



UNIVERSIDADE DE RIBEIRÃO PRETO  
Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias  
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental

MATHEUS MARQUES SIMÕES

OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DO  
SISTEMA DE SECAGEM NATURAL DO LODO DE ETA  
EM ESTUFA PILOTO

RIBEIRÃO PRETO – SP  
2021

Matheus Marques Simões

OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DO  
SISTEMA DE SECAGEM NATURAL DO LODO DE ETA  
EM ESTUFA PILOTO

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Farias de Novaes

Ribeirão Preto - SP  
2021

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Processamento Técnico da  
Biblioteca Central da UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto -

S589o Simões, Matheus Marques, 1989-  
Obtenção de parâmetros para dimensionamento do sistema de  
secagem natural do lodo de ETA em estufa piloto / Matheus Marques  
Simões. – Ribeirão Preto, 2021.  
143 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Farias de Novaes.

Tese (doutorado) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP,  
Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2021.

1. Resíduos sólidos. 2. Métodos de secagem. 3. Saneamento básico. 4.  
Secagem por energia solar. 5. Estufa de secagem natural.

I. Título.

CDD 628

**MATHEUS MARQUES SIMÕES**

**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA  
DE SECAGEM NATURAL DO LODO DE ETA EM ESTUFA PILOTO**

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor pelo programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Farias de Novaes

Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Data de defesa: 23 de março de 2021

Resultado: Aprovado

de forma digital  
ES01040056643  
R. e-CPF-BRASI  
da Brasília-DF  
cnpj=14.088.000/0001-90  
por LUCIANO FARIAS DE NOVAES 050405  
Dados: 2021.06.07 19:50:32 -03'00'

**BANCA EXAMINADORA**

assinado de  
Gustavo Alm

LUCIANO FARIAS DE  
NOVAES:050405066  
43

Assinado  
DE NOVA  
DN: c=B  
Federal

por LUCIANO FARIAS  
L: ou=Secretaria da Receita  
Federal e=CPF AS,  
06643

Prof. Dr. Luciano Farias de Novaes  
Presidente/UNAERP

Luciana  
Rezende Alves  
de Oliveira

Assinado de forma digital  
por Luciana Rezende  
Alves de Oliveira  
Dados: 2021.06.10  
22:36:59 -03'00'

Prof. Dra. Luciana Rezende Alves de  
Oliveira  
UNAERP

gov.br

Documento assinado digitalmente  
Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim  
Data: 11/06/2021 09:15:15-0300  
CPF: 039.540.354-56  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de  
Amorim  
UFAL

Gustavo Almeida Frata  
Dados: 2021.06.09 13:53:46  
-03'00'

Prof. Dr. Gustavo Almeida Frata  
UNAERP

Prof. Dr. Celso Luiz Franzotti

Iso  
FATEC

**RIBEIRÃO PRETO  
2021**



**C A P E S**

*Dedico esse trabalho a comunidade científica e a população brasileira.  
Que possamos mudar o rumo do saneamento básico no Brasil,  
através da união entre ciência, sociedade e pela  
vontade política de nossos governantes.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por essa preciosa oportunidade concedida.

Aos meus pais e minha irmã pelo apoio, amor e por se fazerem de meu porto seguro.

Ao meu orientador, professor e amigo Luciano Novaes. Obrigado pelo suporte nos momentos mais difíceis, pela contribuição com suas correções, pelos incentivos e apoio dados durante a realização deste trabalho. Fica também meus sinceros agradecimentos principalmente por acreditar em mim, pelos ensinamentos, conselhos dados e por colaborar de forma tão significativa em meu crescimento profissional e pessoal.

Ao professor e amigo Gustavo Frata. Gratidão pela recepção calorosa e pela boa vontade de cooperar e ajudar na realização deste trabalho com suas ideias e dicas valiosas. E também pela amizade sincera e verdadeira.

À Concessionária Águas de Mandaguahy pela permissão dada e apoio para a realização do estudo na Estação de Tratamento de Água de Jahu-SP.

Aos amigos e funcionários, diretores e supervisores da Concessionária Águas de Mandaguahy, pela grande ajuda e boa vontade em auxiliar na construção da estufa piloto e na realização dos experimentos.

Aos amigos feitos durante o doutorado, obrigado pela amizade e incentivos.

Aos amigos de caminhada, familiares e minha namorada Josiane Mesquita pela boa energia transmitida, pelas palavras de incentivo e apoio.

À Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, por possibilitar a realização deste sonho.

Ao departamento de Pós- Graduação da UNAERP, pelo excelente serviço prestado, sempre com muita prontidão, agilidade e receptividade aos alunos dos cursos de Mestrado e Doutorado em Tecnologia Ambiental

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Fico imensamente agradecido pela concessão da bolsa durante o curso de doutorado.

*“Não basta, pois, ter as aparências da pureza,  
é preciso, antes de tudo,  
ter a pureza do coração.”*  
(por Allan Kardec)

*“Uma pessoa inteligente resolve um  
problema, um sábio previne.”*  
(Albert Einstein)

*Saneamento Básico não é gasto e sim um investimento  
que se refletirá em economia com  
as despesas no setor de saúde.  
Como seu próprio nome diz:  
Saneamento básico, é o básico que a população deve possuir para ter qualidade de vida.*  
(Matheus Marques Simões)



## RESUMO

Técnicas de redução do volume de lodo das Estações de Tratamento de Água (ETA), tanto naturais quanto mecanizadas, estão sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas no Brasil e em diversos países. A eficiência das técnicas tem sido mostradas e comprovadas em muitos estudos no meio acadêmico, todavia, o custo com a demanda energética e com o capital investido para aquisição de um ou mais equipamentos mecânicos e ou para aquisição e construção do local da instalação de um sistema tratamento, provoca no setor do saneamento a necessidade do desenvolvimento de estudos que possam minimizar investimentos, custos operacionais e também, devido a tudo isso, instiga a busca de novos rumos para solucionar o problema do lodo gerado. Nesse sentido, o presente estudo tem o objetivo de determinar e avaliar parâmetros para a secagem natural de lodo de ETA por energia solar em uma estufa de escala piloto instalada em uma Estação de Tratamento de Água - ETA situada no município de Jahu-SP. O experimento de secagem foi conduzido com condições de secagem diferentes das já estudadas anteriormente na mesma unidade de tratamento por (Frata, 2019), para tanto, foi realizado na estufa existente modificações na sua estrutura, incluindo o fechamento das suas laterais visando aumentar a temperatura interna. O lodo gerado pela ETA e desaguado em uma centrífuga foi disposto em três leitos geometricamente quadrados construídos de tijolos com iguais alturas de 70 cm. Foram pré-estipuladas para a disposição do material de estudo, alturas de camadas de lodo iguais a 60 cm, 30 cm e 15 cm. Foram avaliados as concentrações de sólidos na massa do lodo durante o período do experimento, até que fosse observado que a taxa de secagem do lodo não tivesse mais variações. As condições climáticas em que se determinou os valores das taxas de secagem, foram respectivamente para valores de Temperatura média e Umidade média do ar interno a estufa de 29,54°C e 63,99% e, para valores de Temperatura média e Umidade média do ar externo a estufa de 27,23°C e 67,39%. A concentração de sólidos totais obtida no experimento para 76 dias de secagem natural em estufa, foi de 87,20%, 74,40% e 50,30% respectivamente para as camadas de 15 cm, 30 cm e 60 cm. Foi possível constatar que a altura de camada de lodo referente a 15 cm foi a mais eficiente, sendo possível atingir uma concentração de sólidos totais presentes no lodo de 84,30% em aproximadamente 40 dias de exposição a secagem, já a partir desse período de tempo, não foi observado variação relevante de umidade presente no lodo. Assim, verifica-se que o tempo de secagem considerado adequado nas condições estudadas e para uma altura de camada de lodo igual a 15 cm, foi de aproximados 40 dias. Portanto, conclui-se que em função do tempo de secagem o melhor resultado foi alcançado pela camada de 15 cm, uma vez que, foi possível verificar além de uma maior concentração de sólidos totais ao final do experimento, mas também um valor maior no parâmetro taxa de secagem, o que significou uma maior velocidade de secagem ocasionando para a camada de 15 cm um tempo necessário menor para tratar o lodo quando comparado às outras alturas. A altura da camada de lodo que representou a menor área necessária para secagem foi de 40 cm, ou seja, embora os experimentos mostraram que a camada de 15 cm apresentava melhores taxas de secagem (menor tempo de secagem), ao utilizar esta altura de camada requer maiores áreas, bem como maiores estruturas de estufas. Assim, a altura que representou o melhor custo-benefício em relação a área necessária, foi o valor de 40 cm. Comparando os resultados obtidos com aqueles adquiridos por Frata (2019), foi possível verificar que o fechamento das laterais não contribuiu de forma significativa na eficiência de secagem, tornando o sistema menos eficiente, pois embora a temperatura interna tenha aumentado, não foi previsto dispositivo para recirculação do ar interno, fato este que prejudicou a eficiência do processo.

**Palavras-chave:** Métodos de Secagem. Secagem por Energia Solar. Estufa de Secagem Natural. Resíduos de ETA. Resíduos Sólidos. Desaguamento de Lodo. Saneamento Básico.

## ABSTRACT

Sludge volume reductions techniques at water treatment stations, both natural and mechanized are being developed and improved in Brazil and many other countries. These techniques efficiency have been shown and proven by many academic studies however the cost of energy demand and invested capital in one or more mechanical equipment acquisition plus the system installation site construction calls the sanitation sector for the necessity of studies development that could diminish operational costs, also due to all of that it instigates the search for new directions in solving the sludge problem what means, generate less sludge or to seek for new technologies to reduce the sludge volume and consequently diminish water treatment stations operational costs. Concerning to that, this study sought to determine and evaluate parameters to WTS sludge natural drying by solar energy in a pilot scale greenhouse already installed in an WTS in Jahu-SP. This drying experiment was conducted in a different condition from the ones installed and studied so far in the same treatment unit by (Frata 2019), therefore it was made a structural modification for the existing pilot greenhouse that included closing its laterals in order to bring internal temperature to heighten. The generated sludge by the Water station treatment (WST) and drained into a centrifuge and exposed in three square format water bedding built with bricks in equal heights of 70cm. To the material studied it was pre stipulated sludge layer heights of 60cm., 30cm., and 15cm. It made possible to evaluate the solids concentration in the sludge mass during experiment period till the point we could observe that the sludge would not have any variation in dryness percentage. The climatic conditions in which were determined the dryness rate was respectively at media temperature and internal air, media temperature to the 29.54C and 63.99% greenhouse, and media temperatures with medium humidity for the external air in the 27,23C with 67,39% greenhouse. The total amount of solids obtained in a period of 76 days natural drying experiment at greenhouses were 82,20%, 74,40% and 50,30% respectively at layers of 15 cm., 30cm., and 60cm. It was possible to verify the sludge layer with 15cm. height was the most efficient, it was possible to get to the total solids present in the sludge of 84,30% in approximately 40 days exposed to drying, yet there was not any relevant humidity variation present observed in the sludge beyond this period of time. This way we verified that the drying timing considered adequate in the studied conditions is for sludge layer with 15cm. layer with approximate 40 days. This way we concluded that due to drying time the best result was reached by the 15cm. layers once it made possible to observe besides a larger concentration of solids, also a higher concentration with this drying parameter where we obtained a higher drying efficiency resulting this way in less time consuming to treat sludge when compared to the others heights. The 40cm. sludge layer height was the one that needed the least drying area, this is, although the experiments showed that the 15cm. layers obtained better drying percentage (less time) by using this layer height requires on the other hand larger areas. And larger greenhouses structures. This way the best cost benefit related to the area needed was for the 40cm. height. Comparing the obtained results by Frata (2019), It was possible to verify that the laterals closure did not represent any significant drying efficiency although despite of internal temperatures getting higher there was not an internal device showing air recirculation and this fact harmed the process efficiency.

**Key words:** Drying Methods. Solar Energy Drying. Greenhouse of Natural Drying. WTS residues. Solid Residues. Sludge Dewatering. Basic Sanitation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Percentual da população brasileira com acesso a água e atendimento em coleta de esgoto em relação a população total.....	26
Figura 2. Volume de água faturado e volume de esgoto coletado no Brasil, em litros por habitante por dia.....	26
Figura 3. Representação espacial por estado brasileiro do índice médio de atendimento urbano por rede de abastecimento de água.....	28
Figura 4. Representação espacial por município brasileiro do índice médio de atendimento urbano por rede de abastecimento de água.....	31
Figura 5. Tecnologias frequentemente utilizadas no tratamento de água para abastecimento urbano.....	33
Figura 6. Fluxograma tratamento convencional de água com os pontos de geração de resíduos.....	35
Figura 7. Esquema ilustrativo dos diferentes tipos de frações de água presentes em lodos de ETAs.....	44
Figura 8. Perfil esquemático de adensador de lodo por gravidade.....	47
Figura 9. Perfil esquemático de adensador de lodo por flotação.....	48
Figura 10. Diagrama representativo de uma centrífuga.....	54
Figura 11. Imagens de centrífugas utilizadas no desaguamento de lodo.....	55
Figura 12. Representação esquemática do funcionamento de um filtro prensa.....	56
Figura 13. Fluxograma das etapas do método utilizado para determinação dos parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural.....	66
Figura 14. Comparativo entre a estufa utilizada por Frata (2019) com a estufa utilizada no presente estudo.....	69
Figura 15. Leitos da Estufa piloto Frata (2019) a esquerda e Leitos da Estufa Piloto Autor (2020) a direita.....	72
Figura 16. Balança (Medidor de Umidade ID200) utilizada para determinar a umidade no lodo.....	74
Figura 17. Coleta de amostras de lodo nos leitos para determinação da concentração de sólidos totais na estufa em estudo.....	75
Figura 18. Localização do município de Jahu no estado de São Paulo via imagem de satélite.....	83

Figura 19. Localização da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy via imagem de satélite.....	84
Figura 20. Vista da estrutura da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy.....	84
Figura 21. Fluxograma da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy.....	85
Figura 22. Misturador e medidor de vazão tipo Calha Parshall, com destaque do medidor de vazão ultrassônico instalado e com indicação dos dosadores de coagulante e alcalinizante na ETA em estudo.....	85
Figura 23. Vista dos equipamentos utilizados na floculação com destaque para o controle de velocidade por motor elétrico.....	87
Figura 24. Vista da câmara de floto-filtração (destaque para o lodo flotado/Resíduo e para o motor do removedor de lodo tipo raspador superficial) .....	87
Figura 25. Reservatório com volume útil de 2.000 m <sup>3</sup> localizado nas dependências da estação de tratamento de água da Concessionária Águas de Mandaguahy.....	89
Figura 26. Condições das tubulações da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy.....	90
Figura 27. Laboratório de análises químicas localizado nas dependências da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy.....	90
Figura 28. Câmara de floto-filtração (destaque para a água de lavagem dos filtros/Resíduo e para a canaleta coletora do resíduo) .....	92
Figura 29. Vista frontal da centrífuga instalada na ETA da Concessionária Águas de Madaguahy.....	94
Figura 30. Tanque de preparação do polímero auxiliar de desaguamento do lodo de ETA.....	95
Figura 31. Estufa piloto para secagem natural de lodo de ETA e a localização do medidor de temperatura e umidade do ar em destaque.....	97
Figura 32. Leitões existentes na estufa piloto e a localização na estufa do medidor de temperatura e umidade do ar em destaque.....	97
Figura 33. Representação interna lateral da estufa com indicação em destaque da abertura para recirculação de ar pela lateral.....	98
Figura 34. Monitoramento da temperatura do ar externo à estufa durante o período de secagem natural do lodo.....	100
Figura 35. Monitoramento da umidade do ar externo à estufa durante o período de secagem natural do lodo.....	100

Figura 36. Monitoramento da temperatura do ar interno à estufa durante o período de secagem natural do lodo.....	100
Figura 37. Monitoramento da umidade do ar interno à estufa durante o período de secagem natural do lodo.....	100
Figura 38. Leitões de secagem preenchidos com lodo de ETA nas alturas experimentais estipuladas.....	102
Figura 39. Vista do primeiro dia de exposição do lodo à secagem na estufa em estudo....	102
Figura 40. Vista do terceiro dia de exposição do lodo à secagem na estufa em estudo.....	103
Figura 41. Aspecto das variadas alturas de camadas de lodo passados 76 dias de secagem natural em estufa.....	104
Figura 42. Curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais -ST no lodo desaguado em centrífuga da ETA Águas de Mandaguahy de Jahu-SP, durante o processo de secagem natural em estufa piloto para uma altura 60 cm de camada de lodo disposta no leito.....	107
Figura 43. Curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais -ST no lodo desaguado em centrífuga da ETA Águas de Mandaguahy de Jahu-SP, durante o processo de secagem natural em estufa piloto para uma altura 30 cm de camada de lodo disposta no leito.....	107
Figura 44. Curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais -ST no lodo desaguado em centrífuga da ETA Águas de Mandaguahy de Jahu-SP, durante o processo de secagem natural em estufa piloto para uma altura 15 cm de camada de lodo disposta no leito.....	107
Figura 45. Equações e curvas representativas dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy de Jahu-SP durante 76 dias de secagem natural em estufa piloto.....	110
Figura 46. Equação e Curva representativa da Taxa de Secagem (%ST/dia) em função da Altura de Camada de Lodo disposta a secagem natural em estufa piloto.....	116
Figura 47. Variação da área total de secagem necessária da estufa pelo tempo necessário de secagem em função da altura da camada de lodo disposta no leito da estufa piloto em estudo.....	119
Figura 48. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 15 cm durante 40 dias de secagem natural em estufa piloto.....	126
Figura 49. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 15 cm durante o período de secagem de 40 a 76 dias de secagem natural em estufa piloto.....	127

Figura 50. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 30 cm durante 34 dias de secagem natural em estufa piloto.....	129
Figura 51. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 30 cm durante o período de secagem de 34 a 76 dias de secagem natural em estufa piloto.....	130
Figura 52. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 60 cm durante 34 dias de secagem natural em estufa piloto.....	132
Figura 53. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 60 cm durante o período de secagem de 34 a 76 dias de secagem natural em estufa piloto.....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estações de tratamento de água na Região Metropolitana de São Paulo, com suas respectivas produções de água potável e população atendida.....	29
Tabela 2. Características químicas de amostras compostas das descargas hidráulicas de decantadores de alta taxa de duas diferentes Estações de Tratamento de Água.....	38
Tabela 3. Características químicas de amostras compostas do lodo gerado em decantadores com remoção descontínua e manual da ETA (tecnologia convencional) de São Carlos – SP.....	39
Tabela 4. Características químicas de amostras compostas de águas de lavagem de filtros de Estações de Tratamento de Água com tecnologia de tratamento por ciclo completo.....	40
Tabela 5. Características químicas de amostras compostas de águas de lavagem de filtros de Estações de Tratamento de Água com tecnologia de tratamento por filtração direta ascendente.....	41
Tabela 6. Capacidades hidráulica de centrífugas em função do diâmetro do tambor.....	52
Tabela 7. Caracterização do lodo desaguado em centrífuga da ETA Águas de Mandaguahy, segundo NBR 10.004.....	96
Tabela 8. Denominação dos leitos em função da altura de camada de lodo disposta.....	101
Tabela 9. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo durante 76 dias de secagem natural em estufa piloto.....	104
Tabela 10. Equações descritivas do experimento de secagem e taxas de secagem referentes a cada modelo.....	111
Tabela 11. Variáveis do processo de tratamento de água realizado pela estação Águas de Mandaguahy.....	115
Tabela 12. Resultados obtidos no experimento, relativos à taxa de secagem em função da altura de camada de lodo disposta a secagem.....	115
Tabela 13. Resultados obtidos no experimento, relativos à tempos de secagem em função da altura de camada de lodo disposta a secagem.....	117
Tabela 14. Resultados obtidos no experimento, relativos à área de secagem necessária em função da altura de camada de lodo disposta a secagem.....	119
Tabela 15. Comparação entre os resultados obtidos no experimento com os de Frata (2019), relativos a média dos valores máximos de temperatura e umidade diários verificados para o ar externo a estufa e, relativos a média dos valores mínimos de temperatura e umidade diários verificados para o ar externo a estufa.....	121

Tabela 16. Comparação entre os resultados obtidos no experimento com os de Frata (2019), relativos aos valores da temperatura média e umidade média do ar externo a estufa durante todo o período de secagem.....	121
Tabela 17. Comparação entre os resultados obtidos (taxa de secagem) no experimento com os de Frata (2019), relativos à taxa de secagem em função da altura de camada de lodo disposta a secagem.....	123
Tabela 18. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante 40 dias em altura de camada igual a 15 cm.....	126
Tabela 19. Funções e taxas descritivas do experimento de secagem para 15 cm de altura de camada.....	126
Tabela 20. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante o período de 40 a 76 dias em altura de camada igual a 15 cm....	127
Tabela 21. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante 34 dias em altura de camada igual a 30 cm.....	129
Tabela 22. Funções e taxas descritivas do experimento de secagem para 30 cm de altura de camada.....	129
Tabela 23. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante o período de 34 a 76 dias em altura de camada igual a 30 cm....	130
Tabela 24. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante 34 dias em altura de camada igual a 60 cm.....	131
Tabela 25. Funções e taxas descritivas do experimento de secagem para 60 cm de altura de camada.....	131
Tabela 26. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante o período de 34 a 76 dias em altura de camada igual a 60 cm....	132
Tabela 27. Resumo das taxas descritivas obtidas pelo experimento de secagem para as camadas de 15, 30 e 60 cm de altura.....	133



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Descrição sucinta das principais etapas do tratamento de água para fins de abastecimento público.....	34
Quadro 2. Principais características da estufa utilizada por Frata (2019), e da estufa utilizada no presente estudo.....	69

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico  
ABAR – Associação Brasileira de Agências de Regulação  
ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental  
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
ETA – Estação de Tratamento de Água  
ETE - Estação de Tratamento de Esgoto  
FUNASA - Fundação Nacional de Saúde  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear  
CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos  
MCIDADES – Ministério das Cidades  
MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional  
OMS – Organização Mundial de Saúde  
PNR – Política Nacional de Recursos Hídricos  
PNRH – Plano Nacional de Recursos Hídricos  
RETAs – Resíduos de Estações de Tratamento de Água  
SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo  
SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos  
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento  
SNS – Secretaria Nacional de Saneamento  
SST – Sólidos Suspensos Totais  
ST – Sólidos Totais  
SUS - Sistema Único de Saúde  
UNICEF – Fundo das Nações Unidas para Infância

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	20
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	22
2.1. OBJETIVO GERAL.....	22
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	23
3.1. SITUAÇÃO ATUAL DO ATENDIMENTO URBANO COM ÁGUA POTÁVEL.....	23
3.2. TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO URBANO.....	31
3.3. LODO GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA).....	35
3.3.1. Características e Produção.....	37
3.3.2. Tecnologias para o Tratamento do Lodo Gerado em ETAs (RETAs).....	43
3.3.2.1. Adensamento ou espessamento.....	45
3.3.2.1.1. Adensamento por gravidade.....	46
3.3.2.1.2. Adensamento por flotação a ar dissolvido.....	47
3.3.2.1.3. Adensamento mecânico.....	49
3.3.2.2. Condicionamento.....	50
3.3.2.3. Desaguamento ou desidratação.....	50
3.3.2.3.1. Desaguamento mecânico por centrífuga.....	51
3.3.2.3.2. Desaguamento mecânico por filtro prensa.....	55
3.3.2.3.3. Desaguamento mecânico por filtro rotativo.....	57
3.3.2.4. Secagem.....	57
3.4. LEGISLAÇÕES BRASILEIRAS PERTINENTES AO LODO DE ETA.....	61
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	66
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ETA EM ESTUDO.....	66
4.2. MODIFICAÇÃO DA ESTUFA PILOTO PARA REALIZAR OS TESTES DE SECAGEM DO LODO DA UNIDADE EM ESTUDO.....	67
4.3. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE SECAGEM NATURAL DO LODO DE ETA.....	70
4.3.1. Determinação dos Gráficos de Monitoramento da Temperatura e Umidade do ar Interno e Externo à Estufa Piloto.....	70
4.3.2. Determinação da Concentração de Sólidos Totais no Lodo Durante o Processo de Secagem Natural em Estufa Piloto.....	71
4.3.3. Determinação dos Gráficos de Monitoramento da Concentração de Sólidos Totais no Lodo Durante o Processo de Secagem Natural em Estufa Piloto.....	75
4.3.4. Determinação das Taxas de Secagem e Equações Descritivas de cada um dos Experimentos de Secagem, pelo Método da Linearização.....	76
4.3.5. Determinação da Altura da Camada de Lodo a ser Disposta nos Leitões da Estufa Piloto para Secagem Natural.....	77
4.3.6. Comparação dos resultados de secagem determinados no estudo com aqueles determinados por Frata (2019).....	82
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	83
5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ETA EM ESTUDO.....	83
5.1.1. Descrição da Tecnologia de Tratamento por FlotoFiltração Instalada na ETA Águas de Maguahy.....	85
5.1.2. Descrição da Forma de Remoção Lodo Flotado e da “Água” de Lavagem dos Filtros.....	91
5.1.3. Descrição da Tecnologia de Desaguamento do Lodo Gerado no Tratamento da ETA Águas de Mandaguahy.....	94

5.2. MODIFICAÇÃO DA ESTUFA PILOTO PARA REALIZAR OS TESTES DE SECAGEM DO LODO DA UNIDADE EM ESTUDO.....	97
5.3. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE SECAGEM NATURAL DO LODO DE ETA.....	98
5.3.1. Determinação dos Gráficos de Monitoramento da Temperatura e Umidade do ar Interno e Externo à Estufa Piloto.....	98
5.3.2. Determinação da Concentração de Sólidos Totais no Lodo Durante o Processo de Secagem Natural em Estufa Piloto.....	101
5.3.3. Determinação dos Gráficos de Monitoramento da Concentração de Sólidos Totais no Lodo Durante o Processo de Secagem em Estufa Piloto.....	106
5.3.4. Determinação das Taxas de Secagem e Equações Descritivas de Cada um dos experimentos de Secagem, pelo Método da linearização.....	110
5.3.5. Determinação da Altura da Camada de Lodo a ser Disposta nos Leitões da Estufa Piloto para Secagem Natural.....	114
5.3.6. Comparação dos resultados de secagem determinados no estudo com aqueles determinados por Frata (2019).....	121
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>134</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>138</b>

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde – FUNASA (2017), investir em saneamento impacta indiretamente na saúde da pessoa humana. A fundação afirma que, o fornecimento de *água* com qualidade e contínuo para o consumo humano asseguram a redução de diarreias, cólera, dengue, febre amarela, tracoma, hepatites, conjuntivites, poliomielite, escabioses, leptospirose, febre tifoide, esquistossomose e malária. Similarmente, investir em obras para o afastamento do *esgoto sanitário* das residências, com posterior tratamento, é um fator que contribui para eliminação dos vetores das doenças: Malária, diarreias, verminoses, esquistossomose, cisticercose e teníase. Ainda, a promoção da coleta regular, acondicionamento e destino final aos *resíduos sólidos domiciliares*, diminuirá a incidência de casos de peste, febre amarela, dengue, toxoplasmose, leishmaniose, cisticercose, salmonelose, teníase, leptospirose, cólera e febre tifoide.

Para se ter uma ideia do quanto é possível economizar com saúde ao investir em saneamento básico, o Instituto Trata Brasil (2017), informou que houve 340 mil internações em 2013 por infecções gastrointestinais, sendo que o custo de uma internação desta natureza no Sistema Único de Saúde – SUS em 2013 era de R\$ 355,71 reais por paciente na média nacional. No mesmo ano, informou que houve no país mais de 14 milhões de afastamentos por diarreia ou vômito e que em média uma pessoa fica longe de suas atividades por 3,32 dias, ou seja, essas doenças causaram 49,8 milhões de dias de afastamento ao longo do ano de 2013. O custo com horas não trabalhadas representou em 2013 R\$ 872 milhões de reais.

O abastecimento de água é entendido como uma das quatro vertentes do saneamento básico, sendo importante para garantir e assegurar a saúde da população. E, como em diversos processos industriais que geram resíduos nocivos ao meio ambiente em suas etapas, o tratamento de água também pode gerar em uma ou mais etapas de seu processo, resíduos com potencial poluidor. O lodo gerado em Estações de Tratamento de Água - ETAs, denominados também por Resíduos de Estações de Tratamento de Água - RETAs, deverá ser submetido a um processo de tratamento e disposição final adequada para que não haja poluição ambiental, amenizando ou eliminando o possível dano ambiental que pode vir acontecer pelo lançamento destes nos corpos d'água e ou no solo.

Rubim (2013), menciona que o destino final dos resíduos dos sistemas de tratamento de água é um grande desafio para os países, e o processo é complexo necessitando de conhecimentos diversos, sendo que os custos podem variar de 20 a 60% dos custos

operacionais de uma estação. Ainda, há perspectiva no aumento de geração de lodo em função da tendência de instalação de novas estações.

A definição da tecnologia para desaguoamento e secagem do lodo de ETA a ser utilizada dependerá de fatores como área necessária e disponível para implantação, custos com a área, distância da estação ao local de disposição final, condições climáticas, custo dos equipamentos, custos operacionais, necessidade de mão de obra qualificada ou não (recursos humanos), necessidade de condicionamento do lodo ou não (preparo do lodo para o tratamento), dentre outros fatores (PROSAB, 1999).

Há um significativo interesse pela secagem solar nos últimos anos, tanto com relação a escala piloto como em grande escala. Entretanto, deve-se atentar a carência de dados relativos ao desempenho do processo nas condições típicas da região, os quais não são amplamente documentados. Resultados experimentais para condições típicas do Mediterrâneo, mostraram a eficiência da tecnologia para a então região, pela redução de umidade presente no lodo, verificada durante o verão de 85% para 6% e no outono de 85% para 10% utilizando com uma planta solar (estufa) equipada com um aquecedor solar de recirculação de água (MATHIOUDAKIS et al., 2009).

Di Bernardo et al. (2012), lembra que, a secagem natural já é conhecida a muitos anos e, que apesar do baixo consumo energético das várias técnicas de secagem natural, estas, não estão totalmente desenvolvidas, por falta parâmetros de projeto e operação.

Uma série de tecnologias podem ser usadas para melhorar o desempenho de plantas solares. Mathioudakis et al. (2013) citado por Shao et al. (2015), estudaram a secagem solar de lodos em estufa com revolvimento e depois com incorporação de aquecedor de água. No entanto, ressaltaram o aumento significativo dos custos de implantação e operacionais. Frata (2019), sugeriu uma metodologia para determinar a altura de lodo que represente a menor área necessária em função da geração de lodo, para realizar a secagem por energia solar em estufa.

Sendo assim, este trabalho vem com desígnio de contribuir com o desenvolvimento, aperfeiçoamento e redução de custos das tecnologias voltadas ao gerenciamento dos resíduos de ETAs. Desta forma, objetivou-se determinar e avaliar parâmetros para a secagem natural de lodo utilizando uma estufa de escala piloto instalada em uma Estação de Tratamento de Água - ETA situada no município de Jahu-SP. O intuito principal das condições estabelecidas para determinar os parâmetros de secagem, foi buscar diminuir o tempo necessário de permanência do lodo dentro da estufa, o que contribuirá com a redução do volume de lodo disposto pela ETA e conseqüentemente com a redução de custos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo do presente trabalho consiste em determinar parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural para o lodo de ETA em estufa piloto implantada em uma unidade de tratamento situada no interior do Estado de São Paulo.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar a Estação de Tratamento de Água em estudo situada no interior do Estado de São Paulo;
- Modificar uma estufa piloto existente para realizar os testes de secagem do lodo na unidade de tratamento em estudo;
- Realizar experimentos de secagem natural em estufa piloto, para determinar parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural do lodo da ETA em estudo;
- Comparar os resultados de secagem determinados com aqueles determinados por Frata (2019).

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. SITUAÇÃO ATUAL DO ATENDIMENTO URBANO COM ÁGUA POTÁVEL

Os problemas de escassez hídrica no Brasil decorrem da combinação do crescimento urbano exagerado a partir da década de 1950, o que resultou em altas demandas localizadas de água em concomitante com a degradação da qualidade das águas. O quadro é a consequência do aumento desordenado dos processos de urbanização, industrialização e expansão agrícola. Mesmo o país possuindo legislação específica para uso racional da água desde 1934 através do Código das Águas (Decreto Federal 24.643, de 10 de Junho de 1934), este não foi capaz de combater o desconforto hídrico, a contaminação das águas e os conflitos de uso, tampouco promover uma gestão descentralizada, exigência atual (LIMA, 2001).

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico– ANA (2020), o desafio do atendimento urbano com água potável está relacionado com problemas de capacidade dos sistemas de produção, necessitando, portanto, de alternativas técnicas para ampliação das unidades de captação, adução e tratamento. A exploração de novos mananciais é uma alternativa, mas em geral requer maiores recursos técnicos e financeiros para tanto.

O Fundo das Nações Unidas para a Infância – UNICEF e a Organização Mundial de Saúde – OMS colocaram o Brasil em uma posição relativamente boa no que se diz respeito ao acesso a água potável pela população, ao considerarem a evolução mundial das nações desde 1995 a 2015 no quesito acesso a água. Contudo, mesmo o Brasil tendo avançado nos últimos anos nos serviços de saneamento, a pesquisa classificou o país como o pior país da América Latina em relação a esgotamento sanitário e acesso ao banheiro (TRATA BRASIL, 2018).

O sistema de gestão da água no Brasil é um dos mais avançados do mundo no ponto de vista da sua estrutura legal e de seu arranjo institucional. Dentro desse sistema, um dos instrumentos centrais são os Planos de Bacias Hidrográficas que visam orientar e fundamentar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Os planos de bacias podem apontar diretrizes aos Planos Diretores Municipais no sentido de crescimento urbano, proteção dos mananciais, localização industrial, irrigação e saneamento (PERES e SILVA, 2013).

A Lei n 9.433, de 8 de Janeiro de 1997 institui a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNR e cria em seu Art. 32 o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH, o qual integra o Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, a



ANA, os conselhos de recursos hídricos dos estados e do Distrito Federal, os Comitês de Bacia Hidrográfica, os órgãos dos poderes públicos federal, estaduais, do Distrito Federal e municipais cujas competências se relacionem com a gestão de recursos hídricos e, as agências de água. A lei é conhecida popularmente como Lei das Águas ou ainda Lei de Gestão de Recursos Hídricos, tem o objetivo de promover a disponibilidade de água e a utilização racional e integrada dos recursos hídricos para a atual e para as futuras gerações. Esta lei tem como instrumento o Plano Nacional de Recursos Hídricos – PNRH que orienta a gestão das águas por meio de diretrizes, metas e programas (BRASIL, 1997).

Com a aprovação da Lei 10.257/2001, denominada Estatuto da cidade, estabeleceu-se no Brasil um grande marco para o planejamento. A lei apontou diretrizes para execução da política urbana e estabeleceu a elaboração do Plano Diretor Municipal colocando o Brasil em um novo e estratégico patamar. O Plano Diretor Municipal passou a ser o principal instrumento para a gestão territorial municipal, regulando o uso e ocupação do solo e definindo parâmetros para o cumprimento da função social da cidade e da propriedade (PERES e SILVA, 2013).

As informações sobre a condição em um dado momento dos serviços de água e esgotos no Brasil, são fornecidos pela Secretaria Nacional de Saneamento – SNS que está vinculada ao Ministério do Desenvolvimento Regional – MDR. A divulgação ocorre anualmente através de um documento denominado Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto, sendo que este documento é um texto analítico que apresenta os resultados a partir das informações e dos indicadores que compõe a base de dados atualizados do Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento – SNIS, o qual é responsável pela coleta dos dados através dos prestadores de serviços de cada município. O MDR, por meio da Portaria nº 719, de 12 de dezembro de 2018 instituiu a metodologia para auditoria e certificação das informações publicadas pelo SNIS, buscando através desta, aprimorar a qualidade das informações fornecidas. A auditoria e a certificação são atribuições das agências reguladoras de saneamento básico de estados, municípios e do distrito federal, estas que, devem seguir as recomendações do Manual de Melhores Práticas de Gestão de Informações Sobre o Saneamento, elaborado pela parceria entre o Ministério das Cidades – MCIDADES, atual MDR, com a Associação Brasileira de Agências de Regulação – ABAR, em consonância com portaria aqui citada, permitido desta forma, a geração de informações com maior exatidão (SNIS, 2019).

Ter acesso ao saneamento básico é fundamental para a garantia da saúde e dignidade da pessoa humana. A ausência ou deficiência no fornecimento em qualquer um dos quatro serviços, que unidos definem o termo saneamento básico, representará riscos à população. Por exemplo, déficits no sistema de tratamento e de abastecimento com água potável, incita o consumo de água potencialmente contaminada por poluentes ou patógenos; déficits no sistema de esgotamento e de tratamento de esgotos domésticos, assim como, pela disposição inadequada de resíduos sólidos, podem contaminar o solo, as águas subterrâneas e superficiais comprometendo a saúde pública e; as falhas ocorridas no sistema de drenagem pluvial nas cidades, podem comprometer a saúde das pessoas pelo alastramento de doenças de veiculação hídrica e ou ocasionar em perdas de bens materiais e vidas humanas em eventos de cheia (SIMA, 2020).

A atual crise sanitária causada pela Covid-19 evidenciou com muita clareza a vulnerabilidade das pessoas que não dispõem de acesso a água potável, uma vez que, os órgãos de saúde pública tanto no âmbito nacional como internacional, recomendam que se lave as mãos com frequência para evitar contaminação por corona vírus. Diante de recomendações como estas, foi deparado com uma triste realidade no Brasil, pois há por volta de 35 milhões de brasileiros que não possuem abastecimento com água tratada em suas residências (AGÊNCIA SENADO, 2020).

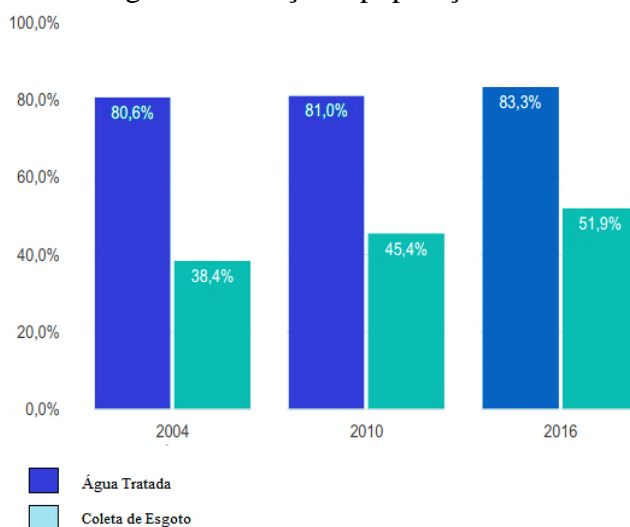
O SNIS (2019), maior e mais importante meio de obter informações sobre o setor do saneamento básico no Brasil, apurou a partir de sua base de dados referente ao ano de 2018, um índice médio de atendimento com água potável de 92,8% nas áreas urbanas e de 83,6% considerando toda a população brasileira. Destacam-se as regiões Sul, Centro-Oeste e Sudeste, onde os índices médios foram de 98,6%, 96% e 95,9% respectivamente.

Do total de municípios brasileiros, 47% são abastecidos exclusivamente por mananciais superficiais, 39% por águas subterrâneas e 14% pelos dois tipos de mananciais (abastecimento misto). Sendo que, estes são prestados predominantemente pelas Companhias Estaduais de Saneamento, representando 69% do total de municípios; em 27% a prestação é realizada pelos municípios (Serviços autônomos ou Prefeituras) com eventual apoio da FUNASA, e em apenas 4% dos municípios brasileiros, os serviços são prestados por empresas do setor privado (ANA, 2020).

O índice de abastecimento de água potável no Brasil passou de 80,6% em 2004 para 83,3% em 2016, representando um aumento no índice de fornecimento de água aos cidadãos. Mas, apesar desse avanço, conforme apresentado pela Figura 1, foi constatado no ano de 2016

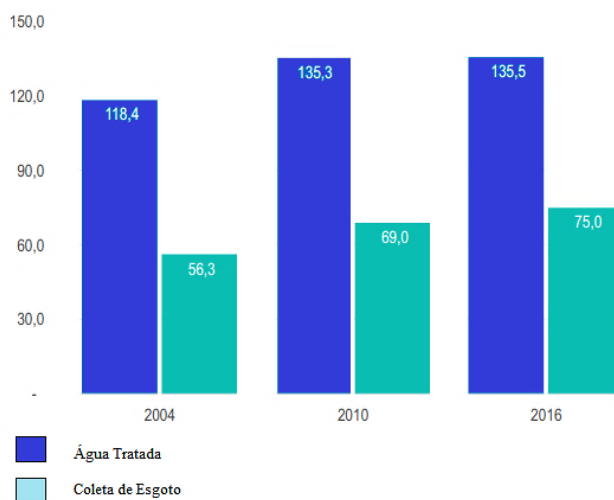
que 33,4 milhões de brasileiros ainda não possuíam água tratada em suas residências, o que correspondeu a 16,7% de toda a população residente no país. No período de 2004 a 2016, foi verificado um aumento no índice do consumo médio de água por habitante em um dia no Brasil, conforme ilustrado pela Figura 2. Esse aumento representou um crescimento no volume de água consumida de 118,4 litros diários per capita para 135,5 litros diários per capita (TRATA BRASIL, 2018).

Figura 1. Porcentual da população brasileira com acesso a água e atendimento em coleta de esgoto em relação a população total



Fonte: Adaptado Trata Brasil (2018)

Figura 2. Volume de água faturado e volume de esgoto coletado no Brasil, em litros por habitante por dia



Fonte: Adaptado Trata Brasil (2018)

O consumo médio diário de água no Brasil para o ano de 2018 foi de 154,9 litros por habitante, variando regionalmente, por exemplo, de 115,4 litros por habitante na região nordeste para 182,6 litros por habitante na região sudeste. É importante lembrar, que nem toda essa água é consumida pela população devido as perdas durante o abastecimento, as perdas são caracterizadas em sua maior parte por ligações clandestinas “gatos” e vazamentos no sistema de distribuição; o SNIS apurou para o referido ano, um índice médio nacional de perdas de 38,5%. Os serviços de abastecimento urbano, lembrando que estes incluem não só o abastecimento com água potável, mas também o tratamento da água bruta pela ETA; juntamente como os serviços de esgotamento e tratamento de esgoto sanitário, tiveram uma movimentação financeira de R\$ 135,6 bilhões, gerando diretamente e indiretamente 915,4 mil empregos no país (SNIS, 2019).

As demandas média e máxima de água potável para abastecimento da população urbana no Brasil, vão atingir segundo projeções realizadas em 2020, uma vazão de 630m<sup>3</sup>/s e 695 m<sup>3</sup>/s respectivamente no ano de 2025. A demanda projetada apontou que as regiões sudeste e nordeste juntas vão responder por 71% de toda demanda de água no Brasil em 2025. O Brasil é um dos países mais ricos em recursos hídricos do mundo, com vazões médias geradas em todo território brasileiro que totalizam quase 180 mil m<sup>3</sup>/s. Contudo, essa grande disponibilidade hídrica do país não garante alta demanda hídrica aos sistemas de abastecimento de água brasileiros, por dois principais motivos, variabilidade climática do Brasil que se reflete em uma distribuição bastante desigual dos recursos hídricos e pelo fato da população brasileira estar concentrada justamente onde disponibilidade é mais desfavorável (ANA, 2020).

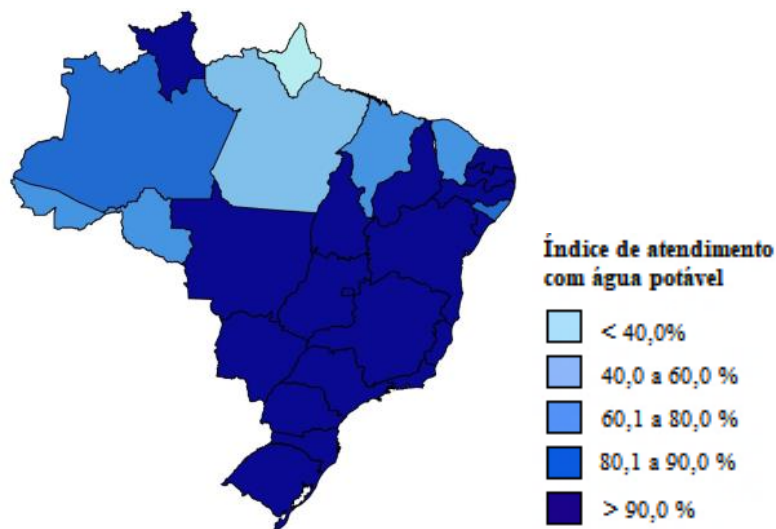
Quando o assunto é disponibilidade hídrica, o Brasil possui uma posição privilegiada ao ser comparado com a maioria dos países. Contudo, mais de 73% da água doce disponível do país encontra-se na bacia Amazônica, a qual é habitada com menos de 5% da população total brasileira e, portanto, restando apenas 27% dos recursos hídricos brasileiros disponíveis para abastecimento público, os quais podem ser utilizados como fonte para o atendimento com água à 95% da população residente no país. A ideia de abundância serviu durante muito tempo como justificativa para o desperdício de água, para a falta de planejamento e investimentos necessários no setor de produção e distribuição de água e, para pequena valorização econômica da água (SETTI et al., 2000).

A desvalorização econômica da água é uma questão cultural no Brasil, percebe-se uma falta de entendimento dos habitantes quanto ao preço justo cobrado, na maioria das

situações, sobre o valor das tarifas de fornecimento de água. Hoje o brasileiro acha normal gastar valores por volta de R\$100,00 em um cinema, um evento com atrações musicais, em um barzinho, dentre outras situações não essenciais que consomem dinheiro em um curto espaço de tempo; mas, tendem considerarem caro o preço cobrado pela água fornecida diariamente em suas residências, mesmo sendo um produto usado com frequência ao longo do dia pelo cidadão, uma vez que ele é essencial para sobrevivência e higiene da pessoa humana.

De acordo com o SNIS (2018), no Brasil há 662,6 mil quilômetros de redes de abastecimento de água, as quais conectam 57,2 milhões de ligações de água. Representando um crescimento em 2018 no atendimento por água tratada de 2,1% em relação ao ano de 2017, tal aumento é devido a 1,2 milhões de novas ligações de água realizadas no país, sendo que, estas ligações passaram a fornecer água tratada para mais de 701,5 mil habitantes (um crescimento de 0,4% em relação ao ano de 2017), totalizando desta forma em 2018 uma população atendida com redes de água igual a 160,7 milhões de habitantes. Os índices de atendimento urbano por rede de abastecimento de água potável para cada estado, estão representados conforme Figura 3.

Figura 3. Representação espacial por estado brasileiro do índice médio de atendimento urbano por rede de abastecimento de água



Fonte: Adaptado SNIS (2018)

A partir do mapa da Figura 3 é possível constatar que 20 (vinte) estados do Brasil e o Distrito Federal, possuem índices de atendimento urbano com água superiores a 80%, contudo os estados do Maranhão, Ceará, Acre e Rondônia se encontram em uma situação mais

preocupante do ponto vista sanitário por apresentarem índices de atendimento na faixa de 60% a 80% e, em situação mais crítica ainda, encontram-se o estados do Pará com índice abaixo de 60% e do Amapá com índice inferior a 40% (SNIS, 2019).

Desde o início de 2014, quando a crise hídrica se manifestou de maneira intensa no estado de São Paulo, têm se notificado informações frequentes relativas ao baixo índice pluviométrico em algumas das represas que abastecem a região metropolitana de São Paulo, reduzindo a disponibilidade de água no estado. É uma situação crônica, porém passível de ser contornada através de planejamento estratégico, no qual se que considere as informações climáticas na tomada de ações (CÔRTEES et al., 2015).

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP (2018), informou que, para atingir uma cobertura em abastecimento com água potável próximo de 100% em 2019, foram investidos R\$ 2,3 bilhões no setor. A companhia encerrou 2018 com um quadro de empregados de 14.449 pessoas, uma rede de abastecimento público de água tratada de 75,5 mil km e 247 estações de tratamento de água.

O abastecimento público na região metropolitana de São Paulo é efetuado por meio de oito estações de tratamento de água, conforme Tabela 1, sendo que apenas a Estação de Tratamento do Sistema Cantareira (Guaraú) fornece água para nove milhões de habitantes, o que representa 45% de toda população residente na região metropolitana de São Paulo (CÔRTEES et al., 2015).

Tabela 1. Estações de tratamento de água na Região Metropolitana de São Paulo, com suas respectivas produções de água potável e população atendida

<b>SISTEMA PRODUTOR</b>	<b>PRODUÇÃO EM</b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>POPULAÇÃO ATENDIDA</b> [milhões de habitantes]
<b>Alto Cotia</b>	1,20	0,41
<b>Alto da Boa Vista</b>	14,00	3,70
<b>Baixo Cotia</b>	0,90	0,42
<b>Casa Grande</b>	4,00	2,06
<b>Guaraú</b>	33,00	9,0
<b>Ribeirão da Estiva</b>	0,10	0,04
<b>Rio Grande</b>	5,00	1,02
<b>Taiacupeba</b>	15,00	3,30

Fonte: Sabesp, 2014

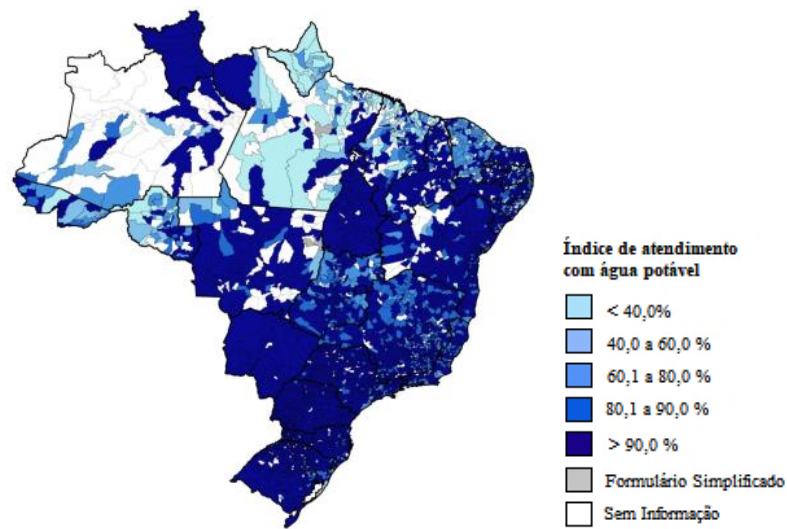
O estado de São Paulo possuía em 2018, 95,82% em atendimento com água potável, 88,76% em coleta de esgotos, 62,84% em tratamento de esgotos e 36,12% em perdas no abastecimento público de água. A SABESP, que é responsável por atender 369 municípios, o

que representa 57% das 645 cidades do estado de São Paulo, atingiu um índice próximo a 100% em 2019 para a cobertura no atendimento com água aos municípios por ela atendidos, o que representou quase 30 milhões de pessoas (66% da população do estado). Ainda a empresa projetou um cenário de 93% em cobertura em coleta de esgotos e de 83% no tratamento de esgotos para os municípios até o ano de 2022 (ABES-RS, 2018).

Com relação as Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá – Bacias PCJ, a qual abrange, total ou parcialmente, territórios de 76 municípios sendo que 71 pertencem ao estado de São Paulo e 5 ao estado de Minas Gerais. O atual panorama dos sistemas de abastecimento de água verificado nos municípios da bacia, identificou a existência de 103 Estações de Tratamento de Água – ETAs e 7 municípios abastecidos exclusivamente com poços. As captações superficiais somam algo em torno de 37,55 m<sup>3</sup>/s, representado 103,4% da disponibilidade hídrica superficial, portanto, há uma situação em que o consumo de água é maior do que a disponibilidade, caracterizando as Bacias PCJ em situação de estresse hídrico. Em média, o índice de atendimento urbano de água foi 98% e o índice de atendimento total de água de 95%. Já o índice de perdas na distribuição de água foi em média de 34% (PCJ, 2018).

O índice de abastecimento urbano para cada município da federação, pode ser verificado conforme Figura 4. Onde nota-se bons resultados em relação ao índice de atendimento e em relação a quantidade de municípios que forneceram informações ao SNIS. Cabe ressaltar que o mapa representa informações de 5.146 municípios, sendo que 3.996 apresentaram índice de atendimento superior a 90%. Outra informação importante, é com relação aos municípios que não forneceram informações ao banco de dados, estes que estão representados pela cor branca no mapa e pela cor cinza diz respeito aos municípios que responderam ao formulário simplificado, o que quer dizer que estes não possuem sistema de abastecimento público, a quantidade representada no mapa é de 424 e 10 municípios respectivamente (SNIS, 2019).

Figura 4. Representação espacial por município brasileiro do índice médio de atendimento urbano por rede de abastecimento de água



Fonte: Adaptado SNIS (2018)

### 3.2. TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO URBANO

Para propor uma tecnologia de gerenciamento de lodo produzido nas estações de tratamento é de extrema importância o conhecimento do tipo de tratamento da água bruta utilizado pela estação, uma vez que, o volume gerado e a qualidade do lodo produzido pela estação está principalmente, relacionado ao sistema de tratamento.

Segundo Di Bernardo et al. (2011), a quantidade e as características do lodo gerado pelas ETAs é função do tipo de tecnologia implantada para realizar o tratamento da água captada nos mananciais, como também das características da água bruta, usos ou não de produtos químicos, bem como suas quantidades, método de operação, automação das etapas do processo, habilidade dos operadores e reuso da água recuperada no tratamento.

O uso da água pelo ser humano é diverso, e dependendo da finalidade que se deseja utilizá-la é requerido um certo grau de qualidade dessa substância.

Braga et al. (2005), consideram a água para o abastecimento urbano como o uso mais nobre e prioritário, uma vez que, a qualidade de vida das pessoas está diretamente relacionada a água. O referido autor, alerta sobre a necessidade desta água apresentar características sanitárias e toxicológicas adequadas que, como sabemos é conseguido ao realizar algum tipo de tratamento antes de fornecê-la para a população.



Libâneo (2010), diz que para produzir água potável é necessário adequar a água bruta aos padrões estabelecidos pela legislação vigente no país, sendo que o tratamento utilizado para esse fim consistirá na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias deletérias a saúde humana. Ainda, no tratamento de água, diferentemente do realizado para água residuárias onde prevalecem processos biológicos de tratamento; as tecnologias voltadas ao tratamento de água para abastecimento urbano compreendem quase sempre apenas operações físico-químicas e, que a escolha da tecnologia deverá levar em consideração a característica da água bruta, custos de implantação/operação e manutenção, localização geográfica e características da comunidade, manuseio e confiabilidade dos equipamentos, flexibilidade operacional e disposição final do lodo.

Bittencourt et al. (2012), descrevem que as etapas de tratamento de água para consumo humano, em geral, seguem com etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração. Di Bernardo et al. (2008), descreveram as principais tecnologias utilizadas nas ETAs de produção de água potável, a saber: Ciclo completo ou convencional, Filtração Direta Descendente, Filtração Direta Ascendente, Dupla Filtração e Filtração em múltiplas etapas.

Cabe lembrar que, essas tecnologias possuem variações de projeto, tanto em termos de dimensões da ETA instalada, ou seja, capacidade de produção, como por exemplo, em termos de variações de eficiência, diferenças nos equipamentos devido à variedade de fornecedores disponíveis no mercado; equipamentos estes que, podem representar uma etapa particular do processo de tratamento. Deste modo, para uma mesma tecnologia de tratamento pode haver diferenças significantes de eficiência, capacidade de produção, custos operacionais, dentre outros aspectos. Por fim, para a escolha da tecnologia adequada é indispensável realizar um estudo aprofundado acerca das características da água bruta do manancial a ser explorado logo no início do projeto.

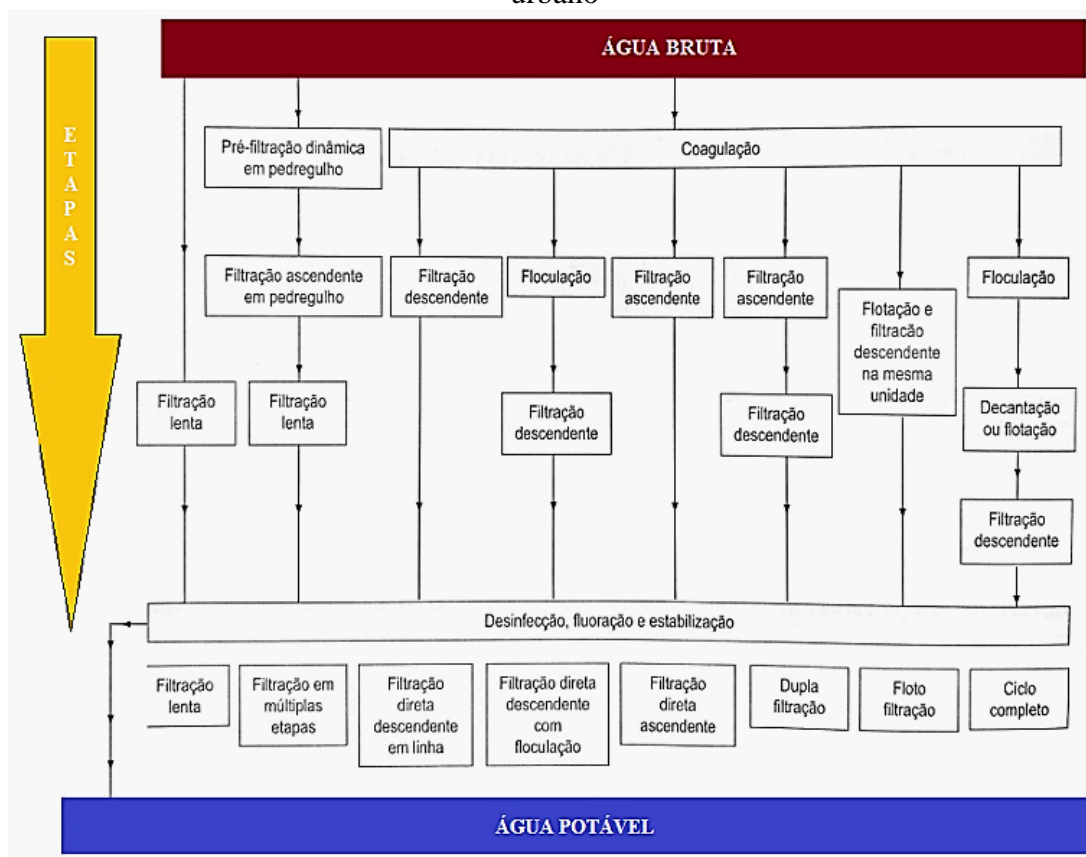
Os tipos de tecnologias mais utilizadas para o tratamento de água para fins de potabilidade, foram apresentados conforme Figura 5.

A filtração utilizando membranas é outra tecnologia de tratamento utilizada no tratamento de água para fins de potabilidade. Com a redução dos custos de operação e instalação, a filtração por membranas tende se tornar realidade.

Habert et al. (2006), informam que a tecnologia de separação por membranas é conhecida desde 1930 e que somente deixou de se tornar uma curiosidade científica e de laboratório, após os Estados Unidos no final da década de 1950 investir em projetos com o

objetivo principal de promover a dessalinização de águas. Di Bernardo et al. (2011), descrevem que as características das tecnologias de filtração por membrana, se diferenciam quanto aos mecanismos de separação, tipos de membranas, operação e módulos de instalação, funcionamento e rendimento.

Figura 5. Tecnologias frequentemente utilizadas no tratamento de água para abastecimento urbano



Fonte: Adaptado de Di Bernardo et al. (2011)

Braga et al. (2005), contam que um sistema de abastecimento de água potável para a população é constituído de equipamentos e instalações, onde fazem parte deste: manancial, captação, adução, tratamento, reservatórios de armazenamento e rede de distribuição. Os indicadores físicos, químicos e biológicos devem estar de acordo como os padrões estabelecidos pela legislação brasileira em vigor, no caso, dentro do “conjunto de valores máximos permissíveis das características de qualidade da água para o consumo humano” apresentados atualmente pela Portaria de Consolidação N° 5, De 28 de Setembro de 2017 (Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde) do Ministério da Saúde, através de seu ANEXO XX (Do Controle e da Vigilância da Qualidade da água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade.

Há várias maneiras de se adequar as características da água para torná-la compatível com as exigências da Portaria citada no parágrafo anterior. As tecnologias ou etapas de tratamento possuem essa finalidade de adequação aos parâmetros, onde as principais foram apresentadas de forma sucinta conforme descrito no Quadro 1.

Quadro 1. Descrição sucinta das principais etapas do tratamento de água para fins de abastecimento público

<b>ETAPAS DO TRATAMENTO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
Coagulação	Técnica que envolve o emprego por agitação rápida de produtos químicos insolúveis em água e que geram íons positivos na água, atraindo as impurezas carregadas negativamente presentes no meio. O resultado da junção entre moléculas e as impurezas é denominado por coágulo, este possui uma tendência maior de sedimentação quando comparado as impurezas dissolvidas na água bruta e ainda são passíveis de aglutinação formando flocos (maiores e mais pesados que os coágulos).
Floculação	Técnica utilizada para agregar os coágulos formados na etapa de coagulação, formando flocos para facilitar sua remoção seja por sedimentação ou por flotação. Deve ser realizada em um tanque sob agitação controlada, esta que, tende possuir um baixo gradiente de velocidade, permitindo com isso a formação dos flocos.
Sedimentação (decantação) / Flotação	Promove a remoção da matéria em suspensão, onde as partículas são sedimentadas ou flotadas em uma câmara ou tanque.
Filtração	Técnica que busca através de uma barreira física (camadas de areia e ou antracito) a remoção de impurezas que não foram removidas durante as etapas antecessoras do tratamento, seja por inexistência delas, seja por permanência de alguns flocos ou coágulos que não foram removidos pelo flotor ou sedimentador (decantador). Ainda, a filtração empregada no tratamento de água possui a finalidade de remoção de patógenos, também através dessa barreira física, na qual uma camada biológica, é formada nos espaços “vazios” entre os grãos de areia.
Cloração e Fluoretação	Produtos químicos que são adicionados a água, para atender os parâmetros estabelecidos pela Portaria 5/2017. A adição do cloro, além de ser realizada para o atendimento da legislação, possui a finalidade de promover a desinfecção, ou seja, a inativação de organismos patógenos.

Fonte: Autor, 2020.

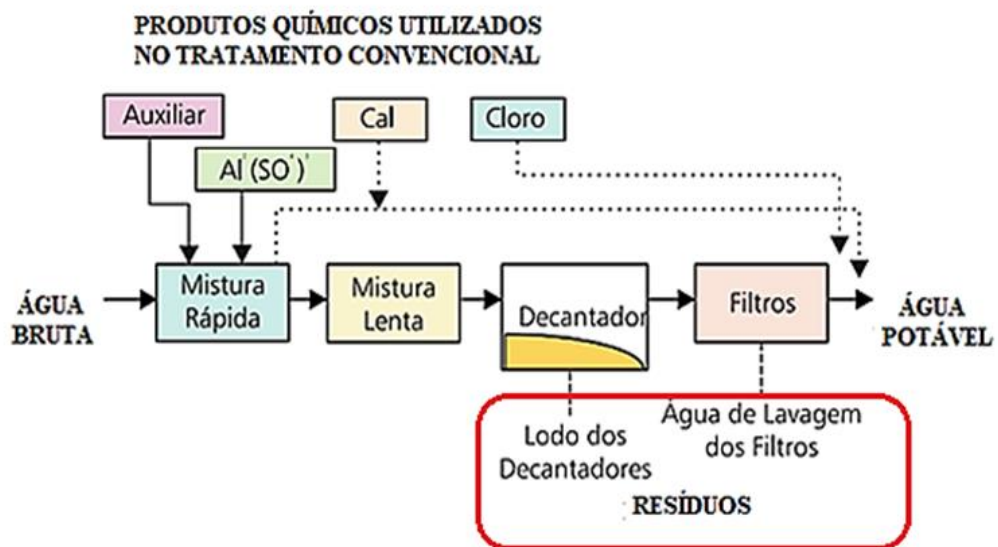
Ao se utilizar qualquer umas das tecnologias mencionadas nos parágrafos anteriores, são gerados resíduos durante o processo de tratamento de água, estes são em geral, denominados por lodo ou Resíduos de Estações de Tratamento de água – RETAs.

Libâneo (2010), descreve que, já a algum tempo se passou a considerar no Brasil o acondicionamento e ou tratamento do lodo e, das águas de lavagem dos filtros como fatores de importância indispensável, que devem ser avaliados seus projetos econômicos juntamente aos custos de implantação e operação de uma ETA. Ainda, deverá ser considerados os projetos de tratamento para os RETAs, antes mesmo de definir a tecnologia a ser implantada para realizar o tratamento de água.

### 3.3. LODO GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)

É comum observar profissionais responsáveis pela gestão e operação de ETAs discutirem sobre a importância da preservação da qualidade água bruta captada através de medidas que visem proteger os mananciais, mas permitem o lançamento de resíduos no corpo d'água mais próximo sem se preocuparem com seus efeitos negativos que causam sobre a qualidade da água, mostrando, portanto, uma certa incoerência. Os pontos de geração do resíduo em ETA operando com a tecnologia de tratamento do tipo convencional, bem como os pontos de adição de produtos químicos, foram apresentados conforme Figura 6 (PROSAB, 1999).

Figura 6. Fluxograma tratamento convencional de água com os pontos de geração de resíduos



Fonte: Adaptado de PROSAB (1999)

Guerra e Angelis (2005), mencionam que nos processos de tratamento de água, a geração de resíduos ocorre de maneira similar aos processos industriais, onde uma matéria prima passa por transformações em diversas operações (etapas físicas) e processos (etapas químicas) até se obter um produto final, gerando ao longo de uma ou mais etapas, resíduos com potencial poluidor. Desta forma, assim como nos resíduos produzidos pelas indústrias, os lodos produzidos pelas estações de tratamento de água, devem receber o devido tratamento de acordo com os padrões e normas que os regulamentam.

Di Bernardo et al. (2012), complementam dizendo que é comum observar a falta de comprometimento quanto a necessidade de resolver o problema de disposição final desses resíduos, por parte dos responsáveis pelos serviços tratamento e fornecimento de água potável. O referido autor lembra ainda que em 2008, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, última pesquisa realizada até o momento pelo órgão, apontou que 26,7% das fontes de captação de água, recebiam algum tipo de poluição ou contaminação e, que 2.098 municípios daquele ano, 37,7% que geravam lodo nas ETAs, destes 2.098 municípios foi constatado que 1.415 municípios, ou seja, 67,4% deles dispunham imediatamente seus resíduos nos corpos d'água mais próximos.

O não tratamento e disposição inadequada do lodo produzidos pelas ETAs gera passivo ambiental às empresas responsáveis, em função da elevada quantidade de metais presentes no resíduo (PCJ, 2018).

É importante ressaltar o perigo de contaminação da população em função do lançamento deste resíduo no meio ambiente, devido principalmente à elevada concentração de alumínio que pode ser constatada no resíduo, caso seja empregado Sulfato de Alumínio durante a etapa de coagulação do tratamento de água, o que é comum de se verificar nas estações de tratamento de água brasileiras.

Estudos indicam que indivíduos que costumavam ingerir alimentos contaminados com alumínio, apresentaram riscos duas vezes maior para desenvolver a doença de Alzheimer. Ainda, resultados obtidos por vários pesquisadores apontaram uma evidência científica, ao verificarem que o Alumínio intervém em diversos processos neurofisiológicos responsáveis pela degeneração características da doença. Portanto, pode-se afirmar que a prevenção à exposição ao Alumínio, poderia diminuir a incidência de doenças crônicas-degenerativas (FERREIRA et al., 2008).

Segundo Di Bernardo et al. (2011), o lodo gerado em estações de tratamento de água para abastecimento público, quando lançados nos corpos receptores, contribuem para aumentar a concentração de metais tóxicos nos bentos e diminuir significativamente a luminosidade do meio, reduzindo a produtividade do fitoplâncton, além de serem potencialmente tóxicos para diversos organismos aquáticos, os quais são importantes componentes das comunidades bentônicas e planctônicas e relevantes na alimentação dos peixes.

Portanto, com base nos estudos supracitados, caso ocorra o lançamento indevido dos RETAs nos corpos receptores próximos, poderá resultar em sérios danos ao meio ambiente. Além disso, uma vez que, o lodo ao ser gerado por possuir uma alta carga de sólidos, representada em boa parte de material inorgânico, contribuirá com o assoreamento de seus respectivos leitos. Também cabe lembrar que, o material por ter origem em um processo que visa a remoção de seres vivos maléficos a saúde humana, há uma tendência desse lodo possuir elevada carga microbiológica, o que pode prejudicar o equilíbrio no meio; sem falar ainda de outras substâncias químicas oriundas do tratamento que tendem a estarem presentes, podendo provocar intoxicação nos seres humanos e nos seres vivos.

Bittencourt et al. (2012), transcrevem informações da Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 10.004/2004, na qual é definido o lodo como um resíduo gerado durante o processo de transformação da água bruta, captada nos mananciais, em água potável para consumo humano. E que, a remoção deste resíduo deverá ocorrer com periodicidade nos decantadores e filtros, para com isso garantir a eficiência do processo.

De forma mais detalhada, Di Bernardo et al. (2012), informam que os RETAs são originados nas etapas de clarificação, realizadas através da decantação ou flotação durante as fases de limpeza e quando ocorre as lavagens dos filtros e que os resíduos originados nessas etapas possuem características distintas, sendo que o seu tratamento poderá ser realizado de forma segregada ou pela mistura de ambos durante a fase de gerenciamento do resíduo.

### 3.3.1. Características e Produção de Lodo de ETA

A produção de água potável realizada pelas ETAs para fins de abastecimento público, geram uma grande quantidade de resíduos durante o processo de tratamento da água bruta. Este resíduo dependendo da concepção do sistema de tratamento de água (tecnologia

empregada) poderá possuir de uma estação para outra, diferentes características (FREITAS et al., 2005).

De acordo com Di Bernardo et al. (2012), há uma tendência internacional em reduzir a quantidade de lodo produzido nas ETAs; o restante deve ser reciclado/reusado e, somente o que não puder ser aproveitado, deve ser disposto. A redução se dará conforme a adoção de tecnologias mais eficazes no que se diz respeito a menor geração desses resíduos no decorrer do tratamento e ou pelo aperfeiçoamento das tecnologias de tratamento já existentes e ainda através do surgimento de novas tecnologias. Contudo, é ressaltado referido autor a questão operacional do processo no que se diz respeito a quantidade gerada de lodo, tanto no quesito do tratamento da água que chega na estação, quanto nas diferentes formas e dispositivos existentes para remoção do lodo, em um etapa particular, como por exemplo, em decantadores presentes nas estações operando com a tecnologia de ciclo completo que, podendo estes decantadores, serem equipados de variados tipos de dispositivos de remoção de lodo, desta maneira, a variedade no dispositivo influenciará no volume de resíduo removido.

A existência de características distintas do resíduo é função principalmente dos diferentes tipos de tecnologias de tratamento de água existentes, modos de operação do tratamento de água e qualidade da água captada para realizar o tratamento. Ainda, esses resíduos são gerados em quantidades distintas ao longo do ano, mês e semana o que influencia no processo de tratamento (“desidratação”). A “desidratação” ou remoção de parcela de água do lodo tem por objetivo a redução do volume (PROSAB, 1999).

É possível constatar como as características do resíduo gerado (lodo de ETA) variam de uma estação para outra, ao se analisar os parâmetros trazidos pela Tabela 2. Tais parâmetros se referem a duas estações que possuem o mesmo tipo de tecnologia para realizar o tratamento de água. Os parâmetros foram determinados nos resíduos gerados pelas descargas hidráulicas do **decantador de alta taxa** (tecnologia presente nas estações A e B).

Tabela 2. Características químicas de amostras compostas das descargas hidráulicas de decantadores de alta taxa de duas diferentes Estações de Tratamento de Água

<b>PARÂMETRO</b>	<b>ETA A</b>	<b>ETA B</b>
<b>Turbidez (uT)</b>	3.650	3.378
<b>Sólidos Suspensos Totais (mg/L)</b>	4.500	3.920
<b>Sólidos Suspensos Totais Fixos (mg/L)</b>	3.920	3.200
<b>Sólidos Suspensos Totais Voláteis (mg/L)</b>	580	720

Fonte: Adaptado de Di Bernardo et al. (2012)

Conforme explicado nas citações anteriores, as características do lodo gerado pelas ETAs, são dependentes do tipo de tecnologia utilizada para realizar o tratamento da água bruta. Entretanto, as alterações verificadas nas características do lodo de uma ETA para outra, nesse caso, não foram devido a utilização de uma tecnologia diferente para tratar a água bruta, pois as duas estações trazidas pela Tabela 2 utilizam a mesma tecnologia de tratamento. Provavelmente, o que influenciou nas características diferentes no lodo gerado pela ETA A em Relação a ETA B conforme verificado, foi pelas diferenças na qualidade da água captada (principalmente turbidez) e ou a questão operacional realizada durante o processo de tratamento, ou ainda, também devido aos usos de diferentes formas de remoção do lodo.

As características do lodo gerado em uma estação de tratamento de água em São Carlos – SP, a qual opera pela tecnologia do tipo convencional e lança seus resíduos no córrego do Monjolinho, foram determinadas obtendo resultados para o resíduo produzido acerca dos parâmetros, conforme Tabela 3 (PROSAB, 1999).

Tabela 3. Características químicas de amostras compostas do lodo gerado em decantadores com remoção descontínua e manual da ETA (tecnologia convencional) de São Carlos - SP

<b>PARÂMETRO</b>	<b>VALOR MEDIDO</b>
<b>Sólidos Totais (mg/L)</b>	30.275
<b>Sólidos Suspensos Totais (mg/L)</b>	27.891
<b>Sólidos Suspensos Totais Fixos (mg/L)</b>	22.034
<b>Sólidos Suspensos Totais Voláteis (mg/L)</b>	5.857

Fonte: Adaptado de PROSAB (1999)

O impacto provocado pelo resíduo gerado, foi observado ao longo do corpo receptor, com relação a alteração nos parâmetros da água do rio após efetuado o lançamento, no que se refere a cor, pH, DQO, Sólidos Totais e Sólidos Sedimentáveis. A avaliação feita constatou que tais parâmetros sofreram mudanças elevadas e bruscas após o lançamento provocando degradação da qualidade ambiental do córrego do Monjolinho. Os valores atingiram cerca de 100 vezes a mais nos parâmetros analisados quando comparado com os valores dos mesmos parâmetros antes do lançamento dos resíduos no corpo receptor (PROSAB, 1999).

E novamente, as diferenças com relação as características dos resíduos gerados de estação para estação, tanto aquelas que usam a mesma tecnologia no tratamento de água, quanto as que não usam, podem ser notadas comparando agora a Tabela 3 com a Tabela 2.

Para exemplificar como podem ser distintas as características do lodo gerado pelas Estações de Tratamento de Água, pode-se pela Tabela 2 analisar os valores de Sólidos



Suspensos Totais de decantadores de alta taxa, onde tem-se para ETA A o valor de 4.500 mg/L e para a ETA B o valor de 3.920 mg/L; já para estação com **decantador de remoção de lodo descontínua e manual**, o valor de Sólidos Suspensos Totais chegou a 27.891 mg/L, conforme apresentado pela Tabela 3. Portanto, a forma de remoção dos resíduos das unidades de decantação, bem como o tipo de decantador empregado no tratamento (alta taxa ou convencional) influenciam na composição do resíduo gerado (lodo de ETA), entretanto, é importante ressaltar além disso, a possibilidade de as diferenças de turbidez na água bruta também ter influenciado na composição desses resíduos.

Em relação as características do resíduo produzido durante a **lavagem dos filtros**, em estações que contam com a tecnologia de ciclo completo ou convencional, Di Bernardo et al. (2012), afirmam que a concentração de Sólidos Suspensos Totais - SST na água de lavagem pode variar de 100 a 700 mg/L. É informado ainda, que a quantidade produzida dos resíduos de água de lavagem dos filtros, pode variar de 0,5 a 3% do volume total diário produzido em uma ETA com tecnologia convencional.

Do mesmo modo, fazendo-se a análise comparativa dos parâmetros trazidos por Di Bernardo et al. (2012), conforme Tabela 4, é possível constatar as diferenças nas composições dos resíduos gerados pelas ETAs D, E e F. Observa-se que, neste caso a tecnologia de tratamento não influenciou nas características dos resíduos produzidos pelas estações, uma vez que, todas ETAs operam com tecnologia de tratamento do tipo convencional. Possivelmente, o que influenciou nas características diferentes verificadas pela comparação entre os três resíduos gerados (ver os valores em destaque da Tabela 4), foi a questão operacional realizada no tratamento, usos de diferentes formas de remoção do lodo e ou diferenças na qualidade da água bruta (principalmente turbidez).

Tabela 4. Características químicas de amostras compostas de águas de lavagem de filtros de Estações de Tratamento de Água com tecnologia de tratamento por ciclo completo

<b>PARÂMETRO</b>	<b>ETA D</b>	<b>ETA E</b>	<b>ETA F</b>
<b>Turbidez (uT)</b>	130	171	58
<b>pH (-)</b>	7,1	8,04	6,9
<b>Sólidos Totais (mg/L)</b>	367	NM	88
<b>Sólidos Suspensos Totais (mg/L)</b>	250	313	59
<b>Sólidos Suspensos Totais Voláteis (mg/L)</b>	40	83	17
<b>DQO (mg/L)</b>	40,8	52	35

Fonte: Adaptado de Di Bernardo et al. (2012)

NM: Não Medido

Por fim, se fez uma comparação também, das diferenças nas composições dos resíduos gerados pela lavagem dos filtros entre duas diferentes estações, sendo uma delas operando com tecnologia de tratamento do tipo tratamento convencional e outra do tipo filtração direta. Os parâmetros, podem ser averiguados pela comparação dos valores trazidos pela Tabela 4 com a Tabela 5. Ressalta-se novamente que, neste caso a tecnologia utilizada para o tratamento não é a mesma, desta forma, pode-se deduzir que, as características do resíduo produzido poderão ser influenciadas pelo tipo de tratamento utilizado.

Tabela 5. Características químicas de amostras compostas de águas de lavagem de filtros de Estações de Tratamento de Água com tecnologia de tratamento por filtração direta ascendente

<b>PARÂMETRO</b>	<b>VALOR MEDIDO</b>
<b>Turbidez (uT)</b>	76
<b>pH (-)</b>	7,25
<b>Sólidos Totais (mg/L)</b>	130
<b>Sólidos Suspensos Totais (mg/L)</b>	95
<b>DQO (mg/L)</b>	48

NMP: Número Mais Provável

Fonte: Adaptado de Di Bernardo et al. (2012)

Em um levantamento realizado em 22 ETAs de tratamento por ciclo completo, sendo 11 do tipo convencional e 11 de alta taxa e, portanto, em todas as estações ocorre a geração de lodo durante a produção de água potável. Foi identificado que 86% lançavam seus resíduos no corpo receptor mais próximo sem nenhuma tecnologia de tratamento, 9% tratam seus resíduos e 5% direcionavam o lodo para uma das Estações de Tratamento de Esgotos – ETE do município (ACHON e CORDEIRO, 2015).

Andreoli et al. (2014), relatam que o Brasil não dispõe ainda de dados consistentes sobre a produção e destinação final de lodos de esgotos, devendo assim, os pesquisadores trabalhar com estimativas em função do atendimento urbano em coleta e tratamento de esgotos. Mas estima-se uma produção de lodo calculada em função de valores médios de produção de esgotos per capita.

A condição referente a dados consistentes sobre produção e destinação final de lodos de esgotos verificada pelos autores supracitados, pode ser também verificada para o lodo gerado em estações de tratamento de água, uma vez que em diversos estudos realizados no meio acadêmico, pelos recentes diagnósticos do SNIS sobre as condições do saneamento no Brasil e através dos dados mais atuais do IBGE, é evidente a carência de informações sobre o tema lodo de ETA, principalmente sobre quantidade total produzida e sobre a quantidade disposta no país.

Contudo, existem modelos de estimativas (equações) da geração de lodo em função da produção total de água específica para uma estação de tratamento de água específica, são disponibilizados por Di Bernardo et al. (2012).

Ainda, existem estudos que relatam estimativas de produção de Lodos de ETA pontuais, seja por regiões, bacias hidrográficas ou por áreas de atuação da empresa responsável pela prestação do serviço de tratamento de água.

Em 2018 houve uma previsão de produção de lodo de ETAs de 90 toneladas por dia em base seca (o que significa dizer, que foi desconsiderado a parcela de umidade ainda presente no lodo antes dele ser direcionado a disposição final). Esses dados são referentes aos municípios nos quais a SABESP é a empresa responsável pela prestação dos serviços de produção e distribuição de água potável (PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA, 2018).

Portanto, em 2018 a quantidade de lodo gerada pela SABESP em volume e peso, foi bem maior que 90 toneladas por dia, uma vez que, é comum a quantidade de água ainda presente no lodo, superar 50% após o desaguamento.

Segundo resultados de um estudo nas Bacias PCJ, há estimativa de geração de 3 mil toneladas diárias de lodo de ETA e ETE em 2020 pelos 76 municípios presentes na bacia (PCJ, 2011). Em outro estudo realizado nesta mesma Bacia, foi identificado 103 estações de tratamento de água, sendo que 98 estavam em operação e, portanto, gerando resíduos. Destas estações em operação, foi constatado que apenas 28% possuem algum destino para o seu lodo gerado, como secagem e envio para aterros, 35% dispõem diretamente seus resíduos nos corpos hídricos, 19% não responderam à pergunta e 18% ainda não há destino adequado, mas possuem projetos ou previsão de adequação (PCJ, 2018).

Rubim (2013), menciona que o destino final dos resíduos dos sistemas de tratamento de água é um grande desafio para os países, e o processo é complexo necessitando de conhecimentos diversos, sendo que os custos podem variar de 20 a 60% dos custos operacionais de uma estação. Ainda, há perspectiva no aumento de geração de lodo em função da tendência de instalação de novas estações.

É importante considerar ainda o crescimento populacional positivo no país, o que reflete na necessidade do aumento no volume de água a ser tratada para os próximos anos, assim a produção de lodo deve ser elevada proporcionalmente, intensificando o problema. Portanto, estudos voltados para resolver ou amenizar a problemática do lodo é de grande importância e, é sobre esse tema, ou seja, as tecnologias disponíveis que o estudo irá tratar nos itens subsequentes.

### 3.3.2. Tecnologias para o Tratamento do Lodo Gerado em ETAs (RETAs)

O lodo gerado em estações de tratamento de água, denominados também por Resíduos de estações de tratamento de água como mencionado no início deste capítulo, deverá ser submetido a um processo de tratamento e disposição final adequada para que não haja poluição ambiental.

Richter (2001), informa que o tratamento dos resíduos (lodo de ETA) gerado nestas estações, visam obter condições adequadas para sua disposição final, como estado sólido ou semi-sólido, pela remoção de água para concentrar os sólidos e diminuir o volume desses resíduos.

A definição da tecnologia a ser utilizada dependerá de fatores como área necessária e disponível para implantação, custos com a área, distância da estação ao local de disposição final, condições climáticas, custo dos equipamentos, custos operacionais, necessidade de mão de obra qualificada ou não (recursos humanos), necessidade de condicionamento do lodo ou não (preparo do lodo para o tratamento), dentre outros fatores (PROSAB, 1999).

O processo de tratamento é o que chamamos de tecnologias para o tratamento ou gerenciamento do resíduo em questão e, esse processo de tratamento do lodo de ETA consisti atualmente em adotar tecnologias com o foco voltado mais para a remoção de umidade, diferentemente, por exemplo, do lodo gerado em uma Estação de Tratamento de Esgoto – ETE, este último, pode requerer além da remoção de umidade, processos de tratamento biológico como a digestão e estabilização.

Portanto, o intuito principal das alternativas tecnológicas disponíveis para o tratamento de lodo de ETA atualmente, é a redução significativa de volume, o que facilitará em termos de logística de transporte do resíduo, adequação com normas disposição em aterros e, ainda reduzirá expressivamente os custos com disposição final.

Collard et al. (2017), explicam que os processos de tratamento de lodo geralmente têm dois objetivos, sendo o primeiro denominado espessamento e o segundo desaguamento. Nos dois processos é possível verificar a ocorrência de redução considerável no volume de lodo, o que diminui os custos com manuseio, transporte e descarte (disposição final).

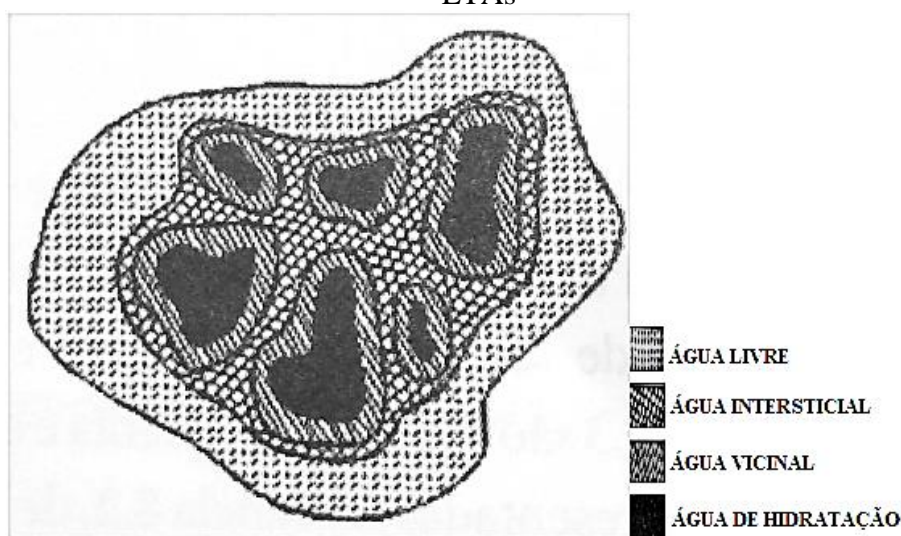
Di Bernardo et al. (2012), informam que as frações de água presentes nos sólidos dos lodos de ETA podem ser definidas de diferentes tipos, a saber:

- Água livre;
- Água intersticial;

- Água vicinal;
- Água de hidratação.

Por sua vez, o referido autor informa que a água livre é a mais fácil de ser removida e as frações intersticial e vicinal são removidas somente com o uso de polímeros e métodos específicos. As frações discutidas pelo autor estão ilustradas pela Figura 7.

Figura 7. Esquema ilustrativo dos diferentes tipos de frações de água presentes em lodos de ETAs



Fonte: Adaptado de Di Bernardo et al. (2012)

A água livre presente no lodo de ETA deve ser removida rapidamente com o intuito de diminuir o tempo de operação, sendo que esta água pode ser reaproveitada no processo. Ainda, a redução no volume do lodo de ETA é realizada pela remoção da água livre e da água presente entre os interstícios do sólido (entre partículas de lodo) (PROSAB, 1999).

Existem diversos meios de reduzir o volume dos RETAs, as tecnologias mais utilizadas para o tratamento de lodos de ETAs, inclusive a tecnologia de secagem natural em estufa, serão descritas na sequência de forma sucinta, apresentando brevemente seu funcionamento e características, os principais equipamentos (mas não todos os existentes) para a operação unitária de remoção de umidade de lodos de ETAs. Será dado um enfoque especial relativo a informações a esta última, pois o levantamento sobre a secagem natural em estufa, servirá de embasamento teórico para os experimentos de secagem a serem realizados no presente estudo.

É preciso notar que, devido a forma que a água está presente no lodo, pode-se ter ao mesmo tempo em um processo para o tratamento dos RETAs as etapas de Adensamento, Desaguamento e Secagem. Nos itens seguintes do presente estudo, será possível constatar que o Adensamento, normalmente terá o intuito principal de remoção da água livre, já o desaguamento terá o designo de remover a água vicinal e intersticial, sendo comum a aplicação de compostos químicos que auxiliarão na remoção deste tipo de umidade presentes no lodo de ETAs.

Por fim, a secagem é uma forma que se pode utilizar para remoção da água de hidratação (que é mais difícil de ser removida) ainda, cabe ressaltar que esta tecnologia pode também ser utilizada para remoção simultânea da água de hidratação e vicinal.

#### 3.3.2.1. Adensamento ou espessamento

Como já descrito pelo item 3.3.2 deste estudo, a técnica de adensamento possui a finalidade de redução do volume de lodo produzido. Di Bernardo et al. (2012), descrevem que nos tanques de adensamento por gravidade ou flotação, ocorre primeiramente a clarificação dos resíduos e posteriormente o adensamento dos sedimentos ou do flotado. Portanto, na etapa de adensamento, a água removida do lodo corresponderá quase que em sua totalidade, apenas pela fração denominada por água livre.

Em geral a concentração de sólidos totais presentes em lodos de ETAs está na ordem de 0,1 a 1%. Ainda, após a etapa de adensamento, esta concentração pode atingir valores superior a 2% para o caso de ETAs que utilizam como coagulantes sais de ferro ou alumínio (PROSAB, 1999).

Di Bernardo et al. 2012, classifica a tecnologia de Adensamento em três tipos, a saber:

- Adensamento por gravidade;
- Adensamento por flotação;
- Adensamento mecânico.

### *3.3.2.1.1. Adensamento por gravidade*

O adensamento por gravidade ou espessamento por gravidade (equipamento: adensador ou sedimentador por gravidade), é o mais antigo e disseminado, existindo um número significativo de unidades em operação no mundo. O equipamento pode ser operado conforme o recebimento de lodo em batelada ou contínuo, dependendo das particularidades do equipamento, das unidades operacionais da ETA e ou das características dos lodos nelas gerados (PROSAB, 1999).

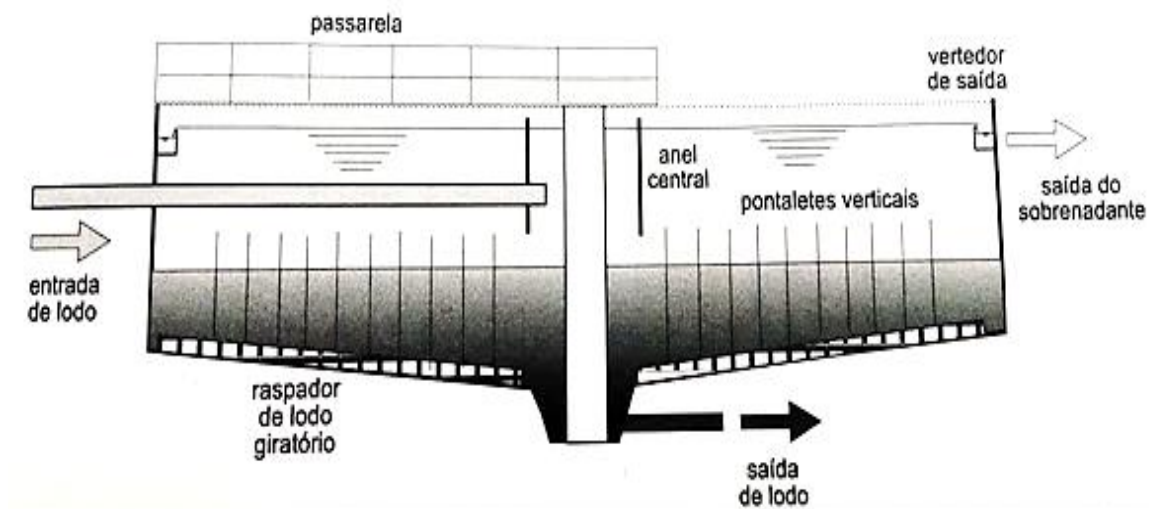
O princípio de funcionamento do equipamento, como seu próprio nome diz, é em função da ação gravitacional sobre os sólidos, os quais tendem a sedimentar no fundo do equipamento. Os adensadores por gravidade possuem uma estrutura similar aos decantadores e o seu formato é usualmente circular com alimentação central e remoção do lodo pelo fundo. Já a retirada do sobrenadante ocorre pela periferia do equipamento (ANDREOLI et al. 2014).

Em relação ao dimensionamento, é necessário a observação de diversas variáveis e critérios. Contudo algumas são importantes de mencionar, como explicam Di Bernardo et al. (2012). Por exemplo, no caso da área do tanque de adensamento, a qual deve ser obtida em função da concentração resultante de sólidos que se deseja obter no lodo.

No Brasil, o dimensionamento dos adensadores segue os critérios de projeto segundo a NB-570 (ABNT 1989) para uma altura mínima de 3,0 m da parede lateral e um tempo de detenção hidráulica máximo de 24h. Ainda, o projeto pode ser feito com base nos princípios da sedimentação zonal e teoria do fluxo ou através de taxas de aplicação de sólidos e taxas de aplicação hidráulica (ANDREOLI et al., 2014). A Figura 8 ilustra o corte esquemático de um adensador típico para o tratamento de lodos.

Os parâmetros de projeto usuais para unidades de adensamento por gravidade, podem ser conseguidos diretamente pelos fabricantes ou como informam Di Bernardo et al. (2012), através da American Water Works Association (AWWA, 1999), American Water Works Association (AWWA, 1999) e American Society of Civil Engineers (AWWA, ASCE, 1998). Contudo, o referido autor alerta para a importância desses parâmetros serem obtidos pela realização de ensaios em laboratório ou em escala piloto utilizando as condições reais operacionais da ETA, como vazão e características do lodo gerado.

Figura 8. Perfil esquemático de adensador de lodo por gravidade



Fonte: Gonçalves et al. (2014)

#### 3.3.2.1.2. Adensamento por flotação com ar dissolvido

O adensamento por flotação é mais satisfatório quando comparado ao realizado por densidade e, usualmente as taxas de aplicação utilizadas para o dimensionamento são mais elevadas nos flotadores, ainda, polímeros podem ser utilizados de forma efetiva para o aumento de eficiência da operação (ANDREOLI et al., 2014).

Este tipo de adensamento, constitui uma prática mais recente para o adensamento de lodos provenientes do tratamento em ETAs, apesar de existir um número menor de unidades em operação, é possível através do adensamento por flotação utilizando uma área menor, tratar a mesma quantidade de lodo tratada através do adensamento por gravidade, obter maiores concentrações de sólidos no lodo ao final do tratamento e, ter maior versatilidade operacional, uma vez que, é possível controlar a quantidade de ar enviada ao equipamento e assim variar sua eficiência e capacidade de tratamento (PROSAB, 1999).

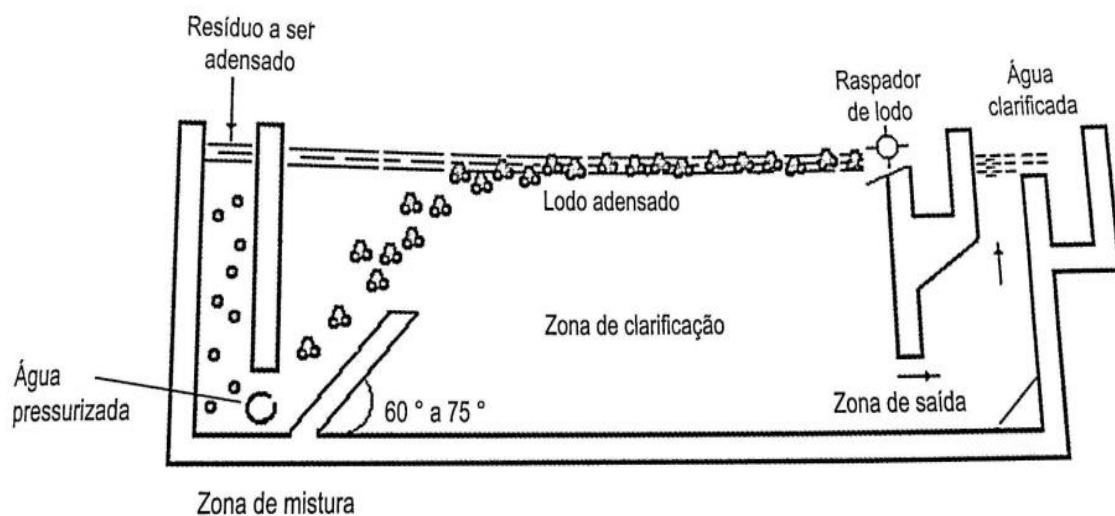
Nesse processo de adensamento ou espeçamento por flotação com ar dissolvido, uma solução deve ser preparada previamente. Esta é mantida em elevada pressão para que após a introdução de ar, este se dissolva na mesma. Assim, quando ocorrer a despressurização dentro do equipamento, no caso do flotador, o ar dissolvido é liberado na forma de pequenas bolhas, em movimento ascensional, possibilitando, portanto, a remoção de pequenas partículas de lodo para a superfície (ANDREOLI et al., 2014).



De acordo com Di Bernardo et al. (2012), o resíduo a ser adensado entra em câmara, na qual ocorre uma mistura com água pressurizada; as bolhas liberadas pela água saturada aderem aos sólidos e formam aglomerados (“bolha de ar – sólido”) com massa específica menor que a da água. Assim, o lodo flotado é removido por uma caneleta e escoado para o tanque de lodo adensado, enquanto a água clarificada é coletada e recirculada para a câmara de pressurização. O autor traz diversas informações sobre o dimensionamento da operação de flotação para lodos gerados em ETAs em seu estudo, sendo que uma das mais importantes informações trazidas é quanto a limitação do comprimento da câmara de flotação, o qual não deve superar 20 metros, pois para valores maiores, existe a possibilidade do lodo não permanecer na superfície até ser removido pelos raspadores, recomendando portanto, uma relação máxima de comprimento por profundidade igual a 4, ou seja, para um equipamento com 3 metros de profundidade, o seu comprimento máximo poderá ser de até 12 metros.

Deste modo, diferentemente dos adensadores por gravitação no qual o lodo se acumula no fundo do equipamento, nestes, o lodo é acumulado e espessado na superfície com a saída da água clarificada acontecendo por meio de aberturas situadas em uma região do equipamento próxima ao fundo dele. E, para recolher eventual parcela de lodo que venha a sedimentar no fundo do flotador, é comum prever no equipamento a existência de um depósito no fundo para a coleta e acúmulo deste lodo decantado, sendo que unidades maiores possuem inclusive raspadores para a sua periódica remoção (PROSAB, 1999). Um esquema típico do equipamento é representado conforme Figura 9.

Figura 9. Perfil esquemático de adensador de lodo por gravidade flotação



Fonte: Adaptado de Di Bernardo et al. (2012)

De acordo com Di Bernardo et al. (2012), Andreoli et al., 2014 e pelos autores supracitados no parágrafo anterior (PROSAB), todos frisam que a escolha do tipo de unidade de adensamento (espessamento) de lodos de ETAs, sempre precisará se pautar nos resultados obtidos em laboratórios ou plantas piloto, os quais podem ser obtidos a partir de ensaios realizados com amostras representativas do lodo a ser espessado.

#### *3.3.2.1.3. Adensamento mecânico*

O adensamento mecânico, consiste na utilização de equipamentos mecânicos para efetuar a concentração dos sólidos do lodo em uma fase e conseqüentemente obter outra fase clarificada. O uso de produtos auxiliares para contribuir na remoção de umidade nesse tipo de adensamento, é bastante comum, sendo que no modo adensamento por gravidade ou flotação, pode ou não ocorrer o uso desses produtos auxiliares.

Di Bernardo et al. (2011), informam que há diversos fabricantes de equipamentos mecânicos para promover o adensamento (espessamento) dos RETAs, ou seja, dos lodos gerados em ETAs, sendo recomendado a consulta dos dados de cada equipamento com seus respectivos fabricantes. Ainda, existem inúmeros tipos de equipamentos mecânicos disponíveis no mercado brasileiro para o espessamento de lodo de ETAs, sendo os mais comuns:

- Adensador mecânico de esteira;
- Adensador dinâmico helicoidal;
- Adensador dinâmico de tambor rotativo.

A descrição destes equipamentos não será realizada por este estudo, pois existem alternativas para o espessamento de lodo de ETAs mais usuais no momento, que é o caso do espessamento por gravidade ou flotação, os quais foram descritos anteriormente com o intuito principal de possibilitar uma noção geral e resumida, a respeito da operação unitária de remoção de umidade de lodos por espessamento (PROSAB, 1999).

### 3.3.2.2. Condicionamento

O condicionamento de lodo é utilizado quando se deseja obter um melhor desempenho nas operações unitárias utilizadas para remoção de água presente nos lodos de ETAs que utilizam sais de ferro ou alumínio como coagulantes, sendo comum a utilização dessa técnica. Ele pode ser de origem física ou química, sendo o primeiro muito utilizado em países frios, pois o condicionamento físico do lodo consiste em um processo de congelamento e descongelamento natural e, portanto, inviável economicamente em países tropicais como o Brasil. Já o segundo, consiste na adição de produtos químicos que atuam auxiliando a remoção da água no lodo, como a cal ou polímeros sintéticos (polieletrólitos), estes são classificados conforme a carga apresentada por suas moléculas em solução aquosa, segundo listado na sequência. O condicionamento do lodo pode ser utilizado tanto nas etapas de adensamento quanto de desaguamento (PROSAB, 1999).

- Aniônicos (cargas negativas);
- Catiônicos (cargas positivas);
- Polímeros não iônicos (sem caráter marcante aniônico ou catiônico).

Andreoli et al. (2014), explicam que a função do condicionamento é modificar o tamanho e distribuição das partículas, as cargas de superfície e a interação das partículas no lodo. Sendo o objetivo principal aumentar o tamanho das partículas presentes no lodo. A quantidade de coagulante a ser utilizada dependerá das características do lodo e dos processos que envolvem a etapa de condicionamento, isto porque as características do lodo podem ser modificadas, como por exemplo o nível de hidratação e a quantidade de partículas finas que podem ser alteradas pelo tipo de transporte nas tubulações ou pelo tempo de estocagem na unidade de condicionamento.

### 3.3.2.3. Desaguamento ou desidratação

De acordo com Metcalf e Eddy (2016), o desaguamento é uma operação unitária utilizada para remoção do material sólido do material líquido presente no lodo, resultando em um produto com maiores quantidades de sólidos. Sendo de grande importância, a realização

de ensaios em bancada ou testes em escala piloto de desaguamento utilizando amostras do lodo a ser tratado, pois de acordo com os referidos autores, é praticamente impossível selecionar o melhor dispositivo de desaguamento e a dosagem de polímero ideal sem a prática prévia desses ensaios. Ressaltam ainda que, não é recomendado a utilização informações disponibilizadas pelos fabricantes de dados de desempenho para projetos, sendo aconselhado a realização de ensaios paralelos nos quais se utilizaria diferentes tipos de equipamentos, empregando o lodo a ser processado (tratado), para então, efetuar a seleção do melhor equipamento para a unidade em questão.

Di Bernardo et al. (2012), classificam as tecnologias de remoção de umidade por Desaguamento em dois tipos, a saber:

- Desaguamento natural;
- Desaguamento mecânico.

E informa que o desaguamento do lodo de ETAs adensado, é uma operação na qual se preocupa aumentar o teor de sólidos totais e conseqüentemente diminuir o volume de lodo a ser disposto. Uma vez que, cada técnica dentre a classificação feita anteriormente por desaguamento natural ou por desaguamento mecânico, possui suas peculiaridades em função de diversos tipos de equipamentos existentes, por exemplo, dentro da classificação de desaguamento mecanizado há vantagens e desvantagens, devendo o projetista estar atento para os custos de implantação, operação e manutenção. Finalizam dizendo que é desejável, seja pela utilização de qualquer uma das técnicas de desaguamento, a obtenção de uma torta de lodo com teor de sólidos totais superior a 20% em massa (DI BERNARDO et al., 2012).

#### *3.3.2.3.1. Desaguamento mecânico por centrífuga*

Dentre os equipamentos mecânicos utilizados para remoção de umidade a nível de desaguamento ou desidratação de lodos gerados em ETAs, as centrífugas são os equipamentos mais utilizados no momento. Estes são destinados para promover a separação de uma fase líquida de outra fase sólida pela ação de uma força centrípeta, desta maneira o líquido, no caso a água, tenderá a “sair” pela tangente por possuir menor densidade ou massa específica quando comparada com a fase sólida, no caso as partículas sólidas presentes no lodo. Portanto, as centrífugas são em geral constituídas de um tambor na forma cilíndrica com

pequenos furos, para acontecer a passagem da fase mais leve (água), que ao rotacionar o tambor ocorrerá o “escape” da água pela tangente (furos), enquanto a fase mais densa (partículas do lodo) tenderá permanecer no centro do tambor (ANDREOLI et al., 2014).

Richter (2001), informa que as capacidades hidráulicas dos decantadores centrífugos (centrífugas) são fixados geralmente em função do diâmetro do tambor, conforme apresentado pela Tabela 6.

Tabela 6. Capacidades hidráulica de centrífugas em função do diâmetro do tambor

<b>CAPACIDADE HIDRÁULICA DE CENTRÍFUGAS</b>	
<b>Diâmetro do Tambor (mm)</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>
300 - 350	5 - 12
400 - 500	12 - 30
600 - 700	25 - 40

Fonte: Adaptado de Richter (2001)

Di Bernardo et al. (2012), explicam que o lodo adensado é conduzido para um tanque de armazenamento provido de um misturador submersível ou agitador tipo turbina para promover a mistura, homogeneizando o material. Logo após, o lodo é encaminhado por bombeamento, utilizando bombas para regular a vazão de lodo alimentada na centrífuga. O autor informa que as centrífugas operam entre 12 e 20 horas por dia, produzindo uma torta com massa específica de 1,1 a 1,3 kg/L com uma porcentagem de sólidos totais variando entre 20 e 30% (massa/massa).

Portella et al. (2003), publicaram um artigo sobre a caracterização de lodos gerados em estações de tratamento de água desaguados por centrífuga. Os autores obtiveram como resultado das análises no lodo final (desaguado), uma maior predominância dos elementos alumínio, sílica e ferro, sendo o primeiro detectado em maior quantidade com 22,8% e os demais 13,42 e 7,98 % e, um teor de umidade de 87% (13% de sólidos totais) e pH de 6,7.

Pelos dados obtidos no artigo de Portella et al. (2003), foi possível notar que a centrífuga por eles estudada, não está operando em condições adequadas, uma vez que, se espera atingir uma concentração de sólidos totais no lodo desaguado, com este tipo de tecnologia, próximos de 20%. É provável que o coagulante utilizando no momento da pesquisa possa não estar apresentando bons resultados em termos de eficiência de coagulação ou a operação da centrífuga (rotação) não está adequada para a vazão de alimentação. Ainda, foi possível notar que, a detecção de concentração de ferro presente no lodo pelo estudo,

provavelmente está vinculada a presença desse elemento na água bruta, uma vez que, foi informado no artigo que a estação utiliza em seu tratamento sais de alumínio.

O fenômeno que ocorre nas centrífugas foi bem detalhado por Andreoli et al. (2014), ao explicarem a centrifugação como um processo de separação sólido/líquido forçada pela ação de uma força centrípeta. Eles esclarecem que o fenômeno pode ser explicado em duas etapas, a primeira de clarificação, onde as partículas sólidas sedimentam a velocidade muito superior ao que ocorreria sob a ação da gravidade. A segunda de compactação, quando o lodo perde parte da água capilar devido a ação prolongada da centrifugação. Da mesma forma ao ocorrido pelo adensamento, a centrifugação é um fenômeno de sedimentação decorrente da diferença de densidade entre uma partícula e o líquido que a circunda.

Conforme foi possível observar na descrição supracitada, entende-se o porquê do uso de centrífugas no desaguamento de lodos ter se tornado tão comum nas estações de tratamento de água. O Fato é que, a tecnologia proporcionou um ganho de tempo no tratamento, o que pode ser traduzido em aumento no potencial de volume de lodo que pode ser tratado ao usar tal tecnologia, isto é, quando comparamos ao tratamento por um método que utiliza como artifício de separação apenas a força gravitacional.

Metcalf e Edyy (2016), relatam que as centrífugas são amplamente utilizadas na indústria para a separação de líquidos de diferentes massas específicas e de lamas adensadas. Este último pode ser representado, portanto, pelo lodo gerado em ETAs, uma vez que estes lodos podem ser adensados formando uma lama adensada. Estes autores afirmam ainda que, as centrífugas são largamente utilizadas nos EUA e Europa para o desaguamento de lodos.

Richter (2001), informa que devido ao aperfeiçoamento recente das centrífugas e paralelamente ao uso de polímeros no condicionamento, têm se obtido resultados satisfatórios no emprego destas máquinas para o desaguamento de lodos de coagulantes metálicos, fazendo com que seu uso fosse expandido.

Andreoli et al. (2014), completam informando que os principais tipos de centrífugas utilizadas atualmente para a desidratação de lodos, são as de eixo horizontal e, lembram também que as centrífugas são os únicos equipamentos utilizados indistintamente para o adensamento (espessamento) e desaguamento (desidratação) de lodos. Estão disponíveis no mercado centrífugas variando com capacidade de alimentação entre 2,5 m<sup>3</sup>/h e 180 m<sup>3</sup>/h. A operação das centrífugas pode ser caracterizada pela forma de alimentação de lodo, esta forma, seja ela contínua ou semi-contínua tende interferir no modelo da centrífuga a ser utilizada no processo; porém, a preferência pela alimentação contínua e pela possibilidade de

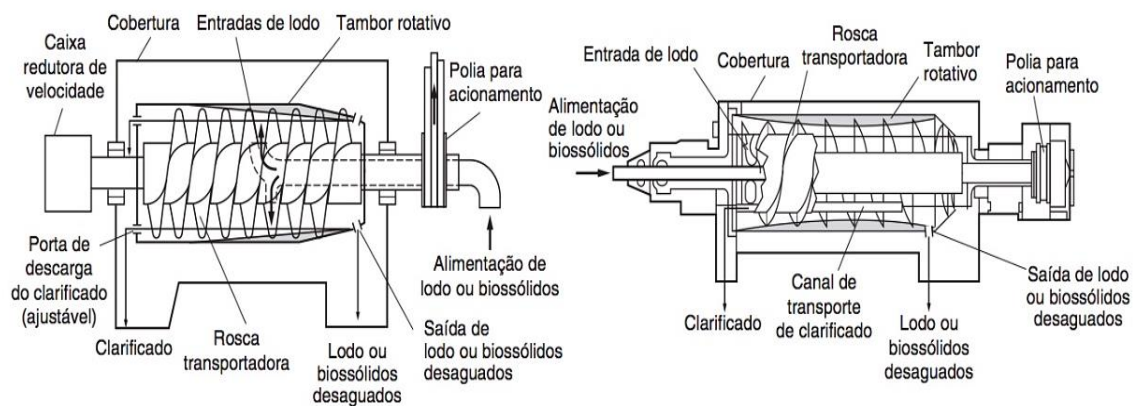
conseguir maiores teores de sólidos totais na torta através deste tipo de alimentação, faz com que se use os modelos de centrífugas que permitam trabalhar com estas duas situações, ou seja, o uso de centrífugas que admitam um processamento de lodo contínuo e que também produza uma torta com elevados teores de sólidos.

Ainda, Metcalf e Eddy (2016), descrevem a alimentação desse tipo centrífugas aplicadas ao desaguamento de lodo, operando com alimentação constante, explicando que, o seu funcionamento ocorre com alimentação do lodo pelo tambor rotativo no qual haverá a separação dos sólidos presentes no lodo, acumulando estes na torta e gerando uma fase líquida denominada clarificado, esta fase deverá ser retornada ao início do tratamento na estação.

Continuado o assunto relativo ao modo de funcionamento das centrífugas, como brevemente já mencionado, tanto o tambor como a rosca transportadora giram na mesma direção em alta velocidade, porém, a rosca gira em velocidade ligeiramente inferior, isto promove, o que chamamos de diferencial de velocidade de rotação, que é garantido pelo conjunto redutor ou caixa de redução acoplada à centrífuga. O diferencial de velocidade, a vazão de alimentação e a velocidade de rotação do tambor, são as principais variáveis de controle; sendo que, a maior concentração de sólidos na torta é obtida reduzindo-se o diferencial de velocidade entre o tambor e a rosca, juntamente com um maior tempo de detenção e com uma vazão de alimentação compatível (ANDREOLI et al., 2014).

A representação de dois diagramas de centrífugas podem ser visualizados conforme Figura 10, sendo que, a primeira imagem desta figura representa uma centrífuga operando em modo contracorrente e a segunda imagem representa uma centrífuga operando em modo concorrente.

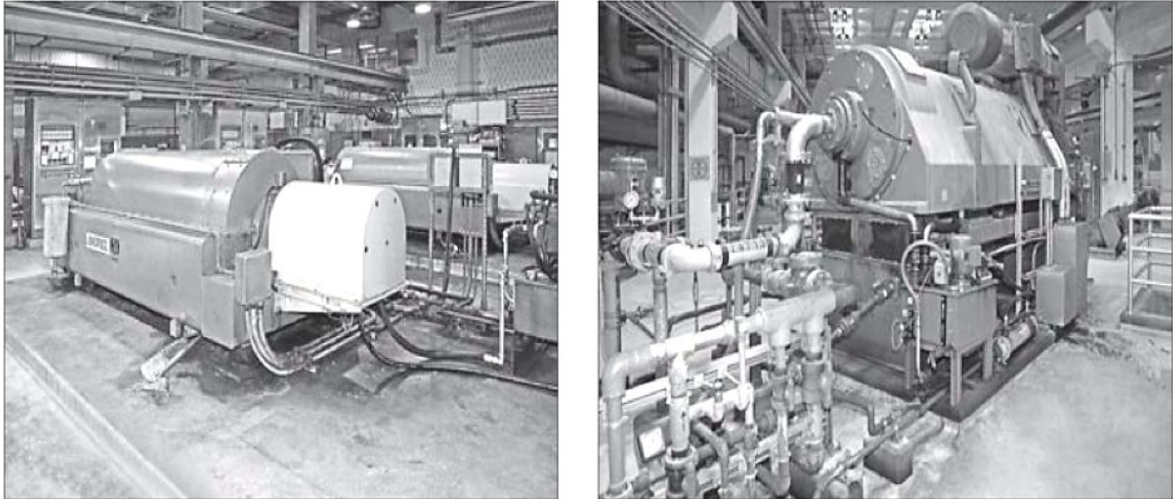
Figura 10. Diagrama representativo de uma centrífuga



Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (2016)

Já a Figura 11 ilustra uma imagem real do equipamento em uma instalação de gerenciamento de lodo.

Figura 11. Imagens de centrífugas utilizadas no desaguamento de lodo



Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (2016)

Os aspectos operacionais são as ferramentas disponíveis para o sucesso da remoção da umidade quando se utiliza para tal finalidade as centrífugas. Dentre destes aspectos, tem-se algumas variáveis que foram classificadas em três categorias, por Andreoli et al. (2014).

- Características do lodo;
- Ajustes mecânicos no equipamento;
- Condicionamento.

Este último por contribuir em considerável importância na eficiência de remoção de umidade, é bastante estudada e citada por diversos autores.

#### *3.3.2.3.2. Desaguamento mecânico por filtro prensa*

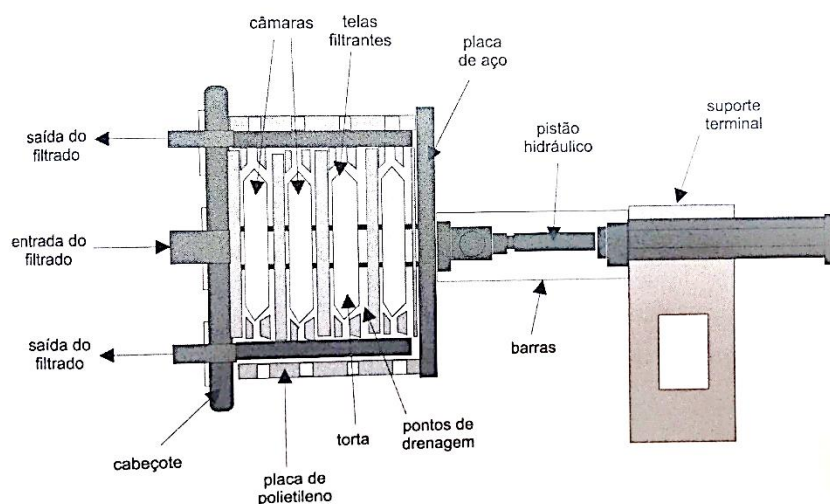
Metcalf e Eddy (2016), recomendam o uso de filtros prensa, quando se deseja obter uma concentração de sólidos na torta de lodo superior a 35%, uma vez que os demais dispositivos de desaguamento mecânico não atingem de forma consistente este valor. Os pesquisadores, relatam a existência de filtros de câmaras de volume fixo, também chamados de filtros de placas de volume fixo e, modelos que permitem a variação no volume de lodo



tratado, ou seja, filtros prensa com placas de volume variável também denominados prensas diafragmas. Existem ainda modelos combinados, como filtro prensa tipo diafragma combinado com secagem a vácuo.

Inicialmente os filtros prensa foram desenvolvidos para o uso industrial e somente mais tarde sofreram adaptações para serem também utilizados em processos de desidratação de lodos. Os filtros prensa de câmaras ou placas de volume fixo são equipamentos que operam em batelada exigindo operadores treinados, seu processo de funcionamento, conforme os referidos autores citados no parágrafo anterior, pode ser dividido em três etapas, a saber: *Enchimento*: que pode levar de 5 a 20 minutos, onde a simples pressão da bomba já provoca a separação sólido/líquido pelas telas filtrantes, pois o bombeamento de lodo faz com que aumente a pressão entre as placas forçando o lodo passar pelas telas filtrantes as quais retém boa parcela de sólidos em suas superfícies formando a torta e o filtrado é permeado através das telas sendo recolhido nos canais e pontos de drenagem; *Filtração sob pressão máxima*: nesta fase, a pressão pode atingir 170 kPa (17 atm -250 psi), que é conseguida por um pistão que empurra uma placa de aço contras placas de polietileno, estabelecendo a prensagem, conforme ilustrado pela Figura 12; *Descarga de torta*: na medida em que se recue o pistão pneumático e se proceda a separação das placas, a torta é removida com facilidade (ANDREOLI et al., 2014).

Figura 12. Representação esquemática do funcionamento de um filtro prensa



Fonte: Adaptado de Andreoli et al., (2014)

Richer (2001), informa que a taxa de aplicação em filtros prensa para lodos de estações de tratamento de água é de 1,5 a 2,5 kg/h de sólidos secos por metro quadrado de área filtrante, caso a etapa de coagulação realizada durante o tratamento de água tenha empregado sais de alumínio e, para sais de ferro é de 1,5 a 3,5 kg/h.

As principais vantagens dos filtros prensa, conforme Andreoli et al., 2014, são:

- Torta com alta concentração de sólidos, superior a outros equipamentos mecânicos;
- Elevada captura de sólidos;
- Qualidade do clarificado (menos de 15 mg SS/l);
- Baixo consumo de produtos químicos para o condicionamento.

Algumas das desvantagens dos filtros prensa, apontadas por Metcalf e Eddy (2016), são:

- Operação em batelada, apesar da operação ser considerada simples;
- Custo elevado do equipamento;
- Requer mão de obra especializada para manutenção;
- Limitação da vida útil dos tecidos filtrantes.

#### 3.3.2.3.3. *Desaguamento mecânico por filtro rotativo*

De acordo com Richer (2001), O motivo da não utilização de filtros rotativos para realizar o desaguamento de lodos gerados em ETAs, é pelo fato de o mesmo não funcionar bem. Pois os lodos de ETAs, como os de Sulfato de Alumínio, são considerados leves para serem desaguados por um filtro rotativo que opera a vácuo, mesmo após o condicionamento desses lodos com polímeros, uma vez que, o lodo é não retido pelos tecidos do filtro e ainda obstrui rapidamente os poros da tela, por isso é muito pouco utilizado pelas ETAs.

#### 3.3.2.4. Secagem

A secagem natural já é conhecida a muitos anos, entretanto, para algumas tecnologias, principalmente para secagem em estufa, a técnica carece de parâmetros

relacionados a eficiência. E, uma das tecnologias que podem ser empregadas é a Secagem Natural de Lodo em Estufa (Sludge Natural Drying in Greenhouse).

Di Bernardo et al. (2012), lembra que, apesar do baixo consumo energético das várias técnicas de secagem natural, estas, não estão totalmente desenvolvidas por falta parâmetros de projeto e operação.

Segundo Flaga (2007), a água não ligada (água livre) presente no lodo pode ser removida por espessamento (adensamento), sendo facilmente extraída do lodo por desidratação (desaguamento) sem o emprego de produtos químicos. Já a água ligada em forma intersticial também pode ser retirada em parte por desidratação, contudo é necessário que se faça o emprego de um produto químico auxiliar de remoção (polímero). Por fim, a água de hidratação pode ser evaporada pelo aquecimento do lodo.

A secagem em estufa é um processo de secagem de lodo utilizando plantas solares, nas quais o objetivo é promover a aceleração na taxa de evaporação da água pelo efeito estufa artificial conseguido através da planta solar (estufa). Com o aumento da umidade do ar interno pela evaporação, pode ser que seja necessário evitar o equilíbrio da pressão de vapor entre a água presente no lodo e água presente no ar interno, por ventilação controlada do ar interno. A tecnologia de secagem em estufa em contraste com secadores térmicos convencionais, é caracterizada por uma demanda muito baixa de energia (COLLARD et al., 2017).

Arisily e Hajji (2019), informam que o consumo de energia para evaporação da umidade presente no lodo e de energia elétrica para o funcionamento do sistema de secagem, dependerá dos diferentes tipos de estufas que possam existir. Para os diferentes tipos, exceto no caso das estufas aquecidas, a energia necessária para a evaporação da água é fornecida pelo sol e, portanto, nessas estufas há uma economia de energia, sendo a principal vantagem da tecnologia com relação a secagem térmica convencional. Ainda, a o consumo de energia elétrica do sistema, dependerá do tipo de estufa (aberta, fechada sem aquecimento ou fechada como aquecimento).

O tratamento dos resíduos gerados pelas ETAs representam uma parcela significativa dos custos operacionais, conforme mencionado por Rubin (2013) anteriormente neste estudo através do item 3.3.1, afirmando que tais custos podem variar de 20 a 60% dos custos totais da estação. Kurt et al. (2015), informam que a secagem térmica é um método capaz de concentrar em 90% o conteúdo de sólidos presentes no lodo, no entanto, a tecnologia requer uma grande quantidade de energia e pode sair cara. Porém, os referidos autores defendem o uso da tecnologia denominada por eles por Greenhouse Solar Dryer – GSD, mais conhecida

aqui no Brasil por Secagem Natural em Estufa, como uma alternativa econômica para a substituição do modelo de secagem clássico (com emprego de energia não renovável), apoiando na condição de que se for possível aumentar a eficiência da GSD, na qual é tipicamente capaz de se obter 70% de sólidos secos.

David (2002), afirma que para cada umidade relativa do ar, há um teor de umidade de equilíbrio no lodo, ou seja, a partir de um dado tempo de exposição a secagem e mantendo as condições de secagem, não será possível promover mais a remoção de umidade ainda presente no lodo.

Bennamoun et al. (2013), informam que o processo de secagem de lodo é complicado, depende de vários parâmetros como métodos secagem e condições de funcionamento e que as taxas de secagem diminuem com o decorrer da secagem. De acordo com os autores na secagem solar, diferentemente dos métodos de secagem convencionais, a taxa de secagem é afetada pelas condições climáticas, aumentando durante as altas radiações e diminuindo em condições desfavoráveis.

Salihoglu et al. (2007), investigaram uma solução para a produção de pelo menos 27.000 toneladas de lama que serão geradas por duas estações de tratamento de efluentes da cidade de Bursa na Turquia. O estudo foi conduzido em instalações de secagem cobertas e não cobertas. Os referidos autores, verificaram que a secagem realizada com a cobertura, proporcionou o efeito estufa em um volume controlado e permitiu uma temperatura superior do que a exterior. Ainda, foi constatado que sistema fechado resultou em níveis mais elevados de sólidos secos presente na lama e que o desempenho da secagem no sistema aberto parou quando a temperatura e velocidade dos ventos eram baixas e, o desempenho da secagem no sistema aberto foi prejudicado pela precipitação diminuindo o teor de sólidos secos.

Ameri et al. (2018), estudaram a secagem solar utilizando equipamentos (secadores diretos e indiretos) que convertem a energia solar em energia térmica, para realizar a secagem de lodo proveniente de estações de tratamento de águas residuais da Argélia. A velocidade de secagem do lodo, em ambos os equipamentos mostrou que a umidade diminuiu rapidamente nos primeiros tempos de secagem, o que significou uma elevada taxa ou velocidade de secagem observada. E, após passado um período de tempo, a umidade reduziu cada vez mais lentamente.

Slim et al. (2008), modelaram um sistema de secagem solar nas condições climáticas da região de Agem na França. Foi proposto por eles um sistema de secagem híbrido que utiliza duas fontes de energia, a solar e a energia fornecida por uma bomba de calor. O

sistema é caracterizado por uma estufa completamente coberta com material transparente, equipada com ventiladores laterais que promovem a recirculação do ar interno, um motor para mistura do lodo no interior da estufa e duas bombas de calor controladas por estratégia on/off em função das condições climáticas, uma para o aquecimento do ar interno e outra para o aquecimento do chão da estufa. Os autores testaram a eficiência do sistema ao longo do ano, comparando a taxa de secagem alcançada em função do consumo de energia em diversas combinações sazonais, mas alertaram para necessidade da realização de cálculos econômicos mais detalhados para a confirmação de seus resultados de secagem de lodo no então sistema proposto.

Wang et al. (2019), propuseram um processo de secagem de lodo gerado em estações de tratamento de esgotos, no qual o lodo é disposto em finas camadas em câmaras do tipo sanduíche. Os pesquisadores otimizaram a taxa de secagem pelo ajuste das variáveis como espessura de leito de lodo e intensidade solar. Foi obtido como resultado no experimento, uma espessura de camada de lodo igual a 5 cm com sendo a mais adequada para a secagem rápida, reduzindo o teor de água no lodo de 79% para 5% em 11 horas de secagem.

Há um significativo interesse pela secagem solar (secagem em estufa) nos últimos anos, tanto com relação a escala piloto como também para instalações em grande escala. Entretanto, deve-se atentar a carência de dados relativos ao desempenho do processo nas condições típicas da região, os quais não são amplamente documentados. Resultados experimentais para a desidratação de lodo em estufa, foram determinados nas condições típicas do Mediterrâneo, com alta radiação solar anual e elevadas temperaturas para a região do norte da Grécia. Estes resultados provaram a eficiência da tecnologia para a região em estudo, pela redução verificada de umidade presente no lodo durante o verão (de 85% para 6%) e no outono (de 85% para 10%) utilizando com uma planta solar (secagem em estufa) equipada com um aquecedor solar de recirculação de água (MATHIOUDAKIS et al., 2009).

Frata (2019), realizou um estudo de secagem natural de lodo de ETA utilizando uma estufa piloto de laterais abertas. O pesquisador determinou a altura de camada (ideal) de lodo a ser disposta em leiras dentro da estufa que demandasse a menor área de exposição a secagem e, ao mesmo tempo realizasse a secagem do material com vista a redução de volume. O referido autor, alcançou em seu experimento um teor de sólidos totais igual a 90% em 97 dias para uma altura de camada (ideal) de lodo igual a 35 cm utilizando uma área de secagem total de 743 m<sup>2</sup>.

Shao et al. (2015), realizaram um experimento de secagem natural de lodo desidratado com a incorporação de palha de arroz no material em uma caixa quadrada de madeira sem cobertura. O desígnio dos pesquisadores foi avaliar a velocidade de secagem devido inclusão no lodo desidratado, com a palha de arroz na proporção mássica de 15:1, submetendo esta mistura a secagem solar em uma espessura de camada de lodo/palha igual a 30 cm. Os referidos autores verificaram que a umidade presente na mistura, reduziu de 75% para 45% nos 23 dias de exposição a secagem. Ainda, foi constado no experimento, que em função da umidade relativa do ar ser baixa durante o dia e alta durante a noite, hora a umidade presente na mistura evaporava, hora a umidade presente no ar permeava na mistura, contudo isso foi observado apenas na superfície da camada de lodo.

#### 3.4. LEGISLAÇÕES BRASILEIRAS PERTINENTES AO LODO DE ETA

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, ao final do processo de tratamento da água bruta em uma estação, tem-se como produto água potável e os subprodutos que, são gerados nas etapas de decantação ou flotação e, de lavagem dos filtros. A junção desses dois subprodutos gerados nestas etapas, é que dará origem ao Resíduo de Estações de Tratamento de água – RETAs ou simplesmente lodo de ETA, que apesar de ser constituído de 98 a 99% de água, e, portanto, com características de líquido, é segundo **Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei 12.305/2010)** a qual segue as **normas de execução** definidas por meio do **Decreto N° 7.404/2010**, entendido como resíduo sólido através de seu **Art 3. Inciso XVI** e pelo **Art. 13**. classifica o lodo de ETA como resíduo dos serviços públicos de saneamento básico. Ainda uma das principais características da PNRS, foi prever a elaboração de um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos – PGRS pelos municípios da federação.

Já a caracterização do lodo de ETA é estabelecida pela **NBR 10.004/2004**, a qual o **classifica na Classe II/A**. Sendo que, **Classe II** identifica aqueles resíduos considerados *Não Perigosos* e, **A** identifica aqueles resíduos considerados *Não Inertes*.

Em função da classificação do lodo de ETA, este somente poderá ser disposto em aterro industrial, podendo ser disposto em aterro sanitário quando não houver aterro industrial em um raio de 200 km da fonte geradora do resíduo.

É importante ressaltar que, os aterros não recebem lodos com concentração de Sólidos Totais – ST tão baixa, como aquela presente no lodo de ETA (por volta de 1 a 2%) ao final do

processo de tratamento de água. Desta forma, conforme também apresentado em capítulos anteriores deste estudo, é preciso que as estações de tratamento possuam equipamentos com a finalidade de remover a umidade presente no lodo e, com isso adequarem o seu resíduo com os limites mínimos de concentração de ST estabelecidos de acordo com os limites exigidos por cada aterro industrial.

A **NBR 13.896/1997** estabelece as condições gerais e específicas para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, como no caso do lodo de ETA, contudo, a norma não traz o limite de concentração mínimo de ST no lodo de ETA para que o material possa ser disposto nos aterros, como traz a **NBR 10.157/1987** que estabelece as condições gerais e específicas para projeto, construção e operação de aterros de resíduos perigosos, sendo que, o limite mínimo de concentração desse tipo de resíduo é estabelecido através do item 8 da referida norma, na qual discorre que resíduos com menos de 15% de sólidos totais (em massa) não podem ser dispostos diretamente em aterros, por não suportarem cobertura.

Entretanto, os aterros que recebem resíduos não perigosos, como no caso do lodo de ETA no Brasil, normalmente estabelecem limites mínimos de concentração de ST no lodo por volta de 20 a 30%, sendo que o limite pode variar de aterro para aterro dentro desta faixa.

É comum o lançamento de forma irregular do ponto de vista legal e ambiental, do lodo de ETA *in natura* nos corpos d'água pelas estações de tratamento de água e, mesmo o lodo de ETA sendo entendido como resíduo pela Lei nº 12.305 de 2010, a prática do lançamento deste resíduo em um corpo hídrico não é permitida segundo **Resolução 430/2011 do CONAMA**, na qual dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, caso o lodo de ETA seja considerado um efluente por apresentar características de líquido. Que, de acordo com o **Art. 16.** da referida resolução, o lodo de ETA não obedece aos padrões previstos neste artigo para lançamento nos corpos d'água.

Ainda, conforme descrito pelo **Art. 18**, da Resolução 430/2011 do CONAMA, onde se lê: “O efluente não deverá causar ou possuir potencial para causar efeitos tóxicos aos organismos aquáticos no corpo receptor, de acordo com critérios de ecotoxicidade estabelecidos pelo órgão ambiental competente.” E, como o resíduo pode possuir elevadas concentrações de metais (o que aumenta a toxidade do meio), de sólidos totais (o que diminui a luminosidade do meio), a produtividade do fitoplâncton e de diversos organismos aquáticos importantes na alimentação dos peixes é prejudicada. Portanto, como o lodo de ETA, também

não atende ao disposto pelo **Art 18.** da presente resolução, seu lançamento em corpos d'água fica proibido.

As sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente são dispostas pela **Lei dos Crimes Ambientais (Lei 9.605/1998)**. Portanto, em função das características do resíduo apresentadas nos parágrafos anteriores, o lançamento de lodo de ETA em corpos hídricos ou a sua disposição inadequada no solo, são ambas práticas, consideradas de **crime ambiental** de acordo com a Lei nº 9.605 de 1998, uma vez que, conforme seu **Art. 54.**, onde se lê: “Causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora”.

É importante ressaltar que, existem ainda decretos estaduais e municipais que visam complementar ou restringir ainda mais as condições de lançamento e disposição de efluentes e resíduos no meio ambiente, tornando a atividade ainda mais proibitiva do que as legislações nacionais.

Nesse sentido, pode-se citar como exemplo, a **Lei de Controle da Poluição do meio Ambiente (Lei 997/1976)**, específica do Estado de São Paulo, que proíbe Através do **Art. 3** o lançamento ou liberação de poluentes nas águas, no ar e no solo. E, através do **Decreto Estadual (8.468/1976)** também do estado de São Paulo, há inclusão de mais dispositivos e anexos para regulamentação, no qual em seu **Art. 10, 11, 12 e 13** da Seção Dos Padrões, traz as condições de permissão ou não, bem como os parâmetros de despejo em corpos d'água. Já o **Art. 52** da Seção Da Poluição do Solo, permite concluir sobre a obrigatoriedade de dispor os Resíduos oriundos do tratamento de água das ETAs em locais devidamente apropriados, no qual discorre que: “O solo somente poderá ser utilizado para destino final de resíduos de qualquer natureza, desde que sua disposição seja feita de forma adequada, estabelecida em projetos específicos de transporte e destino final, ficando vedada a simples descarga ou depósito, seja em propriedade pública ou particular”.

Finalmente, outro aspecto importante do **Decreto Estadual 8.468/1976**, é o enquadramento dos serviços e coleta, armazenamento, transporte e disposição final de lodos de ETA pelo **Inciso VIII do Art. 57**, como atividades que se caracterizam por apresentarem fonte potencial de poluição, e, portanto, através do texto, determina a necessidade de obtenção de Licença prévia de Instalação e Operação das Estações de Tratamento de Água – ETA.

Ainda, o estado de São Paulo conta com a **Política Estadual de Resíduos Sólidos (Lei 12.300/2006)** a qual fundamenta mais acerca da ilegalidade do lançamento indevido de



resíduos em corpos d'água e ou disposição inadequada no solo. E, os instrumentos estabelecidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, contribuem para uma efetiva gestão e solução técnica para os resíduos sólidos gerados no estado.

É importante destacar que, apesar das leis e normas citadas anteriormente, existem **poucas legislações específicas para o Lodo de ETA** e, por isto este resíduo acaba se adequando às Legislações supracitadas.

Assim, torna-se indispensável que ocorra a elaboração de leis e normas no Brasil, para estabelecer um amplo e assertivo aspecto legal para o assunto referente ao lodo de ETA e, com isso contribuir para mitigar os impactos ambientais ocorridos pela inevitável geração deles.

Nesse sentido, cita se como exemplo, a elaboração de leis que venham com intuito de obrigar certos setores, como o da produção de cimentos e blocos, de incrementar uma porcentagem de resíduos em seus produtos, oferecendo em contrapartida uma compensação financeira, como benefícios fiscais.

Por fim, além da inexistência legislativa específica para o lodo de ETA, outro problema enfrentado pelos municípios para solucionar de vez o problema, é o da falta de recursos e restrições em contrair dívidas. Uma vez que, em função da já existência de outros investimentos pelas prefeituras em aberto, como em áreas da saúde, educação e obras de pavimentação. Esta questão financeira, é um assunto que sempre vem à tona durante as justificativas dadas pelos líderes de governo para explicar, por exemplo, os baixos investimentos no setor do saneamento básico, o lançamento indevido do lodo de ETA nos corpos d'água e ou disposição inadequada deste resíduo no solo.

Com o Novo Marco Legal do Saneamento Básico, **Lei (14.026/2020)**, há uma grande perspectiva para solução do problema orçamentário dos municípios com relação ao setor, dada pela atração de recursos financeiros da iniciativa privada, o que seria de grande contribuição, pois os investimentos no ramo do saneamento básico são altos. A regulamentação terá como princípio a regionalização com a formação de blocos e, as mudanças previstas abrem as portas para a concorrência entre os setores público e privado. A tendência é a não privatização dos serviços de saneamento, mas sim, de estabelecimento de concessões para a iniciativa privada, na gestão e operação do setor, as quais podem ser definidas por período de tempo determinado e com metas de investimentos a serem cumpridas ao longo do tempo, que caso não sejam cumpridas, poderá haver caducidade ou anulação dos contratos de concessão.

As duas grandes novidades da lei, são a primeira, de garantir a concorrência igualitária das empresas públicas com as privadas nos processos licitatórios de concessão dos serviços de saneamento básico de um município ou dos blocos formados entre municípios. E a segunda, de definir a Agência Nacional de Águas, hoje, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, como responsável de elaborar normas de referências para o setor de saneamento, como por exemplo, metodologias para o cálculo do valor cobrado sobre o abastecimento de água potável, ou de coleta e disposição final de resíduos sólidos. Em suma, essas normas serão regulamentos nacionais que permitirão o avanço nos índices dos serviços de saneamento, garantindo uniformidade, maior segurança jurídica, imposição do cumprimento das metas e uma melhor fiscalização.

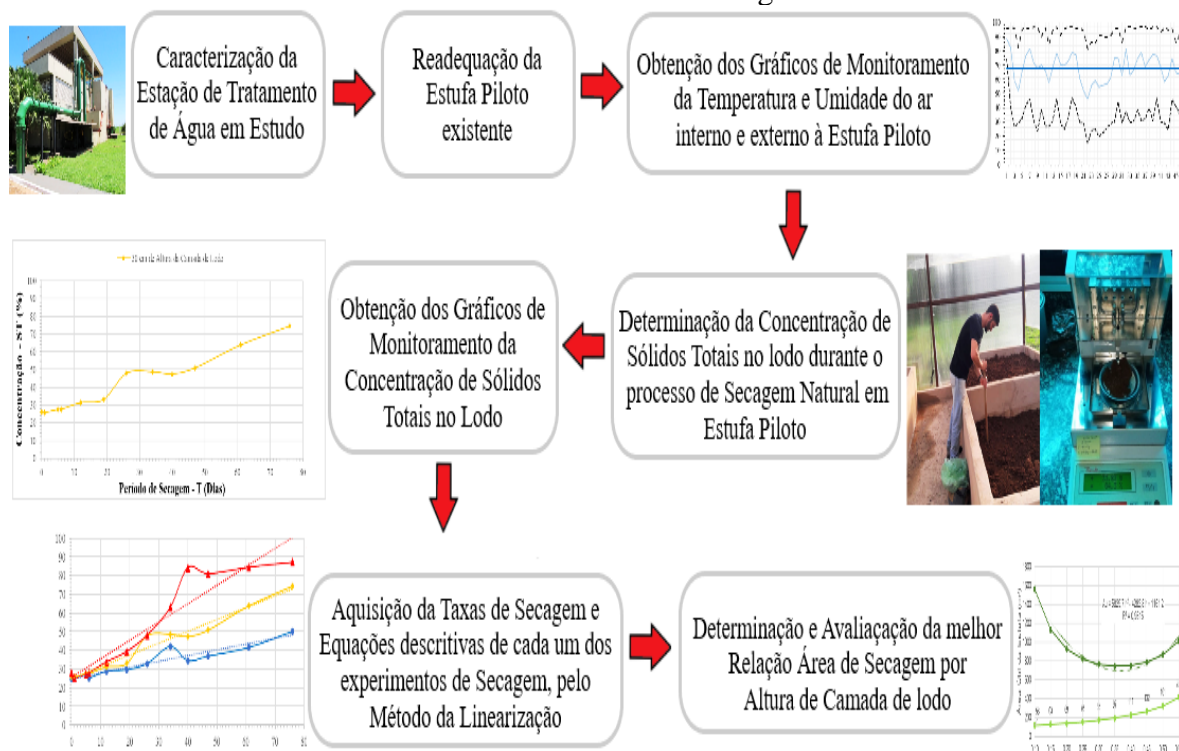
Assim sendo, com a aprimoração das condições estruturais do saneamento básico no país, ocorrido pela implementação da **Lei 14.026 de 15 de julho de 2020**, ocorrerá uma melhoria, possivelmente, não só nos índices de cobertura dos municípios em coleta e disposição adequada dos resíduos sólidos, esgotamento e tratamento de esgotos sanitários, abastecimento de água potável e drenagem pluvial, mas também, nos índices acerca da adequação ambiental das estações de tratamento de água e esgotos do país, no que se diz respeito ao tratamento e disposição adequada do lodo gerado pelos processos de tratamento, tanto de água para abastecimento público, como de esgotos sanitários.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

Na sequência é apresentada as atividades realizadas para a elaboração do presente estudo. Os dados coletados foram registrados de forma escrita e digital. As memórias dos eventos realizados (como as reuniões e atividades de campo) foram organizadas e catalogadas na forma de textos.

A Figura 13 ilustra as etapas do método utilizado para obter os parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural para o lodo de ETA em estufa piloto.

Figura 13. Fluxograma das etapas do método utilizado para determinação dos parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural



Fonte: Autor (2020)

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ETA EM ESTUDO

A descrição da ETA de estudo ocorreu partindo-se de uma reunião com os gestores responsáveis pelo tratamento, a qual foi marcada por e-mail e ligação telefônica com antecedência de uma semana.

Tal reunião possibilitou:

- Apresentar o profissional responsável pela produção do trabalho aos gestores;
- Explicar e apresentar o trabalho proposto na unidade aos gestores;
- Informar o apoio necessário a ser fornecido pela empresa para a construção do estudo;
- Adquirir os contatos dos responsáveis pela manutenção e operação da ETA;
- Firmar um acordo entre ambas as partes e iniciar-se-á elaboração da pesquisa.

Após firmado o acordo, foi efetuado a caracterização da ETA em estudo, a qual contemplou a sua localização, fontes e formas de captação de água, informações sobre a estrutura instalada, fluxograma e descrição sucinta do processo, ou seja, como é feito, descrição detalhada das etapas do tratamento e da tecnologia de retirada e desaguamento do lodo gerado pelo tratamento da ETA em estudo.

O levantamento das informações foi realizado mediante diálogos com o responsável técnico pelo processo de tratamento e com os operadores de processo, durante as visitas de campo realizadas, ligações telefônicas e por mensagens via aplicativo WhatsApp.

Demais informações foram conseguidas através de pesquisas na internet, documentos fornecidos pela empresa e literatura.

#### 4.2. MODIFICAÇÃO DA ESTUFA PILOTO PARA REALIZAR OS TESTES DE SECAGEM DO LODO DA UNIDADE EM ESTUDO

Para determinar os parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural em estufa do lodo desaguado da ETA em estudo, foi modificada uma estufa piloto já existente no local.

Cabe ressaltar que o tamanho da estufa piloto existente foi estimado por Frata (2019), visando comportar no mínimo o volume de 7 m<sup>3</sup> de lodo desaguado em centrífuga, o qual representa aproximadamente o volume gerado em uma semana pela ETA do estudo. Desta forma, o tamanho total (área em planta) da estufa foi mantido, visando comportar também o mesmo volume gerado semanal.

As modificações consistiram em promover alterações nas características construtivas da estufa existente, e assim possibilitar a determinação de outros valores (outras condições de

secagem natural) para os parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural do lodo de ETA em estufa piloto.

Para modificação da estufa piloto, foram realizadas as seguintes alterações na estrutura existente:

- As laterais da estufa abertas antes da modificação foram fechadas, quase que em toda sua totalidade, restando apenas um vão livre de altura igual a 50 cm próximo ao solo. Foi utilizado as mesmas placas transparentes de polietileno presente na estufa em sua cobertura, frente e fundo.

- O solo foi pavimentado com concreto de espessura igual a 5 cm, portanto não há sistema de drenagem nos leitos;

- Os leitos foram construídos utilizando tijolos e suas paredes foram rebocadas tanto internamente quanto externamente;

- Os leitos foram construídos em alvenaria em alturas iguais de 0,70 m;

- No total foram construídos 6 leitos de secagem de geometria quadrada, divididos em dois conjuntos, ficando 3 leitos dispostos no sentido do comprimento no lado esquerdo da estufa e, os outros 3 dispostos também no sentido comprimento da estufa, porém no lado direito da estufa;

- Os dois conjuntos de leitos foram separados por um corredor de comprimento igual ao da estufa e com largura de 1 metro;

- Para o cálculo da área de secagem total de lodo, foi pré-estabelecido 2,0 m para o lado interno de cada um dos leitos de secagem, denominado por  $C_{LEITO\ int}$ ;

- Foi pré-estabelecida uma espessura de 0,13 m para as paredes de cada leito.

As principais características e funções da estufa piloto modificada são:

- Proteger o material de estudo contra intempéries climáticas em virtude dos fechamentos laterais;

- Permitir a passagem de luz pelo teto e laterais, para elevar o potencial de secagem pelo aquecimento do ar do ambiente dentro da estufa piloto, através da absorção de luz solar. Para permitir a passagem de luz, foi utilizado placas de policarbonato de transparência similar ao vidro, do tipo cristal “alveolar”, para cobertura do teto, frente, fundo e laterais;

- Execução de estrutura metálica que proporcionou uma resistência satisfatória para suportar as forças dos ventos;

- A estrutura teve todos os elementos metálicos de sustentação soldados com soldador elétrico;
- Uma fileira de tijolos foi assentada no sentido do comprimento da estufa de forma a evitar o escoamento de água para dentro desta.

As principais características, diferenças e semelhanças da estufa piloto existente nas imediações da ETA utilizada por Frata (2019), foram expostas pela Figura 14 a sua esquerda. Já as da estufa piloto utilizada no presente estudo (após realizada as modificações) foram expostas pela Figura 14 a sua direita. Ainda, conforme Quadro 2 foram apresentadas e descritas tais principais características, diferenças e semelhanças. Sendo assim, para evitar confusões, será denominado estufa Frata (2009) a estufa que existia anteriormente ao presente trabalho na estação, e estufa Autor (2020) a estufa utilizada por este estudo.

Figura 14. Comparativo entre a estufa utilizada por Frata (2019) com a estufa utilizada no presente estudo



Fonte: Autor, 2020

Quadro 2. Principais características da estufa utilizada por Frata (2019), e da estufa utilizada no presente estudo

<b>PARÂMETROS</b>	<b>FRATA (2019)</b>	<b>AUTOR (2020)</b>
<b>Frente da estufa</b>	Totalmente fechada com placas transparentes.	Totalmente fechada com placas transparentes
<b>Fundo da estufa</b>	Parcialmente fechada com placas transparentes.	Totalmente fechada com placas transparentes.
<b>Cobertura da estufa</b>	Totalmente fechada com placas transparentes.	Totalmente fechada com placas transparentes.
<b>Laterais da estufa</b>	Totalmente aberta.	Boa parte fechada, apresentando apenas um vão livre de 50 cm de altura próximo ao solo, em todo o comprimento da estufa.

continua...

Quadro 2. Principais características da estufa utilizada por Frata (2019) e da estufa utilizada no presente estudo (continuação...)

<b>PARÂMETROS</b>	<b>FRATA (2019)</b>	<b>AUTOR (2020)</b>
<b>Geometria das leira/leitões</b>	Leiras de secagem, com comprimento igual ao comprimento da estufa.	Leitões quadrados com lado igual a 2 metros.
<b>Material de construção das leira/leitões</b>	Madeira.	Blocos de tijolos com reboco.
<b>Pavimentação do solo</b>	Concreto.	Concreto.
<b>Revolvimento do Lodo</b>	Sem revolvimento.	Sem revolvimento.
<b>Comprimento Externo (m)</b>	6,50	6,50
<b>Largura Externa (m)</b>	5,50	5,50
<b>Altura (m)</b>	3,0	3,0

Fonte: Autor, 2020

Uma das principais diferenças do presente estudo quando comparado com o estudo do Frata (2019), consistiu em fechar as paredes laterais da estufa, sendo esperado (hipótese) um aumento da taxa de secagem. Buscou, deste modo, determinar os parâmetros de dimensionamento nesta nova condição de secagem, ou seja, em uma condição particular.

#### 4.3. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE SECAGEM NATURAL DO LODO DE ETA

Na sequência é apresentado descritivo contendo informações de como foram determinados os parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural da ETA em estudo. Ressalta-se que o lodo utilizado no experimento já tinha passado no sistema de desaguamento por centrífuga existente na unidade da ETA em estudo.

##### 4.3.1. Determinação dos Gráficos de Monitoramento da Temperatura e Umidade do ar Interno e Externo à Estufa Piloto

Para determinar os valores de umidade e temperatura do ar Interno e Externo à estufa, decorreu-se da seguinte forma:

- Foram instalados dois medidores de registro simultâneo de temperatura e umidade do ar, um interno e outro externo à estufa do tipo Datalogger IMPAC IP-747RH (medidor

fornece o número de medições de ambas as variáveis bem como suas respectivas datas e horas, e registra os dados em sua memória interna). Assim, tais informações foram monitoradas ao longo de todo o experimento;

- O intervalo de tempo para coleta dos dados das variáveis pelo medidor foi programado de 15 minutos em 15 minutos;

- Os dados do aparelho Datalogger foram extraídos ao conectar o medidor via cabo em um computador.

Os resultados das medições foram extraídos em um arquivo de Excel, posteriormente foram selecionados e organizados ainda no aplicativo.

De posse dos dados, foram gerados gráficos de monitoramento representativos do fenômeno analisado utilizando o Excel, ou seja, curvas representativas do registro da variação da temperatura e umidade do ar interno e externo a estufa, ao longo dos dias, ou seja, durante todo o período de realização dos ensaios de secagem natural na estufa piloto.

Após determinado os gráficos de monitoramento de temperatura e umidade do ar, foram calculados os valores médios diários de temperatura interna e externa e os valores médios diários de umidade interna e externa, utilizando funções presentes no Excel para determinar tais valores.

Também foi determinada a média da temperatura e da umidade ao longo de todo o período experimental, tanto do ar interno quanto do ar externo, representado estes valores nos gráficos por meio de linhas horizontais contínuas.

Por fim, os resultados adquiridos foram discutidos com respeito a interferência dos valores de temperatura e umidade no processo de secagem. Também, foi realizada uma comparação dos resultados médios de temperatura e umidade do ar determinados no estudo, com os mesmos resultados médios determinados por Frata (2019) em seu trabalho.

#### 4.3.2. Determinação da Concentração de Sólidos Totais no Lodo Durante o Processo de Secagem Natural em Estufa Piloto

O experimento de secagem realizado nesta pesquisa foi conduzido em apenas três leitos dos seis leitos. Ressalta-se que os leitos da estufa utilizada neste estudo, são de geometria quadrada, diferentemente do experimento realizado por Frata (2019) no qual foram



construídos leitos em tábuas de madeira. A diferença entre os leitos nos dois estudos, foram apresentados na Figura 15, sendo à esquerda da imagem aqueles da estufa utilizada por Frata (2019) e à direita da imagem aqueles da estufa utilizada pelo Autor (2020).

Figura 15. Leitos da Estufa piloto Frata (2019) a esquerda e Leitos da Estufa Piloto Autor (2020) a direita



Fonte: Autor, 2020

O preenchimento dos leitos com o lodo desaguado em centrífuga, foi realizado da seguinte forma:

- Utilizou-se um caminhão tipo Munck para o transporte do lodo acondicionado provisoriamente após o tratamento de água da estação em uma caçamba, para a estufa;
- Fez se do uso de enxadas e pás, para transferir manualmente o lodo da caçamba para os leitos construídos de tijolos em geometria quadrada;
- Foi nivelado o lodo de cada leito em sua correta altura pré-estabelecida, com o uso de uma pá e uma trena de medição;
- Não houve revolvimento de lodo dentro do leito durante o período de secagem;
- Foram utilizados 3 dos 6 leitos existentes dentro da estufa;
- As alturas variáveis de lodo dentro dos 3 leitos utilizados foram estabelecidas em 60 cm, 30 cm e 15 cm.

A aquisição dos valores de concentração de Sólidos Totais – ST presentes nas amostras de lodo no decorrer dos dias de realização do experimento de secagem em estufa, foi conseguida utilizando uma balança determinadora de umidade. A determinação da concentração de Sólidos Totais – ST, foi realizada semanalmente, conforme descrito na sequência.

Para garantir a representatividade da amostra, ou seja, produzir uma amostragem composta do lodo presente no leito, uma vez que a umidade do lodo varia de menor para maior, conforme se varia a profundidade, no sentido do topo do leito para sua base, em um determinado ponto de coleta da amostra no leito foram adotadas as seguintes etapas:

- Utilizou-se como meio de coleta da amostra, um tubo de PVC  $\frac{3}{4}$ '';
- Foi efetuado a inserção do tubo verticalmente à camada de lodo referente ao leito de altura de lodo de 15 cm, o tubo de PVC garantiu uma coleta de amostra em toda a profundidade da camada e não somente na camada superior ou superfície do leito em fase de secagem;
- A inserção do tubo foi executada de forma giratória, permitindo a não compactação do lodo dentro do tubo, o que prejudicaria a representatividade da amostra;
- A amostra de dentro do tubo amostrador foi removida utilizando-se de um tubo com o próximo diâmetro abaixo do diâmetro do tubo amostrador;
- Para garantir a coleta de amostras representativas do material dentro do leito, o mesmo procedimento foi repetido em 2 outros pontos distintos do mesmo leito de 15 cm, escolhidos aleatoriamente;
- Foi utilizada uma espátula coletora em substituição ao tubo de PVC, nos dias finais de exposição do material a secagem dentro da estufa, pois a umidade diminuiu ao ponto de não promover a aderência de amostras de lodo na superfície interna do tubo, o que dificultou a coleta de amostra. Cabe lembrar que, mesmo utilizando a espátula em substituição ao tubo, a amostra coletada abrangeu toda a altura da camada de lodo disposta dentro do leito.

Após coletadas amostras referente ao leito com altura de 15 cm, foi efetuado a homogeneização dessas, utilizando para tanto um Becker e uma espátula. Posteriormente, a amostra composta foi conduzida ao laboratório e determinou-se a concentração de sólidos totais, utilizando para tanto uma balança determinadora de umidade (Medidor de Umidade ID200), esta possui como fonte de calor um infravermelho que é produzido por uma resistência encapsulada em quartzo e display LCD matriz de pontos iluminados. O mesmo procedimento descrito acima foi efetuado para os leitos com alturas de camadas de lodo de 0,30cm e 0,60cm.

Desta forma para realizar a medição de sólidos totais, procedeu-se:

- Adicionou entre 50g e 100g de amostra (mesma quantidade utilizada por Frata (2019)) em pequenos pratos de alumínio específicos para realização de pesagens na balança, sendo o diâmetro útil de cada prato de 80mm e profundidade de 5mm;
- A amostra preparada foi levada para secagem na balança;
- Foi fixada uma temperatura de secagem em 180°C;
- Foi fixado um percentual de 0,05% de variação de peso para cessar o processo de secagem, ou quando a balança apitar indicando que o processo finalizou.

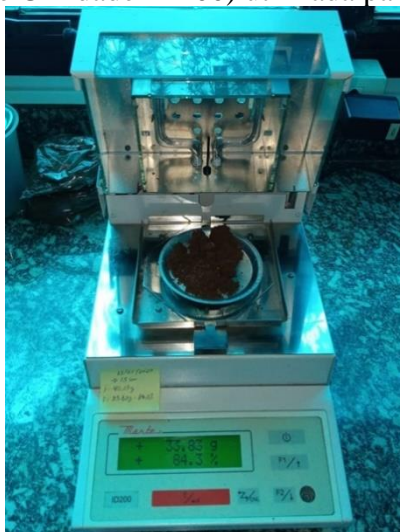
Após realizado o procedimento descrito anteriormente, o equipamento forneceu o resultado de secagem em gramas e o percentual relativo ao peso inicial, ou seja, da fração de sólidos totais.

O experimento de secagem na estufa piloto foi cessado, ou seja, interrompeu-se a determinação da concentração de Sólidos Totais – ST do lodo presente nos três leitos, quando a taxa de secagem diminuiu significativamente, ou seja, quando não houve mais alteração relevante de umidade nas amostras coletadas.

Todos os resultados coletados relativos ao desempenho de secagem do lodo em estufa piloto ao longo dos dias (determinação da concentração de sólidos totais - ST) e em diferentes camadas, foram organizados e armazenados em forma de planilha digital. Posteriormente, os resultados foram apresentados por meio tabela e imagens ilustrativas.

O percentual de sólidos foi conseguido através de uma balança determinadora de umidade, segundo Figura 16.

Figura 16. Balança (Medidor de Umidade ID200) utilizada para determinar a umidade no lodo



Fonte: Autor, 2020

E na Figura 17 foram apresentadas imagens que registram o momento da coleta de amostras nos leitos da estufa, para determinação da concentração de sólidos totais presentes no lodo ao longo de todo período experimental. Conforme já descrito anteriormente, posteriormente a coleta, foi determinado o percentual de sólidos obtendo assim os resultados da concentração percentual de sólidos totais no lodo durante o período de secagem avaliado.

Figura 17. Coleta de amostras de lodo nos leitos para determinação da concentração de sólidos totais na estufa em estudo



Fonte: Autor, 2020

#### 4.3.3. Determinação dos Gráficos de Monitoramento da Concentração de Sólidos Totais no Lodo Durante o Processo de Secagem Natural em Estufa Piloto

De posse dos dados de determinação de Sólidos Totais – ST pelo item 4.3.2 e utilizando uma planilha eletrônica do Excel como auxílio, foi possível gerar e obter os gráficos de monitoramento representativos do fenômeno de secagem analisado, durante o período de realização do experimento.

Portanto, foi possível através do programa traçar curvas empregando como dados de entrada os valores de concentração de ST (%) em função do tempo de secagem em dia (resultados obtidos durante a realização dos experimentos de secagem do lodo desaguado na estufa piloto).

Por fim, os gráficos foram dispostos neste estudo por meio de imagens ilustrativas e os resultados adquiridos foram discutidos com respeito a eficiência de secagem conforme se alterou as alturas de camadas de lodo expostas a secagem.

#### 4.3.4. Determinação das Taxas de Secagem e Equações Descritivas de cada um dos Experimentos de Secagem pelo Método da Linearização

O recurso utilizado para determinar as taxas de secagem (variação da concentração de sólidos no lodo em função do tempo) e obter as equações matemáticas para cada um dos leitos experimentais nas condições analisadas; consistiu no uso do Excel como auxílio, que de posse das curvas obtidas conforme item 4.3.3 e utilizando ferramentas próprias do Excel, foi efetuada a linearização (linhas de tendência – MÉTODO DA LINEARIZAÇÃO).

Com isso obteve-se as equações lineares para cada camada de lodo, estas descrevem o comportamento da secagem em cada leito. E, de posse das equações obtidas, foi possível calcular os parâmetros relativos ao tempo de secagem natural em estufa requerido ou necessário, para atingir uma determinada concentração de sólidos no lodo, para cada altura de camada disposta nos leitos.

Foi utilizado o método da linearização para obtenção das equações específicas para cada altura de camada de lodo, pois este, foi o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais determinados no experimento.

Juntamente de cada uma das equações descritivas foi apresentado também pelo software o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o qual representa o ajuste estatístico do modelo aos dados experimentais coletados, ou seja, representa o grau de confiabilidade da equação.

Além disso, foi pelas equações conseguidas no Excel, que se determinou as taxas de secagem (inclinação da reta linear) em cada um dos leitos estudados.

Assim, com esses resultados a partir dos experimentos realizados, foi possível avaliar do ponto de vista científico as taxas alcançadas, ou seja, foi descrito e discutido nos resultados qual altura de camada disposta a secagem natural em estufa piloto apresentou a melhor viabilidade em função da área utilizada.

Levou-se em consideração para esta análise, a concentração de sólidos totais no lodo alcançada no experimento e o tempo que se levou (requerido) para atingir o valor da concentração em questão.

Por fim, os resultados foram apresentados através de duas tabelas, uma para as equações e seus coeficientes e outra para as respectivas taxas de secagem referentes a cada uma das alturas de camada de lodo avaliadas.

#### 4.3.5. Determinação da Altura da Camada de Lodo a ser Disposta nos Leitos da Estufa Piloto para Secagem Natural

No presente item foi utilizada a metodologia proposta por Frata (2019) para determinar a altura de camada de lodo a ser disposta no leito que necessitará da menor área de secagem para “secar”, ou seja, foi utilizada uma sequência de equações para estimar o melhor custo-benefício (menor área para a melhor taxa de secagem possível).

A altura a ser disposta, a qual representa a melhor viabilidade técnica/econômica, foi determinada através de uma equação geral para o cálculo da área de secagem necessária. A equação é função da altura da camada de lodo e da taxa de secagem (equação representativa das condições de secagem realizadas nos experimentos).

Contudo, a equação geral e a equação para o cálculo do tempo de secagem, propostas por Frata (2019), são específicas para as condições estudadas em seu trabalho, uma vez que, elas consideram as taxas de secagem pelo autor obtidas (estufa por ele estudada) e, portanto, não podem ser utilizadas para o cálculo da área e do tempo de secagem necessários do presente estudo (estufa modificada). Assim, utilizando a metodologia proposta por Frata (2019), mas considerando as taxas obtidas neste estudo, se obteve outras equações conforme descrito na sequência.

Para obtenção da equação geral, o procedimento utilizado, se iniciou conforme Equação 1 apresentada na sequência.

$$A_{SL} = \left( \frac{V_{LD}}{h} \cdot t_S \right) \quad \text{Eq. (1)}$$

Sendo:

$A_{SL}$ : Área Total de secagem necessária [m<sup>2</sup>];

$V_{LD}$ : Vazão de lodo desaguado por dia [m<sup>3</sup>/dia];

$h$ : Altura da camada de lodo [m];

$t_S$ : Tempo necessário de secagem do Lodo [dia].

Ressalta-se que o volume ou vazão de lodo desaguado em uma ETA é dependente da vazão de água bruta captada, bem como da quantidade e qualidade dos produtos químicos que são adicionados ao processo de tratamento e produção de água potável. Desta forma, o cálculo

da vazão de lodo desaguado diariamente pela estação, foi calculado levando em consideração estas influências, pela utilização da Equação 2 a seguir.

$$V_{LD} = \left( \frac{P_{SST}}{\frac{C_{ISTL}}{100} \cdot \rho_{LD}} \right) \quad Eq. (2)$$

Onde:

$P_{SST}$ : Produção de sólidos secos totais [Kg/d];

$C_{ISTL}$ : Concentração inicial de sólidos totais no lodo (lodo desaguado) [%];

$\rho_{LD}$ : Massa específica do lodo desaguado [kg/m<sup>3</sup>].

A Produção de Sólidos Secos Totais [ $P_{SST}$ ] da estação, ou seja, a massa seca de sólidos produzida pela estação de estudo em um dia, foi calculada pela equação empírica, simplificada, fornecida pela American Water Works Association – AWWA (1999), conforme apresentado pela Equação 3.

$$P_{SST} = Q_{\text{áb}} \cdot (4,89 \cdot D_{MC} + C_{SST\text{áb}}) \cdot 10^{-3} \quad Eq. (3)$$

Com:

$Q_{\text{áb}}$ : Vazão de água bruta a ser tratada [m<sup>3</sup>/d];

$D_{MC}$ : Dosagem média de coagulante (a base de alumínio) [mg/L];

$C_{SST\text{áb}}$ : Concentração de sólidos suspensos totais na água bruta a ser tratada (Média considerando os 12 meses de 2018) [mg/L].

Cabe ressaltar que a Equação 3, é o termo responsável por considerar as variantes (qualidade da água bruta, vazão de água bruta tratada e quantidade e qualidade de produtos químicos adicionados) que influenciam na quantidade de lodo gerado durante o tratamento.

Assim, substituindo a Equação 3 na Equação 2 e rearranjando os termos, obteve-se a Equação 4 apresentada na sequência.

$$V_{LD} = \left( \frac{Q_{\text{áb}} \cdot (4,89 \cdot D_{MC} + C_{SST\text{áb}}) \cdot 10^{-3}}{\frac{C_{ISTL}}{100} \cdot \rho_{LD}} \right) \quad Eq. (4)$$

Novamente, tem se:

$V_{LD}$ : Vazão de lodo desaguado por dia [ $m^3/d$ ];

$Q_{áb}$ : Vazão de água bruta a ser tratada [ $m^3/d$ ];

$D_{MC}$ : Dosagem média de coagulante (a base de alumínio) [ $mg/L$ ];

$C_{SSTáb}$ : Concentração de sólidos suspensos totais na água bruta a ser tratada (Média ponderada considerando os 12 meses de 2018) [ $mg/L$ ];

$C_{ISTL}$ : Concentração inicial de sólidos totais no lodo (lodo desaguado) [%];

$\rho_{LD}$ : Massa específica do lodo desaguado [ $kg/m^3$ ].

Já a equação para o cálculo do tempo de secagem do lodo [ $t_s$ ] em dia, (presente também no último termo da Equação 1), foi obtida partindo da relação geral e linear a seguir:

***taxa = variação de uma propriedade em função de outra → no caso:***

$$TAXA = \left( \frac{\Delta C}{\Delta t} \right) \quad (5)$$

Substituindo as variáveis conforme nomenclatura utilizada no presente estudo, fica:

$$tx_s = \left( \frac{C_{FSTL} - C_{ISTL}}{t_s} \right) \quad (6)$$

Rearranjando os termos, temos:

$$t_s = \left( \frac{C_{FSTL} - C_{ISTL}}{tx_s} \right) \quad Eq. (7)$$

Sendo:

$t_s$ : Tempo necessário de secagem do Lodo [d];

$C_{FSTL}$ : Concentração final de sólidos totais no lodo (lodo “seco”) [%];

$C_{ISTL}$ : Concentração inicial de sólidos totais no lodo (lodo desaguado) [%];

$tx_s$ : Taxa de secagem (nas condições estudadas pelo presente trabalho) [%ST/d].



Ainda, note que, foi preciso encontrar uma taxa de secagem que, ao ser alimentada na Equação 7 forneça o tempo de secagem relativo à altura da camada que necessitará da menor área de secagem para tratar o lodo gerado pela ETA. Contudo, como não se sabe com exatidão qual é esta taxa (experimentos realizados em apenas 3 diferentes alturas), determinou-se uma equação que descreveu o comportamento da taxa de secagem à medida que se altera a altura da camada de lodo (taxa de secagem em função da altura) disposta nos leitos.

A obtenção da curva representativa da equação, bem como a equação, foram conseguidas alimentando em uma planilha do software Excel, as taxas de secagem referente a 15, 30 e 60 cm de altura de camada de lodo, determinadas e apresentadas por meio de tabela. Posteriormente, foi gerado um gráfico para obtenção da equação descritiva da taxa de secagem em função da altura.

De posse da equação conseguida através do gráfico e fazendo o uso do software Excel, a equação foi substituída na Equação 7, obtendo-se com isso a Equação 8, na qual é possível determinar o tempo necessário para realizar a secagem natural em estufa, nas condições estudadas, em qualquer altura de camada de lodo que se desejar.

$$t_s = \left( \frac{C_{FSTL} - C_{ISTL}}{\text{equação da taxa de secagem}} \right) \quad \text{Eq. (8)}$$

Sendo:

$t_s$ : Tempo necessário de secagem do Lodo [d];

$C_{FSTL}$ : Concentração final de sólidos totais no lodo (lodo “seco”) [%];

$C_{ISTL}$ : Concentração inicial de sólidos totais no lodo (lodo desaguado) [%];

Equação da taxa de secagem: Função da Altura da camada de lodo – h [m].

Enfim, com auxílio do software Excel foram alimentados na Equação 8, valores de altura da camada de lodo exposta a secagem natural (h), iniciando em 10 cm e finalizando em 60 cm, com acréscimos de 0,5 cm, obtendo com isso valores de tempos de secagem, para cada uma das alturas, apresentado os resultados obtidos por meio de tabela.

Posteriormente, substituindo as Equações 4 e 8 na Equação 1 e rearranjando os termos, se obteve a Equação 5.

Assim, substituindo as seguintes equações:

$$V_{LD} = \left( \frac{Q_{\acute{a}b} \cdot (4,89 \cdot D_{MC} + C_{SST\acute{a}b}) \cdot 10^{-3}}{\frac{C_{ISTL}}{100} \cdot \rho_{LD}} \right) \quad Eq. (4)$$

$$t_s = \left( \frac{C_{FSTL} - C_{ISTL}}{\text{equação da taxa de secagem}} \right) \quad Eq. (8)$$

Em:

$$A_{SL} = \left( \frac{V_{LD}}{h} \cdot t_s \right) \quad Eq. (1)$$

Fica:

$$A_{SL} = \left( \frac{Q_{\acute{a}b} \cdot (4,89 \cdot D_{MC} + C_{SST\acute{a}b})}{C_{ISTL} \cdot \rho_{LD} \cdot h \cdot 10} \right) \cdot \left( \frac{C_{FSTL} - C_{ISTL}}{\text{equação da taxa de secagem}} \right) \quad Eq. (9)$$

Sendo:

$A_{SL}$ : Área Total de secagem necessária [m<sup>2</sup>];

$Q_{\acute{a}b}$ : Vazão de água bruta a ser tratada [m<sup>3</sup>/d];

$D_{MC}$ : Dosagem média de coagulante (a base de alumínio) [mg/L];

$C_{SST\acute{a}b}$ : Concentração de sólidos suspensos totais na água bruta a ser tratada (Média ponderada considerando os 12 meses de 2018) [mg/L];

$C_{ISTL}$ : Concentração inicial de sólidos totais no lodo (lodo desaguado) [%];

$\rho_{LD}$ : Massa específica do lodo desaguado [kg/m<sup>3</sup>];

$C_{FSTL}$ : Concentração final de sólidos totais no lodo (lodo “seco”) [%].

Equação da taxa de secagem: Função da Altura da camada de lodo – h [m].

Note que, apesar da utilização de nomenclatura diferente para as variáveis (parâmetros), a Equação 9, com exceção do denominador do segundo termo desta (pois considera as taxas de secagem obtidas neste estudo), permaneceu exatamente a mesma daquela obtida por Frata (2019). É importante lembrar novamente que, a Equação 9 representou o comportamento da secagem avaliada nas condições estudadas no presente

trabalho (estufa modificada) e, deste modo, diferente daquela equação geral obtida e avaliada por Frata (2019) na estufa por ele estuda.

Esta equação denominada por equação geral, foi utilizada para calcular a área de secagem necessária em função da altura da camada de lodo e das variáveis relativas ao processo de produção de água potável da ETA Águas de Mandaguahy, e assim obter a “altura ideal” (que necessitará da menor área de secagem para “secar” o lodo gerado pela estação).

Enfim, com auxílio do software Excel foram alimentados na Equação 9, valores de altura da camada de lodo exposta a secagem natural (h), iniciando em 10 cm e finalizando em 60 cm, com acréscimos de 0,5 cm, obtendo com isso valores de área de secagem necessária, apresentado os resultados obtidos por meio de tabela.

De posse dos resultados apresentados, referentes as áreas de secagem necessárias e aos tempos de secagem necessários, na medida em que se alterou a altura de camada de lodo, foi gerado um gráfico pela alimentação destes resultados em uma planilha eletrônica do software Excel, e por meio de um gráfico foi apresentado os resultados obtidos, ou seja, as curvas e equações representativas da área necessária e do tempo de secagem.

Com base na curva apresentada pelo gráfico foi possível verificar a altura de camada ideal que deve ser disposta nos leitos, ou seja, aquela que demandou a menor área necessária para realizar a secagem do lodo produzido diariamente pela estação (ponto de inflexão da curva representativa dos dados de secagem).

4.3.6. Comparação dos resultados de secagem determinados no estudo com aqueles determinados por Frata (2019).

De posse dos resultados determinados nos experimentos, estes foram comparados com aqueles adquiridos por Frata (2019), com o intuito de verificar como o fechamento das laterais influenciou no processo de secagem em estufa.

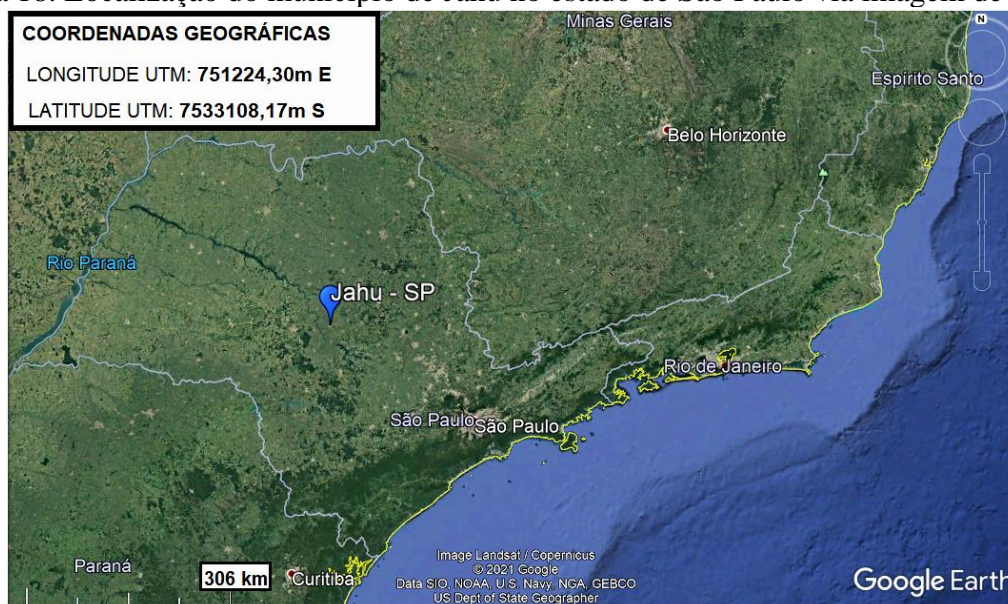
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ETA EM ESTUDO

A Estação de Tratamento de Água (ETA) em estudo é operada pela concessionária privada Águas de Mandaguahy e está situada no município de Jahu, interior de São Paulo. A cidade está distante 296 km da capital do estado e localizada na região central deste.

As localizações do município de Jahu e da ETA em estudo em imagens de satélite foram localizadas no software Google Earth, conforme Figuras 18 e 19 respectivamente.

Figura 18. Localização do município de Jahu no estado de São Paulo via imagem de satélite



Fonte: Adaptado de software Google Earth, 2021

De acordo com informações prestadas pelos responsáveis do tratamento durante a reunião, atualmente a estação explora tanto mananciais superficiais quanto subterrâneos para o abastecimento público de água. Sendo que, o primeiro meio de captação ocorre no Ribeirão Pouso alegre e o segundo meio de captação é feito através de um poço perfurado nas próprias dependências da estação.

A ETA atualmente produz uma vazão de 600 m<sup>3</sup>/h de água, com um sistema de tratamento constituído com calha Parshall, 3 (três) câmaras de floculação e 3 (três) câmaras de flotação, instalado conforme apresentado pela Figura 20 em um prédio de alvenaria de concreto.

Figura 19. Localização da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy via imagem de satélite



Fonte: Adaptado de software Google Earth, 2021

Figura 20. Vista da estrutura da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy

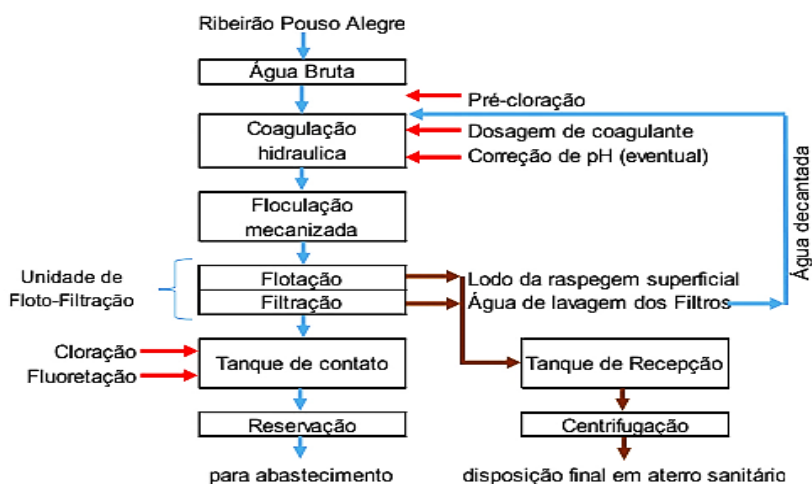


Fonte: Autor, 2020

As etapas do tratamento na ETA em estudo estão apresentadas na Figura 21, sendo:

- etapa de dosagem de produtos químicos e coagulação hidráulica em Calha Parshall;
- etapa de floculação mecanizada;
- etapa de flotação com ar dissolvido e seguida de filtração na mesma unidade;
- etapa de correção final do pH, Desinfecção com cloro gás e Fluoretação;
- etapa de Reservação de água potável em um reservatório de 2.000 m<sup>3</sup>;
- etapa de recuperação dos RETAs e desaguamento destes em uma centrífuga.

Figura 21. Fluxograma da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy



Fonte: Adaptado de FRATA, 2019

### 5.1.1. Descrição da Tecnologia de Tratamento por FlotoFiltração Instalada na ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy

A forma como é feito tratamento da água bruta para torná-la potável, ocorre mediante a coagulação em um misturador rápido tipo Calha Parshall que promove a dispersão do coagulante Sulfato de Alumínio na água, possibilitando a junção das partículas coloidais com o produto químico, conforme apresentado pela Figura 22.

Figura 22. Misturador e medidor de vazão tipo Calha Parshall, com destaque do medidor de vazão ultrassônico instalado e com indicação dos dosadores de coagulante e alcalinizante na ETA em estudo



Fonte: Autor, 2020

A Calha Parshall existente, também possui a função de medir a vazão de água que entra na unidade, sendo que nela existe um medidor de vazão ultrassônico (localização em destaque na Figura 22) que possibilita monitorar as vazões instantâneas e acumulada em tempo real de maneira automatizada, enviando-as informações para a sala de controle do processo, na qual é possível visualizar e controlar todas as variáveis operacionais do tratamento de forma instantânea, como aplicação de produtos químicos pelas bombas dosadoras, variação da vazão de bombas de captação e adução, alteração do gradiente de rotação nos floculadores, dentre outras variáveis.

Em concomitante com a mistura rápida em Calha Parshall que promove a neutralização das impurezas ao coagulante (localização em destaque na Figura 22), é realizado também a dosagem de um alcalinizante (cal hidratada) para correção do pH (localização em destaque na Figura 22). Ressalta-se que a aplicação de alcalinizante é efetuada de forma quando necessário, ou seja, é realizada apenas quando há necessidade de corrigir o pH.

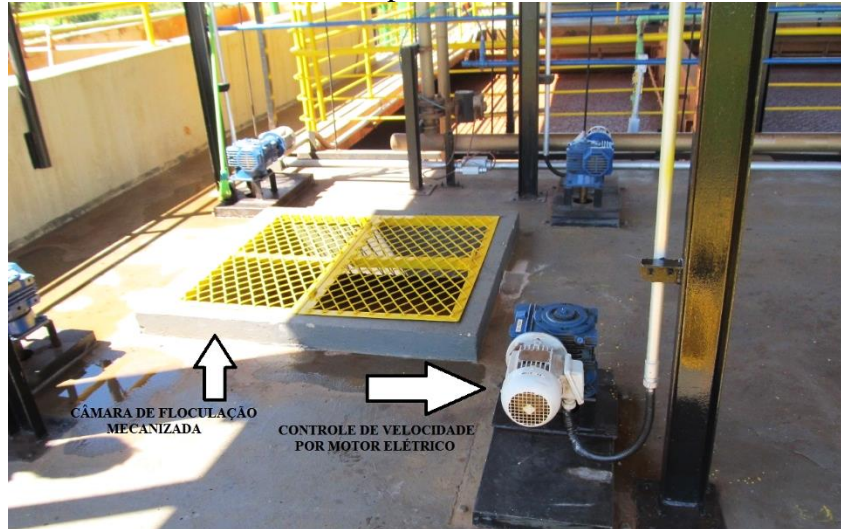
Foi ressaltado pelo gestor responsável que, em função da presença de ferro com concentração máxima girando em torno de 1,9 mg/L na água bruta e, portanto, em concentração acima do permitido de 0,3 mg/L estabelecido pela legislação para o usos de água com vista abastecimento público; é realizado antes da coagulação, ainda no canal de chegada da água bruta, uma pré-oxidação do elemento (ferro) utilizando cloro, com isso o elemento tona-se insolúvel e passivo de ser removido pelas etapas de coagulação e floculação, reduzindo sua concentração abaixo do limite permitido.

Após realizada a coagulação da água bruta, o fluxo de água segue para a etapa de floculação conforme Figura 23, que é composta por três módulos de floculação mecanizados, dividindo a vazão total de 600 m<sup>3</sup>/h em três câmaras de tratamento e, portanto, cada uma com vazão nominal igual a 200 m<sup>3</sup>/h com um tempo de detenção hidráulico de aproximadamente 13 minutos, o qual é adequado para formação dos flocos.

Foi enfatizado pelo responsável do tratamento que o fato da estação estar contemplada com unidades de floculação mecanizada, contribui operacionalmente para a formação de flocos ideais para sua remoção por flotação, pois floculares mecânicos (destaque do motor pela Figura 23) permitem o estabelecimento de gradiente de velocidade diferentes conforme necessidade. Também foi mencionado a flexibilidade operacional que é conseguida devido a existência de três câmaras de floculação, o que possibilita operar o tratamento em função da alteração natural da qualidade da água bruta, hora com gradientes de velocidade

iguais ou hora com gradientes de velocidade diferentes, corrigindo completamente ou parcialmente a variação nas características da água bruta.

Figura 23. Vista dos equipamentos utilizados na floculação com destaque para o controle de velocidade por motor elétrico



Fonte: Autor, 2020

Após essa etapa, a água floculada de cada uma das câmaras é encaminhada para três outras respectivas câmaras de floto-filtração conforme Figura 24, uma vez que a vazão foi dividida pelas três câmaras de flotação citadas anteriormente; cada uma das câmaras de floto-filtração recebem, portanto, uma vazão igual a 200 m<sup>3</sup>/h.

Figura 24. Vista da câmara de floto-filtração (destaque para o lodo flotado/Resíduo e para o motor do removedor de lodo tipo raspador superficial)



Fonte: Autor, 2020



A denominação de câmaras de floto-filtração, é devido ao não seguimento do modelo clássico de tratamento do tipo flotação seguido de filtração, no qual, as etapas de flotação e filtração são realizadas de maneira segregada. Na presente estação as etapas de flotação e filtração são realizadas de maneira associada, ou seja, em uma mesma câmara e por isso designadas por câmara de floto-filtração.

O tratamento nesta etapa consiste em saturar com microbolhas de ar a água floculada, e pelo efeito ascensional das bolhas, estas aderem aos flocos presentes na água arrastando-os para a parte superior da câmara ou tanque de floto-filtração.

Por conseguinte, os flocos flotados se acumulam na superfície da lâmina d'água formando uma camada de resíduos, os quais são denominados por lodo flotado (destaque do lodo pela Figura 24). O lodo flotado, diferentemente da água de lavagem dos filtros, possui boas condições de adensamento.

Conforme mencionado anteriormente, a flotação e a filtração na estação ocorrem de modo associado, isto quer dizer que, à medida que ocorre a flotação das impurezas, a água é retirada e filtrada segundo um fluxo descendente pela parte inferior de cada câmara, com uma taxa de  $195 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ .

Essa medida somente é possível, pois as câmaras são compostas de um fundo falso, onde estão presentes os bocais ou crepinas responsáveis pela retirada da água. Além destes, estão presentes também no fundo falso, os injetores da mistura ar/água, os quais são responsáveis por formarem as microbolhas que promovem o arraste dos flocos para a superfície.

A camada filtrante presentes nas câmaras possuem iguais alturas de 1,30 metros e são compostas unicamente de areia. Foi informado pelo responsável técnico do tratamento, que as carreiras de filtração (tempo de operação da câmara de floto-filtração) em situação normal de operação, ocorrem com duração de 18 a 20 horas. Entretanto, em situações anormais (aumento de turbidez na água bruta), como na ocorrência de chuvas intensas, o tempo de duração das carreiras de filtração podem reduzir bastante, podendo ocorrer por apenas 5 horas.

Uma carreira de filtração é considerada terminada, quando os filtros perdem sua capacidade de filtração de forma adequada, ocorrida pela retenção de impurezas nos espaços “vazios” das camadas filtrantes e, após atingido esse momento, se faz necessário realizar a limpeza do filtro “sujo”. Foi ressaltado ainda, que a operação das três câmaras ocorrem de

forma a evitar que mais de uma câmara esteja em manutenção operacional simultaneamente, e portanto, não comprometendo desta maneira a produção de água potável pela estação.

Finalmente a água tratada é direcionada para uma câmara de contato de volume útil igual a 170 m<sup>3</sup> para efetuar um condicionamento final. Para tornar a água tratada potável, são aplicados de maneira adequada e necessária, cloro gasoso para desinfecção final e de forma a manter concentração exigida por lei de cloro livre presente na água de abastecimento público, cal hidratada para correção final do pH e ácido fluossilícico para fluoretação, novamente para atender os padrões de potabilidade vigentes. Feito isto, a água agora potável é aduzida para um reservatório circular de capacidade igual a 2.000 m<sup>3</sup> conforme Figura 25, o qual é utilizado para amortecer os efeitos das paralizações ou intermitências de vazões ocorridas durante a produção de água, como por exemplo, interrupções na alimentação de energia elétrica, turbidez alta da água bruta, manutenção e limpeza das unidades; de forma a não ocorrer paralização no fornecimento de água ao sistema de distribuição do município.

Figura 25. Reservatório com volume útil de 2.000 m<sup>3</sup> localizado nas dependências da estação de tratamento de água da Concessionária Águas de Mandaguahy



Fonte: Autor, 2020

Foi observado em todas as dependências da ETA da Concessionária Águas de Madaguahy, etapas de tratamento automatizadas com apresentação de parâmetros de controle do processo produção de água potável em tempo real através de uma sala de monitoramento. A condição das estruturas do prédio onde estão localizados os equipamentos e tanques constituintes das operações unitárias de tratamento, estão em ótimo estado de conservação, apresentando ainda uma limpeza excelente das salas de instalação dos equipamentos; foi identificado pinturas novas nas salas de instalação dos equipamentos e nos equipamentos

como bombas e tubulações, neste último foram identificados inclusive adesivos informativos para o sentido do escoamento, conforme ilustrado pela Figura 26. Ressalta-se inclusive a pintura nova das calçadas nas dependências da estação. É importante frisar que todas estas observações feitas, são raras de serem encontradas na maioria das estações de tratamento de água brasileiras.

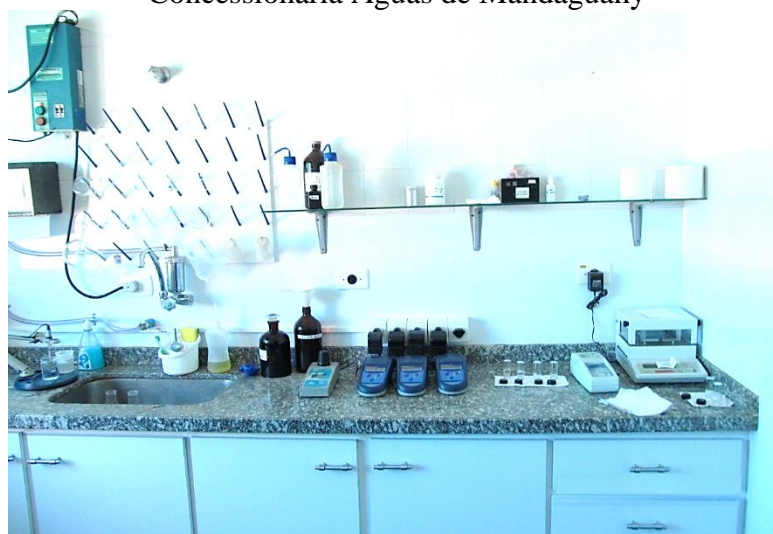
Figura 26. Condições das tubulações da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy



Fonte: Autor, 2020

Também é admirável o estado de conservação, limpeza e manutenção das salas administrativas, direção, controle, cozinha e laboratório, este último pode ser visualizado conforme apresentado pela Figura 27, pela imagem é possível visualizar além das características citadas, mas também a organização do local do ambiente onde são realizadas análises químicas.

Figura 27. Laboratório de análises químicas localizado nas dependências da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy



Fonte: Autor, 2020

Ao longo dos dias, conversando com os colaboradores, foi possível verificar uma identificação positiva dos colaboradores para com a empresa, o que possivelmente refletiu no bom ambiente de trabalho proporcionado pela equipe, o qual foi observado. Ressalta-se outro ponto muito importante e que também foi notado, que é o comprometimento enorme dos colaboradores no exercício de suas funções, com excelente proatividade na execução de suas atividades laborais e uma receptividade de todo o corpo funcional bastante acolhedora.

#### 5.1.2. Descrição da Forma de Remoção do Lodo Flotado e da “Água” de Lavagem dos Filtros

Conforme descrito no processo de tratamento anterior, verifica-se que há formação de resíduos (RETAs) durante a flotação e a filtração. Portanto, nota-se ainda que, pelo tipo e forma que está configurada a tecnologia de tratamento de água da ETA da Concessionária Águas de Mandaguahy, a geração de resíduos ocorre somente nas três câmaras de flotação.

Os resíduos gerados no tratamento são denominados por lodo de ETA, e apesar de ser gerado apenas na câmara de flotação, a sua remoção foi descrita pelo gestor em duas etapas devido ao fato de que a formação dos resíduos ocorre em dois distintos pontos da câmara. Sendo a primeira, referente ao resíduo acumulado na camada superficial da câmara (lodo flotado), originado devido ao arraste dos flocos pelas microbolhas de ar, e a segunda referente ao resíduo gerado pela lavagem dos filtros (água de lavagem dos filtros).

Em relação a forma de remoção do lodo flotado, ela ocorre por meio de um dispositivo mecânico denominado raspador (o motor do removedor de lodo foi destacado pela Figura 24). Este raspador atua somente em uma parte do tanque, ou seja, na extremidade oposta à entrada da água saturada com as microbolhas.

A princípio a ação do raspador limitada somente em uma parte da superfície, poderia causar problemas com relação a remoção do lodo flotado o que comprometeria a eficiência de desempenho dos filtros da unidade. Contudo, conforme explicado pelo responsável técnico do tratamento, o motivo do raspador não atuar em toda superfície de lâmina d'água da câmara de flotação, como ocorre de maneira usual nos flotores, é devido ao direcionamento natural do lodo flotado (formado sobre toda a superfície de lâmina d'água) para o lado oposto da alimentação do tanque. O direcionamento do lodo para o lado oposto, é impulsionado pelo

escoamento no interior da câmara de flotofiltração, ocasionado pela alimentação da água flotada na câmara.

O responsável pelo tratamento explicou que a remoção tem sido realizada de forma bastante adequada, uma vez que, a experiência prática na estação para remoção do lodo na forma usual, ou seja, pela raspagem do lodo em toda a lâmina d'água, se mostrou ineficaz, pois segundo ele ocorre a desestabilização do manto de lodo dificultando a remoção deste material. Ainda, foi informado que há necessidade de acionamento do raspador para remoção do resíduo formado, apenas momentos antes de se iniciar a lavagem dos filtros, não havendo necessidade de acioná-lo durante o período de operação simultânea da flotação e filtração dentro do tanque.

A segunda forma de remoção dos RETAs gerado na etapa de flotofiltração nada mais é do que a remoção da água de lavagem dos filtros (a Figura 28 ilustrou o momento em que se fez a lavagem nos filtros de uma das câmaras de flotofiltração da estação). A lavagem dos filtros é realizada com emprego de ar a uma taxa de 17 NL/s (Normal Litro por segundo) de ar por metro quadrado e água no sentido contracorrente da filtração (ascensional) sob uma velocidade da ordem de 0,8 m/min, após dado por terminada uma carreira de filtração. Então, o resíduo proveniente desta lavagem dos filtros é armazenado em uma unidade denominada por *Tanque de Acúmulo de Água de Lavagem dos Filtros*.

Figura 28. Câmara de floto-filtração (destaque para a água de lavagem dos filtros/Resíduo e para a canaleta coletora do resíduo)



Fonte: Autor, 2020

Enfim, ambos resíduos formados (lodo dos flotoadores e “água” de lavagem dos filtros) são encaminhados de modo segregado. O lodo flotado é direcionado pelo raspador

para um *Tanque de Acúmulo de Lodo Flotado*, neste tanque de recepção, ocorre de maneira natural pela ação da gravidade o adensamento dos sólidos presentes no fundo dele. O resíduo formado após o adensamento é denominado lodo do processo ou lodo de ETA. Em seguida, o lodo adensado é removido através de uma bomba e encaminhado para outro tanque denominado por *Tanque de Acúmulo de Lodo Adensado*, no qual é realizada a homogeneização deste material por meio de uma bomba instalada na unidade com função de recircular esse lodo adensado, e assim promover uma mistura completa no tanque (homogeneização) garantindo com isso uma concentração de sólidos constante em todos os pontos da massa, o que é importante para a alimentação da centrífuga, etapa posterior de desaguamento que será realizada neste lodo.

De forma simultânea, no *Tanque de Acúmulo do Lodo Flotado*, o sobrenadante é removido também por meio de uma bomba e encaminhado para o *Tanque de Acúmulo de Água de Lavagem dos Filtros*.

A “água” de lavagem dos filtros, juntamente a “água” sobrenadante proveniente do *Tanque de Acúmulo do Lodo Flotado*, são submetidas ao adensamento também natural pela ação da força gravitacional dentro do *Tanque de Acúmulo de Água de Lavagem dos Filtros*, ainda que menos pronunciada em função da baixa concentração de sólidos presentes neste resíduo, quando comparado ao lodo flotado. E de forma parecida ao descrito nos parágrafos anteriores, o sobrenadante é removido por meio de uma bomba do *Tanque de Acúmulo de Água de Lavagem dos Filtros*, voltando ao processo de tratamento de água da estação na unidade de coagulação promovida pela agitação rápida em calha Parshall.

Já a remoção do material adensado no fundo do *Tanque de Acúmulo de Água de Lavagem dos Filtros*, é realizada utilizando também uma bomba e este resíduo é encaminhado ao tanque de acúmulo de lodo *Tanque de Acúmulo de Lodo Adensado*. Cabe ressaltar que, neste mesmo tanque ocorre a junção de duas correntes de resíduos, pois conforme descrito anteriormente, o tanque também recebe o lodo flotado, que foi removido pelo dispositivo mecânico denominado rapador. É importante frisar que o resíduo presente no *Tanque de Acúmulo de Lodo Adensado*, é o material resultante do processo de produção de água na estação e conhecido no meio acadêmico por lodo de ETA, ou em outras palavras, o lodo gerado pela ETA da Concessionária Águas de Madaguahy e possui uma concentração de Sólidos Totais – ST, de 1 a 2%, e no caso da estação em estudo o resíduo é encaminhado para uma etapa posterior de desaguamento utilizando para tanto uma centrífuga, que deverá receber uma vazão controlada, a qual é garantida por uma bomba instalada no *Tanque de*

*Acúmulo de Lodo Adensado*, portanto, percebe-se que, o tanque em questão além de possuir as funções de receber o RETA e promover a sua mistura completa, a unidade é essencial para regularizar a vazão de lodo enviada para a centrífuga.

### 5.1.3. Descrição da Tecnologia de Desaguamento do Lodo Gerado no Tratamento da ETA Águas de Mandaguahy

O lodo gerado pela Estação em estudo, o qual foi armazenado no *Tanque de Acúmulo de Lodo Adensado* e está sob mistura completa (homogeneizado) para garantir uma concentração uniforme e ainda de forma a evitar que ocorra a sedimentação neste tanque, o que seria indesejável; o material com concentração de Sólidos Totais – ST na faixa de 1 a 2% é encaminhado para a etapa de desaguamento, a qual é feita utilizando uma centrífuga, conforme apresentado pela Figura 29.

Figura 29. Vista frontal da centrífuga instalada na ETA da Concessionária Águas de Madaguahy



Fonte: Adaptado de Frata, 2019

Para tanto, é alimentado um polímero na tubulação com emprego de uma bomba dosadora (antes da entrada do equipamento de desaguamento) para auxiliar na remoção de umidade presente no lodo adensado (principalmente água intersticial e vicinal). A Figura 30 ilustra os 2 tanques com volume útil de 2 m<sup>3</sup> para o preparo e armazenamento do polímero citado, bem como também é possível visualizar, as bombas dosadoras acopladas aos tanques.

Figura 30. Tanque de preparação do polímero auxiliar de desaguamento do lodo de ETA



Fonte: Adaptado de Frata, 2019

O gestor responsável pelo tratamento explicou que se faz necessário a existência de dois tanques, pois um deles fica em operação, ou seja, promovendo a dosagem de coagulante na linha de alimentação do lodo na centrífuga, e outro tanque é utilizado para preparo do coagulante e com isso, possibilitar a operação contínua da centrífuga.

O líquido recuperado pela centrífuga (é possível ver o aspecto da água centrifugada conforme Figura 29), assim com o sobrenadante do *Tanque de Acúmulo de Água de Lavagem dos Filtros* volta ao processo de tratamento de água da estação na unidade de coagulação (calha Parshall). Já o lodo desaguado pela centrífuga é encaminhado para uma caçamba estacionária com volume útil de 7m<sup>3</sup> através de uma esteira. O lodo é disposto temporariamente nesta caçamba durante aproximadamente 1 semana (tempo médio de enchimento da caçamba) e, após esse período o material é encaminhado para disposição final em um aterro. O material que sai da centrífuga, ou seja, o lodo desaguado, possui uma concentração de Sólidos Totais – ST na faixa de 20%. Foi informado pelo gestor responsável do tratamento que, a disposição final do lodo gerado pela estação é realizada atualmente por uma empresa terceirizada.

Os principais parâmetros presentes no lodo desaguado foram apresentados pela Tabela 7. Estes estão previstas pela NBR 10.004 de 2004 para classificação de resíduos sólidos. É importante citar que, para os resíduos radioativos, estes não são objeto desta Norma, pois eles são de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. A norma, classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública para que possam ser gerenciados adequadamente.



Tabela 7. Caracterização do lodo desaguado em centrífuga da ETA Águas de Madaguahy, segundo NBR 10.004

<b>NBR 10.004/2004 – MASSA BRUTA</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultados Analíticos</b>	<b>VMP – NBR 10.004/2004</b>
pH (Suspensão 1:1)	-	7,14	2,0 -12,5 (b)
Sulfeto (como H <sub>2</sub> S)	mg/kg	< 5	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	19,9	-
Cianeto (como HCN)	mg/kg	1,3	250 (c)
<b>NBR 10.004/2004 – SOLUBILIZADO</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultados Analíticos</b>	<b>VMP – NBR 10.004/2004</b>
Alumínio	mg/L	0,71	0,2
Bário	mg/L	0,061	0,7
Ferro	mg/L	0,236	0,3
Manganês	mg/L	0,907	0,1
Sódio	mg/L	9,2	200
Zinco	mg/L	0,077	5
Índice de fenóis	mg/L	0,075	0,01
Nitrato (como N)	mg/L	0,2	10
Cloreto	mg/L	12,3	250
Sulfato	mg/L	0,9	250

VMP = Valores Máximos Permitidos pela Norma ABNT NBR 10.004/2004.

Massa Bruta – Observações dos parâmetros:

(b) = Avaliação da Corrosividade - Item "a" do tópico 4.2.1.2 da NBR 10.004/2004

(c) = Avaliação da reatividade - Item "e" do tópico 4.2.1.3 da NBR 10.004/2004.

Fonte: Adaptado de Frata, 2019

Conforme podemos observar pela Tabela 7 anterior, a concentração de Alumínio presente no lodo originado pela estação de tratamento de água em estudo, superou o valor máximo permissível estabelecido no Anexo G da NBR 10.004 de 2004 e, portanto, conforme item 4.2.2.2 da referida norma, no qual cita que, para classificar um resíduo como Resíduos classe II B – Inertes, nenhum dos constituintes solubilizados poderão possuir concentrações acima do limite máximo estabelecido.

Sendo assim, o lodo produzido pela estação de tratamento Águas de Mandaguahy, conforme caracterização realizada e disposta através da Tabela 7, é um tipo de resíduo classificado como Resíduos classe II A - Não inertes, e segundo descrito no item 4.2.2.1 da NBR 10.004 de 2004. Cabe ressaltar ainda que, este item faz parte do item 4.2.2 que se refere a classificação dos Resíduos classe II – Não perigosos.

Deste modo, como já era esperado, os resultados confirmaram que o lodo da estação em estudo, é um resíduo Não inerte e Não perigoso, em conformidade com o disposto na norma NBR 10.004 de 2004.

## 5.2. MODIFICAÇÃO DA ESTUFA PILOTO PARA REALIZAR OS TESTES DE SECAGEM DO LODO DA UNIDADE EM ESTUDO

Uma vez que, houve a possibilidade de utilizar a estufa piloto já existente na estação para realizar os testes de secagem, obteve-se, portanto, uma estufa nas condições descritas (aspectos técnicos pré-estabelecidos) pelo capítulo 4 deste estudo a partir da modificação da estufa já existente. O resultado da readequação da estufa piloto, a qual obedeceu aos critérios pré-estabelecidos nesse estudo, pode ser visualizado conforme Figuras 31, 32 e 33.

Figura 31. Estufa piloto para secagem natural de lodo de ETA e a localização do medidor de temperatura e umidade do ar em destaque



Fonte: Autor, 2020

Figura 32. Leitões existentes na estufa piloto e a localização na estufa do medidor de temperatura e umidade do ar em destaque



Fonte: Autor, 2020

Observe que é possível a identificação (em destaque) do medidor de temperatura e umidade do ar externo na segunda imagem da Figura 31 e, também a localização (em destaque) dos medidores de temperatura e umidade do ar interno pela Figura 32. Já pela Figura 33 é possível verificar que as laterais da estufa foram quase totalmente fechadas, ou seja, restando apenas um vão livre de 50 cm próximo ao solo.

Figura 33. Representação interna lateral da estufa com indicação em destaque da abertura para recirculação de ar pela lateral



Fonte: Autor, 2020

### 5.3. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE SECAGEM NATURAL DO LODO DE ETA

#### 5.3.1. Determinação dos Gráficos de Monitoramento da Temperatura e Umidade do ar Interno e Externo à Estufa Piloto

O monitoramento dos dados de temperatura e umidade externa e interna à estufa, iniciou um dia após a disposição do lodo nos leitos da estufa, ou seja, às 14 horas e 28 minutos e 35 segundos do dia 05/12/2019 e foi cessado no dia 03/02/2020.

As medições de temperatura e umidade do ar interno e externo à estufa foram coletados ao final do período de secagem, segundo descrito pelo item 4.3.1.

De posse dos dados coletados pelo medidor Datalogger IMPAC IP-747RH de registro simultâneo de temperatura e umidade do ar externo e interno à estufa, foram gerados

gráficos nos quais foi possível visualizar os valores máximo, mínimo e médio diários tanto para a temperatura interna e externa do ar, quanto para umidade interna e externa do ar, conforme apresentado nas Figuras 34, 35, 36 e 37.

Por fim, foi determinado também a média da temperatura e da umidade ao longo de todo o período, tanto do ar interno quanto do ar externo, conforme ilustrado pelas linhas horizontais contínuas, conforme também apresentado pelas Figuras 34, 35, 36 e 37.

Era esperado que, em função da estação verão na qual foram realizados os experimentos de secagem, constatar valores elevados de temperatura durante o dia e valores menos acentuados de temperatura no período da noite, tanto para o ar externo quanto para o ar interno a estufa ao longo dos dias de realização dos experimentos de secagem.

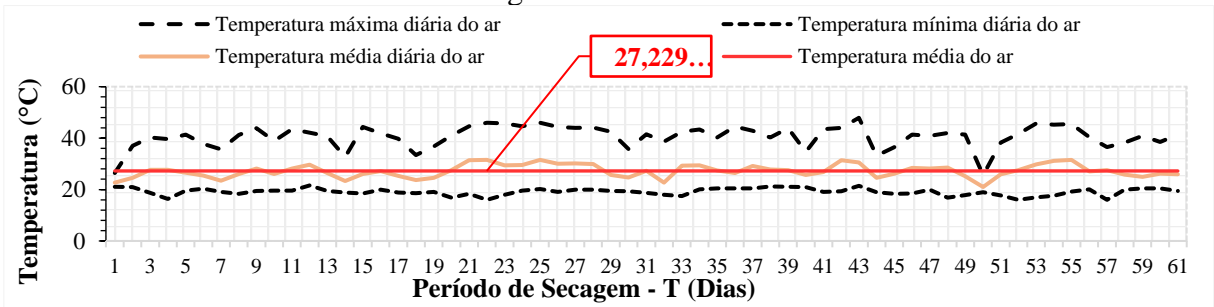
Assim, consultando os resultados representados pelas curvas de monitoramento da temperatura do ar externo e interno a estufa durante o período de realização do experimento de secagem, conforme apresentado pelos gráficos das Figuras 34 e 36, foi possível verificar faixas altas de temperatura durante o dia, tanto para o ar externo quanto interno a estufa e, não se constatou medições de temperaturas muito baixas durante a noite, tanto para o ar externo quanto interno a estufa. Resultados esses que eram esperados e foram obtidos.

De maneira análoga, era esperado para as medições de umidade, resultados hora elevados e hora baixos, tanto para o período diurno quanto para o período noturno, em relação ao ar externo e interno a estufa, uma vez que, os ensaios foram realizados em meses de chuvas frequentes.

Da mesma forma, consultando os resultados representados pelas curvas de monitoramento da umidade do ar externo e interno a estufa durante o período de realização do experimento de secagem, conforme apresentado pelos gráficos das Figuras 35 e 37, foi possível verificar resultados de umidade do ar tanto interno quanto externo, hora elevados e hora baixos, sendo que, provavelmente o primeiro vinculado a precipitação e o segundo indicando provável ausência de chuva. Uma queda na umidade, representada pelas curvas das Figuras 35 e 37, pode ter sido favorecida também pelas elevadas temperaturas típicas de verão.

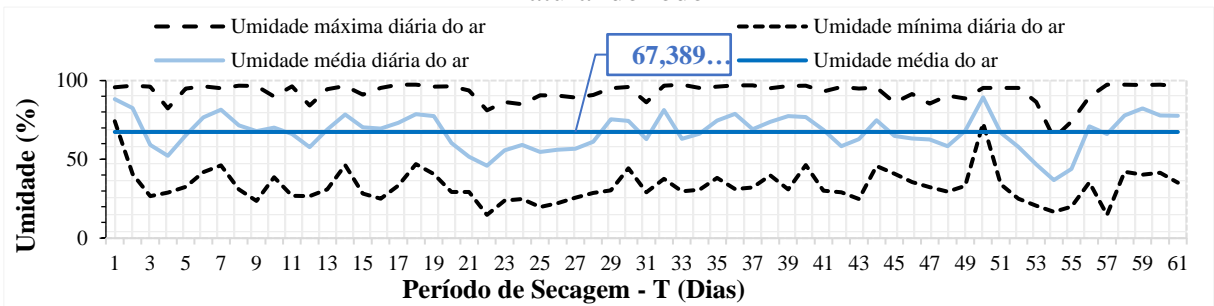
As condições climáticas externas a estufa, ou seja, os valores médios de Temperatura e Umidade do ar externo, foram obtidos pelo medidor Datalogger IMPAC IP-747RH de registro simultâneo de temperatura e umidade, o qual forneceu para o período de secagem de estudo, respectivamente, um valor de temperatura média do ar igual a 27,23°C e de umidade média do ar igual a 67,39%. Os resultados podem ser visualizados pelas Figuras 34 e 35.

Figura 34. Monitoramento da temperatura do ar externo à estufa durante o período de secagem natural do lodo



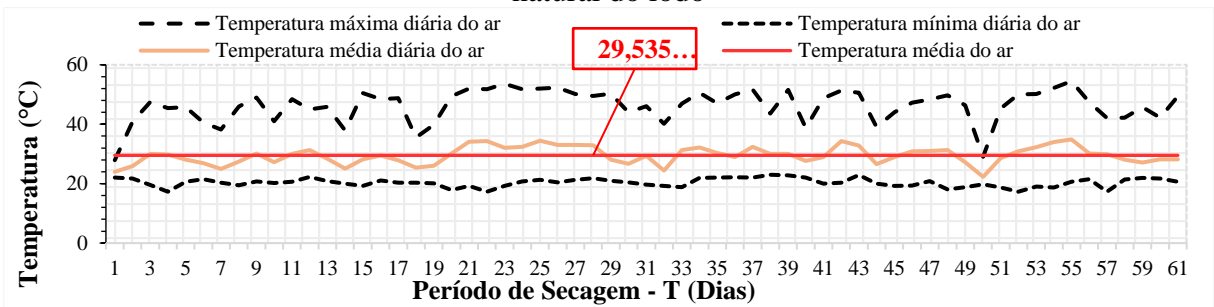
Fonte: Autor, 2020

Figura 35. Monitoramento da umidade do ar externo à estufa durante o período de secagem natural do lodo



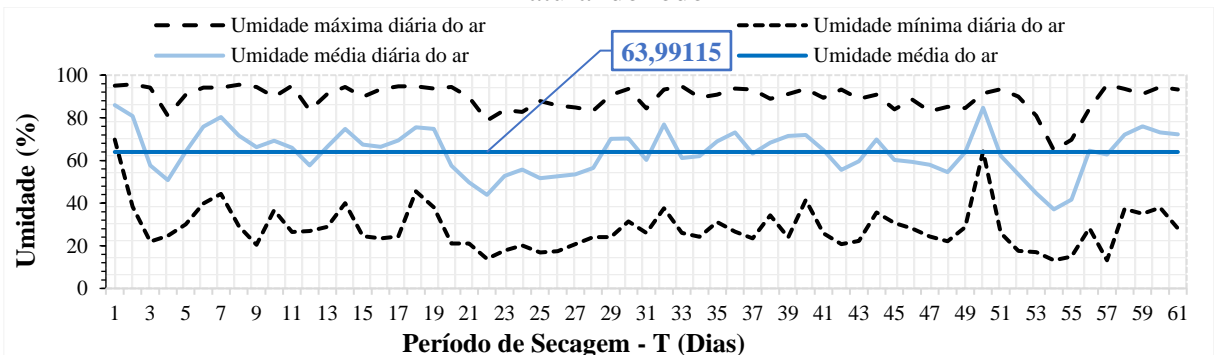
Fonte: Autor, 2020

Figura 36. Monitoramento da temperatura do ar interno à estufa durante o período de secagem natural do lodo



Fonte: Autor, 2020

Figura 37. Monitoramento da umidade do ar interno à estufa durante o período de secagem natural do lodo



Fonte: Autor, 2020

### 5.3.2. Determinação da Concentração de Sólidos Totais no Lodo Durante o Processo de Secagem Natural em Estufa Piloto

O principal objetivo do presente monitoramento foi compreender como se dá a variação na taxa de secagem em função de cada uma das alturas de camadas de lodo exposta a secagem em cada um dos leitos, para novas condições estruturais da estufa piloto (principalmente devido ao fechamento das laterais da estufa), novas condições construtivas e geométricas dos leitos de secagem, para estação climática de realização do experimento e para o clima local da cidade.

Em outras palavras, o intuito foi buscar se há ou não interferência dos fatores, e quando há interferência, se esta influência é ou não significativa nos valores de taxa de secagem do lodo.

O experimento de secagem realizado nesta pesquisa foi conduzido em apenas três dos seis leitos de geometria quadrada. O intuito de utilizar apenas 3 leitos projetados, foi por motivos de segurança, uma vez que os outros três leitos permaneceram em modo de espera durante o estudo e assim, estes leitos “vazios” poderiam receber o material para experimentação a qualquer momento caso houvesse necessidade, devido por exemplo, a problemas e ou falhas no processo de secagem, naqueles leitos que estiveram em operação.

Mas como não houve nenhuma falha ou problema durante a realização do experimento, os leitos permaneceram “vazios” até o final do estudo de secagem.

É possível verificar na Figura 38 que foram preenchidos apenas três leitos dos seis leitos de secagem existentes no interior da estufa piloto, conforme descrito pelo item 4.3 deste estudo.

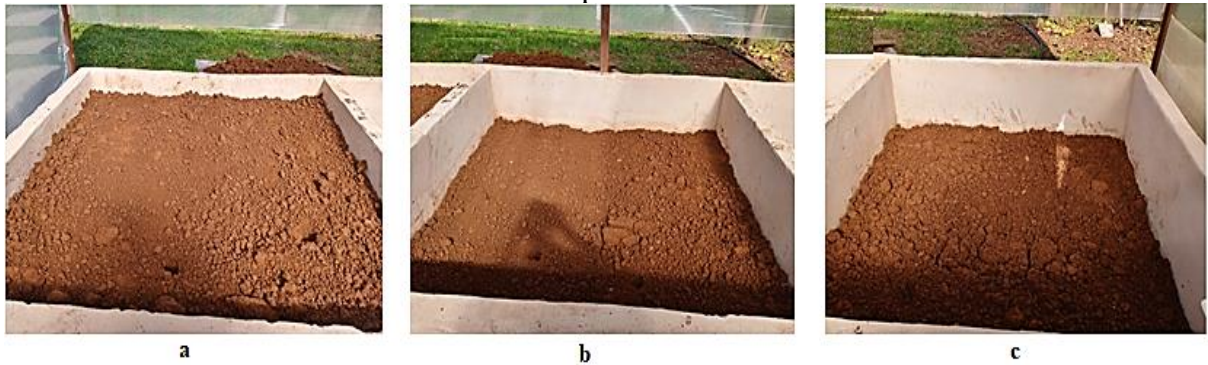
Já a denominação de cada leito seguido da altura de camada de lodo para cada leito experimental, foram dispostos conforme Tabela 8, objetivando representar e facilitar a manipulação e organização dos dados obtidos durante a secagem.

Tabela 8. Denominação dos leitos em função da altura de camada de lodo disposta

<b>LEITO</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO</b>
A	0,60m
B	0,30m
C	0,15m

Fonte: Autor, 2020

Figura 38. Leitões de secagem preenchidos com lodo de ETA nas alturas experimentais estipuladas



a. Leito de 60 cm; b. Leito de 30 cm; c. Leito de 15 cm

Fonte: Autor, 2020

As Figuras 39 e 40 ilustram como ficaram os leitos após o recebimento do lodo desaguado, sendo que a primeira foto foi registrada no momento do enchimento dos leitos, ou seja, no primeiro dia de exposição do lodo à secagem.

Já a segunda foto foi registrada no terceiro dia de exposição, sendo possível a partir da análise das duas fotografias identificar visualmente aquele leito que recebeu lodo até uma altura de camada igual a 60 cm, o leito do meio denominado por (b) conforme Tabela 8 e que recebeu lodo até uma altura de camada igual a 30 cm e enfim o outro leito restante denominado por (c) também segundo a Tabela 8 e que recebeu lodo até uma altura de camada igual a 15 cm.

Figura 39. Vista do primeiro dia de exposição do lodo à secagem na estufa em estudo



Fonte: Autor, 2020

Figura 40. Vista do terceiro dia de exposição do lodo à secagem na estufa em estudo



Fonte: Autor, 2020

A aquisição dos valores de concentração de sólidos totais no lodo para cada amostra (de cada leito) coletada semanalmente, foi, portanto, realizada utilizando como meio de determinação a balança determinadora de umidade, que forneceu o resultado de secagem em gramas e o percentual relativo ao peso inicial, ou seja, da fração de sólidos totais. Os dados adquiridos foram apresentados na Tabela 9.

Pelos dados apresentados na Tabela 9, foi possível verificar que concentração de sólidos totais no lodo disposto em uma camada de 15 cm, atingiu uma concentração de 84,30% de sólidos no dia 13/01/2020 para uma exposição à secagem de 40 dias.

Logo na semana subsequente, mais precisamente no dia 20/01/2020, a análise da concentração de sólidos indicou que o lodo ao invés de continuar perdendo umidade, passou a absorver umidade, o que era esperado, pois, quando a umidade presente no lodo está baixa, há uma tendência de o material absorver umidade do ar ambiente. Contudo, posteriormente as medições de concentração indicaram que o lodo voltou ao processo de secagem novamente.

Esta tendência de absorção de umidade do ar atmosférico por um material com elevada concentração de sólidos e portanto, com baixo teor de umidade, foi observada com antecedência a realização do presente trabalho nos estudos de David (2002), onde é relatado pelo referido autor que, se um material for completamente seco e a seguir exposto a um ambiente com 75% de umidade relativa durante 4 dias, este material irá absorver umidade do ar, regredindo sua concentração de sólidos até atingir o valor de 92%.



Tabela 9. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo durante 76 dias de secagem natural em estufa piloto

<b>SECAGEM NATURAL DE LODO PRÉ-DESAGUADO EM CENTRÍFUGA</b>			
<b>CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS – ST NO LODO</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO IGUAL A 60 cm</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO IGUAL A 30 cm</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO IGUAL A 15 cm</b>
% ST na data 04/12/19	24,80	26,10	28,10
% ST na data 05/12/19	24,90	25,80	25,20
% ST na data 09/12/19	27,10	27,60	27,20
% ST na data 10/12/19	25,20	27,60	28,00
% ST na data 16/12/19	28,90	31,30	33,80
% ST na data 23/12/19	29,70	33,10	39,40
% ST na data 30/12/19	33,00	47,90	48,20
% ST na data 07/01/20	42,20	48,70	63,10
% ST na data 13/01/20	34,60	47,50	84,30
% ST na data 20/01/20	37,00	50,90	81,10
% ST na data 03/02/20	41,69	63,80	84,52
% ST na data 17/02/20	50,30	74,40	87,20

Fonte: Autor, 2020

O experimento de secagem na estufa piloto foi cessado, ou seja, interrompeu-se a determinação da concentração de Sólidos Totais – ST do lodo presente nos três leitos, quando a taxa de secagem diminuiu significativamente (quando não houve mais alteração relevante de umidade nas amostras coletadas).

Desta forma, após atingido 76 dias de experimento, conforme ilustrado pela Figura 41 e disposto pela Tabela 9, não houve mais alteração relevante de umidade nas amostras coletadas, ou em outras palavras, foi constatado que não houve alteração relevante nos valores de concentração de sólidos totais no lodo.

Figura 41. Aspecto das variadas alturas de camadas de lodo passados 76 dias de secagem natural em estufa



a. Leito de 60 cm; b. Leito de 30 cm; c. Leito de 15 cm

Fonte: Autor, 2020

Esta não modificação significativa de concentração de sólidos presente no lodo (baixa taxa de secagem), pode ser verificada como maior clareza ao se consultar os dados de concentração de sólidos referentes a altura de camada de lodo igual a 15 cm, do dia 03/02/2020 e compará-lo com o resultado do dia 17/02/2020 presentes na Tabela 9. Esses resultados mostraram valores muito próximos e que justificam uma taxa de secagem lenta.

Portanto, após verificado esse acontecimento, estabeleceu-se que o limite de secagem em dias (tempo requerido ou tempo considerado adequado para as condições experimentais estudadas) para o experimento realizado, de 76 dias. Deste modo, passados 76 de experimento, este foi cessado e o lodo “seco” foi removido dos leitos manualmente e dispostos em uma caçamba, para posterior transporte e disposição final em aterro sanitário.

O aspecto do lodo passados 76 dias de secagem natural em estufa, pode ser visto através da Figura 41, sendo possível verificar visualmente a eficiência do processo de secagem, onde em todos os leitos foi possível observar o aspecto bastante “seco” do material.

As camadas apresentaram fendilhamento, sendo que foi verificado fendas maiores, largas e profundas na camada de 60 cm. Já na camada de 15 cm foram verificados fendas menores e em maior quantidade quando comparado aos outros leitos de 60 cm e 30 cm. A maior quantidade de fendas e as desigualdades na formação parece estar relacionada ao volume de lodo disposto à secagem e ao teor de umidade ainda presente, sendo que, quanto menos umidade verificada maior foi a quantidade de fendas observada.

Ressalta-se que, o valor da concentração inicial de sólidos totais utilizada nos cálculos que serão apresentados na sequência deste trabalho, não foi nenhum dos valores (leito de 60 cm, 30 cm ou de 15 cm) determinados através da balança determinadora de umidade, após a coleta de amostras referentes ao início da secagem em estufa, ou seja, logo que se dispôs o lodo nos leitos dentro da estufa.

O valor utilizado nos cálculos para concentração inicial de sólidos totais no lodo, antes do início da secagem ou concentração de sólidos totais do lodo desaguado em centrífuga, foi de 20%, que é o valor médio da concentração de sólidos totais do lodo desaguado pela centrífuga da Estação de Tratamento de Água em estudo. O motivo dos valores determinados no início da secagem terem sido superiores a 20%, foi porque boa parte do lodo permaneceu em uma caçamba durante aproximadamente uma semana antes de ser transferido para a estufa, uma vez que, leva-se esse tempo para o enchimento da caçamba que recebe o lodo desaguado da estação e, durante esse período por volta de uma semana, o material alimentado na caçamba, já começa a perder umidade para o meio ambiente.

### 5.3.3. Determinação dos Gráficos de Monitoramento da Concentração de Sólidos Totais no Lodo Durante o Processo de Secagem em Estufa Piloto

De posse da Tabela 9 obtida no item 5.3.2 e utilizando uma planilha eletrônica do Excel como auxílio, foi possível obter os gráficos de monitoramento representativos do fenômeno de secagem analisado, durante o período de 76 dias de experimento, conforme apresentando pelas Figuras 42, 43 e 44.

Observa-se que próximo aos 40 dias de experimento, ocorreu uma redução da concentração de sólidos no lodo, a qual foi mostrada nos gráficos como uma pequena tendência de declínio na curva de concentração de sólidos. Esse fato já era esperado, pois, conforme já mencionado no item 5.3.2., quando um material é exposto a secagem e ele atinge valores elevados de concentração de sólidos totais, a taxa de secagem diminui e há uma tendência de o material absorver umidade do ambiente.

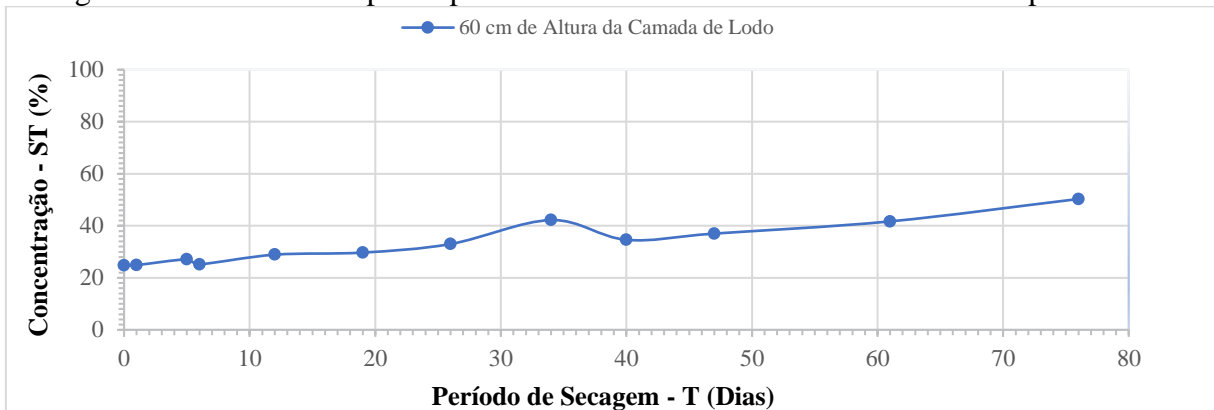
A absorção de umidade pelo material exposto a secagem está relacionada a diminuição na taxa de secagem, mas para que isso ocorra, pode ser que seja necessário, que tenha ocorrido precipitação naquele período de análise, o que provocaria em consequência um aumento no índice de umidade relativa do ar atmosférico e, isso favoreceria a absorção de umidade do ar pelo lodo.

Entretanto, cabe advertir que, não necessariamente é preciso que tenha ocorrido precipitação para que lodo absorvesse umidade do ar.

Ainda, analisando a absorção de umidade do ar pelo lodo verificada e discutida nos parágrafos anteriores, foi possível observar pelas Figuras 34, 35, 36 e 37 presentes no item 5.3.1., que a partir do 40º dia de secagem a umidade média diária máxima manteve constante, porém a curva representativa da umidade média diária mínima apresentou um pico de aumento da umidade, o que pode significar que houve ocorrência de chuva. Isto foi observado tanto gráfico representativo do ar externo quanto do ar interno a estufa.

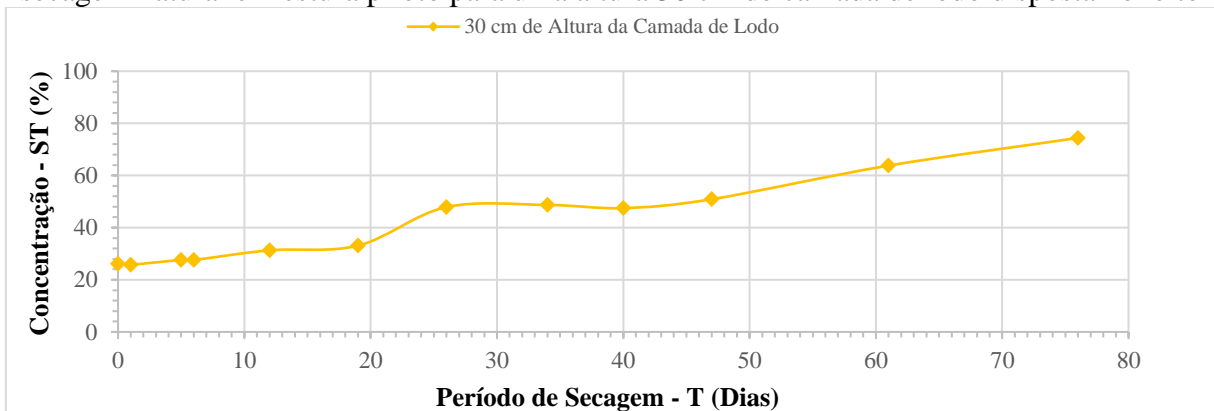
Ainda, foi verificado pelas citadas figuras, que houve queda nas temperaturas máxima, média e diária do ar interno e do ar externo a estufa para o mesmo período avaliado, indicando a possibilidade mesmo de ter ocorrido precipitação, podendo provocar esta diminuição na temperatura observada e conseqüentemente absorção de umidade pelo material exposta a secagem natural em estufa.

Figura 42. Curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais -ST no lodo desaguado em centrífuga da ETA Águas de Mandaguahy de Jahu-SP, durante o processo de secagem natural em estufa piloto para uma altura 60 cm de camada de lodo disposta no leito



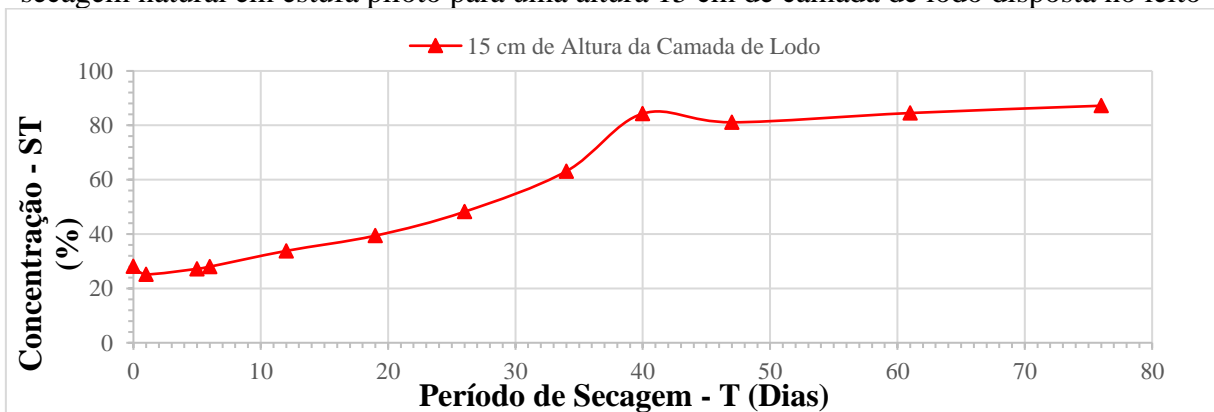
Fonte: Autor, 2020

Figura 43. Curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais -ST no lodo desaguado em centrífuga da ETA Águas de Mandaguahy de Jahu-SP, durante o processo de secagem natural em estufa piloto para uma altura 30 cm de camada de lodo disposta no leito



Fonte: Autor, 2020

Figura 44. Curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais -ST no lodo desaguado em centrífuga da ETA Águas de Mandaguahy de Jahu-SP, durante o processo de secagem natural em estufa piloto para uma altura 15 cm de camada de lodo disposta no leito



Fonte: Autor, 2020

Analisando a curva representativa da camada de lodo em 15 cm, no dia 20/01/2020, a análise da concentração de sólidos indicou que o lodo ao invés de continuar perdendo umidade, passou a absorver umidade. Todavia, foi possível constatar que no dia 03/02/2020 o material disposto voltou ao processo de secagem novamente, sendo mantida esta condição até o último dia de experimentação 17/02/2020.

Apesar disso, ao se comparar a medição em 40 dias de secagem (84,30%) com 76 dias de secagem (87,20%), houve um aumento de concentração de sólidos totais no lodo de apenas 2,9% para um período de secagem considerado grande para obter este aumento na concentração. Este fato é entendido como se não houvesse alteração relevante na concentração de sólidos, o que torna inviável continuar o processo de secagem.

De posse desta verificação de não alteração relevante na umidade presente no lodo, foi possível afirmar que, para a camada de 15 cm nas condições estudadas, o tempo de secagem considerado adequado é de 40 dias. Ainda, será discutido pelo próximo item, que a taxa de secagem para altura de camada igual a 15 cm, após 40 dias de exposição é inferior a taxa de secagem inicial. Podendo assim, concluir que, o tempo requerido ou o período de secagem considerando adequado para uma camada de 15 cm foi de 40 dias.

É importante ressaltar que, a secagem nessa condição experimental e para uma altura de camada de 15 cm, se mostrou eficiente, devido ao nível alcançado de teor de sólidos em período de prazo considerado curto para a tecnologia de secagem natural.

Continuando a análise para a camada de lodo em 15 cm foi possível constatar a eficiência desta maior que as demais, através da Tabela 9 que apresentou os resultados de concentração de ST e ou pela comparação entre a Figura 44 representativa da camada de 15 cm com as Figuras 42 e 43 representativas das camadas de 60 cm e 30 cm respectivamente.

Desse modo, observando a curva do gráfico conforme Figura 44 e, comparando esta curva da camada de 15 cm com as curvas de camadas respectivamente 60 cm e 30 cm conforme Figuras 42 e 43, verificou-se que a primeira atingiu um coeficiente linear maior que as demais, seja pela inclinação mais acentuada da curva (ver inclinação das curvas conforme Figuras 42, 43 e 44) seja pelas equações representativas das curvas com seus respectivos coeficientes angulares.

Ainda, é importante notar que, a concentração de sólidos verificada ao final de 76 dias para a camada de 15 cm foi de 87,20% e para as camadas de 60 cm e 30 cm foram de 50,30% e de 74,40 % respectivamente.

Em suma, o resultado final para 76 dias de experimento de secagem natural em uma estufa piloto, a qual foi modificada (alteração de algumas condições de secagem) para tratar o lodo desaguado em centrífuga da estação de tratamento de água – ETA operada pela Concessionária Águas de Mandaguahy situada no município de Jahu-SP; permitiu constatar que a exposição à secagem natural em estufa do lodo desaguado disposto em leitos quadrados para camadas de 60 cm, não possibilitou através do experimento, identificar o momento em que não houve mais alteração relevante na concentração de sólidos e, portanto não se atribuiu um tempo requerido (período de secagem considerado adequado) para efetuar a secagem nesta altura.

Portanto, nas condições estudadas secar lodo desaguado gerado por ETAs em uma altura de camada igual a 60 cm é inviável, pois o tempo de secagem requerido para alcançar uma concentração acima de 50% de sólidos totais, por exemplo, foi superior a 2 (dois) meses. Já nas camadas de 30 cm e 15 cm, foi possível atingir esse mesmo valor em aproximadamente 35 e 27 dias respectivamente, o que mostrou uma eficiência superior significativa destas últimas camadas sobre a camada de 60 cm.

Por fim, para analisar a eficiência da tecnologia de secagem natural na camada de 30 cm, foi comparado esta, com relação ao leito disposto com lodo em camada de 15 cm, neste que, como já descrito nos parágrafos supracitados, verificou-se um excelente resultado. Porém o volume de lodo utilizado no leito com camada de 15 cm foi menor que 1 m<sup>3</sup>.

Assim, para a camada de 30 cm, mesmo expondo o material desta por 76 dias a secagem, a concentração de sólidos na camada não atingiu a mesma concentração de sólidos totais – ST acima de 80%, concentração esta que foi conseguida na camada de 15 cm em apenas 40 dias de exposição a secagem.

Entretanto, na condição de altura de camada em 30 cm, a camada atingiu a concentração de ST acima de 70% e foi possível utilizar o dobro do volume de lodo do que na condição de altura de camada em 15 cm.

Logo, devido a este fato, foi utilizado o método proposto por Frata (2019) para encontrar uma altura de camada ideal para dispor o lodo nos leitos e assim realizar a secagem natural por energia solar em estufa, de forma a permitir uma boa eficiência de secagem e, ao mesmo tempo tratar o maior volume de lodo da ETA em estudo possível utilizando para tanto, pouca área de secagem.

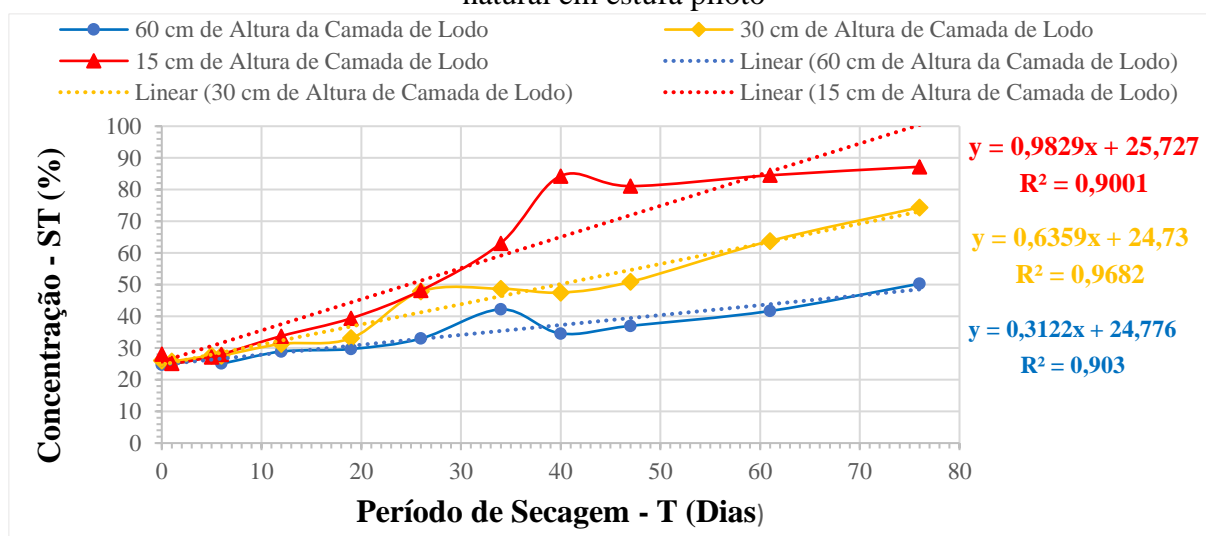
### 5.3.4 Determinação das Taxas de Secagem e Equações Descritivas de Cada um dos experimentos de Secagem, pelo Método da linearização

De posse da Tabela 9 obtida no item 5.3.2 e utilizando uma planilha eletrônica do Excel como auxílio, foi possível obter o gráfico apresentado pela Figura 45.

Para o alcance das equações (modelos representativos do fenômeno de secagem nas condições estudadas) foi utilizado como dados de entrada os valores de concentração de ST (%) em função do tempo de secagem (em dia). Os valores foram obtidos durante a realização das medições de ST (%) das amostras compostas de lodo coletadas em cada altura de camada de lodo por um período de 76 dias.

Em síntese, o gráfico apresentado pela Figura 45 representou o experimento de secagem natural por energia solar realizado na estufa piloto.

Figura 45. Equações e curvas representativas dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy de Jahu-SP durante 76 dias de secagem natural em estufa piloto



Fonte: Autor, 2020

Em seguida, de posse do gráfico, ou melhor das curvas representativas dos resultados determinados no experimento, foi realizado através do programa Excel a linearização (linhas de tendência) das curvas descritivas do processo de secagem de cada altura de camada, obtendo desta forma, uma equação descritiva do fenômeno de secagem natural em estufa para cada altura de camada estudada.

Também, foi a partir da linearização das curvas ilustradas pelo gráfico da Figura 45, que se obteve os valores de R², e com isso, foi possível afirmar que o procedimento realizado

para obtenção das equações tiveram um bom ajuste estatístico (grau de confiabilidade da equação), pois os valores de R<sup>2</sup> superaram 90%, conforme apresentado pela Figura 45.

Cabe ressaltar que, somente foi utilizado o método da linearização para os dados experimentais, pois este modelo foi o melhor que se ajustou aos resultados determinados no experimento.

Com isso, obteve-se, portanto, equações lineares representativas para cada uma das três alturas de camadas de lodo expostas a secagem natural em estufa.

Além disso, as taxas de secagem somente foram possíveis de serem obtidas, após realizado o método de linearização das curvas de secagem. As equações descritivas do fenômeno analisado e as respectivas taxas de secagem para cada altura de camada de lodo, foram dispostas na Tabela 10.

Tabela 10. Equações descritivas do experimento de secagem e taxas de secagem referentes a cada modelo

<b>ALTURA DE CAMADA DE LODO (cm)</b>	<b>FUNÇÃO REPRESENTATIVA DA EXPERIMENTO DE SECAGEM</b>	<b>TAXA DE SECAGEM (%ST/DIA)</b>
60	$C = 0,3122 T + 24,776$	0,31
30	$C = 0,6359 T + 24,730$	0,64
15	$C = 0,9829 T + 25,727$	0,98

Fonte: Autor, 2020

De posse das equações obtidas, foi possível calcular os parâmetros relativos ao tempo requerido ou necessário de secagem natural em estufa para atingir uma determinada concentração de sólidos no lodo para cada altura de camada disposta nos leitos. Em seguida, foram efetuadas verificações (se as equações foram capazes de representar de forma confiável os resultados experimentais) para cada uma das três equações. A verificação das equações foi executada pelo lançamento de valores de tempo em dias nestas, com vista obter os valores de concentração de sólidos pelas equações. Posteriormente, foi realizada a comparação dos resultados obtidos através das equações com os resultados alcançados nos experimentos.

Portanto, objetivando verificar as equações apresentadas pela Tabela 10, foi alimentado nestas um valor para concentração (C) final de sólidos totais de 60%, em cada uma das equações obtidas pelo modelo linearizado (Figura 45). Assim, o valor obtido de tempo em dia (T) por cada equação, representou o tempo requerido de secagem do lodo gerado pela ETA Águas de Mandaguahy com concentração inicial de 20% e final de 60% de Sólidos Totais – ST e para as condições de secagem estudadas; adquirindo desta forma, para



as camadas de 15 cm, 30 cm e 60 cm, aproximadamente iguais a 35 dias, 55 dias e 113 dias, respectivamente.

Logo, a veracidade dos resultados obtidos referentes ao tempo necessário que se gastaria para secar o lodo através da tecnologia de secagem natural em estufa piloto, foi verificada pela comparação dos valores conseguidos pelas equações (modelo matemático linear) com os valores experimentais apresentados conforme Tabela 9 ou pelas Figuras 42, 43, 44 e ou 45.

Pela análise feita a partir dos dados dispostos pela **Tabela 9**, que apesar de ela não fornecer precisamente a quantidade de dias que seria necessário para secar o lodo até uma concentração de 60%, foi possível verificar para as camadas de 15 cm e 30 cm com base nos valores da Tabela 9, que realmente se levaria aquele tempo aproximado em dias obtidos pelas equações. Já para a camada de 60 cm, os dados experimentais não puderam prever qual o tempo em dias se levaria para secar o lodo, pois no último dia de determinação de sólidos totais no lodo, ou seja, passados 76 dias de secagem natural, este ocorreu no dia 17/02/2020 e nesta data para a camada de 60 cm a concentração de sólidos totais presentes no lodo foi de 50,30% e, portanto, não havia ainda atingido os 60%. Pode-se afirmar então, com base nos dados da Tabela 9, que se leva mais de 76 dias para secar o lodo desaguado disposto em uma camada de 60 cm nas condições estudadas, até uma concentração final de 60%, o que é condizente com o valor de 113 dias obtidos pela equação para o modelo de camada em 60 cm.

Pela análise feita a partir das **Figuras 42, 43, 44 e ou 45**. Foi possível, verificar pela Figura 42 e ou Figura 45, com curvas representativas da camada de 15 cm que, para atingir uma concentração de 60% de sólidos totais leva-se aproximadamente 33 dias, este que, pode ser considerado muito próximo daquele tempo de 35 dias obtido pela equação, uma vez que, este último é também um resultado aproximado. Já para a camada de 30 cm, foi possível verificar pela Figura 43 e ou Figura 45 que se leva um tempo aproximado de 56 dias para atingir uma concentração de 60% de sólidos totais, este que, pode também ser considerado muito próximo daquele de 55 dias obtido pela equação, uma vez que, este último é também um resultado aproximado. Por fim, para a análise da camada de 60 cm, assim como não foi possível fazê-la pela verificação dos resultados apresentados pela Tabela 9, também não foi possível averiguar se a equação representou bem a realidade através da Figura 44 e ou Figura 45, pelo mesmo motivo de não haver dados de secagem acima de 76 dias, uma vez que a equação forneceu como resultado 113 dias de secagem para uma camada de altura de lodo de 60 cm atingir uma concentração de 60% de sólidos totais com a tecnologia de secagem natural

em estufa nas condições estudadas. Pode-se afirmar então, com base nos dados da Figura 44 e ou Figura 45, que se leva mais de 76 dias para secar o lodo desaguado disposto em uma altura de camada de 60 cm nas condições estudadas, até uma concentração final de 60%, o que é condizente com o valor de 113 dias obtidos pela equação modelo da camada de 60 cm.

Finalmente, foi possível verificar que as equações apresentaram ótima exatidão em relação à realidade, ou seja, em relação aos dados determinados no experimento. Diante disso, foi possível concluir que houve validação do modelo matemático (método da linearização) utilizado pela presente pesquisa, que estimou o tempo requerido e ou adequado para realizar a secagem natural por energia solar em estufa.

Uma vez obtidas as taxas de secagem, foi possível sustentar as observações feitas durante o experimento, nas quais em resumo, apontavam uma condição ótima de secagem melhor para a camada de 15 cm. Ainda, como já discutido e argumentado pelo item 5.3.3, a camada de lodo com altura igual a 15 cm, se mostrou mais favorável, pois foi verificado nesta condição uma concentração de sólidos ao final de 76 dias de 87,20% e para as camadas de 60 cm e 30 cm foram de 50,30% e de 74,40 % respectivamente. Ainda, cabe lembrar que, para a camada de 15 cm, foi possível determinar um tempo adequado de 40 dias de secagem, no qual atingiu-se na camada de lodo 84,3% de sólidos.

É importante notar que, a taxa obtida para altura de camada igual a 15 cm, foi igual em módulo ao valor de 0,98%/dia que é muito próximo a 1; e sabendo que o significado físico do coeficiente angular de equação linear (modelo matemático linear), no caso a taxa de secagem, é a medida de como variou a concentração de sólidos totais no lodo em função do tempo, no caso, em função dos dias de exposição do lodo a secagem, foi possível concluir que, o valor de taxa igual a 1, informou que o lodo disposto em uma altura de camada igual a 15 cm e submetido a secagem natural por energia solar em estufa nas condições estudadas, teve um aumento na sua concentração de ST em 1% a cada dia de exposição.

Cabe ressaltar que, o experimento foi realizado em um período de constantes chuvas, que apesar de apresentar altas temperaturas devido estação de verão, o que favorece o fenômeno de secagem; o índice de umidade relativa do ar manteve também valores bastante elevados, o que provavelmente dificultou a secagem. Assim, pode se deduzir que em outras épocas do ano como outono e primavera a eficiência de secagem tende ser maior do que a verificada, pelo fato de que nestas estações a umidade relativa do ar é menor, com exceção do inverno, que apesar de possuir baixos valores de umidade relativa, o que contribui para a

secagem natural, é uma época que tende a apresentar também baixas temperaturas, prejudicando a secagem natural.

### 5.3.5. Determinação da Altura da Camada de Lodo a ser Disposta nos Leitões da Estufa Piloto para Secagem Natural

Através dos resultados apresentados pelos itens 5.3.3 e 5.3.4, foi possível afirmar que, a disposição de “finas” camadas de lodo nos leitões para secagem natural, requer um tempo menor para atingir uma concentração de sólidos totais no lodo, o que em primeira análise é positivo do ponto de vista técnico no projeto de estufas de secagem natural.

Porém do ponto de técnico e econômico, para a disposição em “finas” camadas há uma tendência de necessitar de grandes áreas disponíveis para realizar a secagem do lodo gerado pela estação, aumentando os custos com construção da estufa, aquisição de área pela ETA e aumento da mão de obra operacional.

Já a disposição em espessas camadas de lodo nos leitões, pode tratar uma grande quantidade de lodo, necessitando de pouca área para efetuar a secagem natural, o que em primeira análise também é positivo do ponto de vista técnico.

Entretanto, a disposição nessa condição tende a requerer longos períodos de secagem, aumentando também os custos com construção da estufa (como o lodo precisa permanecer mais tempo dentro da estufa, é necessário mais espaço para acomodar mais lodo, uma vez que, o lodo continua sendo gerado no processo de produção de água potável), aquisição de área pela estação e aumento da mão de obra operacional.

Para determinar a altura de camada de lodo a ser disposta na estufa, que necessitará da menor área de secagem para “secar” o lodo gerado pela estação foi utilizado a metodologia proposta por Frata (2019).

Cabe ressaltar que, alguns dos parâmetros considerados para determinar a altura ideal (ponto de inflexão da curva), são os mesmos daqueles determinados e utilizados por Frata (2019), uma vez que, a estação de estudo é mesma. Tais parâmetros foram dispostos conforme Tabela 11.

Tabela 11. Variáveis do processo de tratamento de água realizado pela estação Águas de Mandaguahy

<b>PARÂMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADE</b>
<b>C<sub>FSTL</sub></b> : Concentração inicial de ST no lodo (lodo desaguado)	20,0 0	%
<b>Q<sub>áb</sub></b> : Vazão de água bruta a ser tratada	14.400,00	m <sup>3</sup> /d
<b>D<sub>MC</sub></b> : Dosagem média de coagulante*	0,85	mg/L
<b>C<sub>SSTáb</sub></b> : Concentração de sólidos suspensos totais na água bruta a ser tratada**	40,70	mg/L
<b>ρ<sub>LD</sub></b> : Massa específica do lodo (lodo desaguado)***	1.200,00	kg/m <sup>3</sup>

\* Coagulante a base de alumínio.

\*\* Média ponderada considerando os 12 meses de 2018 – Ponderando a concentração com a frequência em dias.

\*\*\*Valor correspondente a massa específica do lodo de ETA (valores de Sólidos Totais - ST por volta de 20%).

Fonte: Adaptado de Frata, 2019

Demais parâmetros, como a concentração final Sólidos Totais – ST no lodo que se deseja alcançar com a secagem (concentração no lodo “seco” - após cessada a secagem natural em estufa) – C<sub>FSTL</sub> [%], foram definidos pelo presente autor em 90%. O motivo de se ter estabelecido esse valor para C<sub>FSTL</sub>, foi com base nos resultados obtidos, uma vez que, foi observada uma diminuição significativa na velocidade de secagem, após a concentração de sólidos no lodo alcançar 80% de Sólidos Totais.

Por fim, os parâmetros restantes foram determinados pela mesma metodologia utilizada por Frata (2019), os quais foram apresentados na sequência.

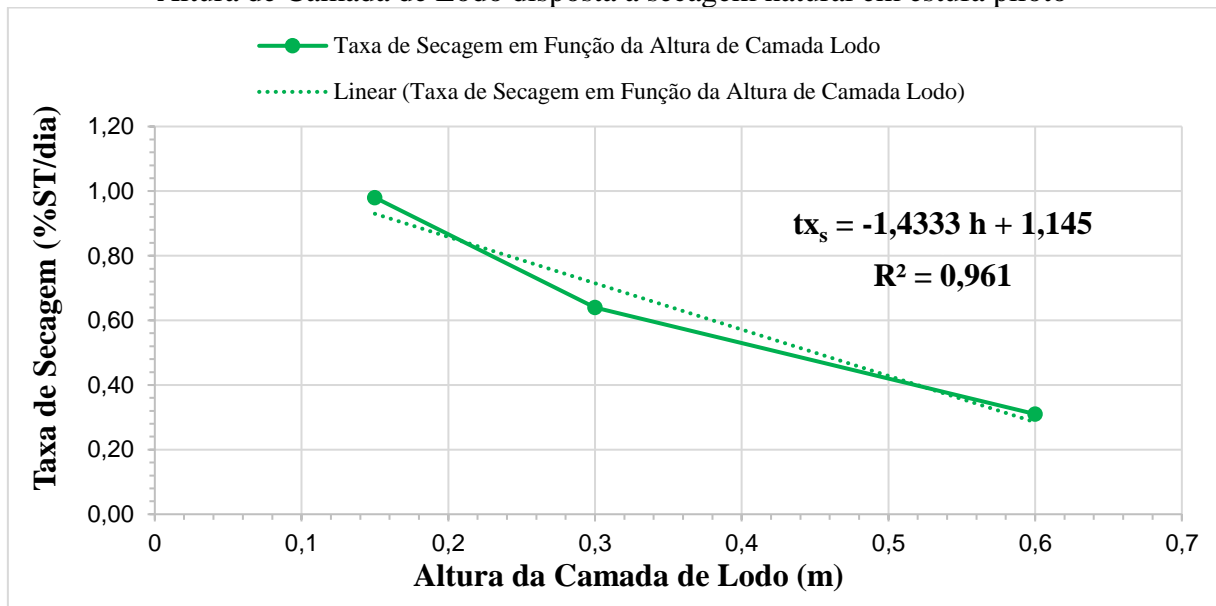
A obtenção da curva descritiva do comportamento da taxa de secagem à medida que se altera a altura da camada de lodo e a equação representativa desta curva, foram conseguidas alimentando em uma planilha do software Excel, as taxas de secagem referente a 15, 30 e 60 cm de altura de camada de lodo, determinadas anteriormente neste estudo e apresentadas conforme Tabela 12. Posteriormente, foi gerado o gráfico conforme apresentado pela Figura 46 e utilizando o Método da Linearização; pois este modelo foi o melhor que se ajustou aos resultados das taxas de secagem determinados no experimento (ajuste estatístico acima de 96%); foi possível obter a equação da taxa de secagem em função da altura.

Tabela 12. Resultados obtidos no experimento, relativos à taxa de secagem em função da altura de camada de lodo disposta a secagem

<b>ALTURA (cm)</b>	<b>TAXA DE SECAGEM (%ST/DIA)</b>
15	0,98
30	0,64
60	0,31

Fonte: Autor, 2020

Figura 46. Equação e Curva representativa da Taxa de Secagem (%ST/dia) em função da Altura de Camada de Lodo disposta a secagem natural em estufa piloto



Fonte: Autor, 2020

Cabe ressaltar, com base nos resultados apresentados pelo gráfico da Figura 46, que a velocidade de secagem (taxa de secagem) diminui à medida que se aumenta a altura da camada de lodo no leito de secagem. Isso representa que, quanto maior for a altura da camada de lodo no leito, menor será a taxa de secagem, logo, a velocidade de secagem é menor e, portanto, quanto mais alta for a camada de lodo no leito, se leva mais tempo para “secá-lo”.

A diminuição na taxa de secagem pelo aumento da camada de lodo no leito observada, obedeceu a uma tendência de linearidade degressiva, motivo pelo qual a equação é linear e o termo que acompanha a variável x (altura da camada de lodo em metros) é negativo.

De posse da equação conseguida conforme Figura 46, esta foi substituída na Equação 7, obtendo-se com isso a Equação 8, na qual é possível determinar o tempo necessário para realizar a secagem natural em estufa, nas condições estudadas, em qualquer altura de camada de lodo que se desejar.

Enfim, novamente com auxílio do software Excel foram alimentados na Equação 8, valores de altura da camada de lodo exposta a secagem natural (h), iniciando em 10 cm e finalizando em 60 cm, com acréscimos de 0,5 cm, obtendo com isso valores de tempos de secagem, para cada uma das alturas, conforme apresentado pela Tabela 13.

$$t_s = \left( \frac{C_{FSTL} - C_{ISTL}}{-1,4333 \cdot h + 1,145} \right) \quad Eq. (8)$$

Sendo:

$t_s$ : Tempo necessário de secagem do Lodo [d];

$C_{FSTL}$ : Concentração final de sólidos totais no lodo (lodo “seco”) [%];

$C_{ISTL}$ : Concentração inicial de sólidos totais no lodo (lodo desaguado) [%];

$h$ : Altura da camada de lodo [m].

Tabela 13. Resultados obtidos no experimento, relativos à tempos de secagem em função da altura de camada de lodo disposta a secagem

ALTURA DA CAMADA DE LODO (cm)	TEMPO DE SECAGEM (dia)
10	70
15	76
20	82
25	89
30	98
35	109
40	123
45	140
50	164
55	197
60	246

Fonte: Autor, 2020

Posteriormente, substituindo as Equações 4 e 8 na Equação 1 e rearranjando os termos, se obteve a Equação 9.

Assim, substituindo:

$$V_{LD} = \left( \frac{Q_{\acute{a}b} \cdot (4,89 \cdot D_{MC} + C_{SST\acute{a}b}) \cdot 10^{-3}}{\frac{C_{ISTL}}{100} \cdot \rho_{LD}} \right) \quad Eq. (4)$$

$$t_s = \left( \frac{C_{FSTL} - C_{ISTL}}{-1,4333 \cdot h + 1,145} \right) \quad Eq. (8)$$

Em:

$$A_{SL} = \left( \frac{V_{LD}}{h} \cdot t_s \right) \quad Eq. (1)$$

Fica:

$$A_{SL} = \left( \frac{Q_{\acute{a}b} \cdot (4,89 \cdot D_{MC} + C_{SST\acute{a}b})}{C_{ISTL} \cdot \rho_{LD} \cdot h \cdot 10} \right) \cdot \left( \frac{C_{FSTL} - C_{ISTL}}{-1,4333 \cdot h + 1,145} \right) \quad Eq. (9)$$

Sendo:

$A_{SL}$ : Área Total de secagem necessária [m<sup>2</sup>];

$Q_{\acute{a}b}$ : Vazão de água bruta a ser tratada [m<sup>3</sup>/d];

$D_{MC}$ : Dosagem média de coagulante (a base de alumínio) [mg/L];

$C_{SST\acute{a}b}$ : Concentração de sólidos suspensos totais na água bruta a ser tratada (Média ponderada considerando os 12 meses de 2018) [mg/L];

$C_{ISTL}$ : Concentração inicial de sólidos totais no lodo (lodo desaguado) [%];

$\rho_{LD}$ : Massa específica do lodo desaguado [kg/m<sup>3</sup>];

$h$ : Altura da camada de lodo [m];

$C_{FSTL}$ : Concentração final de sólidos totais no lodo (lodo “seco”) [%].

Note que, apesar da utilização de nomenclatura diferente para as variáveis (parâmetros), a Equação 9, com exceção do denominador do segundo termo desta (pois considera as taxas de secagem obtidas neste estudo), permaneceu exatamente a mesma daquela obtida por Frata (2019).

É importante lembrar novamente que, a Equação 9 representou o comportamento da secagem avaliada nas condições estudadas no presente trabalho e, deste modo, diferente daquela equação geral obtida e avaliada por Frata (2019).

Esta equação denominada por equação geral, foi utilizada para calcular a área de secagem necessária em função da altura da camada de lodo e das variáveis relativas ao processo de produção de água potável da ETA Águas de Mandaguahy, e assim obter a altura de camada de lodo ideal a ser disposta nos leitos, que demandará a menor área necessária para realizar a secagem do lodo produzido diariamente pela estação.

Enfim, com auxílio do software Excel foram alimentados na Equação 9, valores de altura da camada de lodo exposta a secagem natural ( $h$ ), iniciando em 10 cm e finalizando em 60 cm, com acréscimos de 0,5 cm, obtendo com isso valores de área de secagem necessária, para cada uma das alturas, conforme apresentado pela Tabela 14.

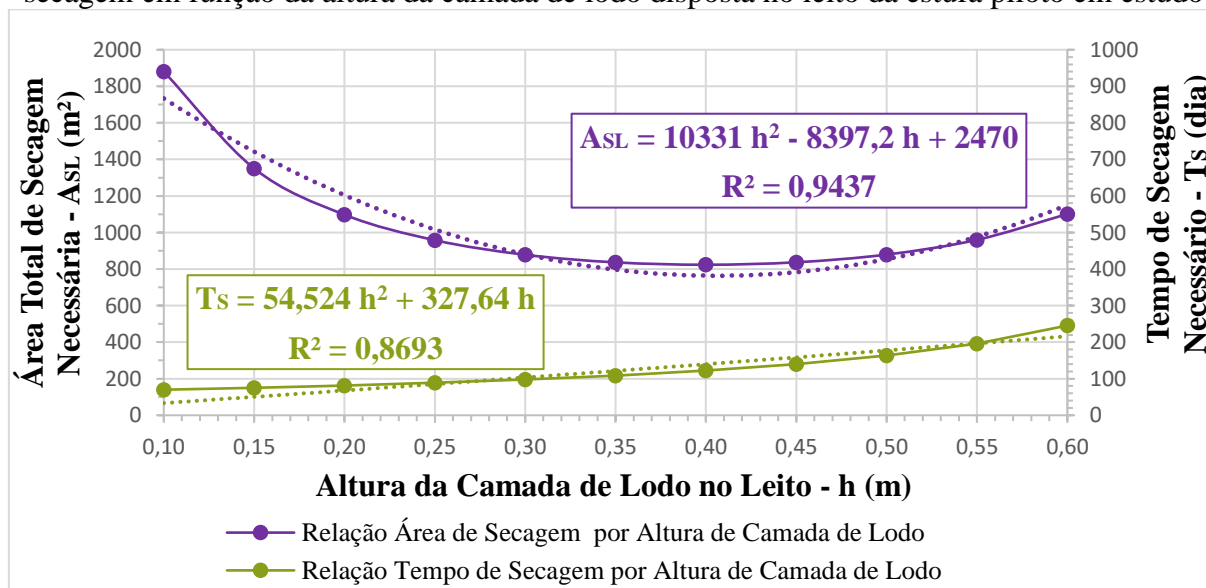
Tabela 14. Resultados obtidos no experimento, relativos à área de secagem necessária em função da altura de camada de lodo disposta a secagem

ALTURA DA CAMADA DE LODO (cm)	ÁREA DE SECAGEM (m <sup>2</sup> )
10	1.880,78
15	1.350,45
20	1.097,38
25	957,85
30	878,19
35	836,55
40	823,70
45	837,07
50	879,33
55	959,90
60	1.100,97

Fonte: Autor, 2020

De posse dos resultados apresentados conforme Tabela 13 e Tabela 14, foi gerado o gráfico apresentado conforme Figura 47. E com base na curva apresentada foi possível observar que, na medida que se dispõe lodo em “finas” camadas, é preciso de uma maior área de secagem, apesar de, necessitar de um tempo de secagem menor para atingir 90% de ST quando comparado aos tempos necessários para disposição em alturas de camadas de lodo maiores. Contudo, foi possível verificar que, na medida que se aumenta a altura na camada de lodo, a área necessária diminui, o que era esperado, pois com alturas maiores é possível dispor maior quantidade de lodo nos leitos, entretanto o tempo de secagem aumenta.

Figura 47. Variação da área total de secagem necessária da estufa pelo tempo necessário de secagem em função da altura da camada de lodo disposta no leito da estufa piloto em estudo



Fonte: Autor, 2020



Esse comportamento decrescente na área de secagem na medida que se aumenta a altura da camada de lodo, é constatado até um certo ponto na curva (ponto de inflexão), o que também era esperado, pois com alturas maiores há uma necessidade de manter o lodo em processo de secagem natural por mais tempo, devido a diminuição na taxa de secagem e, desta forma, o aumento da altura da camada de lodo, ao invés de provocar uma diminuição na área total de secagem necessária, passa a provocar uma necessidade maior de área.

Portanto, verifica-se conforme Figura 47, que a altura de camada ideal, ou seja, aquela que demanda a menor área necessária para realizar a secagem do lodo, é a de 40 cm. Desta forma, para a estufa piloto de estudo, ao se dispor lodo desaguado com uma concentração de Sólidos Totais – ST de 20% em uma altura de camada igual a 40 cm, a Figura 47 ou Tabela 13 informa um tempo necessário e aproximado de 123 dias de secagem natural. Já a área total necessária para realizar a secagem do lodo por este período e nestas condições, até uma concentração de Sólidos Totais – ST de 90%, é conforme Figura 47 ou Tabela 14 de aproximadamente 824 m<sup>2</sup>.

É importante advertir que, uma estufa com área de secagem igual a 824 m<sup>2</sup>, é capaz de receber aproximadamente 330 m<sup>3</sup> de lodo. Assim, conforme Equação 2.1, de que o volume de lodo produzido em um dia é 2,7 m<sup>3</sup> e, (na prática o volume produzido pela estação é de aproximadamente 1 m<sup>3</sup> por dia, deste modo, 7 m<sup>3</sup> por semana, que é o volume correspondente a 1 caçamba estacionária. Contudo, considerou o volume calculado pela Equação 2.1, por razões de segurança e pelo fato desta levar em consideração a produção de sólidos estimada pela AWWA, 1999.) sabendo que a estufa é capaz de receber 330 m<sup>3</sup> de lodo. Portanto, a estufa conseguirá receber os 332 m<sup>3</sup> (volume referente a produção 2,7 m<sup>3</sup> de lodo por dia durante 123 dias, entretanto na prática gera-se aproximadamente apenas 1 m<sup>3</sup> de lodo, logo apenas 123 m<sup>3</sup> durante os 123 dias).

Ressalta que 123 dias, é o tempo necessário para realizar a secagem do lodo desaguado com concentração de ST de 20% até a concentração de ST de 90%. Lembrando que, a partir desse tempo, pode-se remover o lodo para o recebimento de mais material.

### 5.3.6. Comparação dos resultados de secagem determinados no estudo com aqueles determinados por Frata (2019)

Com relação as condições climáticas externas a estufa, os resultados obtidos neste estudo, foram comparados com aqueles obtidos por Frata (2019), no segundo ensaio de secagem, no qual neste foi para temperatura média do ar igual a 27,1°C e para umidade média do ar igual a 64,7%.

A partir da comparação foi possível verificar que os resultados são semelhantes, o que era esperado, pois, ambos experimentos de secagem tiveram o local de realização. Ainda, as medições tanto no trabalho de Frata (2019) quanto do autor (2020), neste caso, são referentes ao ar externo a estufa e, deste modo, não sofrem influência das características construtivas da dela, como poderia ocorrer se a comparação fosse em relação aos resultados de temperatura e umidade do ar interno a estufa.

Ressalta-se que, a estação temporal na qual foi realizada os ensaios pelo autor (2020) e por Frata (2019), foi a mesma estação verão.

Todos estes elementos contribuíram para justificar a similaridade dos valores médios de temperatura e umidade do ar externo a estufa, obtidos pelos pesquisadores. Por fim, os resultados relativos à comparação nos dois estudos, foram dispostos conforme Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 15. Comparação entre os resultados obtidos no experimento com os de Frata (2019), relativos a média dos valores máximos de temperatura e umidade diários verificados para o ar externo a estufa e, relativos a média dos valores mínimos de temperatura e umidade diários verificados para o ar externo a estufa

FRATA 2019				AUTOR 2020			
T <sub>MED.MÁX.</sub> [°C]	U <sub>MED.MÁX.</sub> [%]	T <sub>MED.MÍN.</sub> [°C]	U <sub>MED.MÍN.</sub> [%]	T <sub>MED.MÁX.</sub> [°C]	U <sub>MED.MÁX.</sub> [%]	T <sub>MED.MÍN.</sub> [°C]	U <sub>MED.MÍN.</sub> [%]
35,7	92,7	18,4	44,0	40,59	92,55	19,12	33,26

Fonte: Autor, 2020

Tabela 16. Comparação entre os resultados obtidos no experimento com os de Frata (2019), relativos aos valores da temperatura média e umidade média do ar externo a estufa durante todo o período de secagem

FRATA 2019		AUTOR 2020	
T <sub>MED.</sub> [°C]	U <sub>MED.</sub> [%]	T <sub>MED.</sub> [°C]	U <sub>MED.</sub> [%]
27,1	64,7	27,23	67,39

Fonte: Autor, 2020

A comparação dos resultados obtidos para as medições de temperatura média e umidade média do ar interno a estufa com o trabalho de Frata (2019), não foi possível de ser realizada, uma vez que, no trabalho do autor citado, este não disponibilizou informações sobre o monitoramento dessas variáveis para o ar interno a estufa.

Porém foi possível discutir as medições efetuadas nestes estudo analisando os valores de Temperatura média e Umidade média do ar interno a estufa, ou seja, 29,54°C e 63,99%, os quais podem ser visualizados pelas Figuras 36 e 37 respectivamente e, comparando com os valores médios do ar externo respectivamente 27,23°C e 67,39%. Assim, a partir desta análise, foi possível verificar que o ar dentro da estufa permaneceu em média, com maiores valores de temperatura e menores valores de umidade, quando comparado ao ar externo a estufa, fato este era esperado, tendo em vista que a estufa possui a função de reduzir a umidade interna devido ao aumento de temperatura.

Diante desse acontecimento, esperava-se que ocorresse uma contribuição na velocidade de secagem utilizando a estufa fechada, se comparada a secagem realiza em leitos de secagem “abertos”, pois valores maiores de temperatura favorecem a evaporação pelo aumento da energia de vibração das moléculas de água presentes no lodo e, valores menores de umidade externa, também favorecem a evaporação da água presente no lodo, através da diminuição da resistência de escape das moléculas da fase líquida para a fase vapor.

Entretanto, comparando os resultados obtidos com aqueles adquiridos por Frata (2019), foi possível verificar que o fechamento das laterais não contribuiu de forma significativa na eficiência de secagem. Uma vez que, para uma altura de camada igual a 40 cm, no estudo de Frata (2019), foi necessário uma área total de secagem de 750 m<sup>2</sup> levando para atingir os 90% de Sólidos Totais – ST no lodo, um tempo de secagem necessário de 111 dias. Já no presente estudo, conforme descrito anteriormente, foi necessário uma área de 824 m<sup>2</sup> e um tempo de secagem aproximado de 123 dias.

Cabe ressaltar que, a altura de camada de lodo ideal, que demandará a menor área necessária para realizar a secagem do lodo produzido diariamente pela estação, obtida por Frata (2019), foi de 35 cm, levando 97 dias para “secar” o lodo até 90% de ST no lodo e utilizando uma área de secagem de 743 m<sup>3</sup>. Para esta mesma condição, o presente estudo, apontou a necessidade de se manter o lodo por mais 12 dias e dispor de 836,55 m<sup>2</sup>; constatando novamente uma queda de eficiência na secagem pelo fechamento das laterais.

É importante lembrar novamente que, o fechamento das laterais, além de proporcionar uma maior proteção do material contra intempéries climáticas, influenciou no

aumento da temperatura do ar que esteve em contato com o lodo (interno). Essa afirmação pode ser verificada através da consulta dos dados de temperatura interna e externa apresentados por este estudo.

Entretanto, conforme já mencionado neste trabalho, a secagem nas condições avaliadas por este estudo apresentou menos eficiente do que a secagem estudada por Frata (2019) e, conforme Tabela 17, a secagem realizada na estufa modificada, não possibilitou alcançar um aumento significativo na taxa de secagem (o que resultaria na diminuição da área de secagem necessária).

O motivo da queda de eficiência pelo fechamento das laterais, foi possivelmente em função de uma menor circulação do ar de dentro da estufa para fora dela. Portanto, pela análise comparativa das taxas de secagem conforme Tabela 17, observou-se uma equivalência nos valores obtidos nos dois estudos realizados.

Em suma, pode-se apenas afirmar que, o fechamento das laterais não contribuiu de maneira significativa com o aumento da taxa de secagem, quando comparado ao estudo de Frata (2019).

Tabela 17. Comparação entre os resultados obtidos (taxa de secagem) no experimento com os de Frata (2019), relativos à taxa de secagem em função da altura de camada de lodo disposta a secagem

<b>PARÂMETRO</b>	<b>FRATA 2019</b>	<b>AUTOR 2020</b>
<b>Taxa para 15 cm de altura (%ST/DIA)</b>	-	0,98
<b>Taxa para 10 cm ou 20 cm de altura (%ST/DIA)</b>	1,00	-
<b>Taxa para 30 cm de altura (%ST/DIA)</b>	0,88	0,64
<b>Taxa para 60 cm de altura (%ST/DIA)</b>	0,25	0,31

Fonte: Autor, 2020

É importante mencionar que o experimento de secagem realizado por Frata (2019), ocorreu por período de secagem natural em estufa de 70 dias, o que possibilitou efetuar uma comparação adequada com o presente estudo de secagem, uma vez que, este ocorreu por um período de secagem natural em estufa de 76 dias. Ainda, cabe lembrar que, em ambos os experimentos, o parâmetro utilizado para cessar os ensaios de secagem, foi a verificação de não alteração significativa das medições referentes a concentração de sólidos totais presentes no lodo em função do tempo.

Com base nas taxas de secagem dispostas segundo Tabela 17, foi possível verificar para a altura de camada de 60 cm, um aumento de eficiência pelo aumento do valor da taxa para a referida camada, ao comparar os resultados obtidos com os de Frata (2019), o que representou uma maior velocidade de secagem nessa condição e, portanto, concebeu um tempo menor de exposição do lodo a secagem natural em estufa, considerando atingir uma mesma concentração final de sólidos totais.

Já para a altura de camada de 30 cm, verificou-se uma diminuição na eficiência, pois o valor alcançado para o parâmetro taxa de secagem foi menor quando comparado ao valor obtido por Frata (2019).

E, por fim, comparando a altura de camada de 15 cm com a altura de camada de 20 cm estudada por Frata (2019), as taxas de secagem observadas foram equivalentes, mesmo sendo maior a altura de camada estudada por Frata.

Esse comportamento observado em ambos os casos, tanto naquele em que houve diminuição na eficiência, quanto naquele que a eficiência foi equivalente não era esperado, pois, com o fechamento das laterais da estufa (restando apenas um vão livre com altura de 50 cm próximo ao solo) esperava-se que fosse constatado um aumento na taxa de secagem (pelo aumento da temperatura interna do ar dentro da estufa) em todas alturas de camadas de lodo estudadas no presente trabalho, ou seja, era esperado observar uma maior eficiência de secagem em todos os leitos presentes na estufa ao se comparar com as eficiências de secagem determinadas por Frata (2019).

É possível que, o acréscimo obtido na taxa de secagem devido ao aumento da temperatura interna do ar dentro da estufa ocorrido pelo fechamento das laterais (o que contribui para o aumentar a velocidade de secagem) tenha sido compensado por um possível decréscimo na taxa de secagem devido a uma menor circulação do ar de dentro da estufa para fora dela, o que dificultaria o escape da umidade de dentro da estufa, prejudicando assim a velocidade de secagem.

Caso houvesse instalado na estufa piloto um sistema mecânico de recirculação do ar interno com o ar externo, conforme a estufa equipada com ventiladores laterais que promovem a recirculação do ar interno estudada no experimento apresentado por Slim et al. (2008), para promover a troca gasosa; como por exemplo, no caso de quando a umidade do ar interno fosse maior a umidade do ar externo e, assim manter o lodo de dentro da estufa em contato com um ar de umidade menor; o acréscimo obtido na taxa de secagem devido ao

aumento na temperatura interna da estufa pelo fechamento das laterais, poderia ter sido significativo.

Entretanto é importante ressaltar novamente, a importância da proteção a mais contra intempéries climáticas, pelo fechamento das laterais quando comparado com uma estufa de laterais abertas, principalmente contra chuvas fortes típicas de verão, do material exposto (lodo) a secagem natural dentro da estufa,

Continuando a análise comparativa dos resultados adquiridos nesta pesquisa com os resultados obtidos por Frata (2019), foi determinado uma nova taxa de secagem para a camada de 15 cm deste estudo, porém apenas para o período considerado adequado para realizar a secagem nas condições estudadas, que no caso foi de até 40 dias.

O motivo de se obter outra taxa de secagem, foi porque a concentração de sólidos totais verificada na camada de 15 cm atingiu uma concentração de 84,30% em 40 dias e para um período de tempo de secagem um pouco maior, 42 dias, Frata (2019) obteve para uma camada de 10 cm uma concentração de sólidos totais de apenas 74,0%.

Isso mostrou que, analisando somente 40 dias de secagem o experimento realizado foi 10% mais eficiente do que o Frata (2019), o que é significativo e, ainda na condição de 5 cm a mais na altura de camada de lodo e até levando um tempo menor (40 dias) para atingir a concentração de 84,3%.

O presente estudo avaliou as taxas de secagem em períodos de experimentos distintos, ou seja, a taxa de secagem para o período com maiores eficiências de secagem (até 40 dias) e período com menores eficiências (após 40 dias até o final do experimento). Tal verificação teve a intenção de avaliar matematicamente a variação significativa que ocorre na taxa de secagem após um período de exposição do material na estufa.

O intuito de obter outra taxa de secagem para esta condição, foi buscar um valor de taxa que represente com mais realidade o experimento de secagem na altura de camada de 15 cm, uma vez que, ao ser adicionado resultados de concentração obtidos após os 40 dias de secagem, no qual já não se observava uma alteração significativa de umidade no leito, automaticamente o valor da taxa de secagem diminui por considerar um período maior para realizar a secagem.

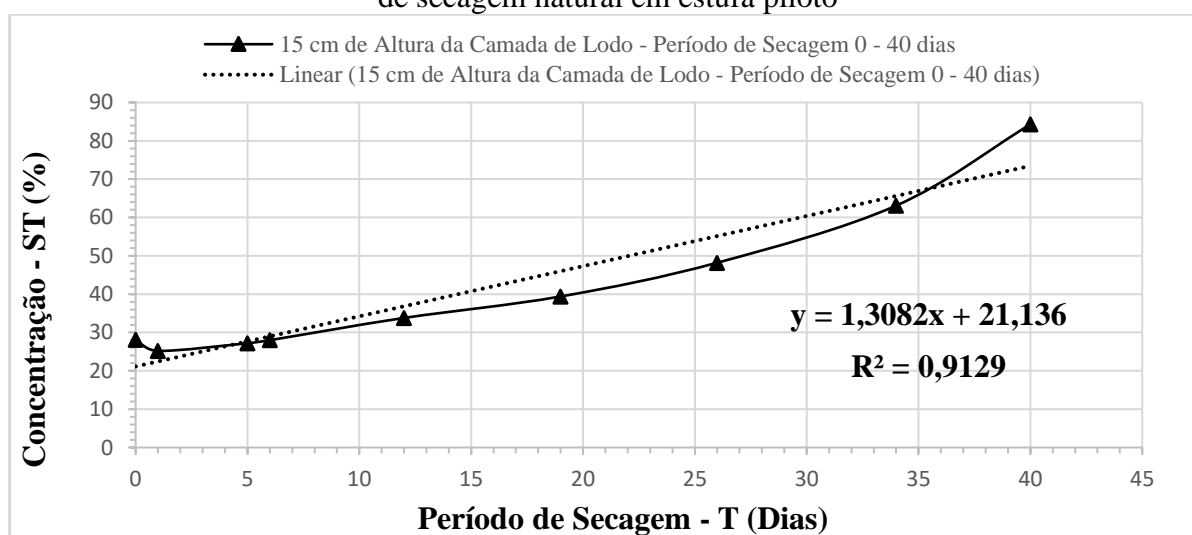
Portanto, considerando apenas 40 dias de secagem para a altura de camada igual 15 cm, conforme Tabela 18, obteve-se os resultados apresentados pela Figura 48 e Tabela 19.

Tabela 18. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante 40 dias em altura de camada igual a 15 cm

<b>SECAGEM NATURAL DE LODO PRÉ-DESAGUADO EM CENTRÍFUGA</b>			
<b>DIA</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO</b>	<b>% DE SÓLIDOS TOTAIS</b>	<b>% DE UMIDADE</b>
04/12/19	15 cm	28,10	71,9
05/12/19	15 cm	25,20	74,8
09/12/19	15 cm	27,20	72,80
10/12/19	15 cm	28,00	72,00
16/12/19	15 cm	33,80	66,20
23/12/19	15 cm	39,40	60,60
30/12/19	15 cm	48,20	51,80
07/01/20	15 cm	63,10	36,90
13/01/20	15 cm	84,30	15,70

Fonte: Autor, 2020

Figura 48. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 15 cm durante 40 dias de secagem natural em estufa piloto



Fonte: Autor, 2020

Tabela 19. Funções e taxas descritivas do experimento de secagem para 15 cm de altura de camada

<b>PERÍODO DE SECAGEM EM DIAS</b>	<b>EQUAÇÃO REPRESENTATIVA</b>	<b>TAXA DE SECAGEM (%ST/DIA)</b>	<b>% DE ST NO FINAL DO PERÍODO</b>
0-76	$C = 0,9829 T + 25,727$	0,98	87,20
0-40	$C = 1,3082 T + 21,136$	1,31	84,30
40-76	$C = 0,1154 T + 77,82$	0,11	87,20

Fonte: Autor, 2020

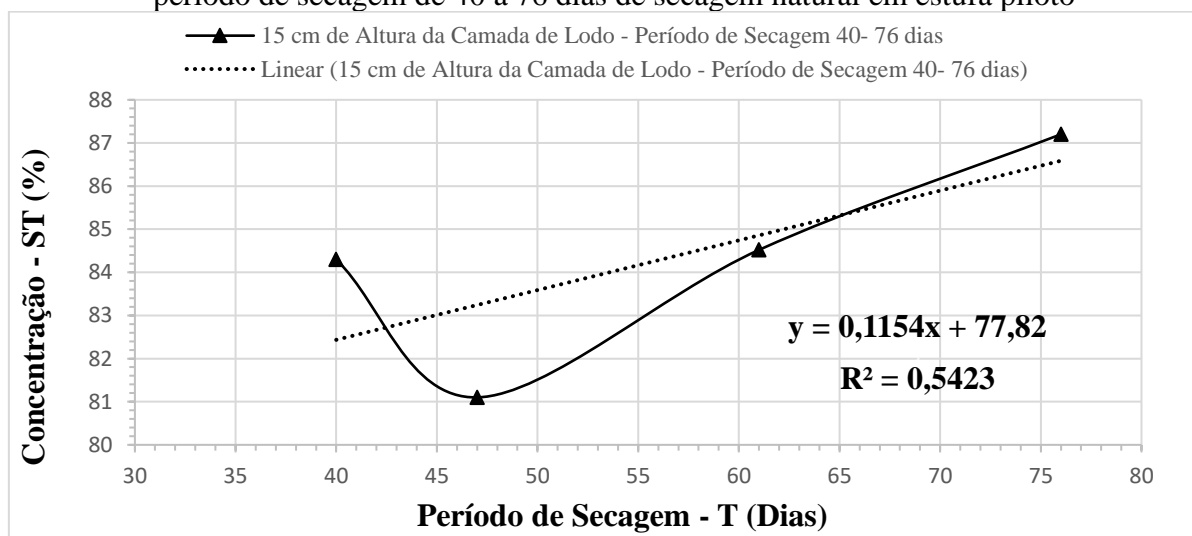
Em seguida foi determinada outra taxa secagem, considerando agora somente o período posterior aos primeiros 40 dias de secagem conforme Tabela 20. Os resultados foram apresentados pela Figura 49 e Tabela 19.

Tabela 20. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante o período de 40 a 76 dias em altura de camada igual a 15 cm

<b>SECAGEM NATURAL DE LODO PRÉ-DESAGUADO EM CENTRÍFUGA</b>			
<b>DIA</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO</b>	<b>% DE SÓLIDOS TOTAIS</b>	<b>% DE UMIDADE</b>
13/01/20	15 cm	84,30	15,70
20/01/20	15 cm	81,10	18,90
03/02/20	15 cm	84,52	15,48
17/02/20	15 cm	87,20	12,80

Fonte: Autor, 2020

Figura 49. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 15 cm durante o período de secagem de 40 a 76 dias de secagem natural em estufa piloto



Fonte: Autor, 2020

Após a aquisição de outras taxas de secagem (considerando períodos de secagem) para 15 cm de altura da camada de lodo, foi possível observar conforme Tabela 19, que houve um aumento significativo no valor da taxa (a qual representa a velocidade de secagem) ao se comparar os valores de taxa referente a todo o período de secagem, com os valores referentes ao período compreendido entre o 1º dia até o 40º dia.

Isso ocorreu possivelmente devido à natureza do fenômeno de secagem, na qual é comum na maioria dos processos de secagem, a taxa de secagem ser maior no início processo e ir diminuindo ao longo deste.



Deste modo, como a taxa de secagem determinada em cada altura de camada considera todo o período de secagem, é comum que a taxa aumente quando se desconsidera alguns dias finais do experimento em comparação com a taxa referente a todo o período de secagem. E de maneira análoga, a taxa diminuirá quando se desconsidera, alguns dias iniciais do experimento, conforme descrito no parágrafo na sequência.

Já o valor da taxa obtida referente ao período do 40º dia ao 76º dia, foi notavelmente menor em relação ao valor da taxa referente a todo período e ao período compreendido entre o 1º dia até o 40º dia. O motivo desse valor ter sido tão baixo (em relação aos demais), foi provavelmente, devido ao processo estar em fase final de secagem, uma vez que, o percentual de ST no lodo já estava acima de 80% e, como a taxa de secagem representa o aumento de sólidos em função dos dias, é condizente obter um valor baixo de taxa para o período considerado entre o 40º ao 76º dia (80,0% à 87,2% de ST), pois o aumento verificado de ST no lodo (7,2% de ST) foi pequeno para um período de 26 dias de secagem (40º ao 76º dia).

Analogamente ao realizado para 15 cm de altura da camada de lodo, foram determinadas também taxas de secagem para 30 cm de altura da camada de lodo. Os resultados referentes a 34 dias de secagem para a altura de camada igual 30 cm, conforme Tabela 21, foram apresentados pela Figura 50 e Tabela 22.

Em seguida foi determinada outra taxa secagem, considerando somente o período posterior aos primeiros 34 dias de secagem conforme Tabela 23. Os resultados foram apresentados pela Figura 51 e Tabela 22.

Após a aquisição de outras taxas de secagem (considerando períodos de secagem) para 30 cm de altura da camada de lodo, foi possível observar conforme Tabela 22, que houve um aumento significativo no valor da taxa (a qual representa a velocidade de secagem) ao se comparar os valores de taxa referente a todo o período de secagem, com os valores referentes ao período compreendido entre o 1º dia até o 34º dia.

Já o valor da taxa obtida referente ao período do 34º dia ao 76º dia, foi equivalente ao valor da taxa referente a todo período e um pouco menor com relação ao período compreendido entre o 1º dia até o 40º dia.

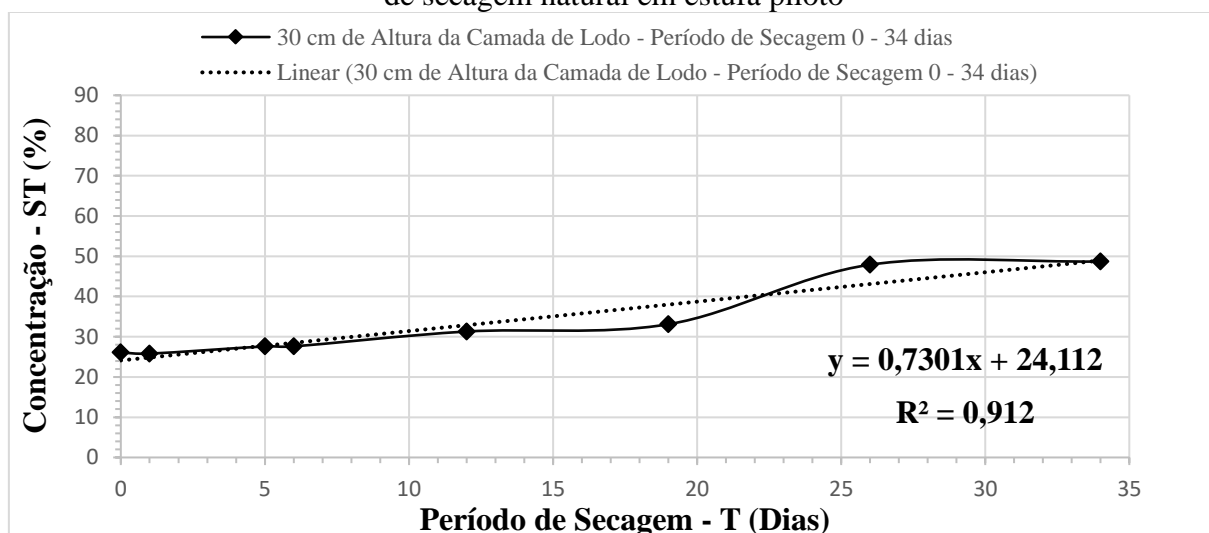
Pelo fato desse valor de taxa de secagem ter sido próximo (em relação aos demais), é condizente afirmar que, o processo de secagem natural em estufa para 30 cm de altura da camada de lodo, ocorreu em uma taxa de secagem praticamente constante em todo o período de secagem, diferentemente do observado para camada de 15 cm e, como veremos, também diferentemente do observado para camada de 60 cm.

Tabela 21. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante 34 dias em altura de camada igual a 30 cm

<b>SECAGEM NATURAL DE LODO PRÉ-DESAGUADO EM CENTRÍFUGA</b>			
<b>DIA</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO</b>	<b>% DE SÓLIDOS TOTAIS</b>	<b>% DE UMIDADE</b>
04/12/19	30 cm	26,10	73,90
05/12/19	30 cm	25,80	74,20
09/12/19	30 cm	27,60	72,40
10/12/19	30 cm	27,60	72,40
16/12/19	30 cm	31,30	68,70
23/12/19	30 cm	33,10	66,90
30/12/19	30 cm	47,90	52,10
07/01/20	30 cm	48,70	51,30

Fonte: Autor, 2020

Figura 50. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 30 cm durante 34 dias de secagem natural em estufa piloto



Fonte: Autor, 2020

Tabela 22. Funções e taxas descritivas do experimento de secagem para 30 cm de altura de camada

<b>PERÍODO DE SECAGEM EM DIAS</b>	<b>EQUAÇÃO REPRESENTATIVA</b>	<b>TAXA DE SECAGEM (%ST/DIA)</b>	<b>% DE ST NO FINAL DO PERÍODO</b>
0-76	$C = 0,6359 T + 24,73$	0,64	74,40
0-34	$C = 0,7301 T + 24,11$	0,73	48,70
34-76	$C = 0,6725 T + 22,36$	0,67	74,40

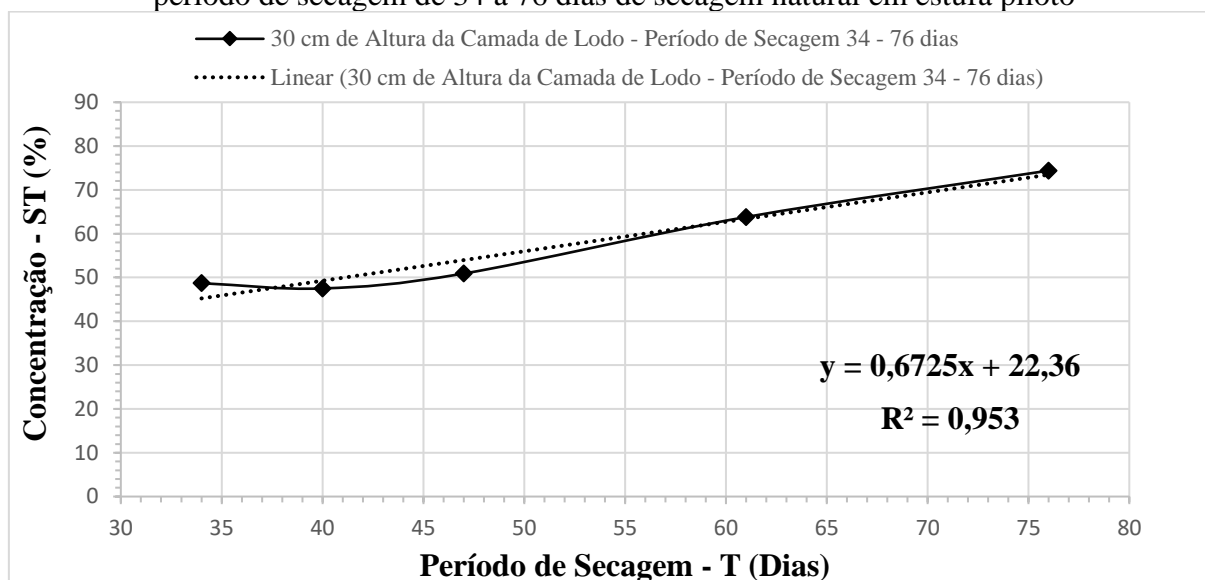
Fonte: Autor, 2020

Tabela 23. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante o período de 34 a 76 dias em altura de camada igual a 30 cm

<b>SECAGEM NATURAL DE LODO PRÉ-DESAGUADO EM CENTRÍFUGA</b>			
<b>DIA</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO</b>	<b>% DE SÓLIDOS TOTAIS</b>	<b>% DE UMIDADE</b>
07/01/20	30 cm	48,70	51,30
13/01/20	30 cm	47,50	52,50
20/01/20	30 cm	50,90	49,10
03/02/20	30 cm	63,80	36,20
17/02/20	30 cm	74,40	25,60

Fonte: Autor, 2020

Figura 51. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 30 cm durante o período de secagem de 34 a 76 dias de secagem natural em estufa piloto



Fonte: Autor, 2020

Por fim, da mesma forma ao realizado para 15 e 30 cm de altura da camada de lodo, foram determinadas taxas de secagem para 60 cm de altura da camada de lodo.

Os resultados referentes a 34 dias de secagem para a altura de camada igual 60 cm, conforme Tabela 24, foram apresentados pela Figura 52 e Tabela 25. Em seguida foi determinada outra taxa secagem, considerando agora somente o período posterior aos primeiros 34 dias de secagem conforme Tabela 26. Os resultados foram apresentados pela Figura 53 e Tabela 25.

Após a aquisição de outras taxas de secagem (considerando períodos de secagem) para 60 cm de altura da camada de lodo, foi possível observar conforme Tabela 25, que houve um aumento significativo no valor da taxa (a qual representa a velocidade de secagem) ao se

comparar os valores de taxa referente a todo o período de secagem, com os valores referentes ao período compreendido entre o 1º dia até o 34º dia.

Já o valor da taxa obtida referente 34º dia ao 76º dia, foi menor em relação ao valor da taxa referente a todo período e ao período compreendido entre o 1º dia até o 34º dia. O motivo desse valor ter menor (em relação aos demais), foi possivelmente, assim como ocorrido para 15 cm de altura de camada de lodo, também devido ao processo já estar em fase final de secagem, uma vez que, o percentual de sólidos totais no lodo em 42,2% e, como a taxa de secagem representa o aumento de sólidos em função dos dias, é condizente obter um valor baixo de taxa para o período considerado entre o 34º ao 76º dia (42,2% à 50,3% de ST), pois o aumento verificado de ST no lodo (8,1% de ST) foi pequeno para um período de 42 dias de secagem (34º ao 76º dia).

Tabela 24. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante 34 dias em altura de camada igual a 60 cm

<b>SECAGEM NATURAL DE LODO PRÉ-DESAGUADO EM CENTRÍFUGA</b>			
<b>DIA</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO</b>	<b>% DE SÓLIDOS TOTAIS</b>	<b>% DE UMIDADE</b>
04/12/19	60 cm	24,80	75,20
05/12/19	60 cm	24,90	75,10
09/12/19	60 cm	27,10	72,90
10/12/19	60 cm	25,20	74,80
16/12/19	60 cm	28,90	71,10
23/12/19	60 cm	29,70	70,30
30/12/19	60 cm	33,00	67,00
07/01/20	60 cm	42,20	57,80

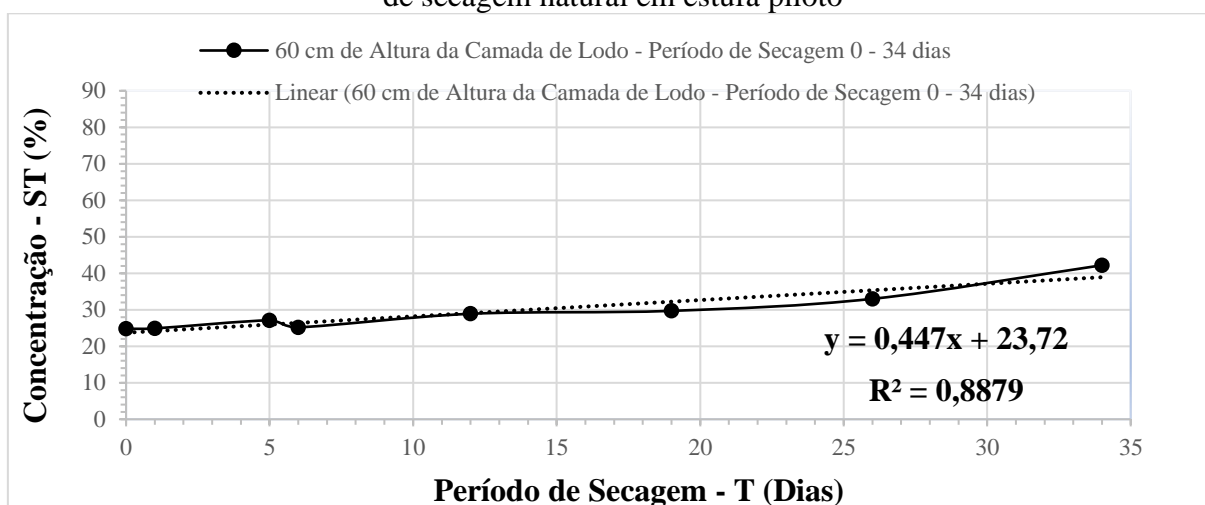
Fonte: Autor, 2020

Tabela 25. Funções e taxas descritivas do experimento de secagem para 60 cm de altura de camada

<b>PERÍODO DE SECAGEM EM DIAS</b>	<b>EQUAÇÃO REPRESENTATIVA</b>	<b>TAXA DE SECAGEM (%ST/DIA)</b>	<b>% DE ST NO FINAL DO PERÍODO</b>
0-76	$C = 0,3122 T + 24,78$	0,31	50,30
0-34	$C = 0,4470 T + 23,72$	0,45	42,20
34-76	$C = 0,2653 T + 27,47$	0,27	50,30

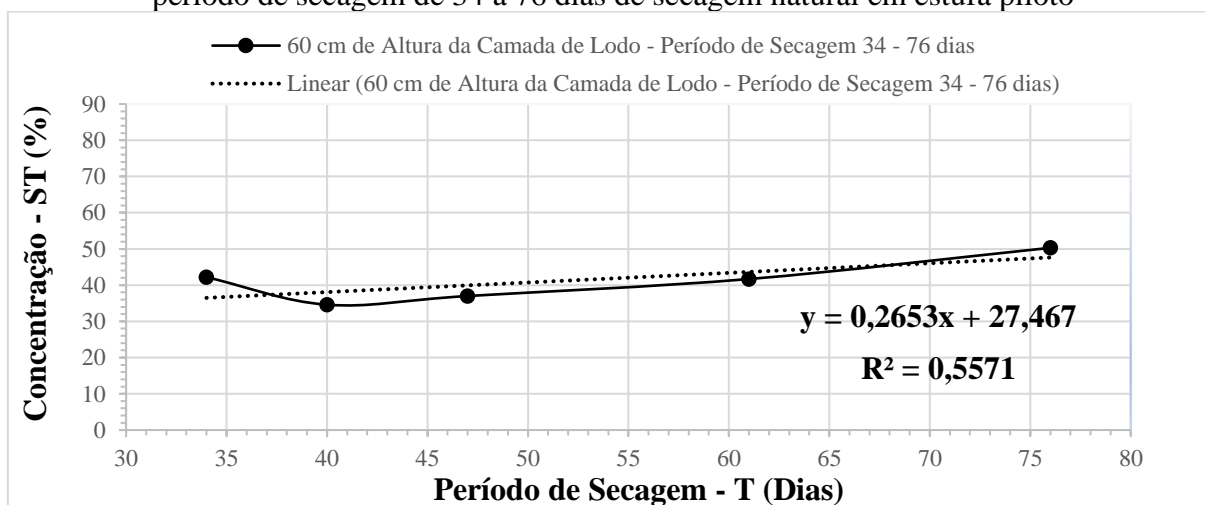
Fonte: Autor, 2020

Figura 52. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 60 cm durante 34 dias de secagem natural em estufa piloto



Fonte: Autor, 2020

Figura 53. Equação e curva representativa dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA Águas de Mandaguahy disposto em altura de 60 cm durante o período de secagem de 34 a 76 dias de secagem natural em estufa piloto



Fonte: Autor, 2020

Tabela 26. Resultados das medições de concentração de sólidos totais no lodo exposto a secagem natural durante o período de 34 a 76 dias em altura de camada igual a 60 cm

<b>SECAGEM NATURAL DE LODO PRÉ-DESAGUADO EM CENTRÍFUGA</b>			
<b>DIA</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO</b>	<b>% DE SÓLIDOS TOTAIS</b>	<b>% DE UMIDADE</b>
07/01/20	60 cm	42,20	57,80
13/01/20	60 cm	34,60	65,40
20/01/20	60 cm	37,00	63,00
03/02/20	60 cm	41,69	58,31
17/02/20	60 cm	50,30	49,70

Fonte: Autor, 2020

Finalmente, todas as taxas de secagem obtidas foram dispostas conforme Tabela 27.

Tabela 27. Resumo das taxas descritivas obtidas pelo experimento de secagem para as camadas de 15, 30 e 60 cm de altura

<b>PERÍODO DE SECAGEM EM DIAS</b>	<b>ALTURA DA CAMADA DE LODO (cm)</b>	<b>TAXA DE SECAGEM (%ST/DIA)</b>	<b>% DE ST NO FINAL DO PERÍODO</b>
0-76	15	0,98	87,20
0-40	15	1,31	84,30
40-76	15	0,11	87,20
0-76	30	0,64	74,40
0-34	30	0,73	48,70
34-76	30	0,67	74,40
0-76	60	0,31	50,30
0-34	60	0,45	42,20
34-76	60	0,27	50,30

Fonte: Autor, 2020

Em resumo, a determinação de novas taxas de secagem que considerem apenas a parte inicial ou final do processo de secagem em cada uma das alturas de camada de lodo, permitiu verificar que, para a altura de 15 cm e 60 cm, a taxa de secagem determinada apenas para os primeiros dias de secagem foi maior do que a taxa de secagem determinada ao se considerar todo o processo de secagem. Isso ocorreu possivelmente devido à natureza do fenômeno de secagem, na qual é comum na maioria dos processos de secagem, a taxa de secagem ser maior no início processo e ir diminuindo ao logo deste. Já com relação a camada de 30 cm, não foi observado de maneira clara esse comportamento e, a taxa permaneceu praticamente constante, tanto na análise inicial dos dias quanto na análise final dos dias.

Analisando a comparação entre os resultados de taxas de secagem determinados no experimento com aqueles determinados por Frata (2019), em função da altura de camada de lodo disposta a secagem, conforme apresentado pela Tabela 17, foi possível verificar que, no experimento realizado para a camada de 15 cm em 40 dias secagem, a tecnologia se mostrou 10 % mais eficiente, ou seja, atingiu 84% de ST no lodo. E, para um período de tempo de secagem um pouco maior, 42 dias, Frata (2019) obteve para uma camada de 10 cm uma concentração de sólidos totais de apenas 74,0%.

## 6 CONCLUSÕES

A secagem realizada pela estufa piloto durante 76 dias, proporcionou o efeito estufa em um volume controlado, permitindo com isso uma temperatura superior do que a exterior. Os resultados apresentados possibilitaram determinar o tempo requerido ou adequado para realizar a secagem natural por energia solar em uma estufa piloto, a qual foi modificada (alteração de algumas condições de secagem) para tratar o lodo desaguado em centrífuga originado pela Estação de Tratamento de Água – ETA operada pela Concessionária Águas de Mandaguahy situada no município de Jahu e localizada na região central do estado de São Paulo.

As condições climáticas nas quais se determinou os parâmetros de secagem, foram para valores de temperatura média e umidade média do ar externo a estufa de 27,23°C e 67,39% e, para valores de temperatura média e umidade média do ar interno a estufa de 29,54°C e 63,99%.

Com relação a secagem do material dentro dos leitos, as camadas apresentaram fendilhamento, sendo que foi observado fendas maiores, largas e profundas na camada de 60 cm. Já na camada de 15 cm verificou-se fendas menores e em maior quantidade quando comparado aos outros leitos de 60 cm e 30 cm. A maior quantidade de fendas e as desigualdades na formação pareceu estar relacionada ao volume de lodo disposto à secagem e ao teor de umidade ainda presente, sendo que, quanto menor a umidade presente no lodo maior foi a quantidade de fendas.

Foram apresentados três modelos matemáticos que representaram o experimento de secagem através de uma equação algébrica, sendo uma para altura de camada de lodo de 15 cm, outra para 30 cm e outra para 60 cm. Através das equações foi possível estimar o tempo requerido para realizar a secagem natural por energia solar em estufa piloto após estabelecida uma concentração final de Sólidos Totais – ST desejada no lodo.

As equações obtidas apresentaram ótima exatidão em relação à realidade, ou seja, em relação aos dados determinados no experimento. Diante disso, foi possível concluir que houve validação do modelo matemático (método da linearização) utilizado.

A concentração de ST obtida no experimento de secagem natural por energia solar em estufa durante 76 dias de exposição, foram de 87,20%, 74,40% e 50,30% respectivamente para alturas de 15 cm, 30 cm e 60 cm de camadas de lodo. Os valores de taxa de secagem

obtidos pelo método de linearização das curvas de secagem, foram de 0,98%/dia, 0,64%/dia e 0,31%/dia respectivamente para alturas de 15 cm, 30 cm e 60 cm de camadas de lodo. Foi possível constatar, que o lodo disposto em uma altura de camada igual a 15 cm teve um aumento aproximado na sua concentração de ST em 1% a cada dia de exposição, uma vez que o valor da taxa em módulo próximo de 1.

Os resultados determinados, informaram que a altura de camada de lodo igual a 15 cm, foi a que apresentou a melhor eficiência com relação ao tempo de secagem gasto para o material atingir uma concentração de ST considerada vantajosa com vista na diminuição dos custos (redução do volume) com disposição em aterro sanitário. Uma vez que, levou-se 40 dias de exposição a secagem para atingir uma concentração de ST no lodo igual a 84,30%. Assim, foi possível afirmar que, secar lodo de ETA nesta altura e nas condições experimentais realizadas, é eficiente, pois, para a tecnologia de secagem natural por energia solar, o tempo de 40 dias é considerado curto. Portanto, este é o tempo adequado de permanência do material dentro da estufa, para secá-lo até uma concentração de ST de 80% em alturas de 15 cm. Contudo, para esta altura de camada, caso se busque atingir uma concentração de ST muito acima de 80%, a secagem se mostrou inviável, devido ao aumento expressivo de permanência do lodo dentro da estufa.

Já para uma altura de camada de lodo igual a 60 cm, nas condições estudadas, a secagem para o lodo gerado por ETAs é inviável, pois o tempo de secagem requerido para alcançar uma concentração de ST acima de 50%, por exemplo, foi superior a 2 (dois) meses. Já nas camadas de 30 cm e 15 cm, foi possível atingir esse mesmo valor ST no lodo em aproximadamente 35 e 27 dias respectivamente, o que mostrou uma eficiência superior significativa destas últimas camadas sobre a camada de 60 cm.

Por fim, com relação a eficiência de secagem verificada para camada de 30 cm, mesmo o material permanecendo por 76 dias na estufa, a concentração de ST na camada não superou 80% como apurado na camada 15 cm e em apenas 40 dias. Entretanto, na condição de altura de camada igual a 30 cm, o material atingiu a concentração de ST acima de 70%, o que já é vantajoso em termos de redução de volume e, foi possível utilizar uma maior quantidade de lodo desaguado (dobro do volume) no leito de 30 cm de altura em relação ao leito de 15 cm altura.

Logo, para encontrar uma altura de camada ideal, ou seja, a mais vantajosa (que necessitará da menor área de secagem para “secar” o lodo gerado pela ETA), foi utilizado a metodologia proposta por Frata (2019). A partir do método proposto por Frata (2019),



verificou-se que a altura de camada ideal, nas condições experimentais, foi a de 40 cm. Desta forma, ao se dispor lodo desaguado com uma concentração de ST de 20% em uma altura de camada igual a 40 cm, o tempo necessário e aproximado de secagem natural por energia solar foi de 123 dias, necessitando de uma área total de secagem de 824 m<sup>2</sup> para que o material atingisse a uma concentração de ST de 90% e ao mesmo tempo atendesse o volume referente a produção 2,7 m<sup>3</sup> de lodo desaguado por dia pela estação de estudo.

A comparação dos resultados de Autor (2020) e Frata (2019), com relação a eficiência de secagem, para uma altura de camada igual a 40 cm (altura ideal no estudo realizado) ou 35 cm (altura ideal do estudo de Frata), em ambos os casos, a secagem realizada na presente pesquisa, mostrou-se menos eficiente, tanto em termos de tempo de secagem necessário, quanto em termos de área necessária para atingir uma concentração de 90% de ST no lodo, para o volume gerado de 2,7 m<sup>3</sup> dia pela ETA águas de Madaguahy. Sendo que, para altura ideal de 40 cm, no estudo de Frata (2019) foi necessário uma área de secagem de 750 m<sup>2</sup> em um tempo de secagem aproximado de 111 e, no estudo Autor (2020) foi necessário uma área de 824 m<sup>2</sup>, levando aproximadamente 123 dias. Já para a altura ideal de 35 cm, no estudo de Frata (2019), foi necessário uma área de secagem de 743 m<sup>2</sup> em um tempo de secagem aproximado de 97 dias e, no estudo Autor (2020) foi necessário uma área de 836,55 m<sup>2</sup>, levando aproximadamente 109 dias.

Com relação aos resultados das taxas de secagem referentes aos referidos trabalhos, observou-se uma equivalência nos valores obtidos nos dois estudos.

Em suma, pode-se apenas afirmar que, o fechamento das laterais da estufa modificada não contribuiu de maneira significativa na taxa de secagem, como era esperado. Possivelmente, devido a uma menor recirculação de ar pelo fechamento das laterais da estufa, em comparação com a estufa de Frata (2019) de laterais abertas.

Todavia, caso houvesse instalado um sistema de recirculação de ar na estufa estudada (modificada), o acréscimo obtido na taxa de secagem, poderia ter sido significativo. Ressalta-se ainda que o fechamento das laterais proporcionou uma maior proteção do material contra intempéries climáticas.

Para trabalhos futuros, sugere-se que seja realizado este mesmo experimento nas mesmas condições estudadas, mas em uma estação do ano diferente, pois, o experimento foi realizado em um período de constantes chuvas, que apesar de apresentar altas temperaturas devido estação de verão, o que favorece o fenômeno de secagem, o índice de umidade relativa

dor ar, se manteve também valores bastante elevados, o que provavelmente dificultou a secagem.

Assim, pode se deduzir que em outras épocas do ano como outono e primavera a eficiência de secagem tende ser maior do que a verificada, pelo fato de que nestas estações a umidade relativa do ar é menor.

Outras sugestões, são, a primeira de realizar experimentos de secagem por energia solar em estufa também nas mesmas condições estudadas, mas, promovendo o revolvimento do lodo dentro dos leitos, segunda, ainda nas mesmas condições estudadas, porém com a implementação de um sistema de recirculação do ar externo com o ar interno que, quando a umidade deste último estiver superior a umidade do ar externo o sistema é acionado por estratégia on/off, garantindo que o material seja mantido em contato com uma ar de menor umidade, conforme Slim et al. (2008) estudou a secagem em uma estufa equipada com ventiladores laterais modelada e, terceira com a implementação de sistemas aquecedores, como por exemplo, placas solares ou trocadores de calor visando aumentar a velocidade de secagem (taxa de secagem) conforme também observado no experimento apresentado por Slim et al. (2008).

Finalmente, todas sugestões mencionadas, podem ser estudadas em simultâneo ou separadamente e, comparar seus resultados em termos de eficiência com aqueles obtidos na presente pesquisa e pelos estudos de Frata (2019), mas advertindo para o aumento dos custos com implementação, mão de obra e consumo energético das sugestões propostas. Uma vez que, a alternativa tecnológica proposta pela presente pesquisa, possui estes custos baixos, sendo isto uma de suas principais vantagens.

## REFERÊNCIAS

- ABES-RS, 2018. Diretoria de Tecnologia Empreendimentos e Meio Ambiente. Superintendência de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. **Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação no Setor do Saneamento**. ABES – RS. 2018. Disponível em: [https://www.abes-rs.org.br/novo/materiais/materiais\\_sx8x0real9lt.p;df](https://www.abes-rs.org.br/novo/materiais/materiais_sx8x0real9lt.p;df) Acesso: 18/01/2020.
- ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. **Destinação e disposição final de lodo gerado em ETA - Lei 12.305/2010**. In: 45ª Assembleia Nacional do ASSEMAE - Saneamento Ambiental: políticas integradas com participação social, Poços de Caldas - MG, 2015.
- AGÊNCIA SENADO. Senado notícias: **Tasso recomenda aprovação do marco do saneamento básico como veio da Câmara**. Da redação, 2020. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2020/06/19/tasso-recomenda-aprovacao-do-marco-do-saneamento-basico-como-veio-da-camara> Acesso: 02/11/2020.
- AMERI, B.; HANINI, S.; BENHAMOU A.; CHIBANE, D. **Comparative approach to the performance of direct and indirect solar drying of sludge from sewage plants, experimental and theoretical evaluation**. The Official Journal of the International Solar Energy Society. Energia Solar 159, p.722-732,2018.
- ANA, 2010. Atlas Brasil Vol 1: **Abastecimento Urbano de Água: Panorama Nacional**/Agência Nacional de Águas. Engecorps/Cobrape. Brasília: ANA: Engecorps/Cobrape, 2010. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Download.aspx>Acesso: 03/12/2020.
- ANDREOLI, Cleverson Vitório; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES Fernando. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014. 444p.
- ARISILY, T. A. A; HAJJI, A. **Solar drying technology of wastewater sludge and its impact on Morocco sludge management**. Journal of Moroccan Journal of Agronomic and Veterinary Sciences. Vol. 8, no. 1. p.57-66, 2019.
- ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decreto Estadual 8.468 do estado de São Paulo: Decreto nº 8.468, de 08 de setembro de 1976**. Secretaria Geral Parlamentar. Departamento de Documentação e Informação. 08 de set. 1976. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1976/decreto-8468-08.09.1976.html> Acesso: 29/11/2020.
- ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lei de Controle da Poluição do Meio Ambiente do Estado de São Paulo: Lei nº 997, de 31 de maio de 1976**. Secretaria Geral Parlamentar. Departamento de Documentação e Informação. 31 de mai. 1976. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1976/original-lei-997-31.05.1976.html> Acesso: 29/11/2020.

ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Política Estatal de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo: Lei nº 12.300, de 16 de março de 2006.** Secretaria Geral Parlamentar. Departamento de Documentação e Informação. 16 de mar. 2006. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2006/lei-12300-16.03.2006.html> Acesso: 29/11/2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Resíduos Sólidos - Classificação: NBR 10.004.** Rio de Janeiro – RJ, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Aterros de Resíduos Não Perigosos – Critérios para Projeto, Implantação e Operação: NBR 13.896.** Rio de Janeiro – RJ, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Aterros de Resíduos Perigosos – Critérios para Projeto, Construção e Operação: NBR 10.157.** Rio de Janeiro – RJ, 1987.

BENAMOUN, L.; ARLABOSSE, P.; LÉONARD, A. **Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge.** Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 28. p.29-43, 2013.

BITTENCOURT, S; SERRAT, B. M; AISSE, M.M.; MARIN, L. M. K. S; SIMÃO, C. C. **Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado.** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Rio de Janeiro – RJ, 2012. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522012000300008](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522012000300008). Acesso: 29/11/2020.

BRAGA, Benedito.; HESPANHOL, Ivanildo; CONEJO, João G. Lotufo.; MIERZWA, José Carlos; BARROS, Mário Thadeu L.; Spencer, Milton; Porto, Monica; Nucci Nelson; Juliano, Neusa; Eiger, Sérgio. **Introdução à engenharia ambiental.** 2 ed. São Paulo: editora Pearson Prentice Hall. 2005. 313p.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA: Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 de mai. 2011. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646> Acesso: 29/11/2020.

BRASIL. **Decreto nº 7.404, de 23 de Dezembro de 2010: Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 de dez. 2010. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=7404&ano=2010&ato=5cdITW65EMVpWT85f> Acesso: 29/11/2020.

BRASIL. **Lei da Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH: Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 08 de jan. 1997. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/busca-geral?termo=lei+9433#gsc.tab=0&gsc.q=lei%209433&gsc.page=1> Acesso: 29/11/2020.

BRASIL. **Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS: Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 de ago. 2010. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2010/lei-12305-2-agosto-2010-607598-publicacaooriginal-154180-pl.html> Acesso: 29/11/2020.

BRASIL. **Lei dos Crimes Ambientais: Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 de fev. 1998. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm) Acesso: 29/11/2020.

BRASIL. **Marco Legal do Saneamento: Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 de jul. 2020. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2020/lei-14026-15-julho-2020-790419-publicacaooriginal-161096-pl.html> Acesso: 29/11/2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Licenciamento Ambiental – Roteiros e Informações.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/licenciamentoambiental/outros-documentos/#1505276168403-123f1e6f-7bc3> Acesso: 29/11/2020

COLLARD, M; TEYCHENÉ, B; LEMÉE, L. **Comparison of three different wastewater sludge and their respective drying processes: Solar, Thermal and reed beds e Impact on organic matter characteristics.** Journal of Environmental Management 203. p.760-767, 2017.

CORTÊS, P. L.; TORRENTE, M.; PINTO, A. P. A.; RUIZ, M. S.; DIAS, A. J. G.; RODRIGUES, R. **Crise de abastecimento de água em São Paulo e falta de planejamento estratégico.** Estudos Avançados. vol.29 no.84. São Paulo maio/ago. 2015. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142015000200007&lng=pt&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142015000200007&lng=pt&tlng=pt) Acesso: 03/12/2020.

DAVID, Airton Checoni. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio.** Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2002.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo; VOLTAN Paulo Eduardo Nogueira. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** São Carlos: editora LDiBe LTDA, 2012. 540 p.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo; VOLTAN Paulo Eduardo Nogueira. **Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** São Carlos: editora LDiBe LTDA, 2011. 454 p.

DI BERNARDO, Luiz; SABOGAL PAZ, Lyda Patrícia. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água – Vol. 1.** São Carlos: editora LDiBe LTDA, 2008. 878p. (vol. 1)

FERREIRA, P. C.; PIAI, K. A.; TAKAYABAGUI, A. M. M.; SEGURA-MUÑOS, S. I. **Alumínio como fator de risco para a doença de Alzheimer.** Revista Latino-Americana de Enfermagem, Ribeirão Preto, 2008. Disponível em: [http://www.scielo.br/pdf/rlae/v16n1/pt\\_22.pdf](http://www.scielo.br/pdf/rlae/v16n1/pt_22.pdf) Acesso: 29/11/2020.

FLAGA, A. **Sludge Drying**. Institute of Heat Engineering and Air Protection, Cracow University of Technology, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland. 2007. Disponível em: <http://www.energiomiljo.org/kth/Polishproject/rep13/Flagasludgedrying73.pdf> Acesso: 29/11/2020.

FRATA, Gustavo Almeida. **Desenvolvimento de Metodologia para Dimensionamento de Estufa de Secagem Natural para Lodo de Estações de Tratamento de Água**. Tese de Doutorado apresentada ao Centro de Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP, 2019.

FREITAS, J. G. de; FERREIRA, S. S. F.; PIVELI, R. P. **Viabilidade técnica e econômica da regeneração de coagulantes a partir de lodos de estações de tratamento de água**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Rio de Janeiro – RJ, 2005. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522005000200007](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522005000200007) Acesso: 29/11/2020.

FUNASA, 2017. Brasil. Fundação Nacional de Saúde. Programas Institucionais/Engenharia de Saúde Pública: **Saneamento para Promoção da Saúde**. Brasília: Funasa, 2017. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/saneamento-para-promocao-da-saude> Acesso: 09/12/2020.

GOOGLE. **Google Earth Website**. <http://earth.google.com/>, 2020.

GUERRA, R. C.; ANGELIS, D.F.D. **Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário**. Arquivos do Instituto Biológico. 2005. v.72, n.1, p.87-91.

HABERT, Alberto Cláudio; BORGES, Cristiano Piacsek; NOBREGA, Ronaldo **Processos de separação por membranas**. Programa de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: e-papers, 2006.

KURT, M; AKSOY, A; SANIN, F. D. **Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements**. Water Research 82. 2015. p.47-45.

LIBÂNEO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 3 ed. Campinas: editora Átomo. 2010. 486p.

LIMA, J. E. F. W. **Recursos Hídricos no Brasil e no Mundo**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2010/23443/1/doc-33.pdf> Acesso: 07/12/2020.

MATHIOUDAKIS, V. L.; KAPAGIANNIDIS, A. G.; ATHANASOULIA, E.; DIAMANTIS, V.I.; MELIDIS, P.; AIVASIDIS, A. **Exterded Dewatering of Sewage Sludge in Solar Drying Plant**. Desalination 248. 2009. P.733-739.

METCALF E EDDY. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. Porto Alegre: editora AMGH LTDA, 2016. 1864 p.

PCJ, 2011. Disponível em: <https://agua.org.br/noticias/bacias-pcj-deverao-gerar-quase-3-mil-toneladas-por-dia-de-lodos-de-eta-e-ete-em-2020/> Acesso: 29/11/2020.

PCJ, 2018. **Primeira revisão do Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá 2010 a 2020**. executado por Consórcio Profill-Rhama e organizado por Comitês PCJ/Agência das Bacias PCJ. – Piracicaba (SP): Consórcio Profill-Rhama, 2018. Disponível em:

[https://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=846:primeira-revisao-pb-relatorios-finais&catid=122&Itemid=345](https://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=846:primeira-revisao-pb-relatorios-finais&catid=122&Itemid=345) Acesso: 03/12/2020.

PERES, R. B; SILVA, R. S. **Análise das relações entre o Plano de Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré e os Planos Diretores Municipais de Araraquara, Bauru e São Carlos, SP: avanços e desafios visando a integração de instrumentos de gestão**. Sociedade & Natureza. vol.25 no.2 Uberlândia May/Aug. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000200011> Acesso: 03/11/2020.

PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA, 2018. **Destinação Final de Lodo de ETAs e ETEs / Gheorge Iwaki (Responsável Técnico)**. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-et-as-e-etes/> Acesso: 01/02/2020.

PORTELLA, K.F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. **Caraterizacao Fisico-Quimica do Lodo Centifugado da Estacao de Tratamento de Água Passauna – Curitiba – Pr. 22o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA AMBIENTAL**. Joinvile: ABES, 2003.

PROSAB, 1999. **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água / Marco Antonio Penalva Reali (Coordenador)**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 240 p.

RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Editora Blücher, 2001.

RUBIM, Cristiane. **O Desafio no Tratamento de Lodo**. Revista Técnica do Tratamento de Água e Efluentes. São Paulo – SP. Vol. 3 – Nº 14 – ago/set 2013. Disponível em: <http://www.revistatae.com.br/6376-noticias> Acesso: 31/01/2020.

SABESP, 2018. Companhia de Saneamento Básico do Básico de São Paulo - SABESP. **Relatório da Administração – 2018**. Disponível em: [http://www.sabesp.com.br/sabesp/filesmng.nsf/A0677CE7B45B29F6832583CC001614A2/\\$File/RelatorioAdministracao.pdf](http://www.sabesp.com.br/sabesp/filesmng.nsf/A0677CE7B45B29F6832583CC001614A2/$File/RelatorioAdministracao.pdf) Acesso: 18/01/2020.

SALIHOGU, N. K.; PINARLI, V.; SALIHOGU, G. **Solar drying in sludge management in Turkey**. The Journal of Renewable Energy 32. p.1661-1675, 2007.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2ª ed. – Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. Disponível em:

[https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2001\\_IntroducaoGerenciamentoRecursosHidricos2ed/75352f44-fa8d-ae7-8fc3-aca3ffbff972](https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2001_IntroducaoGerenciamentoRecursosHidricos2ed/75352f44-fa8d-ae7-8fc3-aca3ffbff972) Acesso: 08/12/2020.

SHAO, L.; WANG, T.; ZHAO, L.; WANG, G.; LÜ, F.; HE, P. **The Effect of Adding Straw on Natural Solar Sludge Drying**. Drying technology, 12 March 2015, Vol.33(4), pp. 414-419.

SLIM, R.; ZOUGHAIB, A.; CLODIC, D. **Modeling of a solar and heat pump sludge drying system**. International Journal of Refrigeration. Vol. 31. p.1156-1168, 2008.

SNIS, 2019. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional do Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações Sobre o Saneamento: **24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018**. Brasília: SNS/MDR, 2019. 180 p. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos> Acesso: 14/01/2020.

SIMA, 2020. PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS 2020-2023. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/perh20202023> Acesso: 03/12/2020.

TRATA BRASIL, 2018. Trata Brasil. **Benefícios Econômicos e Sociais da Expansão do Saneamento no Brasil – 2018**. EX ANTE CONSULTORIA ECONÔMICA. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/estudos/estudos-itb/beneficios-economicos-e-sociais> Acesso: 16/01/2020.

TRATA BRASIL, 2014. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento-e-saude> Acesso: 07/12/2020.

TRATA BRASIL, 2017. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento-e-saude> Acesso: 08/12/2020.

WANG, P.; MOHAMMED, D.; ZHOU, P.; LOU, Z.; QIAN, P.; ZHOU, Q. **Roof solar drying processes for sewage sludge within sandwich-like chamber bed**. Renewable Energy 136. p.1071-1081, 2019.

WHO, 2018. **Guidelines on Sanitation an Health**. Geneva: World Health Organization. 2018. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/274939/9789241514705-eng.pdf?ua=1> Acesso: 09/12/2020.