



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SISTEMA DE CONFINAMENTO DE RESÍDUOS: LODO DA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA DE MAIRIPORÃ - SP

ANA PAULA MOREIRA DE FARIA

VARGINHA

2021

ANA PAULA MOREIRA DE FARIA

SISTEMA DE CONFINAMENTO DE RESÍDUOS: LODO DA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA DE MAIRIPORÃ - SP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais como requisito parcial para obtenção do título
de Engenheira Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Denise de Carvalho Urashima

Coorientadora: Prof.^a Me. Mag Geisielly Alves Guimarães

Varginha

2021

ANA PAULA MOREIRA DE FARIA

SISTEMA DE CONFINAMENTO DE RESÍDUOS: LODO DA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA DE MAIRIPORÃ - SP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais como requisito parcial para obtenção do título
de Engenheira Civil.

Data de aprovação: 13 de abril de 2021

Banca examinadora:



Denise de Carvalho Urashima, Dra.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade
Varginha



Mag Geisielly Alves Guimarães, Me.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade
Varginha



Valéria Antônia Justino Rodrigues, Dra.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade
Varginha



André Geraldo Cornélio Ribeiro, Dr.
Universidade Federal de Lavras (UFLA)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas bênçãos concedidas, por sempre me acompanhar durante minha vida e por permitir que eu sempre passe pelo caminho certo.

À minha mãe, Maria Lúcia; ao meu pai, Humberto; à minha irmã, Adriana e ao meu irmão, Guilherme, pelo apoio constante e incomensurável, pelos ensinamentos, incentivos, carinho e por sempre estarem comigo.

Às minhas orientadoras Professoras Denise de Carvalho Urashima e Mag Geisielly Alves Guimarães por acreditarem no meu potencial para realizar este trabalho, pelos ensinamentos, pelo apoio profissional e por todas as sugestões para o trabalho.

Aos professores que aceitaram o convite para participar da banca de defesa.

A todos os professores que participam da grade da Engenharia Civil, pelos conhecimentos transmitidos e pelos ensinamentos, aos quais agradeço não só pela paciência, mas também pela amizade. E a todos os funcionários do CEFET, pelo zelo e cuidados com o campus e comprometimento na resolução dos problemas.

Ao pessoal que trabalha na ETA de Mairiporã e na SALUS Engenharia em Deságue Ltda, pela colaboração para o desenvolvimento desse trabalho. Em especial Eduardo Andrade Guanaes, Matheus Muller, Gabriel Oliveira, Flavia Francischinelli e Oscar.

Aos colegas e amigos do CEFET Varginha, por estarmos juntos todos esses anos, nos divertindo, estudando e pelas ajudas importantíssimas nos finais de semestres.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Varginha pela oportunidade de concluir a graduação em Engenharia Civil.

RESUMO

Com o aumento da população mundial, é crescente a busca por água tratada e, conseqüentemente, o acréscimo na quantidade de resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água (ETA), que se constituem numa problemática a ser resolvida pelos responsáveis pelo tratamento e distribuição de água à população. A atual legislação brasileira exige o tratamento desses resíduos para posterior disposição de forma adequada, fazendo-se necessário conhecer tanto as características dos resíduos gerados, como as alternativas tecnológicas disponíveis para adequada disposição destes. A tecnologia de desaguamento de resíduos com alto teor de líquido em relação ao teor de sólido, por meio de sistemas de confinamento de resíduos (SCR) empregando geotêxteis, tem sido amplamente utilizada para distintos resíduos. O processo de desaguamento visa diminuir o volume de resíduo, facilitando o transporte, descarte ou reutilização do material, com vantagens como: a moldagem conforme o espaço disponível, eficiência, fácil execução, baixo custo em relação aos métodos convencionais, independência das condições meteorológicas, entre outras. O trabalho apresenta um estudo de caso de SCR móvel, uma solução inovadora empregada, principalmente, em situações em que não há espaço físico disponível para emprego de outras soluções, dada a urbanização nos arredores da ETA. Equações propostas na literatura permitiram calcular os teores de umidade e de sólidos do lodo desaguado, bem como as eficiências de desaguamento e de filtração, sendo estes de 94,5% e 98,7%, respectivamente. A pesquisa traz como resultado a viabilidade promissora de aplicação dos SCR móveis em resíduos de ETA, além de uma contribuição para o entendimento de todo o ciclo de potabilização da água, norteando para uma gestão integrada do processo.

PALAVRAS-CHAVE: Desaguamento. Geotêxteis. Resíduos. Tratamento de água.

ABSTRACT

With the continuous growth of the world population, there is an increasing demand for treated water and consequently an increase in waste generation in Water Treatment Plants, which is a problem to be solved by the ones responsible for the water treatment and distribution. Brazil's current legislation requires the treatment of these residues for later disposal in an appropriate manner. Making it necessary to know both the characteristics of the generated effluent and the technological alternatives available for proper disposal. The technology of dewatering waste with a high liquid content in relation to the solid content, by waste confinement systems employing geotextiles, has been widely used for different residues. The dewatering process aims to reduce the volume of waste, facilitating the transport, disposal or reuse of the material, with advantages, such as shaping it according to the available space, efficiency, easy execution, low cost when compared to conventional methods, regardless of weather conditions, among others advantages. Therefore, the work presents a case study of mobile waste confinement systems, an innovative solution, used mainly in situations where there is no available physical space for other solutions, given the urban surroundings to the Treatment Plant. Equations proposed in the literature allowed to calculate the contents of solids and moisture of dewatered mud, as well as dewatering and filtration efficiencies, 94.5% and 98.7%, respectively. The research provides as its result the promising feasibility of applying mobile SCR in ETA residues, as well as a contribution to the understanding of the full water potabilisation cycle, leading to an integrated process management.

KEYWORDS: Dewatering. Geotextiles. Waste. Water treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de Tratamento em ETA convencional	20
Figura 2 - Distintos tipos de geossintéticos: (a) geotêxtil, (b) geomembrana e (c) geocomposto.....	23
Figura 3 - Produtos correlatos aos geotêxteis (a) geomantas, (b) geogrelhas, (c) geotubos, (d) geoespaçadores.....	23
Figura 4 - Tipos de geotêxteis: (a) tecido, (b) não tecido e (c) tricotado	25
Figura 5 - Georredes típicas.....	26
Figura 6- Detalhe da função de filtração no geotêxtil que constitui o SCR.....	27
Figura 7 - Esquema de Lagoa de lodo.	28
Figura 8 - Esquema de Leito de secagem.....	28
Figura 9 - Filtro prensa de câmara.	29
Figura 10 - Prensa desaguadora.....	29
Figura 11 - Filtro prensa de diafragma	30
Figura 12 - Filtro a vácuo.....	31
Figura 13 - Centrífuga decantadora com eixo horizontal.....	31
Figura 14 - Aplicação de geossintéticos (geotêxtil) no desaguamento de resíduos de ETA	32
Figura 15 - Camada de <i>filter cake</i> formada durante processo de desaguamento com geotêxteis.....	34
Figura 16 - Principais etapas de desaguamento em SCR.....	34
Figura 17 - Ensaio de cone	36
Figura 18 - Poliacrilamida aniônica e desestabilização de partículas com sedimentação	37
Figura 19 - Localização do município de Mairiporã (SP).....	40

Figura 20 - Densidade de ocupação de Mairiporã com sinalização de áreas servidas	41
Figura 21 - Sistema Cantareira	42
Figura 22 - Portão de acesso para a Estação de Tratamento de Água de Mairiporã	42
Figura 23 - Área da ETA-M de Mairiporã e Módulos de Tratamento	43
Figura 24 - Chicanas fixas recebendo água bruta com sulfato ferro, decantador	44
Figura 25 - SCR móvel, central de condicionamento químico e decantador	47
Figura 26 - Bomba helicoidal e tubulações de sucção e recalque.....	47
Figura 27 - (a) Lodo do decantador, (b) percolado após os primeiros desaguamentos	48
Figura 28 - Central de condicionamento químico	48
Figura 29 - Bocal de enchimento do SCR	50
Figura 30 - Amostras de lodo desaguado coletadas em cápsulas.	51
Figura 31 - SCR aberto. Visualização do interior do SCR (a) camada mais externa e (b) camadas mais internas	51
Figura 32 - Balança usada para medir o teor de umidade do lodo <i>in loco</i>	52
Figura 33 - Medições da turbidez realizadas no início e final de ciclos de enchimento.	53
Figura 34 - Medições do pH realizadas no início e final de ciclos de enchimento.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Polímeros comumente utilizados na fabricação dos geossintéticos ..	24
Tabela 2 - Características físico-químicas do efluente do decantador.....	45
Tabela 3 - Propriedades do geotêxtil do SCR em estudo	49
Tabela 4 – Enchimento do SCR – ETA Mairiporã.....	50
Tabela 5 - Teor de umidade pelo método da estufa	54
Tabela 6 - Teor de sólidos em amostras de lodo da primeira, segunda e terceira camadas.....	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Planilha de cálculo do número de SCR	46
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental
DN – Deliberação Normativa
EPS – Poliestireno expandido
ETA – Estação de Tratamento de Água
GCL – Geocompostos Argiloso
IGSBR – International Geosynthetics Society, Associação Brasileira de Geossintéticos
ISO – International Organization for Standardization ou Organização Internacional para Padronização
MMA – Ministério do Meio Ambiente
NBR – Norma Brasileira
NTU – Nephelometric Turbidity Unit, Unidade Nefelométrica de Turbidez
ONU – Organização das Nações Unidas
PA – Poliamida
PAM – Poliacrilamida aniônica
PE – Polietileno
PET – Poliéster
Planares – Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP – Polipropileno
PS – Poliestireno
PVC – Polivinil clorado
RSB – Resíduos de Serviços Públicos de Saneamento Básico
SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCR – Sistemas de Confinamento de Resíduos
SGA – Sistema de Gestão Ambiental
STT – Sólidos em Suspensão Totais
TCC – Trabalho de Conclusão de Curso
UTR – Unidade de Tratamento de Resíduos

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

°C – Graus Celsius (medida de temperatura)

g – Gramas

kN/m – Kilo Newtons por metro (medida de resistência)

L – Litros

m – Metros

m² – Metros quadrados

m³ – Metros cúbicos

m³/h – Metros cúbicos por hora (medida de vazão)

mg/L – Miligramas por litro (medida de concentração)

mgPol/gST – Miligramas por gramas (medida de concentração)

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez (medida de turbidez)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Considerações iniciais	14
1.2. Objetivos da pesquisa	17
1.3. Justificativa	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Contextualização.....	19
2.2. Sistemas de tratamento de água	20
2.3. Resíduos gerados na potabilização	21
2.4. Geossintéticos	22
2.5. Métodos para aumentar o teor de sólidos de resíduos de ETA.....	27
2.5.1. Métodos naturais e mecânicos.....	27
2.5.2. Sistemas de confinamento de resíduos com geossintéticos	31
2.6. Condicionamento químico	35
2.7. Parâmetros para análise de eficiência de sistemas de desaguamento.....	37
3. METODOLOGIA	40
3.1. Delimitação da área de estudo.....	40
3.2. Parâmetros do resíduo do decantador da ETA-M	45
3.3. Sistema de confinamento de resíduos empregado na ETA-M	46
3.3.1. Exumação do SCR.....	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1. Análise de Turbidez e pH nos ciclos de enchimento	53
4.2. Análise de Eficiência do SCR.....	54
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
5.1. Considerações finais	56
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	57
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	59

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A população mundial mais que dobrou nos últimos 70 anos, chegando a um aumento de 169 % (UNIC, 2019). Algumas das implicações do aumento populacional são: as dificuldades ao acesso de água potável, saúde da população e crescente urbanização, por vezes realizada de forma desordenada (BELLAYER; SANTOS, 2019). Dentro deste contexto, a explosão populacional nas últimas dez décadas, aliada ao desenvolvimento socioeconômico, fez com que o consumo de água potável crescesse numa taxa de aproximadamente 1% ao ano (UNESCO, 2020).

No sentido de acompanhar o rápido crescimento da demanda populacional por água tratada ao longo dos anos, tanto para consumo humano, quanto para os processos industriais, Estações de Tratamento de Água (ETA) foram implantadas. As ETA prestam serviço realizando a remoção de impurezas da água que será distribuída à população, com garantia de qualidade e segurança para saúde daqueles que a recebem. Em contrapartida, essas impurezas, que são os resíduos do processo, devem ser tratadas e dispostas de forma adequada para não gerar impactos ambientais negativos (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013; NASCIMENTO JUNIOR, 2005; OLIVEIRA; RONDON, 2016).

A maioria das ETA do Brasil foi construída há mais de cinco décadas, quando não se tinham obrigatoriedades legais, as quais adviriam da crescente preocupação em relação aos recursos naturais, incrementando ao longo dos anos com as questões ambientais (AUGUSTO *et al.*, 2012). Entretanto, no intuito de atender à crescente demanda pela água tratada, aliado à priorização da destinação dos recursos financeiros, não houve uma gestão ambiental que contemplasse investimentos para alternativas de tratamento dos resíduos gerados na potabilização da água. A referida situação é agravada quando a destinação dos resíduos gerados no processo de tratamento da água é o próprio curso d'água que, ao longo do tempo, irá promover distintos impactos ambientais, sociais e econômicos (NOSSOL *et al.*, 2007).

Ressalta-se que o contexto supracitado não deve ser empecilho para a busca de alternativas, mas sim uma eminente necessidade, visto que no Brasil existem várias

legislações pertinentes à disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos gerados neste processo industrial, tais como: Lei nº. 9.605 (BRASIL, 1998) do Ministério do Meio Ambiente que dispõe das sanções legais referentes às condutas lesivas ao meio ambiente; ABNT NBR 10.004 (2004) que classifica o lodo de ETA como Resíduo Sólido Classe IIA – Não Inerte e ABNT NBR ISO 14001 (2004), que especifica os requisitos de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA); Resoluções nº. 357 e nº 430 do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 2005; BRASIL, 2011, respectivamente); a definição dos padrões de potabilidade da água para consumo humano segundo a Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017); a Deliberação Normativa nº153 do Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM (MINAS GERAIS, 2010) que convoca para a regularização ambiental, incluindo a ETA com a Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR), dentre várias leis estaduais. A Deliberação Normativa 153/2010 supracitada, inclusive, teve último prazo para ETA de maior capacidade de tratamento, vencido em dezembro de 2020.

No ano de 2010 foi sancionada a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010a), e regulamentada pelo Decreto nº 7.404 (BRASIL, 2010b), referente a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que apresenta princípios e instrumentos normativos para a gestão integrada de resíduos sólidos, incluindo os Resíduos de Serviços Públicos de Saneamento Básico (RSB), além de atribuir responsabilidades compartilhadas aos geradores de tais resíduos, sejam pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado.

Em 2020, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) publicou a consulta pública do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), incluindo neste documento os resíduos de saneamento (RSB). Segundo o referido documento (BRASIL, 2020), o Planares representa a estratégia de longo prazo em âmbito nacional para operacionalizar as disposições legais, princípios, objetivos e diretrizes da PNRS conjuntamente aos Planos de Resíduos Sólidos de outras esferas, como estadual, microrregionais, intermunicipais e municipais.

Os resíduos gerados nas ETA, tais como lodos de decantadores e água de lavagem dos filtros, são um material fluido, com alto teor de líquido adsorvido, na sua maioria superior a 95 % e o restante formado por resíduos sólidos de difícil sedimentação (REALI *et al.*, 1999). O volume desses resíduos pode corresponder a

aproximadamente 5% sobre a produção de água por dia (ANDREOLI, 2001; NASCIMENTO JUNIOR, 2005). Para exemplificar, uma ETA convencional com capacidade de tratamento de 2400 L/s pode produzir 1,8 T/dia de resíduos (HOPPEN *et al.*, 2005).

Assim sendo, considerando o volume de água tratada em ETA, são fundamentais os estudos sobre a disposição ou a avaliação do aproveitamento do resíduo gerado no processo (lodo e água de lavagem de filtros) e suas potencialidades (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013).

Ressalta-se que várias ETA estão localizadas em áreas urbanas, ou seja, atualmente seu entorno pode estar ocupado, inviabilizando a implantação de processos de tratamento de resíduos que necessitem de grandes áreas, como é o caso dos leitos de secagem. Este fato constitui numa problemática a ser resolvida pelas concessionárias, autarquias e departamentos municipais que tratam a água para distribuição à população. Neste cenário exposto, associar Sistemas de Confinamento de Resíduos (SCR) constituídos por geossintéticos apresenta-se como uma alternativa promissora para o tratamento dos resíduos em áreas mais reduzidas (KURODA *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2020; SILVEIRA *et al.*, 2015).

A tecnologia de desaguamento por meio de SCR empregando geotêxteis tem sido amplamente utilizada nas últimas duas décadas para desaguamento de resíduos (lamas ou lodo) de alto teor de água em relação ao teor de sólidos. O processo visa diminuir o volume da polpa por desaguamento, viabilizando o transporte, descarte e reutilização do material desaguado (KHACHAN; BHATIA, 2017). Os primeiros registros literários do emprego de SCR datam da década de 90 (LAWSON, 2008).

Estudos sobre o tratamento e disposição final adequada dos resíduos gerados em ETA têm se tornado cada vez mais relevantes, além da busca de seu correto manejo para minimizar o volume de material a ser disposto com a redução de custos no transporte e destinação final (FONTANA, 2005; HOPPEN *et al.*, 2005). Além disso, pelo lodo de ETA ser um resíduo e não um rejeito conforme reportado na PNRS segundo a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010a), é importante ressaltar que o ideal seria a gestão ambiental, viabilizando o uso para fins mais nobres, que não apenas o destino final em aterros sanitários (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2018; LIRA; CÂNDIDO, 2013).

Assim sendo, o Trabalho de Conclusão de Curso analisa um Sistema de Confinamento de Resíduos (SCR) empregando geotêxteis, num estudo de caso na

Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Mairiporã, no estado de São Paulo (SP).

Diante do exposto, este trabalho aborda uma revisão sobre o assunto, percorrendo sobre o sistema de potabilização em ETA convencionais, o que são os geossintéticos, suas aplicações e os mais utilizados para o desaguamento de efluentes de ETA, bem como pesquisas nesta temática. A ETA de Mairiporã (SP) é foco deste estudo de caso, no qual aborda-se a metodologia aplicada e a avaliação dos resultados obtidos. Por último, serão discutidas considerações finais para a implantação de sistema para o desaguamento e disposição final dos resíduos, bem como sugestões para trabalhos futuros.

1.2. Objetivos da pesquisa

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o emprego e desempenho de Sistemas de Confinamento de Resíduos (SCR) móveis em uma Estação de Tratamento de Água em zona urbanizada.

Tendo como objetivos específicos:

- Delimitação do local de estudo de caso;
- Coletar informações sobre o estudo de caso;
- Participar da exumação do SCR;
- Determinar as eficiências de desaguamento e de filtração do SCR em estudo;
- Contribuir para tomadas de decisões em relação à disposição de resíduos gerados na potabilização da água.

1.3. Justificativa

O lançamento inadequado de resíduos gerados na potabilização da água implica de forma imensurável em distintos impactos negativos, tanto pelos grandes volumes gerados no processo, quanto por suas graves consequências ao meio ambiente, tais como: assoreamento dos cursos d'água, contaminação do solo e dos mananciais urbanos, além de agravar a escassez de recursos hídricos para abastecimento e potabilização, morte de fauna e flora, disseminação de doenças à população, dentre outros (ANDREOLI, 2001; GUIMARÃES; URASHIMA, 2013; HOPPEN *et al.*, 2005; REALI, PATRIZZI; CORDEIRO, 1999).

Assim sendo, estudos sobre o tratamento e disposição final de forma adequada destes resíduos têm se tornado cada vez mais relevantes, além da busca de seu correto manejo para minimizar o volume de material a ser disposto com a redução de custos no transporte e para destinação final (FONTANA, 2005; HOPPEN *et al.*, 2005).

Apesar de ambos, sistemas com geossintéticos e Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR) serem temas de pesquisa há tempos, a correlação entre os dois métodos para tal finalidade ainda é relevante, tanto em termos científicos como na prática do emprego destes sistemas. Dessa forma, este trabalho busca trazer uma análise de um estudo de caso que empregou SCR em uma ETA com o entorno totalmente urbanizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Contextualização

A possibilidade de conseguir água de qualidade e em quantidade para fornecer à comunidade sempre foi fator fundamental para o estabelecimento e desenvolvimento de núcleos populacionais, desde os primórdios da existência humana, bem como os cuidados para garantir o abastecimento. Para tanto, tornam-se necessários estudos de gestão em vários âmbitos, visando promover o bem-estar socioeconômico, a igualdade social e a redução de riscos associados à qualidade e segurança do abastecimento (HELLER; PÁDUA, 2006).

Devido a fenômenos sociais e ambientais, cada vez mais evidentes com a globalização, as mudanças climáticas, a crise ambiental, os conflitos transfronteiriços, o crescimento populacional, a urbanização, a sociedade de consumo e as pandemias, a gestão da água para consumo humano tem se tornado um desafio cada vez maior e necessário (PAIVA *et al.*, 2020).

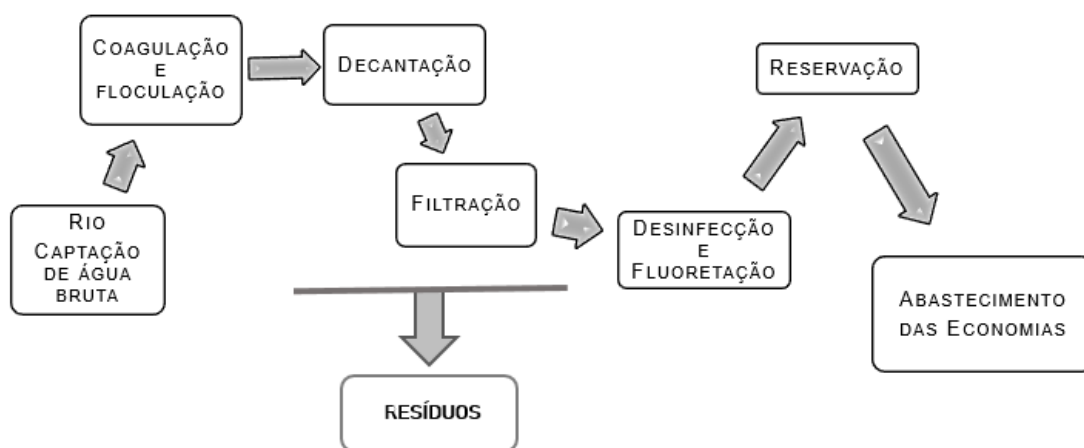
As distintas abordagens existentes tendem a convergir para a definição de segurança hídrica em termos de água bruta. Para tanto, é necessária uma ampla variedade de medidas políticas para lidar com a problemática das possíveis deficiências no fornecimento de água em longo prazo, considerando ainda que o seu abastecimento é sempre entendido como uma ação que visa prioritariamente à proteção da saúde humana e deve atender aos padrões de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2017). Apesar da cobertura do abastecimento de água no Brasil ainda não estar universalizada, alguns municípios brasileiros, como o caso de Varginha, localizado na região do Sul de Minas Gerais, contam com 100 % de cobertura pela rede de abastecimento na área urbana (COPASA, 2021).

É importante atentar que as instalações para potabilização da água podem vir a ser um problema, visto que se não houver uma adequada gestão integrada desses resíduos, podem ser fontes poluidoras e de disseminação de doenças, alterando, inclusive, parâmetros físicos e químicos da água em tratamento, além de agravar a escassez no abastecimento, principalmente, em regiões com baixa disponibilidade hídrica para captação de água, dentre outros impactos (HELLER; PÁDUA, 2006; JEPSON *et al.*, 2017).

2.2. Sistemas de tratamento de água

Segundo Howe *et al.* (2016), a prática de potabilização da água é configurada por um conjunto de operações unitárias. A seleção do processo envolve a avaliação técnica da eficácia para a separação de grande quantidade dos componentes indesejáveis, contaminantes, relacionados às características geológicas, de clima e atividades humanas, identificados no manancial que abastecerá a ETA. Além de custos, consumos de energia e confiabilidade do processo, os quais muitas vezes podem requerer operações múltiplas no tratamento de água. A tipologia mais comum de tratamento de água é a estação de tratamento convencional de água superficial (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013; DI BERNARDO; DANTAS, 2005; NASCIMENTO JUNIOR, 2005), ilustrada na Figura 1.

Figura 1 - Processo de Tratamento em ETA convencional



Fonte: DA AUTORA (2020).

A ETA convencional é composta por processos de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção/correção de pH e, na maioria, a inclusão de fluoretação (LOPES; LIBÂNIO, 2005; LIBÂNIO, 2010; NASCIMENTO JUNIOR, 2005; POHLMANN *et al.*, 2015; SILVA; LOPES; AMARAL, 2016).

A coagulação é o processo de mistura rápida no qual é provocada a desestabilização das partículas coloidais em um sistema aquoso, preparando-as para a remoção (BARTIKO; DE JULIO, 2015; DI BERNARDO; MENDES; GUIMARÃES, 1987; RICHTER; AZEVEDO NETO, 1991).

A floculação é um processo físico no qual as partículas coloidais são colocadas em contato, com objetivo de permitir o aumento do tamanho físico, alterando sua distribuição granulométrica e, assim, a formação de flocos para posterior remoção, conjuntamente à redução de cor (RICHTER, 1991).

No processo de decantação objetiva-se que as partículas mais pesadas sejam sedimentadas ao fundo, para tanto é necessário neutralizar a ação da turbulência, diminuindo a resistência de escoamento das águas, com obtenção de água decantada ou clarificada (RICHTER; AZEVEDO NETO, 1991).

O filtro tem a função de reter partículas sólidas (suspensas, coloidais e microrganismos) por meio de leitos porosos. Em geral são utilizados carvão ativado, areia e cascalho. As ETA que possuem filtros rápidos funcionam por ação da gravidade e, sob pressão, são levados a contracorrente (inversão de fluxo) com uma vazão capaz de assegurar uma expansão adequada para o meio filtrante. Esta etapa é responsável pela redução da turbidez (NASCIMENTO JUNIOR, 2005; RICHTER; AZEVEDO NETO, 1991; SILVA *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2018).

Na desinfecção adiciona-se o cloro, agente químico que vai garantir a qualidade da água pela eliminação de microrganismos na rede, bem como a etapa de fluoretação pela adição de flúor para prevenir cáries dentárias (SILVA *et al.*, 2012).

O princípio da remoção dos contaminantes se aplica quando há diferenças entre as propriedades químicas, físicas e biológicas destes em relação à água potabilizada (HOWE *et al.*, 2016; LIBÂNIO, 2010).

2.3. Resíduos gerados na potabilização

O lodo de ETA, normalmente gerado durante o processo de decantação, é constituído de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, tais como: algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, coloides, areias, argilas, siltes, cálcio, magnésio, ferro, manganês, entre outros. (GRANDIN; ALEM SOBRINHO; GARCIA JÚNIOR, 1993, *apud* PORTELLA *et al.*, 2003).

Silva, Bidone e Marques (2000) complementam a composição dos lodos com hidróxidos de alumínio, em grande quantidade proveniente da adição de produtos químicos e, em alguns casos, polímeros condicionantes utilizados no processo de potabilização.

A geração de resíduos de ETA depende de diversos fatores, por exemplo, partículas presentes na água bruta, com tamanho entre 1 nm a 1 mm, as quais conferem turbidez e cor à água, concentração de produtos químicos aplicados ao tratamento, tempo de permanência do lodo nos tanques, forma de limpeza, eficiência da sedimentação, dentre outros (ANDREOLI, 2001).

Conforme abordado anteriormente, a geração de resíduos em ETA pode corresponder a 5 % do volume total de água potabilizada diariamente e, considerando que o volume produzido pelas ETA tende a aumentar continuamente para suprir as necessidades básicas da população por água tratada, são fundamentais os estudos sobre a disposição, condicionamento e avaliação do aproveitamento do lodo e suas potencialidades, buscando uma gestão integrada no processo de tratamento da água (ANDREOLI, 2001).

Uma das formas de manejar os resíduos gerados na potabilização da água é o emprego de Sistemas de Confinamento de Resíduos (SCR), constituídos por geossintéticos, que permitem o desaguamento do resíduo e, conseqüentemente, um menor volume de resíduo sólido a ser disposto.

2.4. Geossintéticos

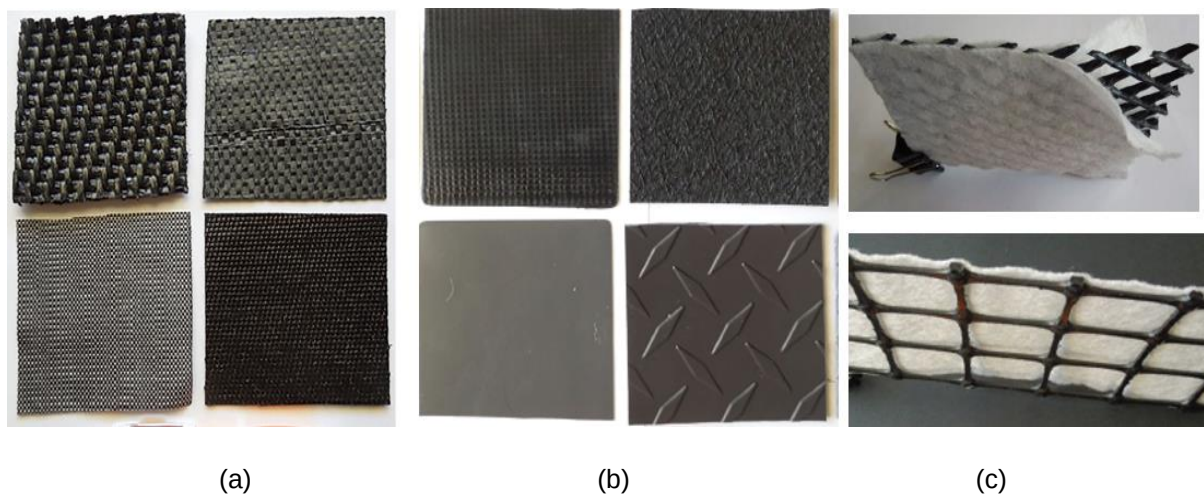
Geossintético é uma denominação atribuída a um conjunto de produtos poliméricos industrializados, de base sintética ou natural, empregados na engenharia civil em projetos geotécnicos e de proteção ambiental. Esses materiais podem apresentar formatos em tiras, mantas ou tridimensional, conferindo aos mesmos tipos e classificações normativas, tais como: geotêxteis, produtos correlatos aos geotêxteis, barreiras geossintéticas (geomembrana ou polimérica, betuminosa e argilosa) e os geocompostos (ABNT NBR ISO 10318-1:2018).

A Figura 2 apresenta os distintos tipos de geossintéticos. Com relação aos produtos correlatos aos geotêxteis, podem ser citadas as geogrelhas, georredes, geocélulas, geomantas, geotiras e geoespaçadores (Figura 3).

A engenharia com geossintéticos vêm ganhando mercado nas últimas décadas, com as primeiras aplicações datadas da década de 1950 direcionadas a obras de controles de erosão superficiais em regiões costeiras e como sistemas de filtração (SHUKLA; YIN, 2006).

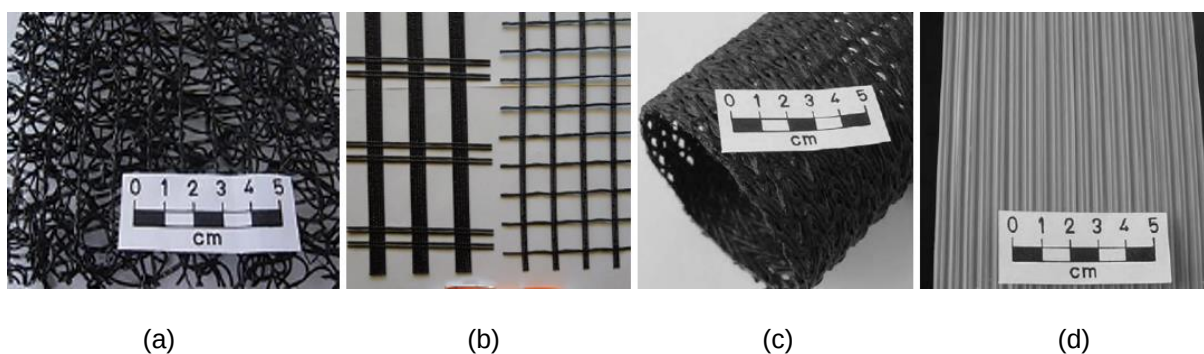
O incremento no emprego destes materiais deve-se aos distintos fatores, entre estes as diferentes funções que podem empenhar em uma obra, tais como: drenagem, filtração, proteção, reforço, separação, controle de erosão superficial, barreira de fluxo e alívio de tensões (ABNT NBR ISO 10318-1:2018).

Figura 2 - Distintos tipos de geossintéticos: (a) geotêxtil, (b) geomembrana e (c) geocomposto.



Fonte: SHUKLA (2006), adaptada.

Figura 3 - Produtos correlatos aos geotêxteis (a) geomantas, (b) geogrelhas, (c) geotubos, (d) geoespaçadores.



Fonte: SHUKLA (2006), adaptada.

Os geossintéticos são constituídos essencialmente por polímeros sintéticos, possuindo alguns aditivos em menores concentrações com o intuito de melhorar seu desempenho ou processos de fabricação. Deste modo, as matrizes poliméricas utilizadas vêm ao encontro de atender às várias necessidades de engenharia, fazendo com que os geossintéticos possuam propriedades adequadas à função que irá desempenhar, tais como: resistência mecânica, rigidez, durabilidade, elasticidade,

resistência química, dentre outras (BUENO, 2014; BUENO; VILAR, 2014; LOPES; LOPES, 2010).

Os polímeros usados na produção dos geossintéticos e suas abreviações comumente empregadas são apresentados na Tabela 1, sendo os mais comuns o polipropileno (PP), o polietileno de alta densidade (HDPE) e o poliéster (PET). Especificamente aos geotêxteis, que será abordado neste trabalho, os polímeros mais empregados são o polipropileno (PP) e o poliéster (PET), que são termoplásticos, com ponto de fusão de 165°C e densidade na faixa de 0,9 a 0,91 g/cm³ e ponto de fusão de 260°C e densidade na faixa de 1,22 a 1,38 g/cm³, respectivamente. O polipropileno apresenta um custo menor de matéria prima e de produção, além de boa resistência química, por causa de sua estrutura semicristalina (BUENO, 2014; SHUKLA, 2016).

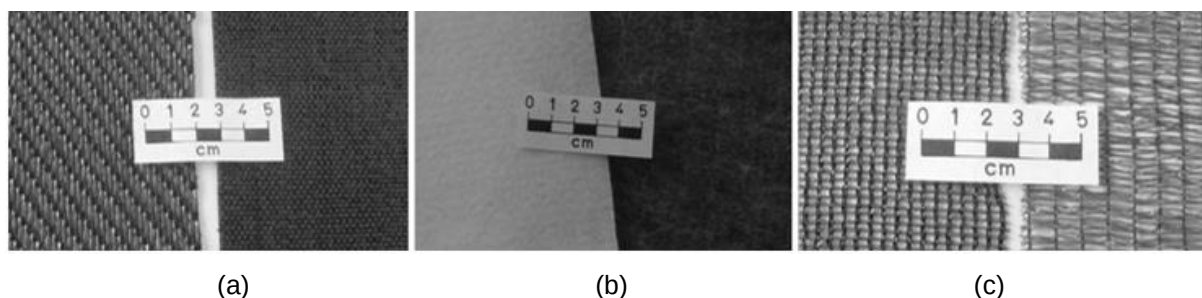
Tabela 1 - Polímeros comumente utilizados na fabricação dos geossintéticos

Tipos de Polímero	Sigla	Geossintético fabricado
Polipropileno	PP	Geotêxtil, Geogrelhas, Geomembranas, Geotubos
Poliéster	PET	Geogrelhas, Geotêxtil
Polietileno de baixa densidade	LDPE	Geotêxtil
Polietileno de muito baixa densidade	LLDPE	Geotêxtil, Geomembranas
Polietileno de média densidade	MDPE	Geotêxtil, Georredes
Polietileno de alta densidade	HDPE	Geogrelhas, Georredes, Geomembranas, Geotubos, Geotêxtil
Polietileno clorado	CPE	Geomembranas
Polietileno clorossulfonado	CSPE	Geomembranas
Polivinil clorado	PVC	Geomembranas, Geotubos
Poliamida	PA	Geotêxtil
Poliestireno	PS	Geoformas

Fonte: SHUKLA (2016), adaptada.

O geossintético do tipo geotêxtil é caracterizado pelo seu formato planar, por sua permeabilidade e flexibilidade, sendo o mais versátil para desempenhar distintas funções. Podem ser classificados, tomando como base o processo de fabricação, em geotêxtil tecido (GTX-W), geotêxtil não tecido (GTX-NW) e geotêxtil tricotado (GTX-K), conforme ilustrado na Figura 4 (SHUKLA; YIN, 2006).

Figura 4 - Tipos de geotêxteis: (a) tecido, (b) não tecido e (c) tricotado



Fonte: SHUKLA; YIN (2006, p. 3).

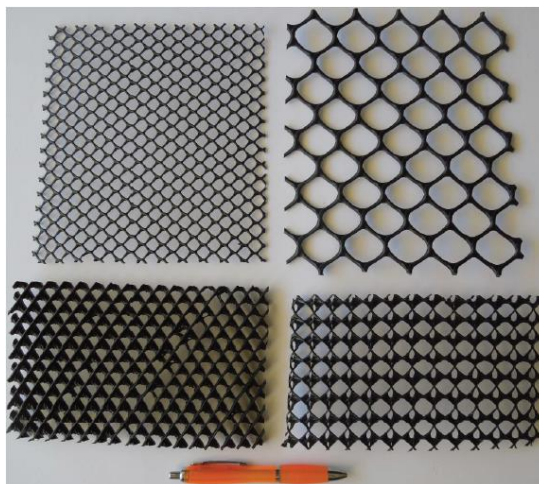
O geotêxtil tecido (GTX-W) é fabricado pelo entrelaçamento de fitas (extrudidas ou cortadas), fios de tiras, monofilamentos ou multifilamentos, normalmente com um ângulo reto entre os elementos constituintes (LOPES; LOPES, 2010; SHUKLA; YIN, 2006).

O geotêxtil não tecido (GTX-NW) tem como premissa a ligação de monofilamentos contínuos ou de fibras cortadas, dispostos com orientação direcional ou aleatória, em uma malha solta. A ligação dos elementos constituintes pode ser realizada por meio mecânico (geotêxteis não tecido agulhados), químico (geotêxteis não tecido ligados quimicamente) ou térmico (geotêxteis não tecido termossoldados) (LOPES; LOPES, 2010).

O geotêxtil tricotado (GTX-K) é confeccionado pelo entrelaçamento de fios com o auxílio de uma máquina de tricotar. É menos empregado devido às grandes deformações sofridas com a aplicação de cargas (LOPES; LOPES, 2010; SHUKLA; YIN, 2006).

As georredes (Figura 5) são malhas poliméricas extrudadas, relativamente rígidas, feita de materiais semelhantes a uma rede com grandes espaços abertos entre suas nervuras estruturais. Se parecem com as geogrelhas, mas diferem pela função drenante, geralmente com aberturas em formato de diamante (12 mm de comprimento e 8 mm de largura) e ângulos da ordem de 70° e 110°. Para a função de drenagem, as georredes devem ser usadas em conjunto com um geotêxtil, uma geomembrana ou outros materiais, nas suas superfícies superior e inferior evitando, assim, a obstrução dos drenos por partículas de solo (SHUKLA, 2016).

Figura 5 - Georredes típicas



Fonte: SHUKLA (2006, p. 4).

A aplicabilidade de geotêxteis para o desaguamento de resíduos de diferentes origens vem ganhando notoriedade nos últimos anos, como uma tecnologia para a contenção da parcela sólida e a saída da parcela líquida, tendo-se como princípio a capacidade de desempenharem a função filtração, a partir de suas propriedades hidráulicas, promovendo concentração e confinamento dos sólidos (BUENO; VILAR, 2014; CANTRÉ; SAATHOFF, 2011; SATYAMURTHY; BHATIA, 2009; YEE; LAWSON, 2012).

De acordo com a norma ABNT NBR 10318:1, a função filtração refere-se à “restrição da passagem sem controle, de partículas do solo ou outro material, submetidas a forças hidrodinâmicas, permitindo a passagem do fluido em movimento pelo ou no interior de um geossintético” (ABNT NBR 10318-1:2018, p. 1), com primeiras aplicações na década de 50 (VERTEMATTI, 2015).

A função filtração é ilustrada na Figura 6 e deve ser considerada no dimensionamento de um sistema de confinamento de resíduos (URASHIMA *et al.*, 2019).

No tópico 2.5 é detalhada a separação sólido-líquido por distintas técnicas, sendo o foco desse trabalho apresentado no item 2.5.2.

Figura 6- Detalhe da função de filtração no geotêxtil que constitui o SCR.



Fonte: HUESKER (2020, p. 100).

2.5. Métodos para aumentar o teor de sólidos de resíduos de ETA

2.5.1. Métodos naturais e mecânicos

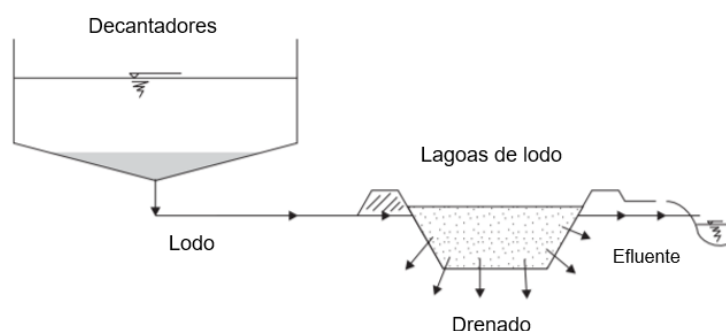
É importante conhecer as características do resíduo gerado na unidade, para viabilizar propostas de tecnologias que permitam a reciclagem e a exploração desses de forma viável, tanto do ponto de vista técnico, quanto econômico. Assim sendo, almeja-se uma gestão de resíduos de forma racional e sustentável durante o processo de potabilização da água, ou seja, a isenção do passivo ambiental pela reutilização do lodo, por exemplo, na construção civil (HOPPEN, *et al*, 2006; NOSSOL *et al*, 2007; PAIXÃO *et al*, 2008; SOUZA; ALMEIDA FILHO, 2017).

Existem alternativas para destinação de resíduos que exigem uma maior concentração de teor de sólidos dos resíduos gerados nas ETA, num nível que permita o transporte, por exemplo, para aterros sanitários e aproveitamento de subprodutos. Para isso, tecnologias de concentração de sólidos são necessárias, sendo estas cada vez mais testadas e estudadas, como o lançamento em lagoas, tanques ou leitos de secagem, a filtração à vácuo, filtros prensa, prensa desaguadora, centrífugas e os sistemas de confinamento de resíduos (SCR) (PROSAB, 1999).

O lançamento em lagoas (Figura 7) e tanques ou leitos de secagem (Figura 8) consistem num processo de decantação, percolação e evaporação para obter a concentração desejada. São alternativas que, não tendo área disponível, podem vir a

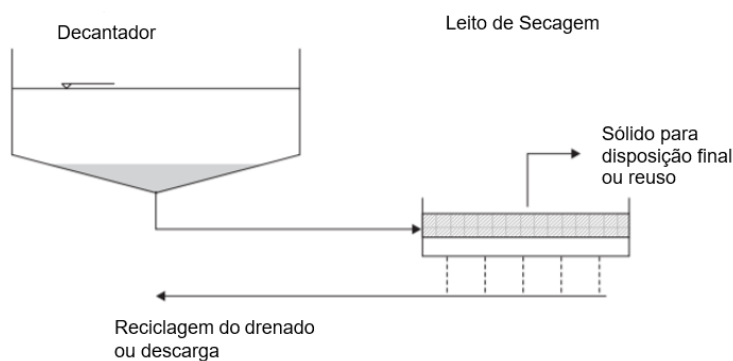
ser mais complexas, por requererem grandes áreas e planejamento da logística de limpeza. Outra questão que terá que ser resolvida nesse tipo de disposição é a torta de lodo sedimentada, que não poderá ser armazenada indefinidamente, devendo ser removida para outro local, ou seja, a destinação final está apenas sendo adiada (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2008; CORDEIRO, 1999).

Figura 7 - Esquema de Lagoa de lodo.



Fonte: CORDEIRO (1999, p. 139).

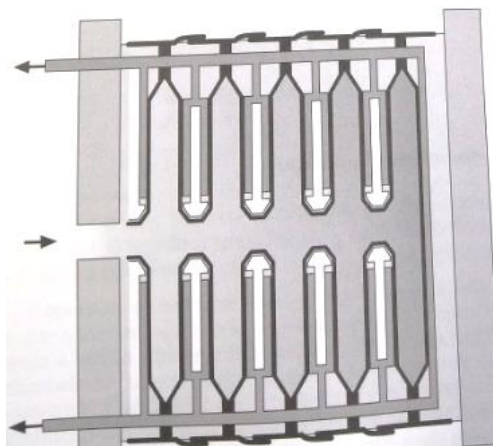
Figura 8 - Esquema de Leito de secagem.



Fonte: CORDEIRO (1999, p. 139).

O filtro a vácuo, filtro prensa (Figura 9) e a prensa desaguadora são aplicações do princípio de filtração, quando os sólidos são grandes o suficiente para serem retidos num meio ou superfície filtrante (CORDEIRO, 1999; RICHTER, 2001).

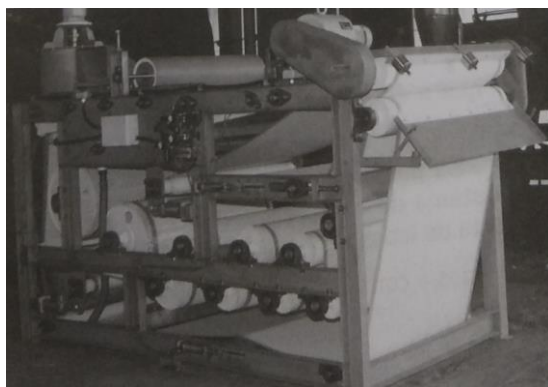
Figura 9 - Filtro prensa de câmara.



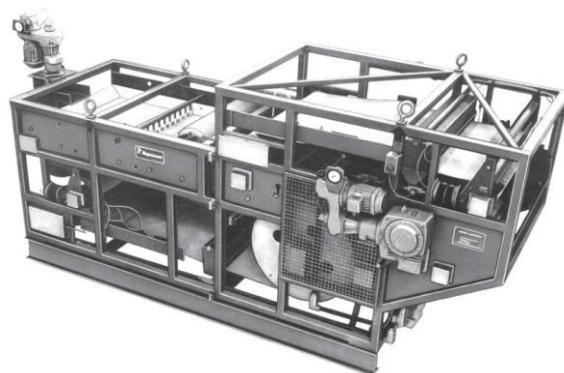
Fonte: RICHTER (2001, p. 55).

A prensa desaguadora (Figura 10) possui eficiência relacionada às características da suspensão e, apesar do custo relativo ser baixo, as correias podem rapidamente se deteriorar na presença de material abrasivo, mas é capaz de produzir tortas com consistência adequada para disposição ou destinação final (CORDEIRO, 1999; RICHTER, 2001).

Figura 10 - Prensa desaguadora



(a)

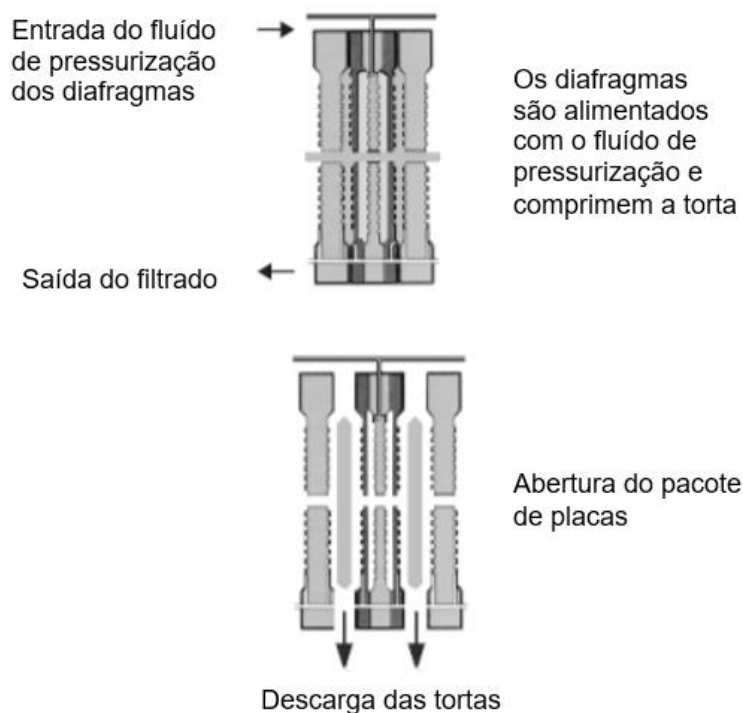


(b)

Fonte: (a) RICHTER (2001, p. 59); (b) CORDEIRO (1999, p. 118).

O filtro prensa (Figura 11) possui alto custo relativo, devido ao custo de operação e consumo de energia elétrica; além da troca do meio filtrante ser demorada e requerer a aplicação de cinza e cal para elevar o pH. Porém, produz torta com teor elevado de sólidos, possibilitando a disposição ou destinação final (CORDEIRO, 1999; RICHTER, 2001).

Figura 11 - Filtro prensa de diafragma

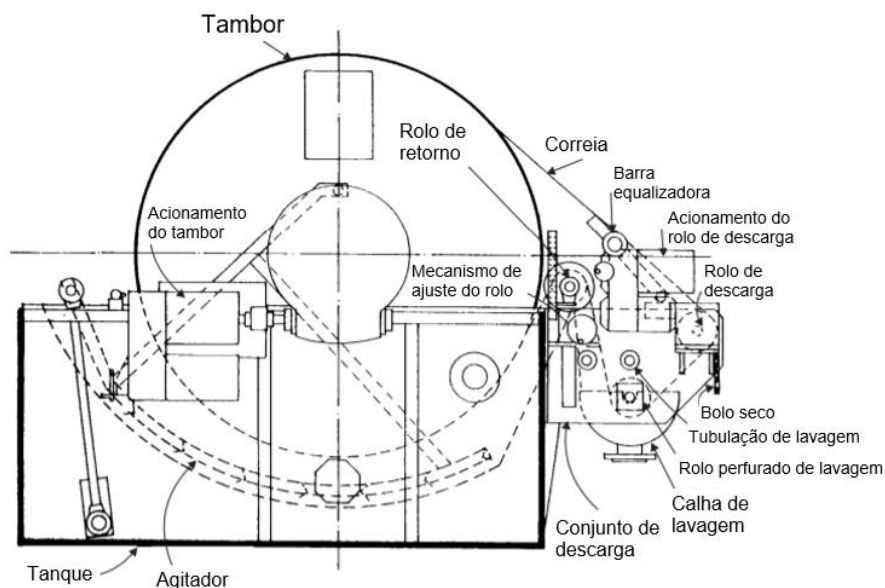


Fonte: CORDEIRO (1999, p. 114).

O filtro a vácuo (Figura 12) é a tecnologia mais cara, menos eficaz para essa finalidade e com alto consumo de energia elétrica. Não funciona tão bem com lodos leves como o de sulfato de alumínio, mesmo com acondicionamento. Os poros da tela são obstruídos rapidamente e o tecido do filtro não retém o lodo, assim é pouco utilizado em estações de tratamento de água (CORDEIRO, 1999; RICHTER, 2001).

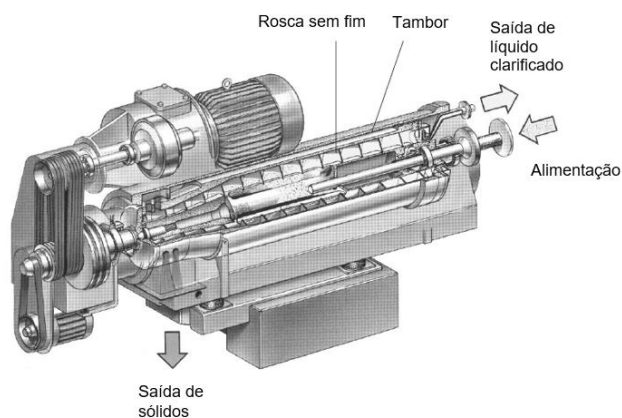
A centrifugação é a separação por sedimentação em um campo de forças, quando os sólidos são mais densos que o líquido que os contém e não é tão efetiva como a filtração (Figura 13). Possui custo relativo médio e o tambor está sujeito à abrasão (REALI; PATRIZZI; CORDEIRO, 1999; RICHTER, 2001).

Figura 12 - Filtro a vácuo



Fonte: CORDEIRO (1999, p. 121).

Figura 13 - Centrífuga decantadora com eixo horizontal



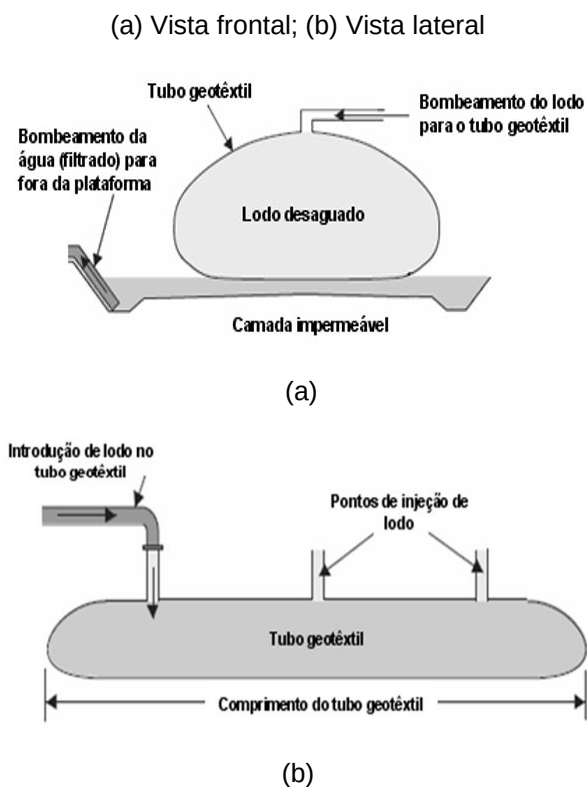
Fonte: REALI; PATRIZZI; CORDEIRO (1999, p. 93).

2.5.2. Sistemas de confinamento de resíduos com geossintéticos

Os sistemas de confinamento de resíduos (SCR) são sistemas contínuos, em forma de bolsa ou tubular, dependendo do dimensionamento (GRI-GT15, 2009; LAWSON, 2008), os quais contêm o resíduo em seu interior, podendo ser aplicados aos resíduos líquidos ou semissólidos (geralmente para desaguamento). No caso de resíduos semissólidos, o mais frequente é a utilização de um dispositivo de drenagem que facilite o desaguamento, retraindo o material particulado mesmo para resíduos

considerados de alta resistência à filtração (GUIMARÃES; URASHIMA; VIDAL, 2014). O confinamento do resíduo o isola do meio ambiente em todas as interfaces e reduz significativamente a infiltração da água de chuva, mesmo no caso de sistema permeável (IGS BRASIL REC04, 2016). A Figura 14 ilustra a aplicação de SCR.

Figura 14 - Aplicação de geossintéticos (geotêxtil) no desaguamento de resíduos de ETA



Fonte: LAWSON (2008), adaptada.

A tecnologia de desaguamento por meio de SCR empregando geotêxteis, sejam estes geotêxtil tecido, não tecido ou geocomposto, contanto que apresentem bom desempenho de filtração, tem sido amplamente utilizada nas últimas duas décadas para o desaguamento de resíduos com alto teor de água em relação ao teor de sólidos, tais como gerados em estações de tratamento de água e de esgotos sanitários, rejeitos de mineração e sedimentos industriais contaminados (CASTRO *et al.*, 2008; GUANAES *et al.*, 2009; MASTIN *et al.*, 2008; YANG *et al.*, 2019). O processo de desaguamento visa diminuir o volume da polpa desidratada, que ajuda no transporte e descarte ou, quando possível, a reutilização do material desidratado (KHACHAN; BHATIA, 2017).

A literatura ressalta algumas das vantagens do emprego de SCR, tais como: moldagem conforme o espaço disponível, possibilidade de empilhamentos, proteção contra às condições meteorológicas do local (KOERNER; KOERNER, 2006). Além disso, em comparação as técnicas tradicionais abordadas, apresentam outras vantagens, como facilidade de execução, baixos custos de implantação e manutenção, certa independência da eletricidade, dentre outros (CANTRÉ; SAATHOFF, 2011; GUIMARÃES; URASHIMA; VIDAL, 2014; MOO-YOUNG; GAFFNEY; MO, 2002; SATYAMURTHY; BHATIA, 2009).

Os processos de desaguamento ocorrem por meio de bombeamentos de resíduos em vários ciclos de enchimentos até se atingir a capacidade volumétrica dimensionada, que deve levar em consideração parâmetros dos resíduos e do geossintético empregado. Em termos de resíduos, enumera-se a constituição química, o teor de sólidos em relação ao teor de líquidos, os volumes gerados, a necessidade de condicionamento químico, dentre outros. Quanto ao elemento filtrante, vale destacar as propriedades hidráulicas e mecânicas, como abertura de filtração, permeabilidade, resistência à tração do geotêxtil e das emendas, condições ambientais de degradação, dentre outros (BUENO; VILAR, 2014; FOWLER *et al.*, 2002; LAWSON, 2008; LIAO; BHATIA, 2008; MOO-YOUNG; TUCKER, 2002).

Nos SCR durante os ciclos de enchimento e desaguamento vão se formando os *filter cakes*, camadas de material consolidado depositados na interface interna com o geotêxtil, como exemplificado na Figura 15.

Segundo Ardila (2020), *filter cake* é um tipo de colmatação por cegamento inerente ao desaguamento, que ocorre quando as partículas mais finas do material desaguado migram, segundo o processo de sufusão (movimento de partículas mais finas através dos poros da matriz de partículas mais grossas), em direção ao geotêxtil. Caso essas partículas não sejam pequenas o suficiente para passar através dos poros do geotêxtil, elas se agrupam formando uma fina camada na superfície interna do SCR.

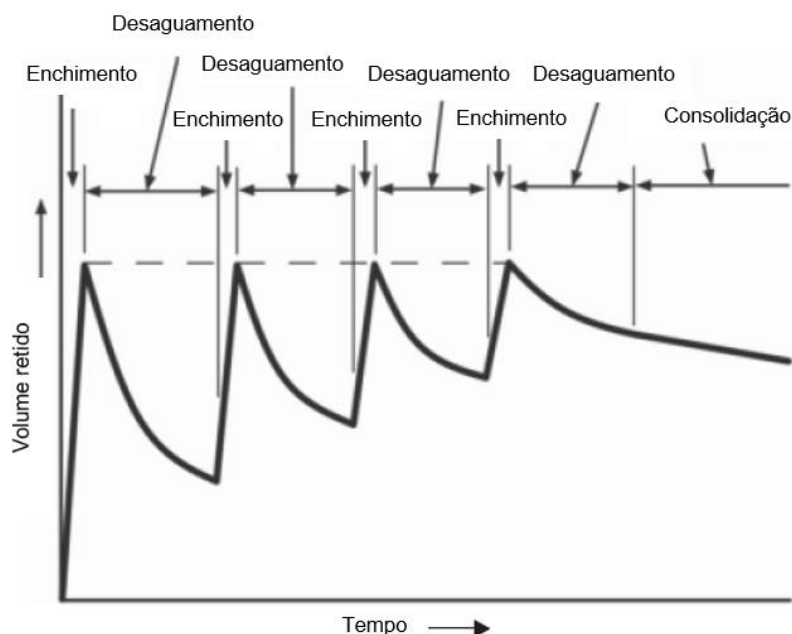
Figura 15 - Camada de *filter cake* formada durante processo de desaguamento com geotêxteis.



Fonte: GUANAES (2009, p. 54).

Foi reportado por Yee e Lawson (2012), que após o primeiro ciclo é formada uma camada que reduz a permeabilidade do sistema, passando a governar a filtração; no segundo ciclo de enchimento o *filter cake* é quebrado na parte superior, o que possibilita a saída de água e depois é formada nova camada; esse processo vai ocorrendo até a consolidação final sob peso próprio (Figura 16). Nesta etapa, a altura máxima só é atingida no primeiro ciclo de enchimento.

Figura 16 - Principais etapas de desaguamento em SCR.



Fonte: LAWSON (2008), adaptada.

Assim sendo, o processo de colmatção por *filter cake* influencia na retenção de sedimentos, tendendo a dificultar a saída de água do interior do SCR e, neste caso,

ocorrendo uma diminuição da vazão relacionada ao tempo. Guimarães, Urashima e Vidal (2014) realizaram ensaios onde o geotêxtil que apresentou melhor eficiência de filtração e mais rápida formação do *filter cake* foi aquele com menor abertura de filtração e permissividade.

2.6. Condicionamento químico

Comumente o sucesso de desaguamento de resíduos com alta resistência à filtração está associado a necessidade de sua polimerização, que constitui na adição de um polímero em concentração e dosagem tais que realizam a aglomeração das partículas sólidas em flocos e a separação da parcela líquida (GUANAES *et al.*, 2009; LAWSON, 2008).

O processo de condicionamento químico visa modificar propriedades (biológicas, físicas, químicas ou físico-químicas) de determinados fluídos (água bruta, resíduo de ETA, entre outros), sendo empregado para adequar suas características para determinado uso ou reuso. São classificados conforme sua carga elétrica em solução aquosa (catiônicos, aniônicos ou não-iônicos), seu peso molecular (baixo, médio, alto ou muito alto) e sua densidade de carga elétrica (baixa, média ou alta). Nas ETA servem para a remoção de partículas das águas no estado bruto e para o condicionamento de resíduos de forma a “quebrar” a resistência à filtração (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

O condicionamento químico de resíduos que passarão pelo processo de deságue em SCR pode ser realizado por polímeros que vão promover a formação de flocos, aumentando-se a taxa de desaguamento. Segundo Guanaes (2009), quando se adiciona algum tipo de polímero para condicionamento de resíduos de ETA, altera-se o estado de equilíbrio natural das frações de água em diferentes estados físicos, favorecendo a eficiência de remoção de água do resíduo.

Na seleção do polímero mais adequado é importante considerar também o geotêxtil a ser utilizado, ou seja, a combinação entre ambos. Uma das formas de fazer a interação, avaliando a sua eficácia, é por meio de ensaios de cone, nos quais é utilizada pequena quantidade representativa do resíduo e os polímeros que se quer testar em concentrações e dosagens distintas, para posterior tomada de decisão (SATYAMURTHY; BHATIA, 2009; SCALIONI; URASHIMA; GUIMARÃES, 2019).

A metodologia do ensaio de cone foi descrita por Miratech (2005) e Lawson (2006) e adaptada por Avancini (2017) na qual é colocada determinada quantidade do efluente (lodo), com ou sem polímero, sobre um corpo de prova circular de geossintético de cerca de 30 cm de diâmetro, em forma de cone, observando durante determinado tempo a quantidade e qualidade (ou limpidez) do efluente que será medida em um recipiente suporte, conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 - Ensaio de cone



Fonte: GUIMARÃES; URASHIMA; VIDAL (2014, p. 313).

O processo irá avaliar a porcentagem de material retido, a qualidade do filtrado que pode ser por turbidez, o tipo de geossintético e a dosagem do polímero (binômio geotêxtil escolhido x condicionante), averiguando a capacidade de filtração da solução (GUANAES, 2009; MÜLLER, 2018).

A concentração pode ser definida como a quantidade de polímero, em grama, que está diluído por litro de solução, normalmente expressa em percentual; e a dosagem é a quantidade de solução polimérica (condicionante químico) administrada por litro de resíduo a ser desaguado.

Vários podem ser os condicionantes químicos, sendo um destes a poliacrilamida, polímero orgânico formado apenas por monômeros de acrilamidas. Também denominado de Poliacrilamida Aniônica (PAM), é um agente floculante de peso molecular elevado, com média carga de polieletrólitos aniônicos baseados em acrilamida e acrilato de sódio. O referido polímero é caracterizado por ser um hidrogel utilizado no tratamento de efluentes aquosos depois de serem tratados previamente

com substâncias formadoras de hidróxidos. Deste modo, aumenta-se a densidade das partículas de impurezas suspensas na água para facilitar a sua decantação com a criação de pontes entre as partículas desestabilizadas, formando agregados em tamanho e propriedades adequados para sedimentação, como apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Poliacrilamida aniônica e desestabilização de partículas com sedimentação



Fonte: BLUWAT (2021).

2.7. Parâmetros para análise de eficiência de sistemas de desaguamento

Nos últimos anos, foram propostas na literatura de referência formulações para avaliação da eficiência dos sistemas de filtração e desaguamento por SCR, considerando-se parâmetros dos resíduos antes e após os processos de bombeamento, desaguamento e consolidação da parcela sólida desidratada, variação da turbidez do filtrado ao longo do tempo, dentre outros. Vários pesquisadores enfatizaram o efeito das propriedades retidas de sedimentos (torta de filtro) e do percolado, nos quais pode ser necessário usar testes de pequena escala ou plantas piloto (FONTANA, 2005; GUIMARÃES; URASHIMA; VIDAL, 2014).

A eficiência de filtração (EF), proposto por Moo-Young e Tucker (2002), é a relação entre o valor de sólidos totais no lodo antes do desaguamento e sólidos totais no filtrado após a filtração e, portanto, relacionado à capacidade do SCR na retenção de sólidos em conjunto a retirada da parcela líquida do lodo (Equação 1).

$$EF = \frac{TS_{\text{inicial}} - TS_{\text{final}}}{TS_{\text{inicial}}} \times 100 \% \quad (1)$$

Sendo,

EF = Eficiência de filtração, %;

TS_{inicial} = Sólidos totais iniciais, mg/L;

TS_{final} = Sólidos totais finais no filtrado, mg/L (percolado final).

A eficiência de desaguamento (ED), parâmetro apresentado por Moo-Young, Gaffney e Mo (2002), refere-se ao percentual de sólidos totais do lodo antes e após o processo de deságue (Equação 2).

$$ED = \frac{PS_{\text{final}} - PS_{\text{inicial}}}{PS_{\text{final}}} \times 100 \% \quad (2)$$

Sendo,

ED = Eficiência de desaguamento, %;

PS_{inicial} = Percentual de sólidos iniciais, %;

PS_{final} = Percentual de sólidos final, %.

A eficiência de infiltração (EI) é o parâmetro proposto a partir da relação entre o teor de umidade do resíduo antes e após a finalização do deságue (MUTHUKUMARAN; ILAMPARUTHI, 2006), apresentado na Equação 3.

$$EI = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \% \quad (3)$$

Sendo,

EI = Eficiência de infiltração, %;

W_i = Teor de umidade inicial do lodo, %;

W_f = Teor de umidade final do lodo, %.

A perda de partículas (PP), análise apresentada por Satyamurthy e Bhatia (2009), refere-se à capacidade de retenção do filtro pela massa de sólidos suspensos totais

passantes através do geotêxtil, durante o tempo, pela área efetiva do sistema de desaguamento, definida pela Equação 4.

$$PP = \frac{TSS_{final}}{A} \times 100 \% \quad (4)$$

Sendo,

PP = Perda de partículas, g/m²;

TSS_{final} = Totais de sólido suspensos final, g;

A = Área efetiva de geotêxtil no desaguamento, m².

Para a determinação de parâmetros relacionados ao teor de sólidos e teor de umidade para emprego das fórmulas supracitadas, a ABNT NBR 6457 (2016) estabelece a metodologia de determinação do teor de umidade do solo, ou seja, o método da estufa, que possui boa precisão e simples determinação, ao comparar a massa da amostra no estado natural com a massa após secagem completa em estufa. O teor de umidade, conforme preconiza a ABNT NBR 6457 (2016), é obtido pela divisão da massa de água contida na amostra de solo (resíduo) pela massa seca das partículas sólidas de solo (resíduo), cujo resultado é expresso em porcentagem. Também, se pode obter o teor de sólidos, ou seja, massa seca das partículas sólidas de solo (resíduo) pela massa total de solo (resíduo), sendo este valor também expresso em porcentagem.

Outra forma de obtenção do teor de umidade é por meio de balanças determinadoras de umidade. A amostra é aquecida por sensores infravermelhos ou lâmpadas de halogênio e a variação da massa, de acordo com a quantidade de água evaporada, é medida por meio da balança. A energia eletromagnética é transformada em energia cinética com liberação de energia térmica no princípio do aquecimento por radiação infravermelha, fornecendo-se calor suficiente para a liberação das moléculas de água. Dessa forma, as balanças determinadoras de umidade podem ser úteis tendo em vista a agilidade na obtenção de dados em contraste com a transferência de calor por convecção, em comparação a secagem em estufa (BORGES *et al.*, 2005). Este sistema de determinação de umidade é usado na ETA em estudo.

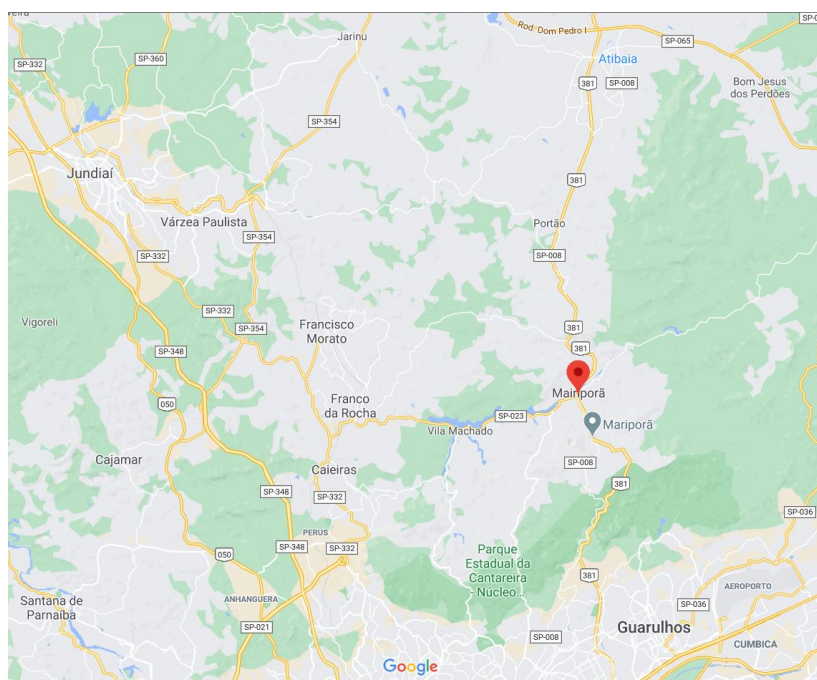
3. METODOLOGIA

3.1. Delimitação da área de estudo

Este trabalho de pesquisa delimitou-se em analisar dados da ETA Convencional do município de Mairiporã no estado de São Paulo, operada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, pessoa jurídica de direito privado e empresa concessionária do serviço público de saneamento básico, doravante designada pela sigla SABESP, a qual permitiu o estudo de caso.

O município de Mairiporã é uma das cidades do Extremo Norte da Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, distante trinta e cinco quilômetros da Capital, cortado pela Rodovia Federal Fernão Dias (BR-381), situado às margens da Represa Paiva Castro (Figura 19). A região possui núcleos urbanos com uso e ocupação do solo com variadas densidades de ocupação e localizados de forma heterogênea.

Figura 19 - Localização do município de Mairiporã (SP)

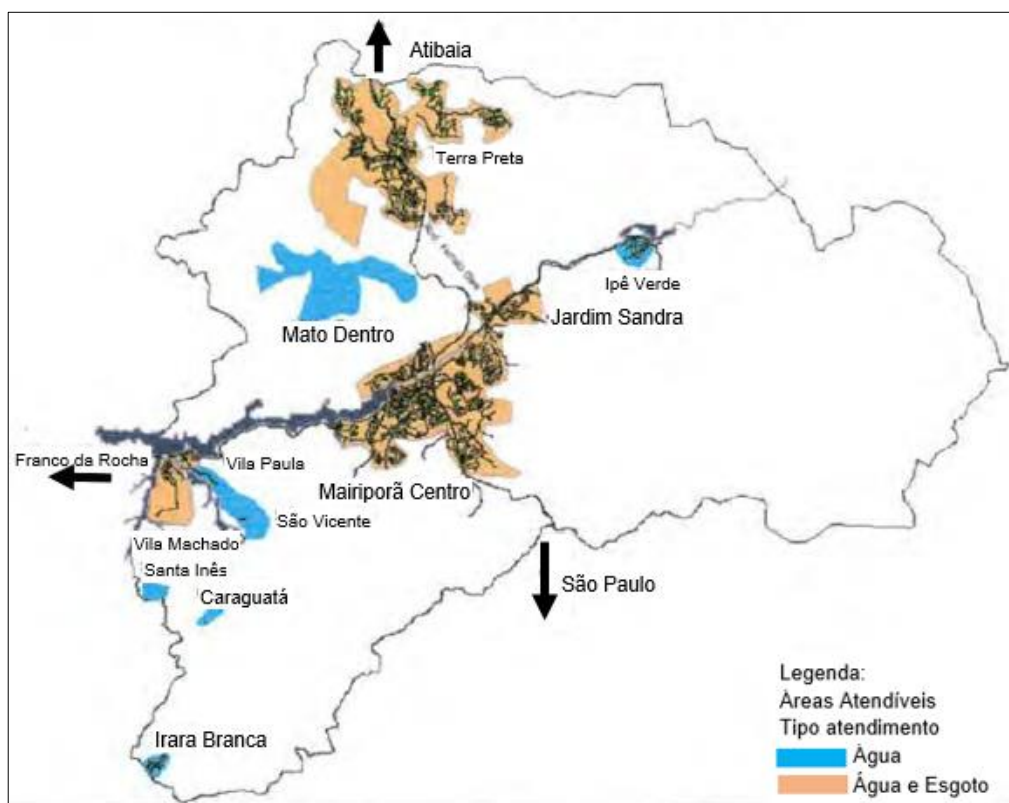


Fonte: GOOGLE EARTH (2021).

Em 03 de julho de 2014, foi assinado convênio entre município de Mairiporã e a SABESP, com intuito de traçar um Plano de Investimento para o município. O referido convênio visou o atendimento das demandas municipais (Figura 20) com base nos cenários futuros de crescimento populacional para os próximos trinta anos, o

equacionamento dos problemas já existentes e daqueles previstos nos horizontes de curto, médio e longo prazo (SABESP, 2014).

Figura 20 - Densidade de ocupação de Mairiporã com sinalização de áreas servidas

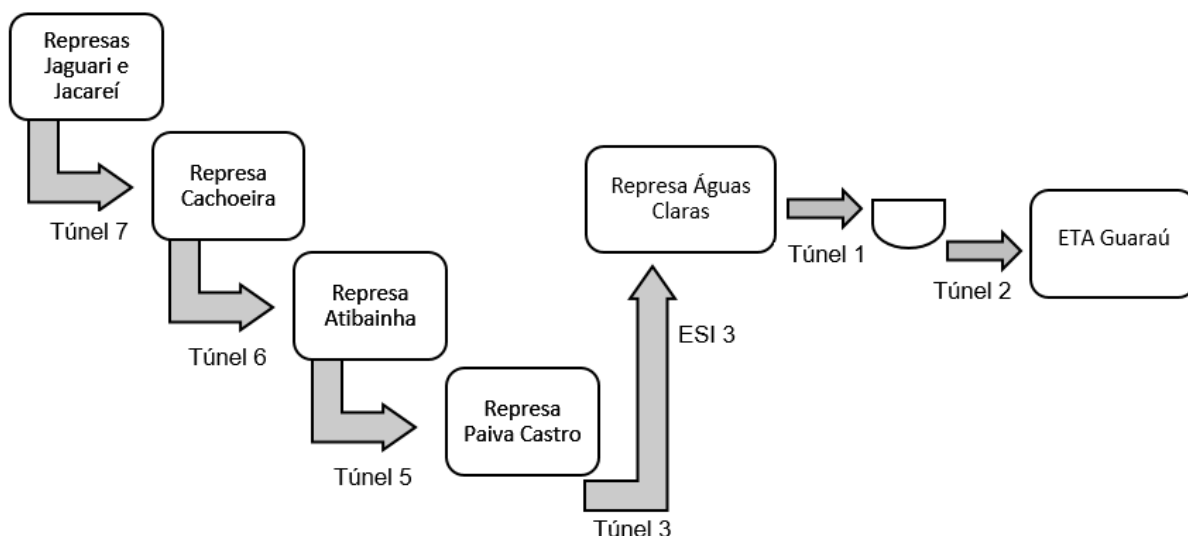


Fonte: SABESP (2014), adaptada.

Atualmente, o sistema de abastecimento de água do município de Mairiporã apresenta captações superficiais na Represa do Complexo da Cantareira (Figura 21), neste caso, na Represa Paiva Castro, bem como captações subterrâneas (poços profundos).

A cidade de Mairiporã possui duas ETA para atender ao município, sendo uma destinada ao abastecimento da maior parte do município e outra localizada no Distrito Industrial, bairro Terra Preta. Ressalta-se que uma nova ETA está em fase final de construção, a qual deverá entrar em funcionamento no primeiro semestre de 2021, possibilitando a desativação da primeira supracitada.

Figura 21 - Sistema Cantareira



Fonte: SABESP (2018), adaptada.

A ETA que abastece a maior parte do município e que está para ser desativada é localizada na Rua Fernão Lopes, nº 97 e possui capacidade atual de tratamento de 390 m³/h ou 108,33 L/s (Figura 22). Foi objeto de estudo desta pesquisa, a qual será designada como ETA-M.

Figura 22 - Portão de acesso para a Estação de Tratamento de Água de Mairiporã

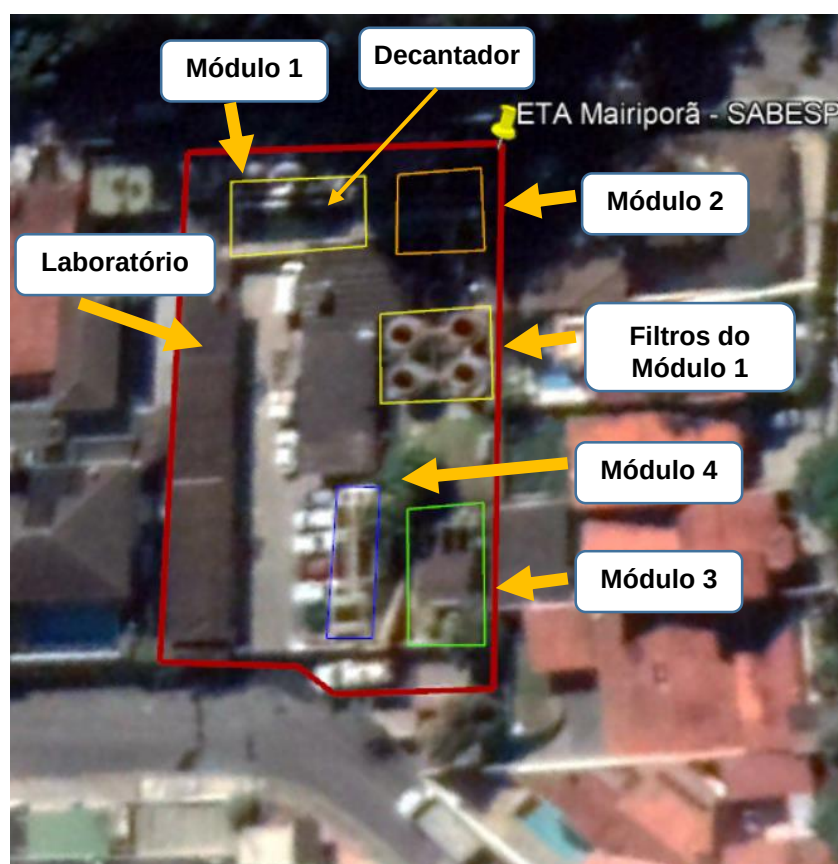


Fonte: DA AUTORA (2020).

A água bruta tratada na ETA-M é captada na Represa Paiva Castro. Todo o entorno da área da ETA-M está urbanizado e ocupado com residências, não permitindo a ampliação da capacidade de tratamento de água e a implantação de dispositivos convencionais para o tratamento dos resíduos gerados no processo.

A ETA-M (Figura 23) constitui-se de três módulos compactos de tratamento convencional e um quarto módulo do tipo flotação. A mistura rápida e coagulação iniciam na própria adutora de água bruta, por meio da aplicação de sulfato férrico. Após adição deste produto, a água é derivada em duas adutoras e segue para as unidades de clarificação, uma que alimenta os Módulos 1 e 2, mais antigos, e outra que alimenta os mais novos, Módulos 3 e 4.

Figura 23 - Área da ETA-M de Mairiporã e Módulos de Tratamento



Fonte: GOOGLE EARTH (2021), adaptada.

Os tópicos a seguir detalham as instalações da ETA em estudo (Figura 23):

- No **Módulo 1**, do tipo compacto, a água passa por chicanas fixas, na qual ocorre a floculação e em seguida é conduzida ao decantador. A água decantada é filtrada em quatro filtros cilíndricos descendentes. Parte da água decantada é revertida ao Módulo 2.
- No **Módulo 2**, do tipo compacto, o volume de água vai para o misturador dotado de pás acionado por motor elétrico, no qual ocorre a floculação, que em seguida

flui para o decantador do tipo colmeia, no qual ocorre a decantação. A água decantada é filtrada em dois filtros descendentes.

- O **Módulo 3** é do tipo compacto, no qual tem a unidade de clarificação operando por flotação com ar dissolvido, seguida de dois filtros descendentes.
- No **Módulo 4**, a clarificação ocorre por floculação e decantação com decantador tipo colmeia. A filtração é realizada em 2 (dois) filtros descendentes.
- A desinfecção começa a ocorrer na entrada (pré-tratamento) e no sistema de desinfecção das águas filtradas (pós-tratamento) dos diferente módulos, num mesmo canal de água final.

Os produtos químicos utilizados na potabilização da água bruta na ETA-M são:

- Coagulação com sulfato férrico;
- Ajuste de pH com carbonato de sódio (barrilha);
- Desinfecção com cloro gás;
- Fluoretação com ácido fluossilícico.

A unidade objeto desse estudo é o **Módulo 1** da ETA-M que possui vazão nominal de 130 m³/h ou 36,11 L/s. Na Figura 24 são visualizadas as chicanas fixas para floculação durante o fluxo da água ainda bruta e, lateralmente a estas, o decantador.

Figura 24 - Chicanas fixas recebendo água bruta com sulfato ferro, decantador



Fonte: DA AUTORA (2020).

O decantador possui capacidade máxima para 330 m³, devido à quantidade de sólidos, cujo teor de sólido na sua capacidade total estava em torno de 1 %, foi necessária sua limpeza total, ou seja, do volume total comportado pelo mesmo.

3.2. Parâmetros do resíduo do decantador da ETA-M

As características físico-químicas e os parâmetros químicos do resíduo do decantador, também denominado de lodo, foram fornecidas pela SABESP, tais como alumínio, cádmio, chumbo, cobre, ferro, fósforo total, níquel, nitrogênio amoniacal, óleos e graxas, pH, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos totais, sólidos totais (fixos e voláteis), sulfato, sulfeto e temperatura, apresentados na Tabela 2. A metodologia para cada análise é descrita no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (AWWA/APHA/WEF, 1998).

Tabela 2 - Características físico-químicas do efluente do decantador

Parâmetro	[CAS] ¹	Unidade	Resultados	Incerteza Expandida	LQ ²	Método ³
Alumínio	[7429-90-5]	mg Al/L	667	43,4000	0,5600	SM22 3120 B
Cádmio	[7440-43-9]	mg Cd/L	0,0071	0,0009	0,0056	SM22 3120 B
Chumbo	[7439-92-1]	mg Pb/L	0,24	0,0220	0,0056	SM22 3120 B
Cobre	[7440-50-8]	mg Cu/L	1,58	0,1500	0,0056	SM22 3120 B
Ferro	[7439-89-6]	mg Fe/L	111	11,6000	0,0056	SM22 3120 B
Fósforo Total	[7723-14-0]	mg P/L	5,74	0,5800	0,0056	SM22 3120 B
Níquel	[7440-02-0]	mg Ni/L	0,017	0,0016	0,0056	SM22 3120 B
Nitrogênio Amoniacal	[7664-41-7]	mg NH ₃ /L	1,93	0,0440	0,0600	SM22 4500-NH ₃ E
Óleos e Graxas		mg/L	2,71	0,0270	0,8500	SM22 5520 B
pH			8,1	0,0309	0-14	SM22 4500-H B
Sólidos Sedimentáveis		mg/L	950	9,5000	0,1000	SM22 2540 F
Sólidos Suspensos Totais		mg/L	9295	279,0000	2,0000	SM22 2540 D
Sólidos Totais		mg/L	9560	287,0000	5,0000	SM22 2540 B
Sólidos Totais Fixos		mg/L	6175	ND	5,0000	SM22 2540 C
Sólidos Totais Voláteis		mg/L	3385	ND	5,0000	SM22 2540 C
Sulfato	[14808-79-8]	mg SO ₄ /L	9,6	1,8900	1,0000	SM22 4500-SO ₄ E
Sulfeto	[18496-25-8]	mg S ₂ -/L	<0,005	0,0000	0,0050	SM22 4500-S ₂ - D
Temperatura		°C	26	0,6000		SM22 2550 B
Zinco	[7440-66-6]	mg Zn/L	0,22	0,0200	0,0056	SM22 3120 B

Legenda: ¹CAS - registro de um composto químico no banco de dados do Chemical Abstracts Service; ²LQ - Limite de Quantificação; ³Método empregado do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*.

Fonte: SABESP (2020), adaptada.

3.3. Sistema de confinamento de resíduos empregado na ETA-M

Devido à falta de espaço disponível na ETA em estudo, para diminuição do volume de lodo a ser disposto, optou-se por um dispositivo de sistema de confinamento de resíduos inovador, ou seja, um SCR móvel.

O SCR móvel completo inclui a central de condicionamento e é patenteado pela SALUS Engenharia em Deságue no INPI (BR 202020009781-0). Este sistema é constituído de caçamba do tipo *roll on roll of* adaptada para essa finalidade, com capacidade de 21,84 m³, sendo 6,5 metros de comprimento e 2,4 metros de largura e profundidade de 1,4 metros. O fundo da caçamba possui espaçadores internos (georredes) para drenagem do líquido desaguado e inclinação que permite a coleta e saída do percolado.

No estudo de viabilidade realizado pela Empresa SALUS Ltda foi calculado o número de sistemas de contenção de resíduos que seriam necessários, conforme as primícias do Quadro 1, chegando a um geotêxtil de 12 m³.

Quadro 1 - Planilha de cálculo do número de SCR

DESAGUAMENTO EM SCR - TRATAMENTO DE LODOS - ETA Mairiporã			
Parâmetros básicos - LODO ETA		Parâmetros básicos - LODO ETA	
Teor de sólidos do lodo, em peso (%)	1,00	Resistência Geotêxtil à tração (kN/m)	105,00
Densidade do lodo (g/L)	*1004,00	Perímetro da seção transversal (m)	7,00
Teor de sólidos da torta gerada, em peso (%)	25,00	Altura máxima pode ser atingida (m)	1,10
Densidade da torta (g/L)	*1115,00	Largura (m)	2,40
Volume total do lodo a ser dessecado (m ³)	330,00	Largura da base de apoio (m)	2,40
Peso de sólidos da torta (g/L)	*279,00	Seção transversal dessecada (m ²)	2,00
Volume de sólidos na torta (L/L)	*0,16	Comprimento total do SCR	*5,95
Densidade seca dos sólidos (g/L)	1700,00	Comprimento unitário do módulo adotado (m)	6,00
Volume total de torta produzida (m ³)	*11,89	Número de módulos necessários	*0,99

OBS: Os dados precedidos de (*) foram obtidos por meio de cálculos e os demais são requeridos para o cálculo.

Fonte: SALUS LTDA (2020).

Como informações de dimensionamento, a empresa analisou o teor de sólidos inicial do lodo e aquele teor ao qual se desejava alcançar e suas respectivas densidades. Ainda, considerando o tamanho do SCR, determinam-se quantas

unidades de SCR a serem utilizadas, no caso em estudo chegou-se a apenas uma única unidade.

A Figura 25 apresenta o SCR móvel, ao lado da central de condicionamento e ao fundo o decantador. Para retirada do lodo do decantador foi empregada uma bomba helicoidal, conforme ilustra a Figura 26.

Figura 25 - SCR móvel, central de condicionamento químico e decantador



Fonte: DA AUTORA (2020).

Figura 26 - Bomba helicoidal e tubulações de sucção e recalque



Fonte: DA AUTORA (2020).

Na Figura 26 a tubulação de cor alaranjada faz a sucção do material e a de cor azul o recalque do lodo até o Sistema de Confinamento de Resíduos (SRC).

O SCR foi instalado em 16/09/2020 e retirado em 30/11/2020, perfazendo um período de deságue de 45 dias. A Figura 27 apresenta o lodo e percolado após os primeiros desaguamentos.

Figura 27 - (a) Lodo do decantador, (b) percolado após os primeiros desaguamentos



Fonte: (a) DA AUTORA (2020); (b) SABESP (2020).

Para o condicionamento químico, a fim de viabilizar a retenção de sólidos constituintes do lodo e o deságue do mesmo, incrementando o teor de sólidos e minimizando os impactos de sua disposição, foi empregado o polímero orgânico à base de poliacrilamida em pó, sendo preparado na concentração de 1 g/L e dosagem de 36 L/minutos (NTS 233, 2020). A Figura 28 apresenta a central de condicionamento químico da empresa SALUS Engenharia em Deságue.

Figura 28 - Central de condicionamento químico



Fonte: DA AUTORA (2020).

Para a confecção do sistema de contenção de resíduos foi empregado geotêxtil tecido de polipropileno de alta tenacidade e com aditivo para proteção contra radiação do tipo ultravioleta (UV), apresentando um bocal de enchimento com 0,30 m de diâmetro, com costuras circunferenciais. A função principal do geotêxtil que compõe o sistema é confinar as partículas sólidas de forma provisória ou permanente e permitir a passagem de fluído de dentro para fora, por meio de ciclos de enchimento e deságue. A Tabela 3 apresenta as propriedades do geotêxtil empregado no SCR em estudo e fornecidas pela empresa responsável pela confecção dos SCR.

Tabela 3 - Propriedades do geotêxtil do SCR em estudo

Propriedades	Norma	Valores	Unidades
Massa por unidade de área	ISO 9864	≥ 440	g/cm ²
Resistência à tração nominal direção longitudinal	ISO 10319	105	kN/m
Resistência à tração nominal direção transversal	ISO 10319	105	kN/m
Deformação na resistência nominal direção longitudinal	ISO 10319	≤ 10	%
Deformação na resistência nominal direção transversal	ISO 10.319	≤ 10	%
Abertura de filtração (O_{90})	ISO 12.956	240 ± 40	μm
Permeabilidade	ISO 11.058	$20 \times 10^{-3} \pm 2 \times 10^{-3}$	m/s

Fonte: FABRICANTE (2021).

O sistema recebeu lodo adensado do decantador com vazão de entrada de 12m³/h e com enchimentos de uma hora, seguidos de período de descanso para desague de vinte e três horas, diariamente, até a data da retirada, ou seja, por quarenta e cinco dias.

As costuras circunferenciais (bocal) e inferiores do SCR são do tipo sêxtupla, sobrepostas e realizadas com linha de alta tenacidade. Nas extremidades, as costuras empregadas no SCR são do tipo *Prayer*, com seis linhas de poliéster de alta tenacidade e costura de reforço. O bocal de enchimento apresenta um geotêxtil do tipo não tecido para evitar fuga de material pela costura que apresenta 0,30 m de diâmetro, conforme ilustra a Figura 29.

No dia da instalação do SCR os testes de turbidez no lodo apresentaram resultados médios de 9 NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez) do percolado, no início do enchimento, entretanto, após cinco minutos novos testes de turbidez indicaram valor médio de 2 NTU.

Figura 29 - Bocal de enchimento do SCR



Fonte: DA AUTORA (2020).

Durante o período de enchimento/desaguamento do lodo, em alguns dias foram realizadas medidas de desempenho do SCR, por servidores da SABESP, com determinação de turbidez e pH do percolado saindo do sistema, no início e no final de cada ciclo de enchimento. Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos na medição desses parâmetros, no enchimento e desaguamento do lodo no período de 07 de outubro de 2020 a 22 de outubro de 2020.

No dia 30/11/2020 foi realizada a retirada do SCR da ETA-M, quando foi realizada a visita técnica no local para acompanhamento da exumação do SCR e coleta de dados para análises.

Tabela 4 – Enchimento do SCR – ETA Mairiporã

Data	Hora amostragem	1º Amostra		Hora amostragem	2º Amostra	
		Turbidez (NTU)	pH		Turbidez (NTU)	pH
07/10/2020	10:45	4,1	6,5	11:20	1,7	6,6
08/10/2020	10:25	4,3	7,0	11:00	2,0	6,5
09/10/2020	08:40	4,7	6,8	09:00	2,8	6,7
14/10/2020	10:20	5,5	6,4	11:20	4,3	6,6
15/10/2020	10:00	6,0	6,4	10:35	3,8	6,5
16/10/2020	09:10	10,8	6,4	10:20	2,8	6,5
19/10/2020	06:25	12,9	6,5	07:05	4,6	6,6
20/10/2020	06:15	8,6	6,5	06:50	4,3	6,6
21/10/2020	06:20	7,6	6,6	07:40	4,0	6,5
22/10/2020	07:00	6,8	6,4	07:45	3,7	6,5

Fonte: SABESP (2020).

3.3.1. Exumação do SCR

A exumação do SCR ocorreu após 45 dias da instalação do SCR, sendo realizada uma abertura na parte superior do sistema, com objetivo de verificar a situação do material sólido e coletar amostras para as análises. A Figura 30 apresenta o sistema sendo exumado e a realização de coleta de amostra para a análise dos teores de umidade e de sólidos.

Figura 30 - Amostras de lodo desaguado coletadas em cápsulas.



Fonte: DA AUTORA (2020).

A Figura 31 apresenta o interior do SCR da camada mais externa, equivalente ao último ciclo de desaguamento para as camadas mais internas, onde foram retiradas amostras para determinação tanto do teor de sólidos como teor de umidade.

Figura 31 - SCR aberto. Visualização do interior do SCR (a) camada mais externa e (b) camadas mais internas



(a)



(b)

Fonte: DA AUTORA (2020).

Imediatamente após a exumação foi utilizado o analisador de umidade por infravermelho IV2500 do laboratório da ETA (Figura, 32) para a verificação prévia do teor de umidade da amostra de lodo desaguado *in loco*.

Figura 32 - Balança usada para medir o teor de umidade do lodo *in loco*.



Fonte: DA AUTORA (2020).

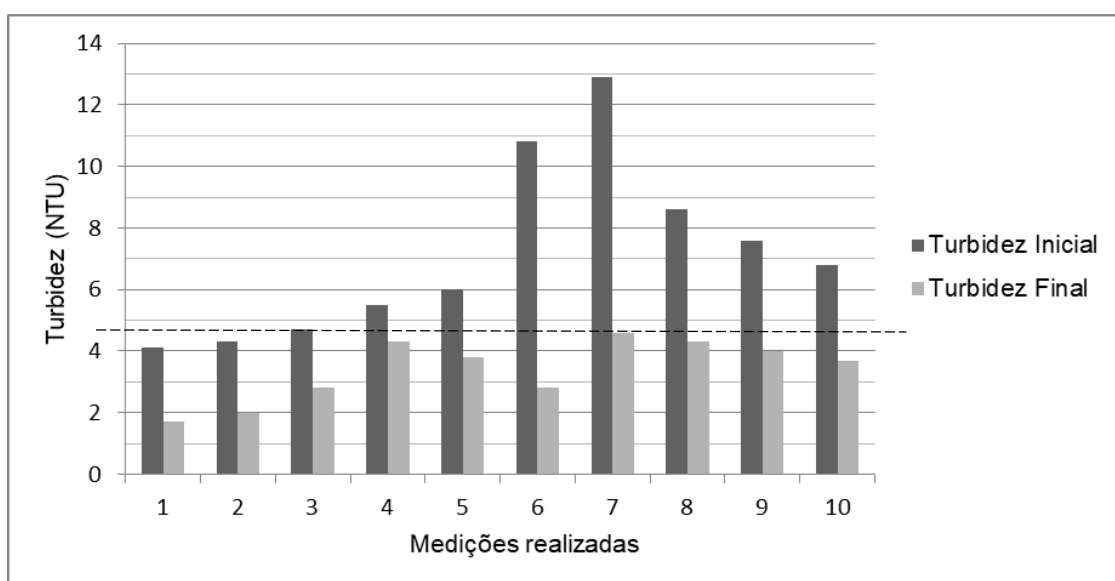
Posteriormente, as amostras de lodo foram coletadas do SCR, em três distintos extratos (camadas), equivalentes aos três últimos ciclos de desaguamento, respectivamente. As amostras foram extraídas e colocadas em cápsulas e levadas para estufa numa temperatura média de 110°C, por 24h, para determinação do teor de umidade e teor de sólidos, conforme ABNT NBR 6457 (2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise de Turbidez e pH nos ciclos de enchimento

A Figura 33 apresenta o gráfico de turbidez, cujos valores foram obtidos da Tabela 4, permitindo uma comparação dos valores obtidos entre o início e o final de dez ciclos de enchimentos do SCR.

Figura 33 - Medições da turbidez realizadas no início e final de ciclos de enchimento.

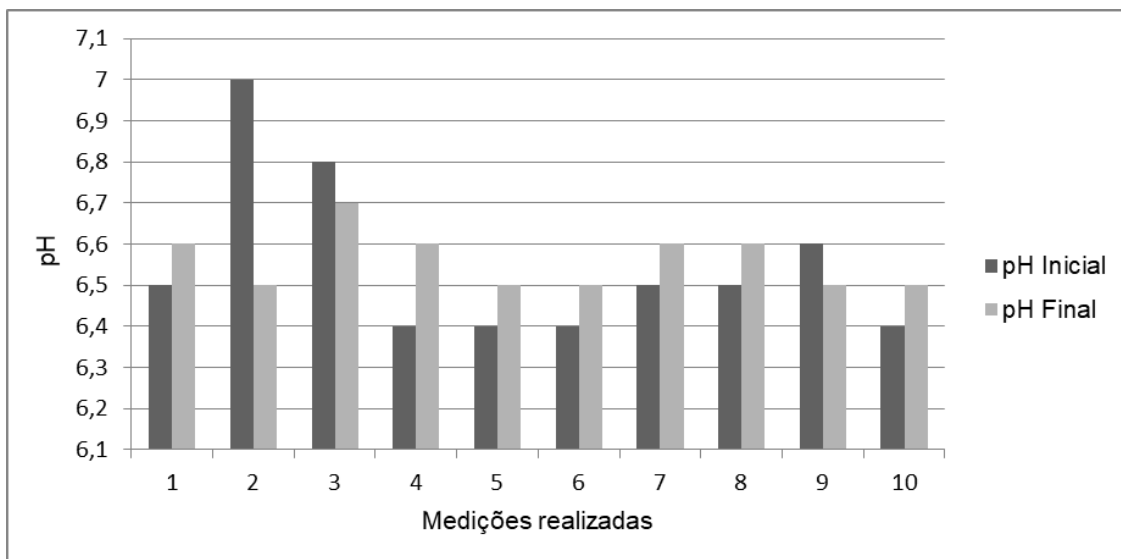


Fonte: DA AUTORA (2021).

Os resultados apontam que a turbidez diminui entre o início e final de cada ciclo de enchimento de forma sistemática, provavelmente devido aos particulados retidos no ciclo de desaguamento que antecede o que está em análise. Observa-se que no início do ciclo de desaguamento é alcançada uma média amostral de 7,1 NTU, enquanto no final do ciclo de 3,4 NTU, dando uma média entre início e final de enchimento do SCR de 5,2 NTU, conforme indicado pela linha tracejada no gráfico (Figura 33).

Os valores de pH, no mesmo período e condições de análise da turbidez, são apresentados graficamente na Figura 34, que permite visualizar que o pH das amostras não variou de maneira significativa, quando comparado à turbidez, entre os ciclos de enchimentos avaliados, mantendo uma média de 6,6, próximo ao pH neutro.

Figura 34 - Medições do pH realizadas no início e final de ciclos de enchimento.



Fonte: DA AUTORA (2021).

4.2. Análise de Eficiência do SCR

Obteve-se para o lodo desaguado, por meio do analisador de umidade por infravermelho IV2500 do laboratório da ETA, o teor de umidade de 30,9%.

A Tabela 5 apresenta os resultados de teor de umidade pelo método da estufa.

Tabela 5 - Teor de umidade pelo método da estufa

Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Teor Umidade (%)	48,10	34,85	28,22	14,71	38,24	30,77	28,93	26,53	17,44
Teor de Umidade médio (%)		37,06			27,91			24,30	

Fonte: DA AUTORA (2021)

Aplicando o método da estufa nas camadas exumadas, o teor de umidade na camada mais interna foi de 37,06%, 27,91% na camada intermediária e 24,30% na camada mais externa, exumadas. Fato que pode ser explicado pela camada mais externa ficar mais susceptível à evaporação. O teor de umidade médio foi de 29,75%.

Pode-se observar que ambos os processos de determinação do teor de umidade (estufa e infravermelho) apresentaram valores similares, ou seja, aproximadamente 30% de teor de umidade na média entre os extratos avaliados.

Para avaliar a eficiência do SCR empregado no estudo de caso, foram calculados os teores de sólidos apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Teor de sólidos em amostras de lodo da primeira, segunda e terceira camadas.

Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Teor de sólidos (%)	17,76	18,11	18,85	14,79	15,60	15,45	13,62	12,45	12,21
Teor de sólidos médio (%)	18,24			15,28			12,76		

Fonte: DA AUTORA (2021).

O teor de sólidos na camada mais interna foi de 12,76%, na camada intermediária foi de 15,28% e na camada mais externa de 18,24%. O teor médio utilizado nos cálculos desse trabalho será o da camada mais externa, de 18,24 %, pois não foi possível deixar o SCR por mais tempo sujeito às intempéries, como é recomendado na literatura.

O teor de sólidos por litro de percolado do SCR foi calculado após a secagem de um litro, em estufa à 110° Celsius, chegando-se a 0,13 gramas de sólidos por litro. Já o lodo do decantador apresentou 10 gramas de sólidos por litro de lodo.

Assim sendo, determinou-se que a Eficiência de Filtração (Equação 1) do SCR em 98,7%. A Eficiência de Desaguamento (Equação 2), empregando-se o teor de sólidos médio do lodo desaguado como 18,24% e o teor de sólidos inicial no lodo igual a 1%, alcançou-se o valor de 94,5%.

A Perda de Partículas (Equação 4) não foi calculada, pois não houve possibilidade de coletar todo o percolado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Considerações finais

As Estações de Tratamento de Água são unidades que precisam funcionar continuamente. No Brasil, infelizmente, grande percentual das ETA funcionaram por décadas, sem conformação às novas legislações para disposição e destinação adequadas dos resíduos gerados no processo de potabilização da água. Consequentemente, foram geradas quantidades de resíduos, que impactaram de forma imensurável o meio ambiente e, assim continuarão, se alternativas tecnológicas não forem adotadas.

Paralelamente, várias destas ETA por possuírem projetos de décadas, atualmente, têm seus arredores totalmente urbanizados, sem espaço para implantação de sistemas mais complexos para uma gestão sustentável.

Os Sistemas de Confinamento de Resíduos empregando geotêxteis se apresentam como alternativa ao processo de desaguamento de resíduos gerados em ETA, principalmente para os lodos de decantadores, que possuem maior concentração de sólidos do que as águas de lavagem dos filtros. Assim sendo, a referida técnica possibilita a diminuição do volume destes resíduos, possibilitando sua disposição final de forma adequada.

O sistema inovador de SRC móvel, apresentado nesse trabalho, vem como uma possível resposta ao atual desafio deparado aos responsáveis pelos sistemas de tratamento de água, principalmente naqueles que possuem pequenas áreas disponíveis aos arredores; de forma que os SCR móveis possam contribuir na resolução da problemática enfrentada com relação à indisponibilidade de área, situação comumente encontrada na maioria das ETA urbanas, cercadas de edificações.

Este trabalho de conclusão de curso buscou apresentar a problemática dos resíduos gerados nas ETA, as formas mais comuns de tratamento e os sistemas de confinamento de resíduos em geotêxteis, que cada vez mais vêm sendo utilizados e, assim, agregar e difundir acerca de novas tecnologias que visam mitigar os impactos gerados na potabilização da água.

O SCR empregado no estudo de caso apresentou valores de Eficiências de Filtração e de Desaguamento de 98,7% e 94,5 %, respectivamente, mostrando ser uma tecnologia promissora, no caso em estudo, que tratou de um SCR móvel, tecnologia inovadora no mercado brasileiro, apresentou-se como uma das soluções viáveis para ETA com pouco espaço para disposição dos resíduos gerados.

É importante ressaltar a necessidade de realização de ensaios para a verificação do geotêxtil mais adequado a se utilizar no SCR, bem como a necessidade de condicionamento químico (tipo, concentração e dosagem) em detrimento às características dos resíduos gerados na ETA. A realização desta etapa não foi contemplada neste TCC, visto que o tipo, concentração e dosagem do condicionante já estavam determinados antes do início do acompanhamento do estudo de caso.

Apesar das dificuldades encontradas nesse estudo, como a falta de alguns dados e o não acompanhamento contínuo do período de operação do SCR, devido ao momento vivenciado com a pandemia, foi possível perceber, com os valores obtidos, o quão promissor pode ser o emprego de SCR para promover a separação do sistema sólido-líquido e permitir a disposição e posterior destinação adequada do material consolidado no seu interior. Assim sendo, o SCR atua como parte da gestão integrada no processo de potabilização da água.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para pesquisas futuras, enumeram-se:

- Estudo dos ciclos de enchimento durante o período de emprego do SCR, com medições da turbidez, pH e teor de sólidos no início e final de cada ciclos de forma sistêmica;
- Análise das características do geotêxtil empregado intacto e após exumação do SCR, juntamente com os dados sobre os agentes de degradação que possam levar a uma perda de características desejáveis no geotêxtil, tais como: resistência à tração, permeabilidade, abertura de filtração, entre outras propriedades;
- Avaliação de possíveis efeitos das precipitações sobre a eficácia do SCR;
- Estudos das características físicas do lodo desaguado, visando-se possíveis utilizações em outros processos, como na construção civil;

- Análise das características do fluído desaguado, visando-se uma possível utilização para fins não potáveis e sem riscos de contaminação ao meio ambiente;
- Estudos hidrodinâmicos para avaliar a eficiência do SCR ao longo do tempo de uso do geotêxtil e a vida útil para atender a eficiência requerida.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S.; Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro: [s.n.], v.18, p. 115-122, 2013.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Leito de drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro: [s.n.], v. 13, n. 1, p. 54-62, jan./mar. 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522008000100008>. Acesso em: 06 mar. 2021.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Investigating calcined filter backwash solids as supplementary cementitious material for recycling in construction practices. **Construction and Building Materials**, Rio de Janeiro: Elsevier, n. 175, p. 664–671. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.227>. Acesso em: 06 mar. 2021.

ANDREOLI, C. V. (coord.). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. **Projeto PROSAB**. Rio de Janeiro: ABES / RiMa, v. 2, p. 119-142, 2001, 257 p.

ARDILA, Maria Alejandra Aparicio. **Avaliação de sistemas fechados em geotêxteis não tecidos para o desaguamento de lodo de ETA por meio de ensaios de semi-desempenho**. 2020. 166 f. Dissertação (Pós-Graduação *lato sensu* em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOSINTÉTICOS [IGS]. **IGS BRASIL REC04**: Aplicação de Geossintéticos em Áreas de Disposição de Resíduos. São Paulo: IGS, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.318-1**: Terminologia de geossintéticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6.457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004**: Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14.001**: Sistema de gestão ambiental: especificações e diretrizes para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

AUGUSTO, L. G. S.; GURGEL, I. G. D.; CÂMARA NETO, H. F.; MELO, C.H.; COSTA, A. M. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro: [s.n.], v.17, n. 6, p. 1511-1522, 2012.

AVANCINI, Livia Luiza de Souza. **Análise do desaguamento do lodo de estação de tratamento de água em sistema de confinamento em geotêxtil**. 2017. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

AWWA/APHA/WEF. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**, 1998.

BARTIKO, D.; DE JULIO, M. Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. **Rev. Ambient. Água**. ISSN 1980-993X versão *online*, Taubaté: [s.n.], v. 10, n. 1, p. 71-81, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1239>. Acesso em: 06 mar. 2021.

BELLAVER, E. H.; SANTOS, Z. M. Q. Impacto do crescimento populacional sobre recursos finitos. **Extensão em Foco**. ISSN 2317-9791, [s.l.], v. 6, n. 1, 2019. Disponível em: <https://45.238.172.12/index.php/extensao/article/view/1975>. Acesso em: 8 mar. 2021.

BLUWAT. **Poliacrilamida catiónica química del floculante de aguas residuales del polímero municipal del tratamiento**. Yixing Bluwat Chemicals CO. LTDA. China. Disponível em: <http://spanish.waterpurifyingchemicals.com/sale-7889226-municipal-sewage-treatment-polymer-chemical-cationic-flocculant-polyacrylamide.html>. Acesso em: 11 jan. 2021.

BORGES, D. B.; FARIAS, M. R.; SIMÕES, C. M. O.; SCHENKEL, E. P. Comparação das metodologias da Farmacopeia Brasileira para determinação de água em matérias-primas vegetais, e validação da determinação de água em analisador de umidade [...]. **Rev. Bras. Farmacogn.**, ISSN 1981-528X versão *online*. Curitiba: Elsevier, v. 15, n. 3, p. 229-236, jul./set. 2005. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-695X2005000300013&script=sci_abstract&lng=pt. Acesso em: 14 mar. 2021.

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. **Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências**. Brasília, DF: Congresso Nacional, [2010b]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm. Acesso em 10 mar. 2021.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 1998.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Brasília, DF: Congresso Nacional, [2010a]. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em 10 mar. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5/2017**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 28 set. 2017. Disponível em: <https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida----o-n---5--de-28-de-setembro-de-2017.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 357/2005**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 58-63, 17 mar. 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 430/2011**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 89. 13 mai. 2011.

BUENO, B. S.; Matérias-Primas. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Blucher, 2014, cap. 2, p. 13-25.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. Propriedades, Ensaio e Normas. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Blucher, 2014, cap. 3, p. 27-62.

CANTRÉ, S.; SAATHOFF, F. Design parameters for geosynthetic dewatering tubes derived from pressure filtration tests. **Geosynthetics International**, [s.l.]: Elsevier, v. 18, n. 3, p. 90-103, 2011.

CASTRO, N. P. B.; MELO, L. C. Q. C.; ESCOBAR, L. G. B. Environmental Integrated Solution for Septic Tank Sludge and Landfill Leachate Using Geotextile Tubes Dewatering Technology. PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION, 1., 2008. Cancun. **Anais [...]**, mar. 2008, p. 419-424.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **NTS 233**: Norma Técnica **SABESP** – Polímeros orgânicos base poliacrilamida para tratamento de água e esgoto. São Paulo, dez. 2020.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório Técnico SABESP** – Atendimento ao Artigo 11º da Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 926 de 29/05/17. São Paulo, mai. 2018. 51 p.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Nota Técnica SABESP** – Índice de cobertura e de atendimento com abastecimento de água e coleta de esgotos – município de Mairiporã. Contrato Sabesp 280/15. São Paulo, jan. 2014. 16 p.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS. **Portal de Informações**, 2021. Belo Horizonte: COPASA, 2021.

CORDEIRO, J. S. Remoção de água de lodos de ETAs através de filtração forçada. **Projeto PROSAB**. São Carlos: RiMa Artes e Textos, cap. 5, p. 107-124, 1999.

CORDEIRO, J. S. Remoção natural de água de lodos de ETAs utilizando leitos de secagem e lagoas de lodo. **Projeto PROSAB**, São Carlos: RiMa Artes e Textos, cap. 6, p. 125-141, 1999.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: RiMA, 2005. 1565 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: Editora LDiBe, 2012. 540 p.

DI BERNARDO, L.; MENDES, C. G. N.; GUIMARÃES, A. F. Coagulação-floculação de águas com turbidez ou cor elevada (parte I). **REVISTA DAE**, São Paulo, n. 150, p. 228-231, 1987. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_150_n_229.pdf.

FONTANA, Antônio Osmar. **Sistema de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantador e reuso de água de lavagem de filtros: estudo de caso – ETA Cardoso**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2005.

FOWLER, J.; DUKE, M.; SCHMIDT, M. L.; CRABTREE, B.; BAGBY, R. M.; TRAINER, E. Dewatering sewage sludge and hazardous with geotextile tubes. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002. Nice. **Anais [...]**. France: Nice, 2002, p. 1007-1012.

GEOSYNTHETIC INSTITUTE. GRI-GT15: **The pillow test for field assessment of fabrics/additives used for geotextile bags, containers and tubes**. Pennsylvania: GSI, 2009.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JUNIOR, A. D. Desidratação de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Água. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., 1993, Natal. **Anais [...]**. Natal: ABES, 1993. v.2, p. 324-341.

GUANAES, E. A.; GUIMARÃES, M. G. A.; URASHIMA, D. C.; PONTES, P. P. Análise laboratorial do desaguamento do lodo residual de estação de tratamento de água por meio de geossintéticos. **Educ. Tecnol.**, Belo Horizonte: [s.n.], v. 14, n. 2, p. 33-39, mai./ago. 2009.

GUANAES, Eduardo Andrade. **Análise laboratorial do desaguamento do lodo residual de estação de tratamento de água por meio de geossintéticos**. 2009. 115 f. Dissertação (Pós-Graduação *lato sensu* em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GUIMARÃES, M.G.A.; URASHIMA, D.C.; VIDAL, D.M. Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems. **Geosynthetics International**, [s.l.]: Elsevier, v. 21, n. 5, p. 310-320, 2014.

GUIMARAES, M.G.A.; URASHIMA, D.C. Dewatering Sludge in Geotextile Closed Systems: Brazilian Experiences. **Soils & Rocks**, Rio de Janeiro, v. 36, p. 251-263, 2013.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. de. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. 859 p.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDREÓLI, C. V. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental. **Quim. Nova**, São Paulo: [s.n.], v. 29, n. 1, p. 79-84. 2006.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K.F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C.V; PAULON, V.A. Codisposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, São Paulo: [s.n.], v. 51, n. 318, p. 85-95, jun. 2005.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSEL, R. R.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Princípios de tratamento de água**. Tradução Noveritis do Brasil; revisão técnica Elvis Carissimi. São Paulo: Editora Cengage, 2016. 624 p.

HUESKER. **Huesker Report – Casos de Obras**. São José dos Campos: Huesker, 2020, v. 2. *E-book* (125 p.).

JEPSON, W.; BUDDS, J.; EICHELBERGER, L.; HARRIS, L.; NORMAN, E.; O'REILLY, K.; PEARSON, A.; SHAH, S.; SHINN, J.; STADDON, C.; STOLER, J.; WUTICH, A.; YOUNG, S. Advancing human capabilities for water security: a relational approach. **Water Security**. ISSN: 2468-31241 versão *online*, [s.l.]: Elsevier, p. 46-52. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2017.07.001>. Acesso em: 06 mar. 2021.

KHACHAN, M. M.; BHATIA, S. K. The efficacy and use of small centrifuge for evaluating geotextile tube dewatering performance. **Geotextiles and Geomembranes**, [s.l.]: Elsevier, v. 45, n. 4, p. 280-293, abr. 2017. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.04.001\(2017\)](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.04.001(2017)). Acesso em: 07 mar. 2021

KOERNER, G.R.; KOERNER, M.R. Geotextile tube assessment using a hanging bag test. **Geotextiles and Geomembranes**, [s.l.]: Elsevier, v. 24, n. 2, p. 129-137, 2006.

KURODA, E. K.; SILVEIRA, C.; MACEDO, J. G.; LIMA, M. S. P.; KAWAHIGASHI, F.; BATISTA, A. D.; SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F. Drenagem / secagem de lodo de decantadores de ETAs em manta geotêxtil. **Revista DAE**, São Paulo: [s.n.], n. 194, p. 24-34, jan./abr. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.002>. Acesso em: 06 mar. 2021.

LAWSON, C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. **Geosynthetics International**, [s.l.]: Elsevier, v. 15, n. 6, p. 384-427, 2008.

LAWSON, C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 8., 2006. Yokohama, Proceedings, [s.l.: s.n]. **Anais** [...]. Yokohama, 2006. p. 9-48.

LIAO, K.; BHATIA, S. K. Geotextile Tube Dewatering: Filtration Criteria. In: Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition, 1., 2008. Cancun. **Anais** [...]. [s.l.: s.n], 2008, p. 506-513.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.

LIRA, Waleska Silveira; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde (org.). **Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa**. Campina Grande: EDUEPB, 2013. *E-book* (325 p). Disponível em: <http://books.scielo.org>. Acesso em: 06 mar. 2021.

LOPES, M.P; LOPES, M.L. **A durabilidade dos geossintéticos**. 1. ed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: [s.n], 2010. 294 p.

LOPES, V. C.; LIBÂNIO, M. Proposição de um índice de qualidade de estações de tratamento de água (IQETA). **Eng. Sanit. Ambient.** ISSN: 1809-4457 versão *online*, Rio de Janeiro: [s.n.], v. 10, n. 4, p. 318-328, out./dez. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000400008>. Acesso em: 06 mar. 2021.

MASTIN, B.J.; LEBSTER, G.E.; SALLEY, J.R. Use of Geotextile Tube Dewatering Containers in Environmental Dredging. PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION, 1., 2008. Cancun, Mexico, mar. 2008. **Anais** [...]. Cancun, 2008, p. 390-399.

MINAS GERAIS (Estado). Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM. **Deliberação Normativa COPAM nº 153, de 26 de julho de 2010**. [Convoca os municípios para a regularização ambiental de sistemas de tratamento de água e dá outras providências]. Diário do Executivo – Minas Gerais: caderno 1, p. 24, 06 mar. 2013. Disponível em: <https://www.jornalminasgerais.mg.gov.br/?dataJornal=2013-03-06#caderno-jornal>. Acesso em: 27 abr. 2019.

MIRATECH, Ten Cate Nicolon. Geotube. Dewatering Technology: versão 5.2. Seção: Applications: [s.l.]: **Mining & Mineral Processing**, 2005.

MOO-YOUNG, H. K., GAFFNEY, D. A., MO, X. Testing Procedures to asses the viability of dewatering with geotextiles tubes. **Geotextiles and Geomenbranes**, [s.l.]: Elsevier, v. 20, p. 289-303. 2002.

MOO-YOUNG, H. K., TUCKER, W.R. Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes. **Geotextiles and Geomenbranes**, [s.l.]: Elsevier, v. 20, p. 191-212. 2002.

MÜLLER, Matheus. Desaguamento de efluentes em caçamba especial drenante com refil geossintético. Depositante: SALUS TRANSPORTE DE RESIDUO LTDA (BR/SP).

Procurador: Luiz Fernando Alves. BR 202020009781-0. Depósito: 15 mai. 2020. Disponível em: <https://busca.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedido=1577013&SearchParameter=BR%20202020009781-0%20%20%20%20%20%20%20&Resumo=&Titulo=>. Acesso em: 13 mar. 2021.

MÜLLER, Matheus. **Efeito de diferentes configurações no deságue de lodos em sistemas de confinamento de resíduos em geotêxtil**. 2018. 101 f. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2018.

NASCIMENTO JUNIOR, P. F. **Unidade de tratamento de resíduos - UTR de estação de tratamento de água – ETA: um complemento essencial para a preservação do meio ambiente**. 2005. Monografia (Pós-Graduação *lato sensu* em Saneamento Ambiental) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

NOSSOL, T.; ESCOSIM, S.; SOUZA, A. G.; ALMEIDA, A. F.; BREDA, B. Como reaproveitar os resíduos resultantes do processo de tratamento de água. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO, 2007, Ponta Grossa. **Anais [...]**. Ponta Grossa, 2017, 6 p.

OLIVEIRA, I. Y. Q.; RONDON, O. C. Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. **INTERAÇÕES**, Campo Grande: [s.n.], v. 17, n. 4, p. 687-698, out./dez. 2016. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.20435/1984-042X-2016-v.17-n.4\(11\)](http://dx.doi.org/10.20435/1984-042X-2016-v.17-n.4(11)). Acesso em: 8 mar. 2021.

PAIVA, A. C. E.; NASCIMENTO, N.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; CARRIELLO, F.; REZENDE, F. S. Urban expansion and its impact on water security: The case of the Paraíba do Sul River Basin, São Paulo, Brazil. **Science of the Total Environment**, [s.l.]: Elsevier, n. 720, 2020.

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENORIO, J. A. S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, São Paulo: [s.n.], n. 54, p. 63-76. 2008.

POHLMANN, P. H. M., FRANCISCO, A. A., FERREIRA, M. A.; JABBOUR, C. J. C. Tratamento de água para abastecimento humano: contribuições da metodologia Seis Sigma. **Eng. Sanit. Ambient.** ISSN: 1809-4457 versão *online*, Rio de Janeiro: [s.n.], v. 20, n. 3, p. 485-492, jul./set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000097976>. Acesso em: 06 mar. 2021.

PORTELLA, K. F.; ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; SALES, A.; BARON, O. **Caraterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba – PR**. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, 22., 2003. **Anais [...]**. Joinville, 2003.
PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO. PROSAB: **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. REALI, M. A. P. (coord.). Rio de Janeiro: ABES, 1999. 240 p.

REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J.; CORDEIRO, J. S. Desidratação de lodos por centrifugação. **Projeto PROSAB**. São Carlos: RiMa Artes e Textos, cap. 4, p. 85-106. 1999.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2001. 102 p.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETO, J. M. A evolução tecnológica do tratamento de água. **REVISTA DAE**. ISSN 0101-6040, São Paulo: [s.n.], n. 161, p. 1-5, jul. 1991. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_161_n_42.pdf.

SATYAMUTHY, R.; BHATIA, S. K. Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles. **Geosynthetics International**, [s.l.]: Elsevier, v. 16, n. 2, 2009.

SCALIONI, A. B.; URASHIMA, D. C. GUIMARÃES, M. G. A. Análise do condicionamento químico de resíduos com alto teor de líquido por ensaio de cone: Estudo de caso com lodo de ETA. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 9., 2019. São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: São Carlos, 2019.

SHUKLA, S. K. **An Introduction to Geosynthetic Engineering**. London: Taylor & Francis Group, 2016. 449 p.

SHUKLA, S. K. **Geosynthetic and their application**. London: Thomas Telford Ltda, 2006. 430 p.

SHUKLA, S. K.; YIN, J. H. **Fundamentals of Geosynthetic Engineering**. London: Taylor & Francis Group, 2016. 410 p.

SILVA, A. P.; BIDONE, F. R. A.; MARQUES, D. M. L M. Avaliação da Lixiviação de Alumínio e da Produção de Ácidos Graxos Voláteis em Reatores Anaeróbios Utilizados para Estudar a Disposição Final de Lodos de ETAs em Aterros Sanitários. *In*: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: AIDIS, 2000.

SILVA, D. R.; COSTA, N. C. M.; MAGALHÃES, L. F. C.; CAVALCANTE, C. M. P.; DANIEL, L. A. Efeitos da inter-cloração na duração da carreira de filtração e na formação de THM em águas de abastecimento. **REVISTA DAE**. ISSN 0101-6040, São Paulo, v. 60, n. 189, p. 50-57, mai./ago. 2012. Disponível em: <https://doaj.org/article/315c8d7da49b4fe2904355f9d48ac0a2>. Acesso em: 06 mar. 2021.

SILVA, G. G.; DANTAS, A. Di B.; QUEIROZ S. C. B.; RODRIGUES, M. I.; GUIMARÃES, M. A. R. Uso da metodologia de superfície de resposta para avaliação do desaguamento de resíduos de estação de tratamento de água em filtração geotêxtil. **Revista AIDIS**, Cidade do México: [s.n.], v. 13, n. 3, p. 939-956. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.3.69559>. Acesso em: 06 mar. 2021.

SILVA, L. J.; LOPES, L. G.; AMARAL, L. A. Qualidade da água de abastecimento público do município de Jaboticabal, SP. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro: [s.n.], v. 21, n. 3, p. 615-622, jul./set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016121151>. Acesso em: 06 mar. 2021.

SILVEIRA, C.; KURODA, E. K.; ABE, C. H.; YOSHIKI, L.; HIROOKA, E. Y. Desaguamento do lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro: [s.n.], v. 20, n. 2, p. 297-306, abr./jun. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522015020000082264>. Acesso em: 06 mar. 2021.

SOUZA, F. H.; TOSCANO, B.; CARNEIRO, C. G.; SENS, M. L. Diagnóstico e discussão sobre uso da Filtração Lenta para abastecimento público em Santa Catarina, Brasil. **REVISTA DAE**, São Paulo: [s.n.], v. 66, n. 209, p. 37-50, jan./mar. 2018. Disponível em: <https://doaj.org/article/fd2e066fe01444aabe5e0f1d01765c8b>. Acesso em: 07 mar. 2021.

SOUZA, T. M. M.; ALMEIDA FILHO, A. Caracterização Físico-Química do Resíduo (Lodo) de ETA, no período de seca, em Várzea Grande – MT. **E&S - Engineering and Science**, Mato Grosso: [s.n.], v. 6, n. 1. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18607/ES201764754>. Acesso em: 07 mar. 2021.

UNESCO World Water Assessment Programme. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos 2020: Água e mudança climática**. Tradução: Kelly Cristina Pereira de Moraes. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372882_por?fbclid=IwAR0yBI24uVUHZp5Gm4pLws8vYjRmdq4AX282A-aUfcpyXtYjC8olwrON4JA. Acesso em: 07 set. 2020.

UNIC. CENTRO DE INFORMAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **População mundial: A ONU e a população mundial**. Rio de Janeiro: [s.n.], p. 1, 2019. Disponível em: <https://unicrio.org.br/acao/populacao-mundial/>. Acesso em: 02 jun. 2020.

URASHIMA, B. M. C.; URASHIMA, D. C.; GUIMARÃES, M. G. A.; PAULINO R. G.; RIBEIRO A. G. C. Sistema de Confinamento de Resíduos Empregando Geotêxteis Comparados a Leito de Drenagem para Desaguamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 8., 2019. São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: USP, 2019, p. 65-72.

VERTEMATTI, J. C. (coord.). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015, p.1-12, 413 p.

YANG, Y.; WEI, Z.; CAO, G.; YANG, Y.; WANG, H.; ZHUANG, S.; LU, T. A case study on utilizing geotextile tubes for tailings dams construction in China. **Geotextiles and Geomembranes**, [s.l.]: Elsevier, v. 47, p. 187-192, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.12.007>. Acesso em: 25 mar. 2021.

YEE, T. W.; LAWSON, C. R.; WANG, Z. Y.; DING, L.; LIU, Y. Geotextile tube dewatering of contaminated sediments, Tianjin Eco-City, China. **Geotextiles and Geomembranes**, [s.l.]: Elsevier, v. 31, p. 39-50, abr. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.07.005>. Acesso em: 07 mar. 2021.