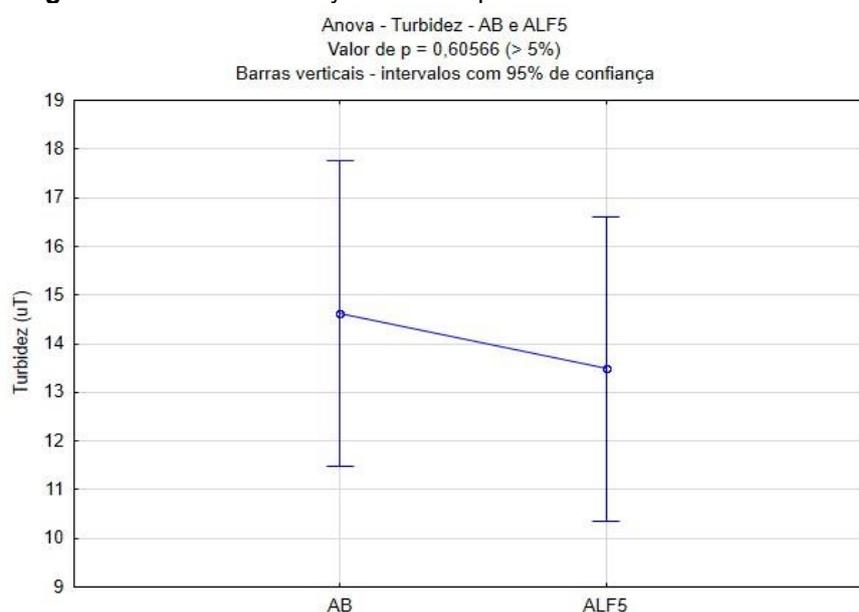
Parâmetros/ Amostras		ALF 0	ALF 1	ALF 2	ALF 3	ALF 4	ALF 5
TURBIDEZ (uT)	Média	4,3	177,6	62,3	29,4	20,0	13,5
	Desvio Padrão	1,1	74,5	25,9	16,6	9,5	7,6
	CV (%)	24,4	42,0	41,5	56,6	47,4	56,1
	Mediana	4,1	151,8	67,5	30,5	20,2	13,2
COR APARENTE (uH)	Média	36,3	722,9	319,9	163,2	118,5	80,7
	Desvio Padrão	8,7	234,1	123,4	78,9	53,0	45,2
	CV (%)	24,0	32,4	38,6	48,3	44,7	56,1
	Mediana	34,2	730,0	336,0	152,0	105,0	69,8
SÓLIDOS TOTAIS (mg/L)	Média	162,8	372,3	254,8	207,3	199,7	188,2
	Desvio Padrão	17,4	79,0	38,2	30,1	21,1	20,1
	CV (%)	10,7	21,2	15,0	14,5	10,6	10,7
	Mediana	158,8	359,4	260,0	205,0	200,0	193,8
SÓLIDOS SUSP TOT (mg/L)	Média	5,3	197,6	78,2	36,7	26,0	16,8
	Desvio Padrão	2,8	71,5	34,5	21,1	14,2	10,6
	CV (%)	52,7	36,2	44,2	57,4	54,8	63,2
	Mediana	4,0	185,4	79,0	40,0	25,0	16,0

Os dados da análise temporal expostos na Tabela 6 se mostram relevantes em virtude do caráter da pesquisa e de modo que juntamente com a caracterização quantitativa possam nortear conclusões acerca do tempo de lavagem dos filtros.

Os níveis de turbidez da água pré-oxidada e coagulada revelam a eficiência do tratamento de água até o ponto que antecede a filtração, uma vez que no instante inicial da lavagem (no tempo zero) a ALF0 equivale à parcela de água tratada que reside sobre os filtros. Comparando os resultados de turbidez da AB com a da ALF0, houve uma redução de 70% (14,6 para 4,3 uT).

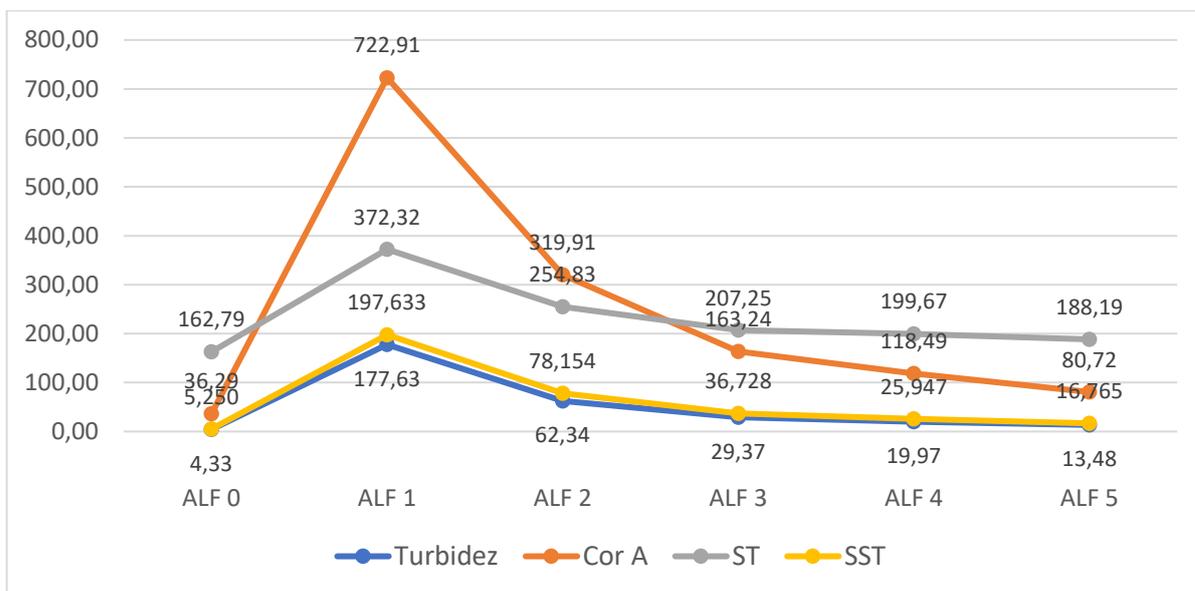
No entanto, merece destaque o ajuste operacional do tempo de lavagem do filtro. A turbidez apresentada pela ALF no minuto final (ALF5) se equivale à da AB (13,5 e 14,6 uT respectivamente) ratificada pelo resultado da ANOVA exposto na Figura 13, o que revela um bom ajuste de tempo de lavagem à luz do parâmetro Turbidez, embora Cor aparente e SST da ALF5 ainda apresentem valores bem superiores aos encontrados na AB (80,7 uH e 16,8 mg/L respectivamente).

**Figura 13.** Anova OneWay - Turbidez para as amostras de AB e ALF5.



Se por um lado aumentar o tempo de lavagem melhoraria a qualidade e potencial de recirculação da ALF, por outro se revelaria medida incoerente do ponto de vista ambiental (por haver maior gasto de AT para tal finalidade), considerando que a ALF já apresenta baixo teor de SST e uma qualidade boa quando comparada com outras ETA de mesma configuração tecnológica (USEPA, 2002). A Figura 14 traz as curvas temporais da ALF à luz dos parâmetros Turbidez, Cor Aparente, ST e SST.

**Figura 14.** Comparativo entre parâmetros para análise temporal da ALF.



Ao avaliarmos graficamente as curvas características da ALF, geradas a partir dos dados da Tabela 6, na mesma análise temporal, é possível perceber a proporcionalidade que há entre elas e a existência de um ápice evidente para os 4 parâmetros (Figura 14).

O ponto de máximo das curvas para a amostra de ALF1 revela primeiramente que a ALF tem sua maior concentração de impurezas em torno do primeiro minuto de lavagem. O comportamento das curvas permite inferir que há viabilidade em se reduzir o tempo de lavagem entre 20 e 40% do tempo, passando para um período entre 3 a 4 minutos. A repercussão da economia de AT gerada com a medida pode ser avaliada na seção acerca de caracterização quantitativa. Por fim, nota-se uma forte tendência de correlação entre os parâmetros, analisada a seguir na Tabela 7.

**Tabela 7.** Matriz de correlação entre os parâmetros Turbidez, Cor-A, ST e SST da ALF.

ALF	Turbidez	Cor A	ST	SST
Turbidez	1	0,996813	0,993583	<b>0,999024</b>
Cor A	0,996813	1	0,998144	<b>0,999348</b>
ST	0,993583	0,998144	1	0,996947
SST	<b>0,999024</b>	<b>0,999348</b>	0,996947	1

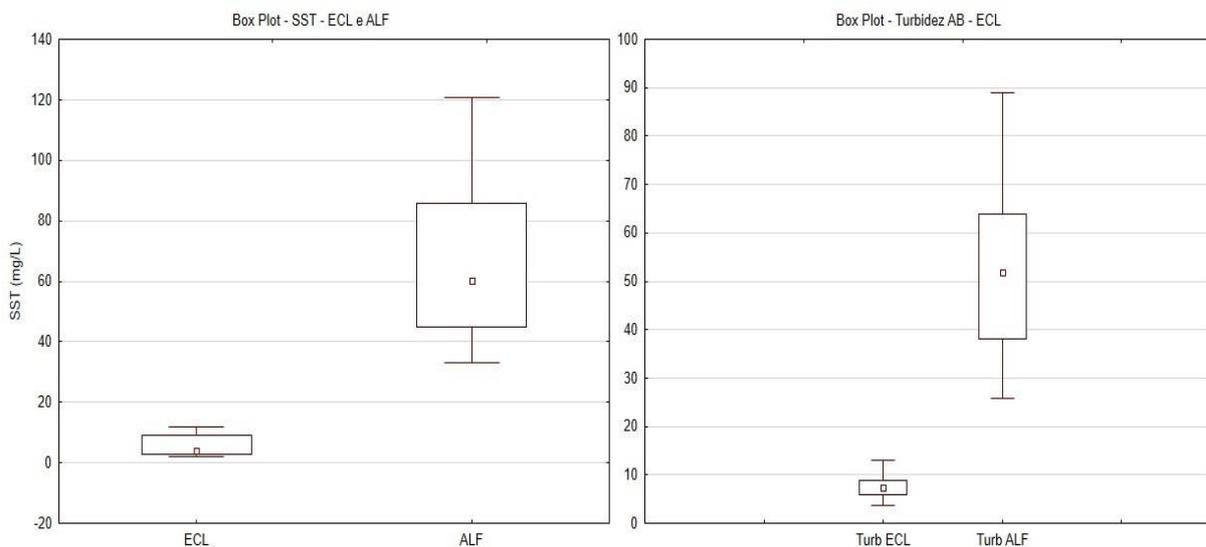
A matriz de correlação foi construída utilizando-se de todos os resultados das análises dos referidos parâmetros para as amostras de ALF0 a ALF5. A correlação entre todos os parâmetros é positiva e supera os 99%. Isso significa que à medida

que uma variável aumenta, as demais também se elevam e o mesmo princípio se aplica para uma variação negativa: quando uma variável decai, as demais também são reduzidas.

Ao contrário do que revelam os estudos de Di Bernardo *et al.* (2017), o ápice dos parâmetros Turbidez, ST e SST para a ALF se apresenta de forma atenuada, o que evidencia e confirma o baixo teor de sólidos na ALF já constatado.

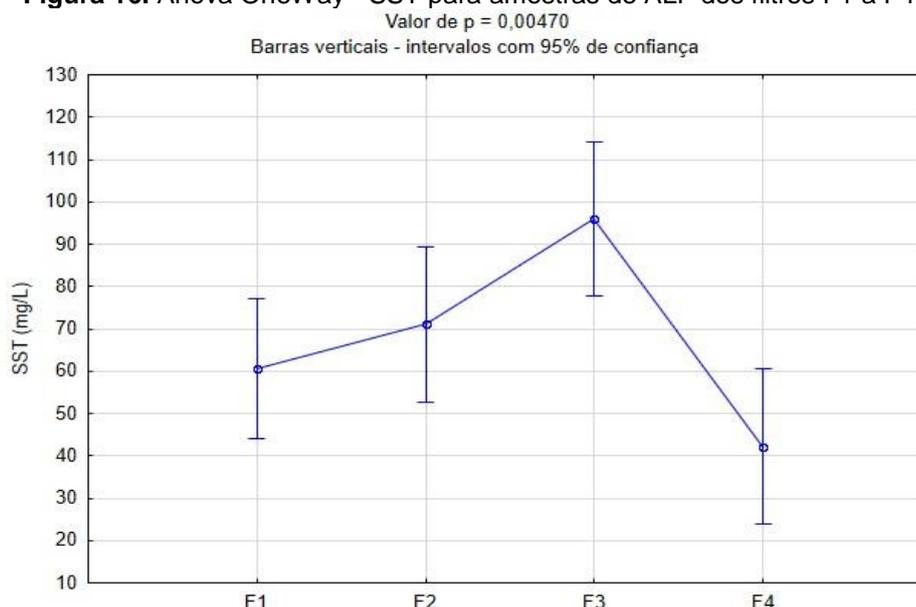
Em se tratando de eficiência da lagoa de sedimentação, é possível destacar o potencial de clarificação através das concentrações de SST e turbidez das amostras de ALF e ECL. Esses resultados, expostos graficamente na Figura 15, demonstram que apesar da variação da ALF no tocante ao teor de sólidos, devido aos aspectos já mencionados, a lagoa tem apresentado não apenas uma alta eficiência na redução de SST (> 93%) variando em média de 60,3 mg/L na ALF para 4 mg/L no ECL; e de Turbidez (> 85%) de 51,9 uT na ALF para 7,4 uT no ECL; como um alto potencial de equalização de ambos os parâmetros no ECL. A maior vantagem do uso de lagoas de sedimentação com a configuração de fluxo pistonado em termos hidráulicos, reside na constatação da eficiência na redução dos parâmetros que mais possuem relação direta com o processo de clarificação.

**Figura 15.** Box Plot - SST (mg/L) e Turbidez (uT) das amostras de ALF x ECL.



Outro aspecto associado à variabilidade das características dos resíduos está na operação dos filtros da ETA. A Figura 16 traz o resultado na ANOVA, que ilustra o comportamento de cada filtro sob a ótica do parâmetro SST.

**Figura 16.** Anova OneWay - SST para amostras de ALF dos filtros F1 a F4.



Considerando que a ETA tenha sido projetada para que as condições hidráulicas na operação de cada filtro fossem as mesmas, foi possível perceber, através da separação dos resultados de SST por filtro (Figura 16), que eles geram resíduos com teor de sólidos distintos entre si, em especial os filtros F3 e F4 (96,0 e 42,3 mg/L, respectivamente), que poderiam ser considerados o de maior e menor eficiência, respectivamente, tendo em vista que os resultados de SST na ALF representam indiretamente a capacidade de retenção de sólidos em suspensão pelos filtros. Estatisticamente, os filtros F1 e F2 apresentam resultados equivalentes de SST (60,6 e 71,1 mg/L, respectivamente).

O que ocorre na prática, no entanto, é que mesmo de maneira indesejável e imprevista, há uma interrupção parcial do fluxo de água coagulada após a distribuição afluyente aos filtros (o que gera perda de carga considerável) identificada entre os filtros 3 e 4 de modo que parte da vazão que deveria ser encaminhada para o filtro 4, retorna e/ou é encaminhada para o filtro 3, sobrecarregando o mesmo. Dessa forma, os resultados da caracterização qualitativa, quando avaliada sob a ótica de cada filtro, revelam tal oscilação, que por sua vez, se apresenta como um dos fatores a justificar o elevado CV já citado anteriormente.

### 3.2. Caracterização Quantitativa

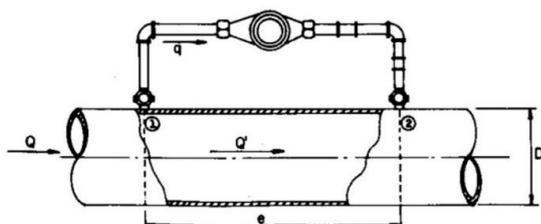
Os resultados da caracterização quantitativa, possibilitaram relacionar a carga de resíduos gerada com outros parâmetros, tais como vazões de entrada e saída da

lagoa de sedimentação, correlacionando os dados com o índice potencial médio de evaporação incidente sobre o reator e com a geração de lodo.

A avaliação do dimensionamento, operação e eficiência da lagoa de sedimentação como tecnologia de tratamento de resíduos se demonstrou viável através dos dados combinados das caracterizações qualitativa e quantitativa (em especial da ALF e do lodo adensado) bem como a proposição de alternativas à tecnologia de tratamento dos resíduos da ETA objeto de estudo.

A coleta de dados diários durante 22 dias do mês de janeiro de 2018, fornecidos pela CAERN (ETA Extremoz), durante o período de estudo dos volumes anterior e posterior à lavagem de filtro registrados pelo hidrômetro do medidor de vazão proporcional (Figura 17) revelou um consumo médio de 0,03 m<sup>3</sup> de AT advinda do RE durante os 5 minutos de lavagem, que resulta em vazão  $q$  de 0,1 L/s.

**Figura 17.** Medidor de vazão proporcional.



**Fonte:** Hueb e Kappaz (1981).

Para calcular a equivalência entre as vazões  $Q'$  (que alimenta o filtro durante a lavagem) e " $q$ " (que atravessa o hidrômetro) foram considerados parâmetros dimensionais das tubulações e singularidades relativas ao medidor de vazão proporcional em trecho de tubo reto, também detalhados por Hueb e Kappaz (1981). Constatou-se que a vazão  $Q_{LF}$  que alimenta os filtros em fluxo ascendente equivale à vazão  $q$  conforme a Equação 1:

$$Q_{LF} = q \times 5150 \rightarrow Q_{LF} = 0,1 \text{ L/s} \times 5150 \rightarrow Q_{LF} = 515 \text{ L/s} \quad (1)$$

A partir da vazão  $Q_{LF}$  e considerando os 5 minutos de lavagem, foi possível estimar o consumo aproximado de 155 m<sup>3</sup> por lavagem. Dessa forma, tendo em vista que vinham sendo realizadas uma média de 4 lavagens de filtro por dia (a cada 6 horas) no período de estudo, a vazão afluyente de ALF na lagoa de sedimentação pode ser estimada em 620 m<sup>3</sup>/dia (7,2 L/s). Os referidos resultados contrapõem os dados até então estimados em 200 m<sup>3</sup> pela própria CAERN e por estudos anteriores (NG, 2017).

O volume de AT consumido durante a lavagem de um dos filtros (155 m<sup>3</sup>) pode ser reduzido através da redução do tempo de lavagem como já proposto inicialmente na seção sobre caracterização qualitativa, quando analisada as curvas temporais da ALF. Levantamento feito por Brasil (2018) aponta para um consumo médio per capita de 115 L/hab.dia para o Rio Grande do Norte nos anos de 2014, 2015 e 2016. Com base nos referidos dados, é possível deduzir que para uma redução em 20% no tempo de lavagem (totalizando 4 minutos), a economia de 31 m<sup>3</sup> por lavagem geraria um excedente diário de 124 m<sup>3</sup> a mais de AT para ser distribuída e por consequência um salto estimado no atendimento em 1078 pessoas a mais. Se a economia for de 40% (lavagem do filtro por 3 minutos), a economia de AT e o excedente no atendimento também dobrariam, para 248 m<sup>3</sup>/d e 2156 pessoas, respectivamente.

Em se tratando da vazão Q<sub>ECL</sub>, constatou-se após cerca de 20 medições por volumetria simples em 5 dias distintos, durante o período de estudo, que a vazão média estimada do efluente clarificado da lagoa de sedimentação é de 4,6 L/s, o que equivale a um volume diário de 397 m<sup>3</sup> e representa 0,69% da vazão operacional da ETA (670 L/s). Em posse de tais resultados e associando-os aos resultados de Turbidez e ST da caracterização qualitativa, é possível afirmar (em virtude da pouca representatividade da vazão de recirculação - Q<sub>ECL</sub>) que a Q<sub>LF</sub> poderia ser recirculada integralmente (em curto prazo devido principalmente à presença e acúmulo de metais no lodo adensado como pode ser visto na seção 3.2.2), caso houvesse necessidade de manutenção da lagoa de sedimentação para dragagem de lodo de fundo ou finalidades outras, uma vez que a piora em tais parâmetros (< 3,2 %) não causaria danos significativos à qualidade da água bruta coagulada e pré-oxidada, como pode ser notado pelos resultados das simulações de alteração na Turbidez expostas nas Equações 2 (recirculação pós tratamento) e 3 (recirculação de ALF bruta).

$$Turb_{AB+ECL} = \frac{Q_{AB} \times Turb_{AB} + Q_{ECL} \times Turb_{ECL}}{Q_{AB} + Q_{ECL}} = \frac{670 \times 14,6 + 4,6 \times 7,9}{674,6} = 14,55 \text{ uT} \quad (2)$$

$$Turb_{AB+ALF} = \frac{Q_{AB} \times Turb_{AB} + Q_{LF} \times Turb_{ALF}}{Q_{AB} + Q_{LF}} = \frac{670 \times 14,6 + 7,2 \times 53,0}{677,2} = 15,01 \text{ uT} \quad (3)$$

Considerando as vazões Q<sub>LF</sub> e Q<sub>ECL</sub>, é possível inferir que dos 620 m<sup>3</sup> de ALF que afluem à lagoa diariamente, 397 m<sup>3</sup> (64%) retornam efetivamente à ETA através da linha de recirculação. Isso equivale a uma taxa de evaporação e/ou infiltração da ordem de 37%, já considerando o aumento percentual de 1% afluente (que representa

em média 10,6 m<sup>3</sup>/dia) relativo à precipitação para a região que foi de 1342 mm para a região de Extremoz (BRASIL, 2017a).

Os resultados do balanço hídrico no interior da lagoa de sedimentação se mostram condizentes com o estudo de Lopes et al. (2015), que afirma que mesmo para um cenário mais extremo, como o do clima semiárido podem ser encontrados valores de até 60% de taxa de evaporação, mesmo que tais valores sejam estritamente dependentes da curva cota-área-volume do reservatório. Assim sendo, é possível concluir que, para o clima tropical úmido (As) da região de estudo, os valores encontrados são aceitáveis e factíveis.

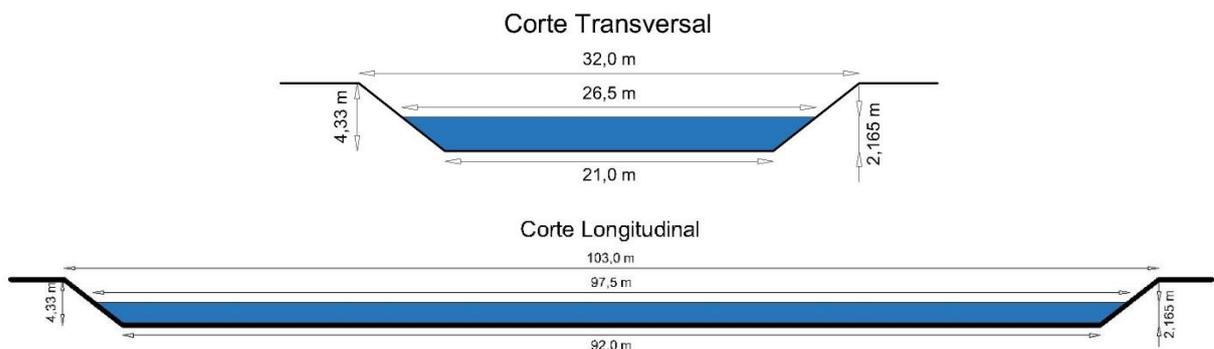
Para determinar o TDH da lagoa, foram admitidos os dados de vazão afluente Q<sub>LF</sub>, precipitação média, taxa de evaporação média e vazão efluente Q<sub>ECL</sub>. A Figura 18 ilustra as dimensões da lagoa de sedimentação que foram aferidas *in loco*.

A lagoa se apresenta em uma configuração tronco-piramidal. Dessa forma, o cálculo do volume operacional partiu da Equação 4:

$$Vol (m^3) = \frac{h}{3} \times (A + \sqrt{A \times a} + a) \quad (4)$$

h = profundidade (m)      A = área da superfície líquida (m<sup>2</sup>)      a = área da base/fundo (m<sup>2</sup>)

**Figura 18.** Cortes transversal e longitudinal da Lagoa de Sedimentação.



Com base na Equação 4, na Figura 16 e a partir das dimensões aferidas *in loco*, foi possível determinar a área da superfície líquida  $A = L \times C = 2583,75 \text{ m}^2$  a partir da largura útil (L) de 26,5 m e do comprimento útil (C) igual a 97,5 m. Além disso, quando a altura do nível d'água (h) equivale a 2,165 m (à meia altura) e considerando a área de fundo  $a = 1932 \text{ m}^2$ , é possível obter o volume útil da lagoa  $V = 4871,25 \text{ m}^3$  a partir da Equação 2. No entanto, na prática a lagoa opera em um nível um pouco abaixo da meia altura, com uma profundidade média de aproximadamente 1,80 m, refletindo um volume operacional de  $V_{\text{OPER}} = 3951,56 \text{ m}^3$ . O Apêndice B ilustra as

medições realizadas *in loco* através da vista superior e dos cortes transversal e longitudinal mais detalhados.

Tais números refletem um TDH equivalente a pouco menos de 6 dias e 9 horas, confirmando a estimativa de um TDH em torno de 7 dias, apesar dos ajustes necessários no  $V_{OPER}$  (abaixo do esperado), uma vez que dados de projeto resultariam em um volume operacional de 5548,37 m<sup>3</sup>. O TDH verificado também foi afetado pelo ajuste necessário na vazão afluyente  $Q_{ALF}$ , também um pouco menor quando comparamos com os resultados de vazão afluyente de estudo anterior de NG (2017).

Tendo como base ainda a configuração dimensional ilustrada na Figura 18 e em posse da Equação 4, foi possível obter a Equação 5 que representa a relação entre profundidade  $H$  (m) e área  $A$  (m<sup>2</sup>) correspondente na lagoa de sedimentação, através de regressão polinomial de ordem 2.

$$A (m^2) = 6,453H^2 + 287,07H + 1932 \quad (5)$$

A partir da associação entre as equações 2 e 3, é possível obter qualquer volume ( $V_N$ ) na lagoa a partir de uma determinada profundidade ( $H_N$ ), o que permite calcular eventuais volumes de lodo adensado, que serão determinados na seção de análise qualitativa do lodo.

Merece destaque o fato de a configuração da lagoa como reator de fluxo pistão acrescida ao elevado TDH poderem ser elencados como justificativas para a redução da turbidez a níveis abaixo dos encontrados na AB (14,4 uT), conforme analisado na caracterização qualitativa. A eficiência na redução da turbidez em mais de 85%, passando de 51,9 uT na ALF para 7,4 uT no ECL confirma a expectativa de alta eficiência da tecnologia de tratamento de resíduos para a redução do referido parâmetro.

### 3.2.1. Produção estimada de lodo

Os dados de SST e volume diário de ALF afluyente foram utilizados para estimar a produção de lodo no interior da lagoa de sedimentação. Os resultados de SST revelaram uma mediana em torno de 60 mg/L, mas em virtude dos valores máximos não *outliers* próximo de 120 mg/L, pode-se elevar a estimativa de SST para algo em torno de 70 mg/L, uma vez que a média ficou próxima a esse valor. Com a vazão afluyente de ALF estimada em 620 m<sup>3</sup>/d, tem-se, portanto, uma produção estimada de

lodo em torno de 43,4 kg/dia (base úmida). Os ensaios de sedimentabilidade em cone Imhoff revelaram para a ALF média de 3,7 ml/L de lodo decantado não adensado. Certamente, o volume de lodo adensado no interior do reator ao longo de mais de duas décadas de operação apresenta uma redução de volume superior a 90%, uma vez que sem o adensamento progressivo e conseqüente compactação, o volume de lodo decantado, com base no ensaio de sólidos sedimentáveis da ALF, seria de cerca de 16837 m<sup>3</sup>, o equivalente ao volume útil de mais de 3 lagoas de clarificação iguais à que existe atualmente em operação.

### 3.2.2. *Análise do lodo adensado*

Os resultados das análises do lodo confirmaram as expectativas em torno do percentual de sólidos, da presença de metais e do elevado potencial de adensamento que um material já “digerido” e mineralizado apresenta ao longo de mais de duas décadas (considerando o início da operação da ETA em 1992) de armazenamento sem dragagem ou desaguamento, quando comparamos suas características com as do resíduo bruto gerado (ALF).

Diversos estudos indicam que há uma tendência do lodo de ETA de filtração direta de se apresentar com característica essencialmente líquida (composição de sólidos entre 0,05 e 4%) quando em configurações que utilizam sais de alumínio como coagulante. O baixo percentual de sólidos da ALF apesar de revelar um elevado potencial de adensamento ao longo dos anos, justifica o fato de não ter havido necessidade de dragagem para desaguamento e disposição final do lodo adensado acumulado na base do reservatório, especialmente tomando-se como referência resultados de outros estudos (AWWA, 1999; Richter, 2001; USEPA, 2002) que apresentam características do lodo adensado de ETA de FD que têm como coagulante sais de alumínio.

Em face dos resultados obtidos e do cenário apresentado, percebe-se que o lodo adensado apresenta uma aparência esponjosa, assemelhando-se a argila ou barro suave (RICHTER, 2001). Além disso, ao combinarmos os resultados da análise de SS em cone Imhoff (190 ml/L) com os da análise de ST do lodo (9,674 g/L), resulta em uma densidade de aproximadamente 62,7 kg/m<sup>3</sup>, levando à conclusão de que o percentual de sólidos no lodo adensado (ao contrário do apresentado pela ALF) é de fato bastante elevado (em torno de 6,3%).

Dentre as vantagens do uso do coletor desenvolvido na pesquisa está no fato do mesmo ser transparente e graduado, possibilitando a verificação imediata da espessura da camada de lodo adensado na coluna de material sólido/líquido coletado. Um segundo ponto de destaque da ferramenta de coleta reside na preservação do volume coletado com o devido manuseio do dispositivo de vedação, permitindo manter as características quantitativas (além das qualitativas) do material coletado.

A amostra composta do lodo (adensado + coluna d'água), coletada de forma estratificada em coluna, possibilita, a partir de amostras discretizadas (em relação ao volume total do reservatório), a inferência dos resultados de uma porção representativa da lagoa de sedimentação para o reservatório como um todo em termos de concentrações de ST e metais. A análise da umidade da amostra composta (99,02%), por exemplo, refletiu o que se esperava de teor de sólidos (0,98%) presentes na amostra (entre 0,05 e 4%).

A profundidade de coleta atingida na porção central do reservatório, revelou uma espessura aproximada de 30 cm de lodo adensado e 150 cm de coluna d'água, totalizando 1,80 m de profundidade, conforme já constatado na caracterização quantitativa no que se refere ao volume e profundidade operacional do reservatório, corroborando os resultados até então apresentados. Pode-se concluir que, em posse das equações 2 e 3, o volume estimado de lodo adensado no interior do reservatório, considerando os 30 cm de espessura é de 592,56 m<sup>3</sup>.

As análises de ferro (Fe) e alumínio (Al) revelaram concentrações muito semelhantes entre ambos os metais, o que por um lado pode ser considerada uma surpresa, tendo em vista que a ETA utilizou, durante um bom tempo, o hidroxiclreto de polialumínio (PAC23) como coagulante no tratamento de água. Por outro lado, a elevada concentração de Fe pode estar associada à presença do elemento na água bruta, por reação da água com a parede da tubulação adutora (oxidação) ou ainda pelo uso de coagulante à base de ferro em algum período anterior ao uso dos coagulantes à base de alumínio. A amostra composta do lodo apresentou concentração de 476 mg/L de Fe enquanto que o Al foi encontrado na concentração de 612 mg/L. Tais números quando associados aos resultados de ST (0,98%), indicam uma proporção de 4,1 % de Fe e 4,6 % de Al, totalizando 8,7% de ambos os metais nos sólidos presentes no lodo. Vale destacar que com as referidas concentrações de Fe e Al, o presente lodo adensado não poderia ser encaminhado para disposição final

em aterro sanitário, após simples dragagem e desidratação, sem a devida descontaminação (BRASIL, 2010).

Dessa forma, para que a viabilidade da retirada do lodo adensado do interior da lagoa seja avaliada, tendo em vista a recuperação do coagulante e/ou dos metais com valor comercial, é possível estimar a quantidade de Fe e Al existente no interior do reator, a partir dos dados de densidade do lodo adensado ( $62,7 \text{ kg/m}^3$ ), do volume estimado do lodo adensado ( $592,6 \text{ m}^3$ ) e da proporção de Fe e Al encontradas. Considerando o referido levantamento, pode-se inferir que os 4,1 % de Fe no interior da lagoa de sedimentação equivalem a 1527,7 kg, enquanto que os 4,6 % de Al equivalem a 1702,5 kg.

### 3.2.3. Proposta de tecnologia alternativa

Tendo em vista a alta eficiência da tecnologia existente de adensamento de sólidos dos resíduos de ETA e em contrapartida seu evidente superdimensionamento em face das características da AB de baixa turbidez e baixo teor de SST, é possível que se adapte a tecnologia atual para adensadores de menor proporção, gerando uma economia de área destinada à tecnologia de tratamento de resíduos e uma contribuição sanitária alinhada ao controle de eventuais proliferações de algas e cianobactérias.

A Tabela 8 traz parâmetros que norteiam o projeto e dimensionamento dos adensadores por gravidade e que dependem de dados como volume diário de resíduos (em  $\text{m}^3/\text{dia}$ ), área do reator ( $\text{m}^2$ ), carga de SST ( $\text{kg}/\text{dia}$ ) e teor de SST (em percentual).

**Tabela 8.** Parâmetros usuais de projeto de adensadores por gravidade e resultados obtidos.

Resíduo/Coagulante	TAS ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ )	TFS (kg de SST/ $\text{m}^2.\text{dia}$ )	Teor de SST (%)
ETA que usam sal de alumínio como coagulante (sulfato de alumínio e PAC)	3,0 a 8,0	10 a 40	4 a 8
ETA Extremoz (PAC23) com produção de $620 \text{ m}^3/\text{d}$ de ALF com $70 \text{ mg}/\text{L}$ de SST Tratamento em UMA lagoa com $A = 2469,6 \text{ m}^2$ e $H = 1,8 \text{ m}$	0,251	0,018	0,007

LEGENDA: TAS - Taxa de Aplicação Superficial TFS - Taxa de Fluxo de Sólidos

Fonte: adaptado de AWWA (1999).

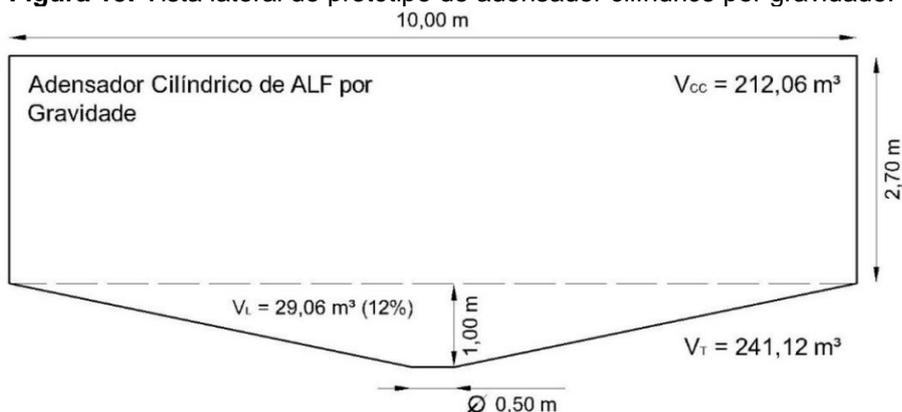
Os dados coletados na pesquisa comprovam o já indicado superdimensionamento da lagoa como adensador de lodo e clarificação de efluente

previamente à recirculação. A vazão de ALF (620 m<sup>3</sup>/dia) associado à área da lâmina líquida do reator (2469,6 m<sup>2</sup>) resulta em TAS = 0,251 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia. A concentração de SST média foi considerada em torno de 70 mg/L, que associada à vazão de ALF resulta em uma carga de 43,4 kg/dia. Associando-se a carga de SST à área do reator, obteve-se uma TFS de 0,018 kg de SST/m<sup>2</sup>.dia. Os valores baixos obtidos indicam não apenas um reator superdimensionado, como também demonstram uma ALF com teores de ST e SST abaixo da faixa esperada, apresentando valores médios da ordem de 0,007% de SST e 0,023% de ST (0,05 e 4% de ST – RICHTER, 2001).

A proposta para um adensador de menor volume, primeiramente, visa adequar os dados operacionais da ETA, juntamente com os resultados da caracterização qualitativa da ALF e do lodo adensado, aos parâmetros de projeto. Vale ressaltar a necessidade de análises complementares para um dimensionamento mais adequado, como por exemplo uma análise de velocidade de sedimentação em amostrador cilíndrico do tipo coluna, com o objetivo de ajustar a altura ótima do reator em escala real, a fim de proporcionar máxima eficiência de clarificação.

Após alguns cálculos e ajustes dimensionais, chegou-se à proposta inicial de um decantador cilíndrico com as seguintes dimensões internas: D = 10 m e H = 2,7 m, no compartimento cilíndrico de coleta do clarificado (CC), e d = 0,5 m e h = 1 m, na zona tronco-cônica de coleta e descarga de lodo, conforme ilustra a Figura 19.

**Figura 19.** Vista lateral do protótipo de adensador cilíndrico por gravidade.



O sugerido reator apresentaria um volume total (VT) de 241,12 m<sup>3</sup> (sendo 212,06 m<sup>3</sup> da câmara do clarificado) e operaria por batelada, com tempo de residência de 5,5 horas, previamente à recirculação do efluente clarificado e descarga do lodo para desidratação, renovando o interior do reator para receber nova carga de ALF no

instante da lavagem subsequente. O novo reator apresentaria os seguintes resultados na tabela dos parâmetros de projeto apresentada anteriormente (Tabela 9):

**Tabela 9.** Parâmetros de projeto de adensadores por gravidade e resultados do novo reator.

Resíduo/Coagulante	TAS (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia)	TFS (kg de SST/m <sup>2</sup> .dia)	Teor de SST (%)
ETA que usam sal de alumínio como coagulante (sulfato de alumínio e PAC)	3,0 a 8,0	10 a 40	4 a 8
ETA Extremoz (PAC23) com produção de 620 m <sup>3</sup> /d de ALF com 70 mg/L de SST Tratamento em decantador cilíndrico com D = 10, H = 2,7 m, d = 0,5 m e h = 1 m.	7,89	0,553	0,007

LEGENDA: TAS - Taxa de Aplicação Superficial TFS - Taxa de Fluxo de Sólidos

Fonte: adaptado de AWWA (1999).

Ao analisar o ajuste dos parâmetros de projeto entre as Tabelas 8 e 9, percebe-se que haveria ganhos de âmbito técnico e operacional com a proposta de tecnologia alternativa, no entanto, o baixo teor de SST que apresenta a ALF sugere que, desde que não haja restrições de área para que se mantenha a lagoa de sedimentação em operação, essa se revela opção viável já que a tendência de saturação e necessidade de dragagem de lodo é mínima, pela fluidez característica do próprio lodo adensado, diante de todos os dados e resultados apresentados.

#### 4. CONCLUSÕES

A caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos confirmou o superdimensionamento da lagoa de sedimentação, que por sua vez possui relação intrínseca com uma ALF que apresenta baixas concentrações de sólidos totais e em suspensão.

A análise temporal do resíduo gerado no que se refere à caracterização qualitativa permite concluir, em face da economia de AT gerada, que é possível reduzir em até 40 % o tempo de lavagem dos filtros, sem prejudicar a produção de água tratada ou o tratamento da água.

As oscilações operacionais verificadas entre os filtros é um dos fatores que mais contribuíram para a alta variabilidade (CV) dos resultados da caracterização qualitativa e sugerem a necessidade de um controle rígido de operação e manutenção das ETA para que o tratamento de água seja otimizado e tais questões não afetem a qualidade da água. Além disso, ressalta-se a importância de considerar a interferência de tais fatores quando da realização de pesquisas científicas em cenários similares.

Há viabilidade de recirculação da ALF bruta em caso de manutenção da lagoa de sedimentação, sem que haja prejuízo, em curto prazo, à qualidade da AT, desde que haja um reservatório de regularização da vazão diária de ALF.

Uma vez constatada a presença de quantidade significativa de metais no lodo adensado da lagoa de sedimentação, mostra-se interessante avaliar técnicas de extração dos metais (Fe e Al) recuperação de coagulante que mais se adequem à característica do lodo gerado, inclusive para se que viabilize a disposição final do lodo desidratado em aterro sanitário, quando essa se fizer necessária.

## 5. REFERÊNCIAS

ACHON, C.L.; BARROSO, M.M.; CORDEIRO, J.S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental** v.18, p.115-122, 2013.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. **Procedia Environmental Sciences**. v.35, p.950–955, 2016.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. 5ª ed. Editora McGraw Hill Inc. USA, 1999.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Standard methods for the examination of water and wastewater**, 2012.

BOURGEOIS, J.C.; WALSH, M.E.; GAGNON, G.A. Treatment of drinking water residuals: Comparing sedimentation and dissolved air flotation performance with optimal cation ratios. **Water Research**. v.38, p.1173–1182, 2004.

BRASIL. **Política Nacional dos Resíduos Sólidos**. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Brasília: Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para assuntos jurídicos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 28 jul. 2017.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte - EMPARN. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (Org.). **Monitoramento Pluviométrico: Acumulado de Chuvas no Ano. 2017**. Disponível em: <<http://189.124.130.5:8181/monitoramento/2017/acumulapr.htm>>. Acesso em: 17 ago. 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 05, de 28 de setembro de 2017. **Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde**. Anexo XX. Brasília-DF.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018. 220 p. : il.

COMPANHIA DE ÁGUAS E ESGOTOS DO RIO GRANDE DO NORTE (CAERN). **Apresentação da ETA de Extremoz**. Natal: Apresentação de slides, 2014. 35 slides, color.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**, 3ª ed. LDiBe Editora, São Carlos-SP , 2017

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**, 1ª ed. LDiBe Editora, São Carlos-SP , 2012.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. **Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**, 1ª ed. LDiBe Editora, São Carlos-SP, 2011.

DUARTE, M. A. C. **Tratamento de água para consumo humano de reservatório eutrofizado através de pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração**. 301 f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2011.

EVUTI, A.M.; LAWAL, M. Recovery of coagulants from water works sludge : A review. **Advances in Applied Science Research**. v.2, p.410–417, 2011.

FABER, H.A. **Disposal of Wastes from Water Treatment Plants**. New York, NY - US, 1969.

FABER, H.A.; NARDOZZI, A.D. Water treatment plant waste disposal - Action Now! **Journal American Water Works Association**, v.64, p.674–680, 1972.

FREITAS, A.G. DE; BASTOS, R.K.X.; BEVILACQUA, P.D.; PÁDUA, V.L.; PIMENTA, J.F. de P.; ANDRADE, R.C. de. Recirculação de água de lavagem de filtros e perigos associados a protozoários. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.15, p;37–46, 2010.

FREITAS, D.G. de. **Efeitos da recirculação de água de lavagem de filtros em um sistema de filtração direta em escala de bancada**, 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

GOTTFRIED, A.; SHEPARD, A.D.; HARDIMAN, K.; WALSH, M.E. Impact of recycling filter backwash water on organic removal in coagulation–sedimentation processes. **Water Research**. v.42, p.4683–4691, 2008.

HIDALGO, A.M.; MURCIA, M.D.; GÓMEZ, M.; GÓMEZ, E.; GARCÍA-IZQUIERDO, C.; SOLANO, C. Possible Uses for Sludge from Drinking Water Treatment Plants. **Journal of Environmental Engineering**, v.143, p.7, 2016.

HUEB, José Augusto; KAPPAZ, Anderson Pedro Medidor de Vazão Proporcional. **Revista Dae**, São Paulo, n. 126, p.148-159, 1981. Disponível em: <[http://revistadae.com.br/artigos/artigo\\_edicao\\_126\\_n\\_1268.pdf](http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_126_n_1268.pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2018.

KEELEY, J.; SMITH, A.D.; JUDD, S.J.; JARVIS, P. Acidified and ultrafiltered recovered coagulants from water treatment works sludge for removal of phosphorus from wastewater. **Water Research**. v.88, p.380–388, 2016.

KYNCL, M. Opportunity for water treatment sludge re-use. **GeoScience Engineering** v.54, p.11–22, 2008.

LIN, S.D.; GREEN, C.D. **Wastes From Water Treatment Plants: Literature Review, Results of an Illinois Survey and Effects of Alum Sludge Application To Cropland**. Peoria, Illinois - US, 1987.

MCCORMICK, N.J.; PORTER, M.; WALSH, M.E. Disinfection by-products in filter backwash water: Implications to water quality in recycle designs. **Water Research**. v.44, p.4581–4589, 2010.

MCTIGUE, N.E.; CORNWELL, D.A. **Water Treatment Residuals Management for Small Systems**. Water Research Foundation, 2009.

NAIR, A.T.; AHAMMED, M.M. Coagulant recovery from water treatment plant sludge and reuse in post-treatment of UASB reactor effluent treating municipal wastewater. **Environmental Science and Pollution Research**. v.21, p.10407-10418, 2014.

NG, M.C. **Produção de água em ETA com alteração da carreira de filtração**, 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

OLINGER, C. **Caracterização e Clarificação por Sedimentação da Água de Lavagem de Filtro Rápido de uma Estação de Água**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

PEREIRA, J. de O.; SILVA, S.B.F.; FARIA, P.C. de; COSTA, T.T. da; PIRES, V. das G.R. Impacto do consumo descontrolado de água na produção de resíduos em estação de tratamento de água. Estudo de caso: ETA-Itacolomi, Ouro Preto (MG). **Revista Brasileira de Ciências Ambientais** p. 2-13, 2016.

RAJ, C.B.C.; KWONG, T.E.; CHENG, W.W.; FONG, L.M.; TIONG, S.H.; KLOSE, P.S. Wash water in waterworks: contaminants and process options for reclamation. **Journal of Environmental Sciences** v. 20, p. 1300–1305, 2008.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. 1ª ed. Editora Blucher. São Paulo, 2001. 102 p.

SCHEFFER, M.; VAN NES, E. Shallow lakes theory revisited: Various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. **Hydrobiologia** v. 584(1) p. 455-466, 2007.

SILVA, M.S.G. da. **Adequação das condições operacionais de uma ETA “convencional” que trata água com cor e turbidez baixas**, 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SUMAN, S.; SINGH, N. P.; SULEKH, C. Effect of Filter Backwash Water when lends with Raw Water on Total Organic Carbon and Dissolve Organic Carbon Removal. **Research Journal of Chemical Sciences**, 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), 2002. **Filter Backwash Recycling Rule: Technical Guidance Manual**. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=200025V5.txt>>. Acesso em: 07 Mai. 2017.

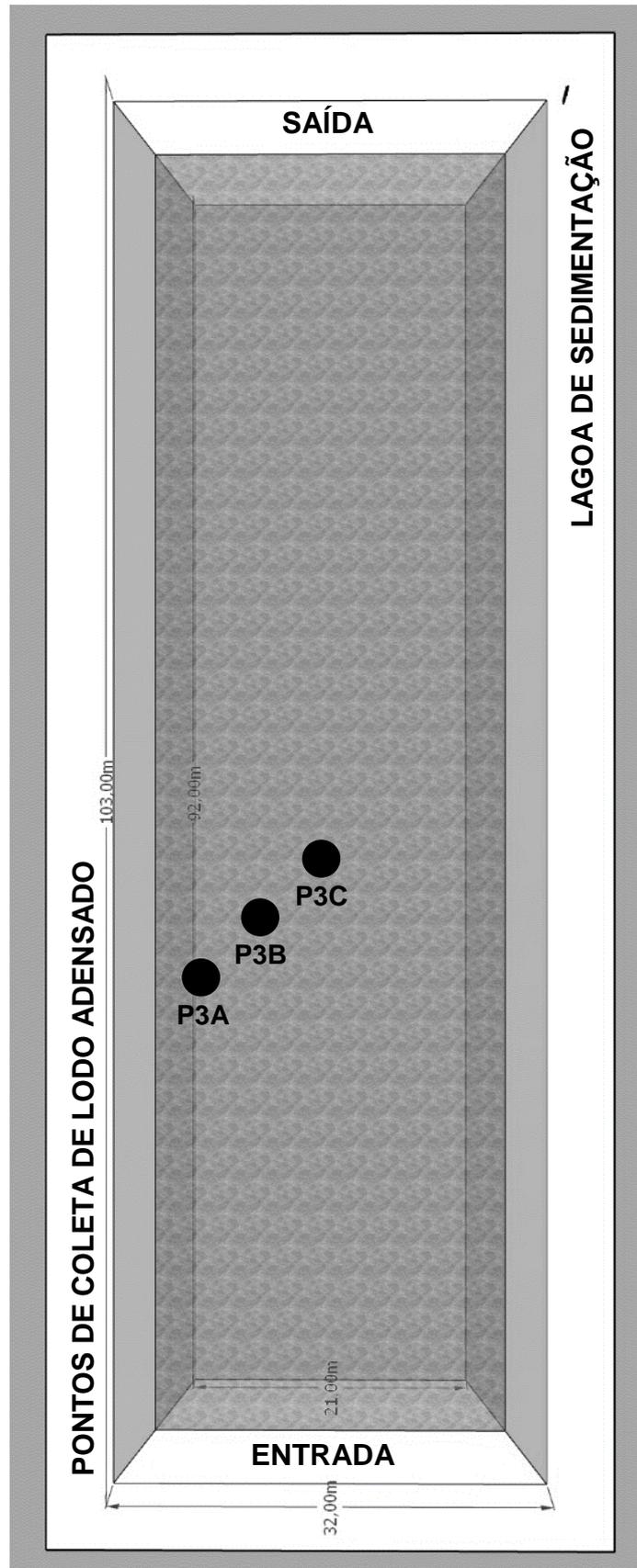
VENEU, D. M.; SILVA, M.P.M.; DI SALVIO, A.M.; DELPHINO, I.A.Z. Tratamento De Água Eutrofizada Através dos Processos de Pré-Oxidação, Coagulação e Floculação. **Engevista**, v. 17, n. 2, p. 175–186, 2015.

VERRELLI, D.I. **Drinking Water Treatment Sludge Production and Dewaterability**. Tese (PhD). Universidade de Melbourne, 2008.

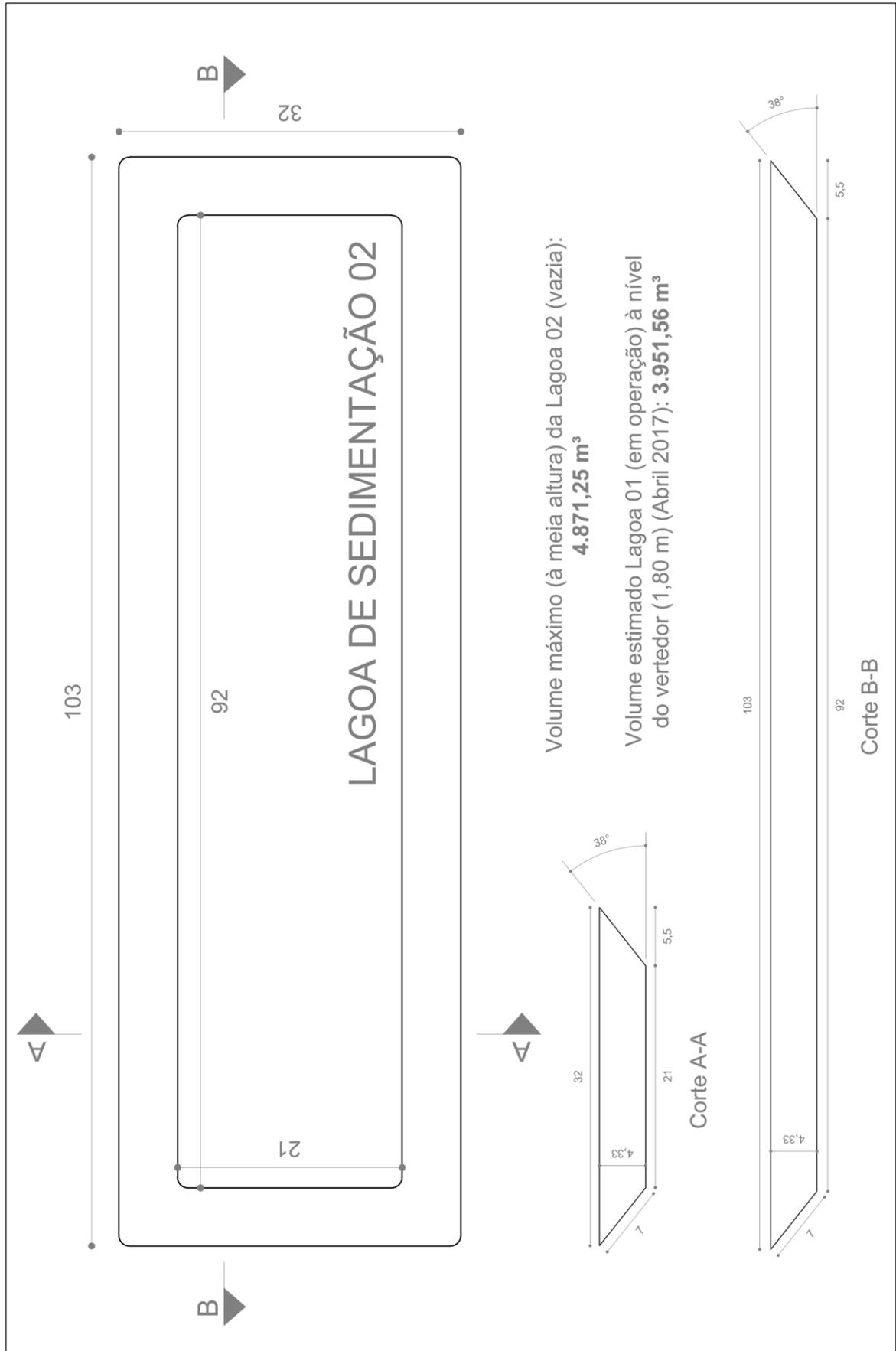
WALSH, M.E.; LAKE, C.B.; GAGNON, G.A. Strategic pathways for the sustainable management of water treatment plant residuals. **Journal of Environmental Engineering and Science**. v. 7, p. 45–52, 2008.

ZHOU, Z.; YANG, Y.; LI, X.; GAO, W.; LIANG, H.; LI, G. Coagulation efficiency and flocs characteristics of recycling sludge during treatment of low temperature and micro-polluted water. **Journal of Environmental Science (China)** v. 24, p. 1014–1020, 2012.

## APÊNDICE A



## APÊNDICE B



# ANEXO A

