

**INSTITUTO  
FEDERAL**  
Pernambuco

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE

PERNAMBUCO - IFPE

Campus Recife

Departamento Acadêmico de Cursos Superiores - DACS

Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental

ANA KARINA NÓBREGA DE ASSIS

**USO DO GEOTÊXTIL PARA DESIDRATAÇÃO DE LODO DA ETA  
BOTAFOGO - PE**

**Recife  
2024**

ANA KARINA NÓBREGA DE ASSIS

**USO DO GEOTÊXTIL PARA DESIDRATAÇÃO DE LODO DA ETA  
BOTAFOGO - PE**

Orientador

Prof. Dr. Ronaldo Faustino da Silva

Coorientador

Romero Correia Freire - Mestre em  
Gestão Ambiental - IFPE

Recife  
2024

ANA KARINA NÓBREGA DE ASSIS

**USO DO GEOTÊXTIL PARA DESIDRATAÇÃO DE LODO DA ETA  
BOTAFOGO - PE**

Recife  
2024

## RESUMO

O lodo gerado na portabilização da água em Estações de Tratamento de Água (ETAs) é enquadrado como resíduo sólido classe II A (não perigoso e não inerte), de acordo com a NBR 10.004/2004. A disposição inadequada deste resíduo pode provocar a degradação do meio ambiente, a contaminação de mananciais e do solo. Destaca-se , a importância de estudos para o tratamento e desague final correta do lodo. Cada ETA gera lodo com características diferentes, dependendo do tratamento aplicado. Portanto, é preciso o conhecimento destas características para que se possam definir os destinos. Conforme estas considerações iniciais, o presente estudo tem como objetivo caracterizar a tecnologia de manta geotêtil no desague do lodo proveniente da ETA pertencente à Companhia de Saneamento de Pernambuco (COMPESA), por meio de análises químicas, físicas e microbiológicas.

Palavras - Chave : Geotêtil , Resíduo de ETA, Tecnologia , Tratamento

## ABSTRAT

The sludge generated in the purification of water in Water Treatment Plants (ETAs) is classified as solid waste class II A (non-hazardous and non-inert), according to NBR 10.004/2004. The inadequate disposal of this residue can cause the degradation of the environment, the contamination of springs and the soil. The importance of studies for the treatment and correct final dewatering of the sludge is highlighted. Each ETA generates sludge with different characteristics, depending on the treatment applied. Therefore, it is necessary to know these characteristics so that destinations can be defined. According to these initial considerations, the present study aims to characterize the technology of geotextile blanket in the drainage of sludge from the WTP belonging to the Sanitation Company of Pernambuco (COMPESA), through chemical, physical, and microbiological analyses.

KEYWORDS: Geotextile, Wastewater Treatment Plant, Technology, Treatment

## RESUME

Los lodos generados en la portabilización del agua en las Estaciones de Tratamiento de Agua (ETAs) son clasificados como residuos sólidos clase II A (no peligrosos y no inertes), según la NBR 10.004/2004. La disposición inadecuada de estos residuos puede provocar la degradación del medio ambiente, la contaminación de las fuentes de agua y del suelo. Se destaca la importancia de los estudios para el tratamiento y correcto drenaje final de los lodos. Cada ETA genera lodos de diferentes características, dependiendo del tratamiento aplicado. Por lo tanto, es necesario conocer estas características para definir los destinos. De acuerdo con estas consideraciones iniciales, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar la tecnología de manta geotextil en el drenaje de lodos de la ETA perteneciente a la Empresa de Saneamiento de Pernambuco (COMPESA), a través de análisis químicos físicos y microbiológicos.

PALABRAS CLAVE: Geotextil, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales], Tecnología, Tratamiento

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>06</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>10</b>
2.1 LEGISLAÇÕES PERTINENTES.....	13
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
3.1 Objetivo Geral.....	17
3.2 Objetivo Específico.....	17
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>24</b>
<b>5.RESULTADOS E DISCURSÕES.....</b>	<b>26</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>28</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de potabilidade da água bruta, proveniente dos mananciais, é realizado usualmente nas Estações de Tratamento de Água (ETAs). As etapas físicas e químicas deste processo envolvem aeração, eliminação de impurezas grosseiras, pré-cloração, controle de vazão, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e fluoretação (DI BERNARDO et al., 2002; TEIXEIRA et al., 2006).

Segundo Richter, o tratamento de água indiscutivelmente gera benefícios sociais e econômicos, porém, como todo processo industrial suas operações podem gerar impactos no meio (RICHTER, 2001). Neste contexto, a questão dos resíduos gerados nas ETAs, tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo, representa um desafio no seu gerenciamento, tanto no sistema gerador quanto à procura de disposição adequada para os mesmos visando atender a legislação vigente (SOUZA, 2009).

O lodo gerado no tratamento nas ETAs é proveniente dos decantadores ou flotadores, além da água de lavagem dos filtros e rejeitos de limpeza dos tanques de preparo de suspensões de produtos químicos. Composto, geralmente, pelas sujidades da água bruta, coagulante, auxiliar de coagulação, alcalinizantes e polímeros empregados na etapa de desaguamento, com isto, enquadrado como resíduo sólido - Classe II A - não inerte, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004; JANUÁRIO, 2005).

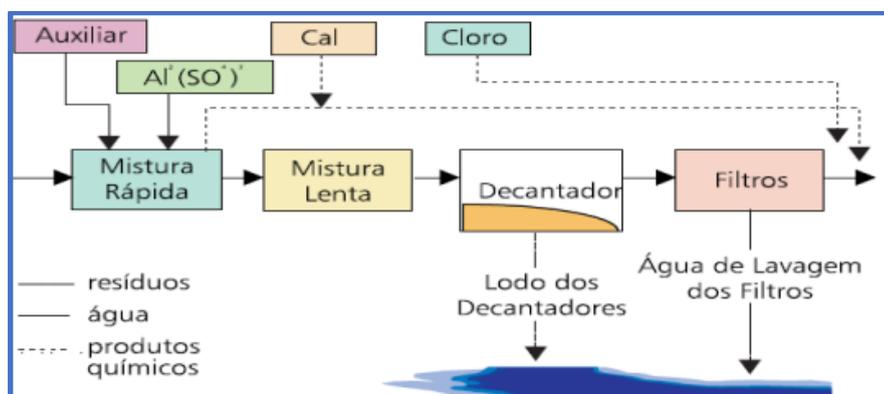


Figura 1 - Operações unitárias que geram mais resíduos nas ETA's

Deste modo, se faz necessária a destinação correta deste tipo de lodo. A disposição inadequada destes resíduos pode provocar a degradação do meio ambiente, em virtude dos possíveis metais pesados e teor de sólidos, bem como a contaminação de mananciais e do solo. Prontamente, torna-se importante que haja estudos para o tratamento e disposição final

correta do lodo (DI BERNARDO et al., 2002; MENEZES, 2006).

Em nosso país, entretanto, estes resíduos são em sua maioria, lançados diretamente nos cursos d'água modificando suas características, conforme figura 2, sendo raras as estações que possuem um sistema adequado de tratamento e disposição do lodo produzido pelas ETA's. Quando jogados diretamente nos rios na forma líquida, estes efluentes estão sujeitos a legislações estaduais e federais que remetem ao lançamento de efluentes em forma líquida.



Figura 2- Lançamento de resíduos de eta nos corpos receptores mudando suas características

Cada ETA gera lodo com características diferentes, que dependem do tratamento aplicado, das condições da água bruta (presença de sólidos orgânicos e inorgânicos), das dosagens de produtos químicos (sulfato de alumínio, cloreto férrico, policloreto de alumínio e, em alguns casos, polímeros condicionantes) e da forma de limpeza dos decantadores, que influencia no tempo de retenção do lodo na estação (RICHTER, 2001; MENEZES, 2006).

Após o tratamento do lodo da ETA pode ser destinado (por exemplo, disposição em aterros), como incorporação em tijolos, concreto e selagem em aterros sanitários. Estas técnicas são importantes para minimizar o impacto negativo do resíduo no ambiente e para reduzir custos, pois geram benefícios à companhia de saneamento, além de contribuir para a proteção do meio ambiente e para a melhoria da qualidade de vida da sociedade. Outras opções de disposição do lodo de ETA são empregado na fabricação de solo cimento, que é obtido através da mistura homogênea de solo, cimento e água. O lodo de ETA também pode ser utilizado na recuperação de solos de áreas degradadas (MOTTA, 2011).

Além das destinações já mencionadas, o lodo de ETA pode ainda ser coprocessado, ou seja, queimado em fornos de cimento. As técnicas citadas necessitam que o lodo de água sofra desidratação. Os métodos são diversos que podem ser utilizados para este fim, como leitos de secagem, filtros-prensa e centrifugas.

O lodo deve possuir maior teor de sólidos para melhor responder às técnicas de

desaguamento , diante do panorama apresentado, causado pelo descarte do resíduo em questão, justifica-se este projeto de lodo da ETA Botafogo . Estes lodos são classificados pela NBR-10004 como “resíduos sólidos” e devem, portanto, ser tratados e dispostos como tal .

No entanto, para o lançamento de resíduos gerados na estação de tratamento se faz necessário uma legislação específica para destinação desse resíduo e enquanto não se tem essa resolução, toda etapa é norteadada pela a resolução do Conama 357 e a 430, já que é um resíduo diferente do esgoto e de outros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Estação de Tratamento de Água é parte fundamental do sistema de abastecimento de água para a população. Já existe tratamento com estações compactas que utilizam o mecanismo de coagulação de neutralização de cargas, e o sistema convencional ou completo, que possui mecanismo de coagulação do tipo varredura, sendo o mais utilizado. O tratamento de água visa a remoção de partículas finas em suspensão e em solução presentes na água bruta através do emprego de coagulantes. Geralmente, utilizam-se sais de ferro ou de alumínio, que formam flocos pelos hidróxidos insolúveis, e que são removidos nos decantadores e, uma menor parcela, nos filtros. Nos processos e operações unitárias utilizadas nas estações geram-se resíduos: lodos acumulados nos decantadores e água de lavagem dos filtros, além da água de lavagem periódica dos floculadores e tanques de preparo de solução ou suspensão de produtos químicos, cada tecnologia de tratamento possui operações que geram diferentes tipos de resíduos, conforme figura 3.

Tratamento	Resíduos
Ciclo completo	Lodo / águas de lavagem dos filtros
Filtração direta descendente	Águas de lavagem dos filtros
Filtração direta ascendente	Descargas de fundo / águas de lavagem dos filtros
Dupla filtração	Descargas de fundo / águas de lavagem dos filtros
Ciclo completo flotação AD	Lodo / águas de lavagem dos filtros.
Filtração lenta	Biofilme da superfície
Membranas	Concentrado / retrolavagem / química

Figura 3 - TIPOS DE OPERAÇÕES DE LIMPEZA DAS UNIDADES DE TRATAMENTO

O lodo que vem de decantadores varia numa faixa de 60 a 95% da quantia total de lodo gerado, em quantidade de sólidos, enquanto a água de lavagem dos filtros varia de 5 a 40%, sendo que essa quantia total depende da qualidade da água bruta, do tipo e dosagem do

coagulante, do projeto das unidades da ETA e da eficiência da operação. Este resíduo gerado nos decantadores pode ter teor de sólidos muito variável de acordo com o tipo decantador, modo de descarga, frequência de limpeza, variando de 0,1% a 4,0%, e na maioria dos casos situa-se abaixo de 1,0%. Quanto à água de lavagem de filtros, como o teor de sólidos é menor, entre 0,01% a 0,1% a recirculação da água de lavagem para o início da estação torna-se um procedimento interessante.



Figura 4 - LIMPEZA DOS RESÍDUOS GERADOS EM DECANTADORES CONVENCIONAIS

Este resíduo é constituído, basicamente, de resíduos sólidos de natureza orgânica e inorgânica provenientes da água bruta, tais como: algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, coloides, areias, argilas, siltes, cálcio, magnésio, ferro e manganês. Além dos elementos provenientes da água bruta, também formarão o lodo de ETA os floculantes, hidróxidos de alumínio e ferro (em grande quantidade) e polímeros condicionantes (em alguns casos) também utilizados no processo de potabilização da água (SILVA et al., 2000).

#### Lodos Químicos de Al e Fe – Propriedades Químicas

Característica		Unidade	Tipo de Lodo	
			Alumínio	Ferro
Demanda Bioq. de Oxigênio		mg/L O <sub>2</sub>	30 - 300	30 - 300
Demanda Quím. de Oxigênio		mg/L O <sub>2</sub>	30 - 5000	30 - 5000
pH		-	6 - 8	6 - 8
Sólidos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5,5 H <sub>2</sub> O	%	15 - 40	
	Fe	%		4 - 20
	Silicatos e mat. inertes	%	35 - 70	35 - 70
	Orgânicos	%	5 - 15	5 - 15

Figura 5 - COMPOSIÇÃO DE Fe e Al no lodo de ETA

#### **2.1 TIPO DE ÁGUA PRESENTE NO LODO DE ETA**

Um dos problemas enfrentados pelas indústrias modernas é a busca pela redução de

resíduos gerados nos processos produtivos. O maior desafio da indústria de água potável está na disposição final do lodo sob os pontos de vista técnico, ambiental e econômico. No Brasil, o lodo gerado na indústria de potabilização da água é enquadrado como resíduo sólido pela NBR 10.004/2004, portanto, não deve ser lançado nos corpos d'água sem prévio tratamento. A diversos fatores relevantes a seleção da tecnologia para tratamento de lodos de ETA, um deles é o tipo de água presente na composição do lodo. Segundo Lopes et. al, (2005), o tratamento de lodos de decantadores consiste basicamente na remoção da água livre e intersticial presente no lodo com redução de seu volume, facilitando o manuseio, transporte e disposição final adequada deste resíduo.

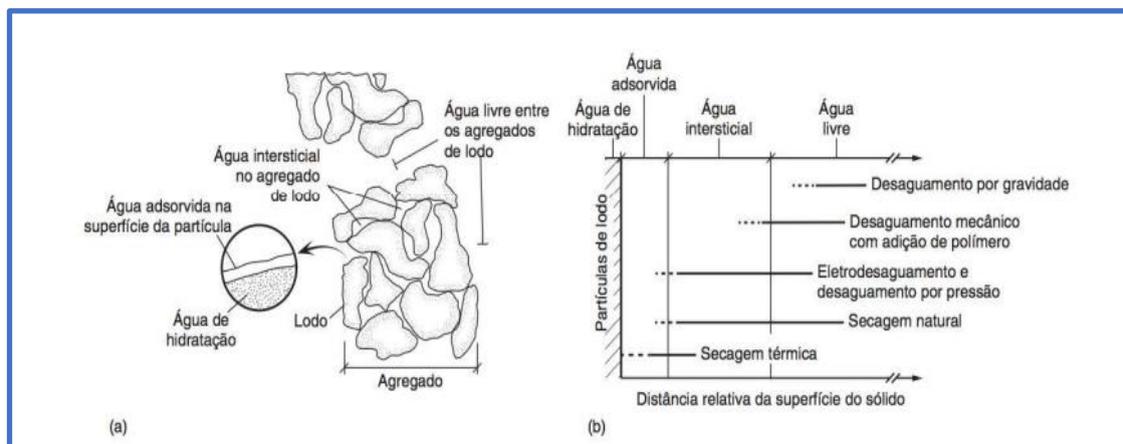


Figura 6 - (a) Diferentes formas de água associadas ao resíduo (b) Diferentes processos pro desague

Diante dessa preocupação com a disposição do Lodo de Estações de Tratamento (LETA), estudos têm sido conduzidos para avaliar a aplicação e/ou reaproveitamento (reuso) desse resíduo. Diante disso, esta pesquisa buscou identificar alternativas viáveis para disposição final ou reuso do LODO ETA, transformando-os em insumo para outros processos industriais.

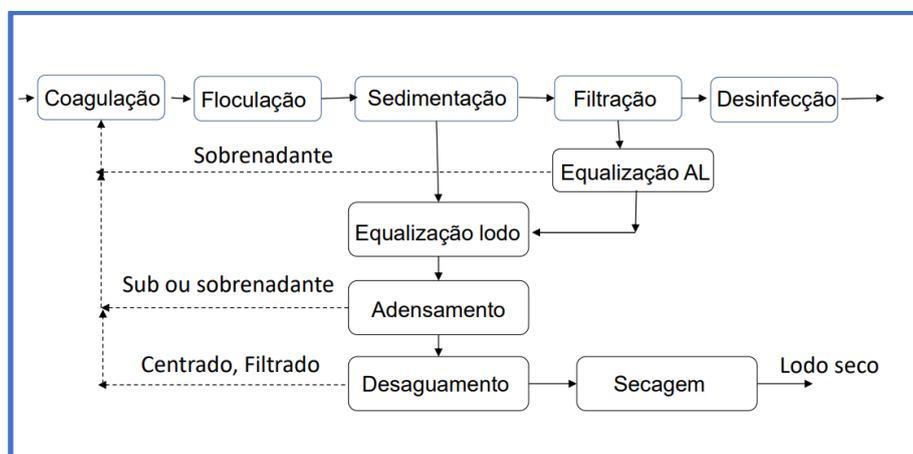
## 2. 2 TOXIDADE DO LODO DE ETA

Apesar de proibida, uma prática ainda corriqueira, em grande parte das ETAs é o lançamento de seus lodos nos mananciais a jusante da captação, como destinação final, ou em terrenos próximos às estações. A presença de Al em concentrações elevadas nesses lodos pode induzir toxicidade aos organismos aquáticos e aumentar a degradação desses ambientes. Considerando ainda que esses lodos, além de conterem metais, apresentam concentrações elevadas de sólidos, turbidez e DQO, fatores que podem causar condições indesejáveis, tais como a criação de bancos de lodo, o assoreamento do curso d'água, alterações na cor, na luminosidade e na composição química, interferindo nos fenômenos biológicos naturais da macro e microbiota aquática e nos fenômenos de auto-depuração do corpo receptor (ANDRADE, 2014). Uma vez lançados no solo, os metais tendem a se acumular, podendo atingir diversos níveis da cadeia alimentar, afetando a saúde humana.

Elevadas concentrações de alumínio, quando dispostos no solo, podem propiciar a redução da taxa de crescimento radicular de plantas sensíveis, diminuindo a capacidade para obter água e nutrientes do subsolo, tornando o solo menos produtivo.

### **2.3 SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA TRATAMENTO DE LODO**

Nas Estações de Tratamento de Água - ETAs que adotam o tratamento de água por ciclo completo, composto pela sequência dos processos e operações de coagulação, floculação, sedimentação e filtração, os resíduos são gerados principalmente nas unidades de sedimentação e filtração, e são chamados de lodos de decantadores e águas de lavagem de filtros, a grande quantidade de lodo gerado na tecnologia de eta's convencionais é devido ao mecanismo de coagulação, que é o de varredura, onde é aplicada uma grande quantidade de coagulante para aumentar o tamanho do floco e ele fica retido nos decantadores. Devido principalmente à grande quantidade de água agregada nos lodos das lavagens de filtros e descarga de decantadores, é requerido um tratamento mais avançado e o tipo de lodo gerado, seu transporte possui um custo relativamente elevado, fazendo com que grande parte das ETAs descartem esses resíduos nos corpos de água mais próximos, esses resíduos possuem uma grande carga de metais e microorganismos que podem comprometer a qualidade da água.



A tecnologia de mantas geotexteis no tratamento de lodo gerado na eta, essa tecnologia de baixo custo é usada em vários países, os sacos de drenagem ou sacos de desague para lodo de ETA's desaguam ou desidratam sedimentos, lamas de dragagem de lagoa e lodo de Estações de Tratamento de Efluentes (ETE).

O sistema de desidratação por sacos mantas é o método menos dispendioso para desaguar lodo de estações de tratamento municipal ou operações de tratamento de água industrial. O método requer um mínimo investimento em equipamentos e dependendo do caso os sacos podem ser reaproveitados. A operação evita os odores de uma secagem tradicional a céu aberto e atinge os limites permitidos de Teor de Sólidos em Suspensão

(TSS) da legislação de descarte. Mas a caracterização das macropropriedades e micropropriedades é fundamental para seleção da tecnologia a ser aplicada.

Para desidratação de lodo em ETA's, estes sacos são colocados diretamente sobre uma superfície preparada ou sobre um típico leito de areia de secagem e recebem o lodo por mangueiras que vertem a água e retêm o lodo.



Figura 7- Geotexteis reação de lodo de eta



Figura 8- Bateria de geotexteis aplicada para grandes vazões

A drenagem inicial em poucas horas concentra sólidos a 15% nas bolsas que serão seladas e removidas da unidade. Os sacos podem ainda ser armazenados a céu aberto para desaguamento e evaporação final que em 10-15 dias elevam o teor de humidade a 60-65% e então levados para disposição final.

Além dos sedimentos também removem boa quantidade de óleo que possam acompanhar a água. Este processo pode eliminar completamente o trabalho manual necessário para remoção das lamas desidratadas do leito de secagem.

Na limpeza e restauro de lagoas ou lagos, clarifica as águas e restaura a capacidade de armazenamento original sem drenagem ou escavações. Nestes casos a operação é feita sem liberação de odor, de forma simples e limpa e seu progresso e execução não é afetado por condições atmosféricas.

Construídos de lonas porosas resistentes ao manuseio e às intempéries pode ser adquirido em uma ampla gama de tamanhos reutilizáveis ou descartáveis.

## 2.4 Legislações Pertinentes

A produção e destinação dos resíduos gerados nas ETAs estão sujeitas as legislações específicas, que tiveram uma evolução histórica nas últimas décadas.

- Lei de Crimes Ambientais (Lei 9.605 – 1998)
- Política Nacional do Meio Ambiente (Lei 6.938 – 1981)
- Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433 – 1997)
- Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (Lei 9.985 – 2000)
- Resolução CONAMA nº 430/11 dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos de água.

No Brasil, a Lei n.º 6.938, de 31 de Agosto de 1981, instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente. É definido em seu artigo 2º os princípios adotados para a racionalização do uso do solo, subsolo, ar e água, bem como da preservação e restauração dos recursos ambientais visando sua utilização racional e disponibilidade permanente. Concorrendo para a manutenção do equilíbrio ecológico propício à vida e os objetivos desta política, em especial quanto à utilização racional e disponibilização permanente dos recursos ambientais (BRASIL, 1981).

A Lei n.º 6938/1981, define os instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente (artigo 9º), instituindo, entre eles, “o licenciamento e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras (inciso IV) (BRASIL, 1981)”. Uma forma encontrada para proteger os mananciais e estimular os seus usuários a proteger e usufruir destes de modo racional, foi a implantação da cobrança pela utilização dos recursos hídricos instituídos, primeiro, pela Lei n.º 6.938/1981 artigo 4º, inciso IV (BRASIL, 1981).

Devidamente regulamentadas pela Resolução n.º 237, de 19 de dezembro de 1997, emitida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que prevê o licenciamento ambiental para as atividades e empreendimentos constantes em seu anexo 1, aí incluídas as estações de tratamento de água” (BRASIL, 1997). Outro preceito legal que fornece fundamentos jurídicos para a questão dos recursos hídricos é a Lei n.º 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e dispõe, em seu artigo 2º, sobre os objetivos desta Política, como explicita no inciso II: “a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, com vistas ao desenvolvimento sustentável”.

Também define, como parte do conteúdo mínimo dos Planos de Recursos Hídricos (artigo 7º), “as metas de racionalização de uso, aumento da quantidade e melhoria da qualidade dos recursos hídricos disponíveis” inciso IV (BRASIL, 1997). A imposição dessas leis e o aumento no rigor nas fiscalizações dos órgãos ambientais fazem com que as empresas de saneamento que possuíam seus Termos de Ajuste de Conduta (TAC) junto aos órgãos ambientais também fiquem sujeitas a serem punidas e terem, até mesmo, o embargo de suas Estações de tratamento, se não adequarem com um processo alternativo para eliminação de seus resíduos.

Posteriormente, pela Lei n.º 9.433/1997 que instituiu a cobrança como instrumento da

Política Nacional de Recursos Hídricos, para o gerenciamento desses recursos, no artigo 5º, inciso IV e pela Lei n.º 9.984/2000, que instituiu a Agência Nacional de Águas (ANA) — em seu artigo 4º sobre a atuação dessa Agência, dispõe, no inciso VIII, que ela deve "implementar, em articulação com os Comitês de Bacia Hidrográfica, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos de domínio da União" (BRASIL, 1997; BRASIL, 2000).

Quando lançados nos rios na forma líquida, os efluentes com resíduos estão sujeitos às determinações da Resolução CONAMA n.º 430, de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões e lançamento de efluentes, complementa 29 e altera a Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005, e essa prática vem sendo questionada pelos órgãos ambientais, pois oferece riscos à vida aquática e à saúde pública (BRASIL, 2005; BRASIL, 2011; CARNEIRO et al., 2013). A Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Em seu artigo 2º, inciso IV, define condições de lançamento como as "condições e padrões de emissão adotados para o controle de lançamentos de efluentes no corpo receptor". Já no artigo 24 determina: Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis. O parâmetro principal para o lançamento de resíduos refere-se aos sólidos sedimentáveis somados às demais condições previstas no artigo 34 dessa Resolução, que dispõe que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água se obedecerem às condições de lançamento de efluentes previstas no seu parágrafo 4º.

No entanto, não há Resolução do CONAMA que disponha sobre o tratamento e disposição do lodo de ETA. Portanto, utiliza-se a Resolução CONAMA n.º 375 de 2006 como base para se comparar os parâmetros quando se destina o lodo de ETA em áreas degradadas e/ou disposição controlada em solo (MOTTA, 2011). Os projetos de abastecimento de água trazem benefícios à população, porém, durante muito tempo foram desconsiderados eventuais impactos negativos sobre o ambiente. Segundo Gandini e Galvis (2000), as variáveis que determinam o impacto ambiental nas ETAs são: área construída, volume de construção, requerimentos energéticos, produtos químicos e resíduos gerados no tratamento. A crescente preocupação e regulamentação para preservar e recuperar a qualidade do meio ambiente têm imposto a busca de alternativas de tratamento, aproveitamento e disposição dos resíduos das ETAs, em 5564 estações existentes no Brasil (IBGE, 2010). O interesse pelo tratamento, aproveitamento e disposição adequada do resíduo da ETA é assunto relativamente novo no Brasil.

Por esse fato, ainda não há regulamentação que forneça limites na quantidade e qualidade do lodo utilizado em cada uma das alternativas de aproveitamento e disposição do resíduo

(ANDREOLI et al., 2013a). Ainda há sistemas que descartam seus resíduos nos corpos de água. De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008 (IBGE, 2010), 74,4% dos lodos de ETAs da região sul brasileira são lançados em rios e/ou corpos de água. Os métodos comumente utilizados para tratamento do lodo consideram: equalização, regularização, condicionamento, adensamento, desaguamento, e em alguns casos secagem e incineração (ANDREOLI et al., 2013a).

O intuito dessas técnicas é reduzir o teor de umidade, e conseqüentemente o volume de resíduo, em função das opções de aproveitamento e de disposição do mesmo (ANDREOLI et al., 2013b).

Por razões técnicas e ambientais, os resíduos líquidos gerados nas ETAs devem ser adequadamente tratados, evitando-se o seu lançamento direto nos cursos de água. Pois seu lançamento pode causar diminuição do oxigênio dissolvido, aumento da turbidez e concentração de metais na biota (HOPPEN et al., 2005a). A frequência das descargas dos decantadores e o volume correspondente de cada uma delas devem ser conhecidos, assim como, o volume da água de lavagem de um filtro e a frequência com que essa atividade ocorre na ETA.

A partir do tanque de recepção e regularização, pode-se ter bombeamento direto para a rede coletora para tratamento, em conjunto, na estação de tratamento de esgoto (SILVA et al., 2000).

Segundo as características dos resíduos gerados nas ETAs, é fundamental o condicionamento para o sucesso do adensamento e do desaguamento, gerando as condições necessárias para a liberação da água, especialmente se forem utilizadas unidades mecanizadas de tratamento (RICHTER, 2001). No caso de métodos naturais como lagoa de lodo e leitos, geralmente, dispensa-se o condicionamento (GONÇALVES et al., 2001).

O condicionamento é um processo utilizado para melhorar as características de separação das fases sólido-líquida do lodo.

## **OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo Geral**

Avaliar a tecnologia de mantas geotexteis como opção para o tratamento do lodo produzido na ETA aplicada no tratamento de lodo gerada na estação de tratamento de água (ETA) Botafogo no município de Igarassu - PE

### **3. 1 Objetivos Específicos**

- Apresentar a concepção de tratamento dos filtros e decantadores da ETA.
- Caracterizar lodo ETA Botafogo dos filtros e decantadores.
- Quantificar o lodo gerado, através de estudo de balanço de massa .
- Verificar as opções de disposição para o lodo.
- Propor uma tecnologia adequada para o tratamento dos resíduos gerado na ETA.
- Realizar uma avaliação entre as ODS 6 e ODS 12 e o lodo produzido na ETA Botafogo

## **. 4 METODOLOGIA**

### **4.1 Caracterização da área de estudo**

A ETA Botafogo faz parte do sistema produtor de mesmo nome, responsável pela geração de aproximadamente 17% do volume de água distribuído na Região Metropolitana do Recife, abrangendo parte de Igarassu e os municípios de Abreu e Lima, Paulista, Olinda e as praias da Zona Norte (COMPESA, 2013), a capacidade nominal da ETA é de 3600 L/s, mas atualmente está operando com 1800 L/s. A Figura 1, mostra uma foto aérea da ETA Botafogo, a qual está localizada no município de Igarassu-PE.

A água tratada é distribuída para as seguintes localidades: Alto da Boa Vista, Alto do São Miguel, Caetés I, Caetés II, Caetés III, Centro, Desterro, Jardim Caetés, Matinha, Planalto, Timbó, Agamenon, Alto do Céu, Bela Vista, Boa Sorte, Bonfim, Campina de Feira, Cruz de Ças, Igarassu, Inhamã, Jabacó, Monjope, Pancó, Posto de Monta, Rubina, Santa Luzia, Santa Rita, Santo Antonio, Saramandaia, Sítio dos Macacos, Tabatinga, Triunfo, Umbura, Vila Rural, Arthur Lundgren I, Arthur Lundgren II, Engenho Maranguape, Fragoso, Jaguarana, Jaguaribe, Janga, Jardim Maranguape, Jardim Paulista, Jardim Velho, Maranguape I, Maranguape II, Maranguape III, Mirueira, Nobre, Nossa Senhora da Conceição, Nossa Senhora do Ó, Paratibe, Paque do Janga, Tabajara, Torrões Galvão, Cajueiro, Cidade Criança, Cidade Industrial, Conceição, Espinheiro, Grêmio, Mangabeira, Várzea, Veloz

Figura 1.2 : Imagem aérea do sistema de produção de água de BOTAFOGO



**Fonte:** Compesa (2023)

A bacia do sistema Botafogo possui um espelho máximo de água de 1,79 km<sup>2</sup> e uma capacidade de acumulação de 288 m<sup>3</sup> (COMPESA, 2013).

O rio Botafogo abrange o município de Araçoiaba, e partes dos municípios de Tracunhaém, Igarassu, Itaquitinga e Goiana. Recebe como principais afluentes pela margem esquerda, o Riacho Pilão (classe 2), Rio Cumbe (classe 1), Rio Guandú, Riacho Jardim, Rio Itapirema, Rio Arataca (classe 2) e pela margem direita, o Rio Itapicuru (classe 2) e o Rio Caticá. Possui a Mata da Usina São José e Mata de Miritiba como áreas de proteção. Seu solo é usado para ocupação urbana e industrial, áreas de cultivo com cana-de-açúcar, áreas de Mata Atlântica e mangue e policultura, aquicultura e silvicultura. A água é destinada para abastecimento público, recepção de efluentes domésticos e recepção de efluente industrial, devido a indústrias química e sucro alcooleira desenvolverem atividades em torno da bacia (CPRH, 2000). Os dados de:

- Volume gasto nas lavagens de filtros;
- Volume gasto nas descarga de decantadores;
- Dosagem média de coagulante;
- Dosagem média de polímeros;
- Balanço de massa para identificar o quantitativo de lodo produzido;
- A caracterização do lodo produzido;

Foram coletados direto com a coordenação de produção da ETA BOTAFOGO.

Os ensaios de resistência específica do lodo para identificar qual o melhor polímero a ser aplicado foi realizado no laboratório da ETA BOTAFOGO.

O tipo de tratamento desta ETA é do tipo convencional o esquema de tratamento de água está representado na figura 1.1

**Figura 1.1.** Fluxograma do Processo de Tratamento na ETA Botafogo



**Fonte:** Do Autor (2023)

A ETA Botafogo foi projetada com 4 módulos idênticos, com capacidade unitária de 1,56m<sup>3</sup>/s. A configuração atual consta de um módulo e meio, com capacidade de tratamento para 2,2m<sup>3</sup>/s de água bruta. A construção das unidades de tratamento da ETA se deu em duas etapas. Na primeira, concluída em 1986, foi construído um módulo de tratamento e na segunda, concluída em 1989, foi construído meio módulo de tratamento. Os principais constituintes desta ETA são: Calha Parshall; 3 floculadores mecanizados de 4 estágios e decantadores (Figura 1.3) com capacidade de tratamento de 2.77 m<sup>3</sup>/s, de módulos tubulares sem agitação onde os flocos formados nos floculadores decantam sob ação da gravidade, indo para o fundo do decantador, a água sem os flocos escoam por tubulações localizadas no final da câmara na altura da linha d'água e segue para os filtros, a limpeza nos decantadores é realizada através de descarga hidrostática (Figura 1.2), o lodo que é depositado no fundo do decantador é retirado periodicamente por escoamento hidráulico por tubulações ou aberturas de comportas de fundo, escoando para uma caixa de concreto e depois para a unidade de tratamento de resíduos. A ETA possui ainda filtros rápidos com leito de antracito e areia, como mostra a Figura 1.2.

**Figura 1.2** Foto do Tanque de Decantação da ETA Botafogo



**Fonte:** Do Autor (2021)

**Figura 1.3** Foto do Ponto de Descarga de Lodo do Decantador



**Fonte:** Do Autor (2023)

**Figura 1.4** Foto dos filtros descendentes da ETA Botafogo



**Fonte:** Do Autor (2021)

Ainda como parte do tratamento da água, à ETA Botafogo possui um pavilhão de cloro, podendo funcionar uma bateria de até seis cilindros de cloro, que ficam estocados no mesmo local. Existe também um prédio de química, onde ficam localizados os tanques de dissolução

de sulfato de alumínio, onde o mesmo é dissolvido para ser aplicado à água. É utilizado sulfato no estado líquido que fica armazenado em tanques de fibra de vidro próximos a este prédio.

Este projeto está dividido em quatro partes. A primeira consiste na descrição do local onde foram realizadas as coletas das amostras. A segunda descreve a metodologia empregada na coleta das amostras os cuidados no transporte ao laboratório e preservação, e a metodologia utilizada no ensaio de deságue do lodo. A terceira escreve-se as metodologias e equipamentos adotados para se obter os resultados da pesquisa. Por fim apresenta-se a análise estatística dos dados analisados.

## **4.2 Procedimentos Metodológicos**

As informações sobre concepção dos filtros e decantadores da ETA foram obtidas na base de dados da COMPESA, setor de projetos onde consta todos os dados das unidades de tratamento.

A ETA Botafogo possui uma concepção de ciclo completo, coagulação, floculação, decantação e filtração.

Os decantadores são três, com concepção de decantadores lamelares.

São oito filtros que operam com hidráulica de taxa declinante.

A caracterização do lodo ETA Botafogo foi obtida por dados fornecidos pelo laboratório de resíduos localizado em dois irmãos, todas as análises de caracterização dos resíduos gerados na ETA ocorre nesse laboratório.

O lodo de ETA tem características que variam dependendo das propriedades da água de origem e dos métodos de tratamento e os produtos químicos usados, milhões de toneladas de resíduos sólidos são gerados todos os anos a partir dos processos de tratamento de água, e o aumento da demanda de água tem aumentado o volume de lodo fazendo com que a destinação e gerenciamento dos resíduos dessas unidades seja um contínuo problema ambiental e econômico desafiador para todas as autoridades de água em todo o mundo (Babatunde e Zhao, 2007)

O lodo gerado nas Estações de tratamento de Água, possui sólidos suspensos e dissolvidos produzidos, alta concentração de sílica, proveniente principalmente da água bruta, alto teores de Alumínio e/ou Ferro provenientes dos coagulantes, acrilamida composto existente na maioria dos polímeros, e em algumas estações há também considerável quantidade de polímeros orgânicos.

A tecnologia de mantas geotexteis foi analisada com base nos resultados de quantificação e caracterização dos resíduos gerados, dos ensaios de trabalhabilidade para identificação do teor

de lodo adensado.

Após a avaliação da qualidade do tratamento do lodo produzido, foi realizada uma relação entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS 6 e 12 e o que é produzido na ETA.

Essa pesquisa é qualitativa e quantitativa pois nela iremos abordar os dados usados na coleta das informações sobre consumo de energia, quanto de volume de água se usa numa estação dessa, quais os processos e etapas que envolvem a filtração do lodo, quais as formas de reduzir esse resíduo e mostrar também as possíveis destinações finais e sustentáveis.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os filtros da ETA BOTAFOGO tem a capacidade nominal para tratar 2.976,17 L/s, os decantadores tem capacidade nominal de 2.219 L/s.

- Número de filtros.....6 unidades
- Dimensões úteis..... 12,15 x 8,0m
- Área útil.....97,20m<sup>2</sup>
- Velocidade ascensional.....1 m/min.(só água)
- Velocidade ascensional.....0,25 m/min.(ar e água)
- Tempo de lavagem.....12min. (só água)
- Tempo de lavagem.....02min.(ar e água)
- Vazão máxima de lavagem .....97,20 m<sup>3</sup>/min. = 1.620 L/s

Volume de água gasto na lavagem de um filtro =  $97,20 \times 1 \times 12 + 97,20 \times 0,25 \times 2$   
 $= 1.215 \text{ m}^3$

- Volume gasto nas descargas de decantadores – 9654,65 M<sup>3</sup>

De acordo com Kawamura (1991), a melhor forma para dimensionar sistemas de tratamento de lodo, e sua quantificação, é a execução de testes em estações-piloto ou ensaios de laboratório. Porém, esses procedimentos demandam custos significativos, tornando-os menos utilizados. O balanço de massa é outra alternativa para a quantificação do lodo, na qual a produção é calculada pela relação entre massa molar

dos produtos químicos aplicados e dos compostos precipitados, adicionando a concentração de sólidos na água bruta e multiplicando pela vazão (Di BERNARDO & SABOGAL PAZ, 2008).

Existem diversas equações empíricas que estimam a produção de sólidos relacionando parâmetros como vazão afluente, dosagem de coagulante e outros produtos aplicados no tratamento, além da concentração de sólidos em suspensão na água bruta. A variabilidade de equações está associada ao tratamento que cada autor atribuiu à relação sólidos suspensos e turbidez, além da inclusão ou não do parâmetro cor. De acordo com a pesquisa realizada por Katayama et al. (2015), o cálculo de balanço de massa oferece precisão e representatividade na estimativa superiores às das fórmulas empíricas. Apesar disso, as equações são muito empregadas nos estudos devido à praticidade e principalmente por conta da falta de dados oferecidos pelas companhias operantes das estações. No estudo da quantificação do lodo produzido pela ETA BOTAFOGO, calculamos através das formulas empíricas e do balanço de massa.

- ✓ TEOR SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS (KgSST/dia): 101.192
- ✓ DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMINIO MÉDIA: 62 PPM
- ✓ TURBIDEZ (MAIORES MÉDIAS) ÁGUA BRUTA (NTU):220
- ✓ COR (MAIORES MÉDIAS) ÁGUA BRUTA (uH):950

#### **QUANTIFICAÇÃO DO LODO PRODUZIDO NA ETA BOTAFOGO – FÓRMULAS**

- ✚ VOLUME LODO (Kg/DIA) WCR:95.300
- ✚ VOLUME LODO (Kg/DIA) CETESB:105.230
- ✚ VOLUME LODO (Kg/DIA) CORWELLI:110.232
- ✚ VOLUME LODO (Kg/DIA) KAWAMURA:91.521
- ✚ VOLUME MÉDIO LODO (Kg/DIA):92.563
- ✚ VOLUME MÉDIO LODO (m<sup>3</sup>/DIA):6.232

#### **QUANTIFICAÇÃO DO LODO PRODUZIDO NA ETA BOTAFOGO – BALANÇO DE MASSA**

##### **Resultado dos ensaios de resistência específica dos resíduos gerados na ETA BOTAFOGO.**

O teor de sólidos é de 0,82% na água de descarga dos decantadores, e 0,0053% na água de lavagem dos filtros, coagulante utilizado foi o sulfato de alumínio.

A resistência específica é um parâmetro utilizado para descrever a filtrabilidade de lodos de águas residuárias e de outros resíduos. Tal parâmetro possibilita a escolha apropriada de polímeros e a seleção de dispositivos para desaguamento. CHRISTENSEN (1985) afirma

que os lodos adensados apresentam valores de resistência específica à filtração entre  $1 \times 10^{12}$  e  $10 \times 10^{12} \text{ m/Kg}$ , sendo que quando devidamente condicionados com polímeros, estes valores são reduzidos para  $1 \times 10^{10}$  e  $1 \times 10^{11} \text{ m/Kg}$ .

O valor da resistência específica encontrada nos ensaios do lodo gerado na ETA BOTAFOGO foi de  $4,92 \times 10^{12} \text{ m/Kg}$ , após ensaio com polímero cationico de alta carga e alto peso molecular, a resistencia específica foi reduzida para  $0,97 \times 10^{12} \text{ m/Kg}$ . Um maior tempo de permanencia dos lodos nos decantadores.

### Disposição final do lodo gerado na ETA BOTAFOGO

Os usos benéficos mais utilizados ou de maior potencial de utilização para o lodo gerado, adensado e desidratado da ETA BOTAFOGO são: fabricação de cimento, disposição no solo, cultivo de grama comercial, fabricação de tijolos, solo comercial, compostagem e plantações de cítricos. O lodo também poderá ser utilizado para a melhoria da sedimentabilidade em águas de baixa turbidez, recuperação de coagulantes e controle de  $\text{H}_2\text{S}$ . Além das utilizações benéficas citadas, muitas vantagens têm sido observadas, quando os lodos de ETAs são lançados em redes coletoras de esgotos ou diretamente nas estações de tratamento de esgotos. Devido ao teor de sólidos na água da lavagem dos filtros e descargas dos decantadores a melhor concepção de tratamento é a segregação das duas fontes de geração de sólidos conforme apresentado figura 9 e 10.

### Tecnologia adequada para o tratamento do lodo gerado na ETA BOTAFOGO

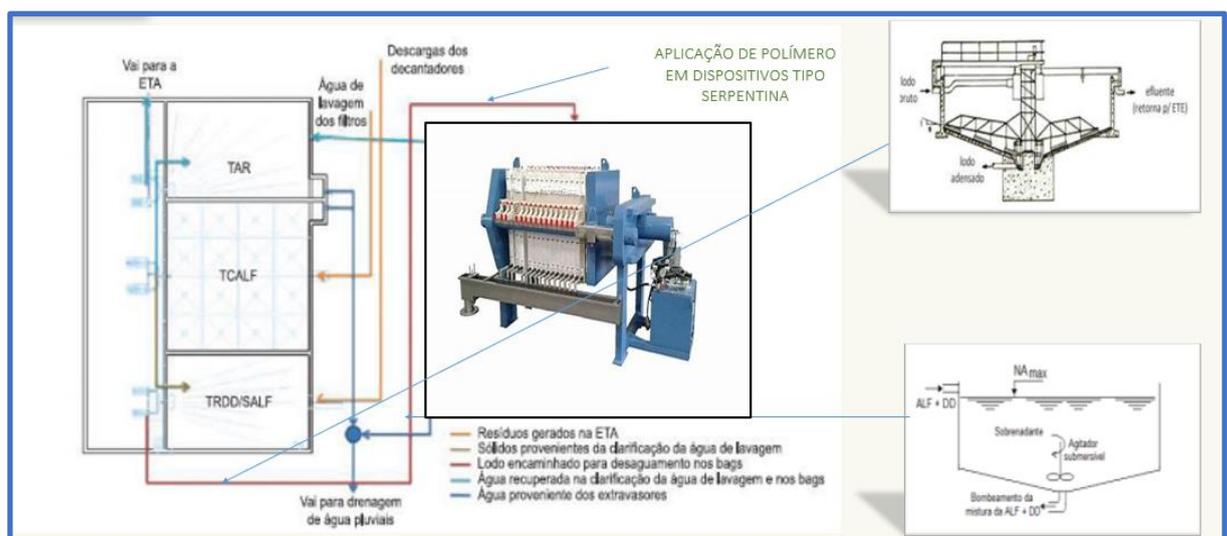


Figura 9 - Tecnologia proposta para ETA'S DE CICLO COMPLETO

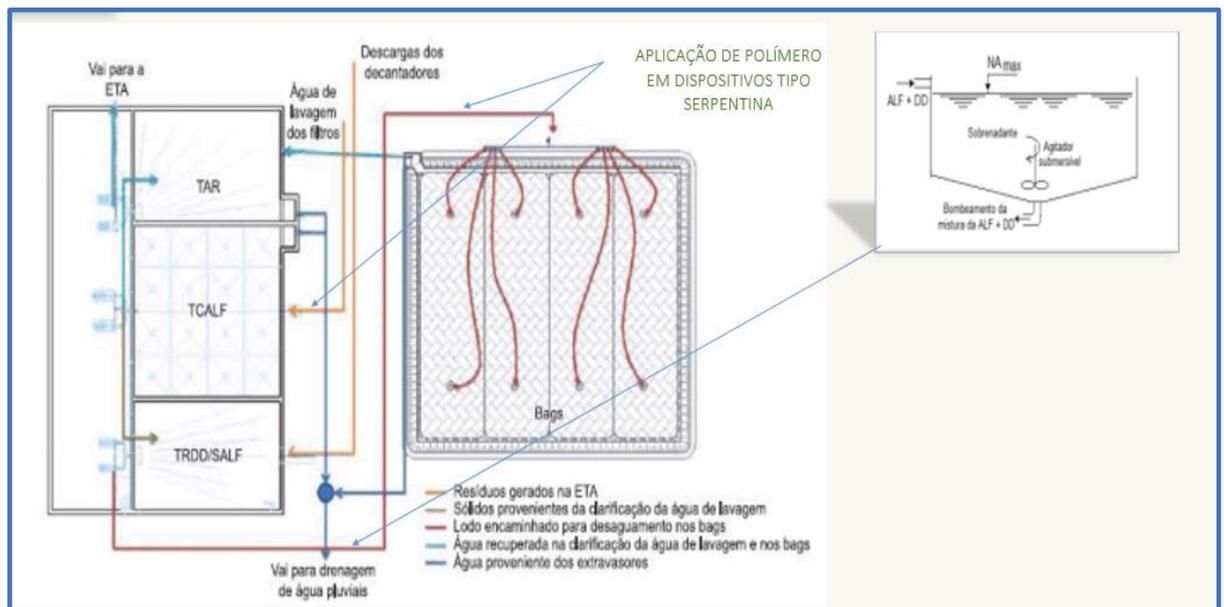


Figura 10 - Tecnologia proposta para ETA'S DE CICLO COMPLETO

### Destinação pós tratamento

Após o tratamento, o lodo poderá ser utilizado de diversas maneiras, como na agricultura, silvicultura, na recuperação de áreas degradadas, construção de telhados verdes, controle de erosão, na fabricação de materiais de construção, pavimentação, dentre outras. Para tal, é imprescindível o tratamento adequado de acordo com a PNRS, evitando graves impactos ao meio ambiente e aos seres vivos.

### Tecnologias e Projetos

Atualmente existem diversas tecnologias que podem ser empregadas nas diferentes fases do processo de tratamento, no entanto, para obtenção de resultados eficientes, é imprescindível um projeto prévio, desenvolvido com base na caracterização do lodo, estrutura existente, projeção de crescimento de demanda, condições ambientais locais, entre outros fatores.

Diante do exposto apresentamos como tecnologias para o tratamento de lodo gerado na ETA BOTAFOGO, O TRATAMENTO ATRAVÉS DE MANTAS GEOTEXTEIX OU FILTRO PRENSA.

### Conclusão

Para destinar corretamente o lodo de ETA, além do conhecimento técnico sobre os tratamentos envolvidos, são necessários também conhecimentos logísticos. O emprego da logística para planejar, manusear, armazenar e transportar os resíduos é essencial para o sucesso do processo. Os conceitos de logística reversa estão presentes em toda a cadeia de reuso do lodo, bem como os preceitos da logística verde que se preocupa, entre outros aspectos, com a ausência de reaproveitamento e com o crescente aumento da emissão de resíduos ao meio

ambiente. O conhecimento dos processos logísticos para identificar as alternativas existentes em equipamentos, materiais e instalações é fator determinante para garantir a máxima eficiência do processo com o mínimo custo. Da mesma forma, conhecer e aplicar os conceitos relativos à logística reversa e à logística verde é igualmente necessário para que se alcance o equilíbrio entre economia, meio ambiente e sociedade. Diante do que foi exposto não existe solução única para o destino final dos **lodos de ETA's e ETE's**.

O que se deve buscar são soluções múltiplas que suportem em conjunto e com longevidade a destinação final e os usos benéficos de lodos.

Trata-se de mudança de postura e de posicionamento técnico e até jurídico-legal.

Ainda que os aterros se configurem numa alternativa de disposição final ambientalmente segura, é ilusão acreditar que eles sejam a solução única e definitiva para o problema. As soluções diversificadas e múltiplas nos levarão a condições de independência tecnológica e principalmente de versatilidade e flexibilidade operacional.

O encaminhamento da questão ambiental só irá atingir patamares mais elevados a partir da articulação entre os vários setores de desenvolvimento urbano, e a destinação dos resíduos gerados pela atividade humana é um fator chave para o planejamento ambiental e a gestão das cidades. É fundamental essa integração para a promoção gradativa de qualidade de vida, melhorias ambientais e de saúde, colaborando também para a responsável prestação de serviços públicos.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos Sólidos - Classificação** - NBR-10.004. 2004

ACHON, C. L., MEGDA, C. R, SOARES, L.V. **Impactos ambientais proocados pelo lançamento in natura de lodos provenientes de estações de tratamento de água**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, ABES, Campo Grande - MS, 2005.

ÁGUA - Associação Guardiã da Água. Jornal Eletrônico da Água - **Tratamento de Água**. Disponível em: <[www.agua.bio.br/botao\\_d\\_L.htm](http://www.agua.bio.br/botao_d_L.htm)>. Acesso em: 13

set. 2013.

ANDRADE, C. F., SILVA, C.M., OLIVEIRA, F.C. Gestão ambiental em saneamento: uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de ETA e seus impactos na qualidade das águas. In: **Anais V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Belo Horizonte/MG - 2014.

APHA American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater**, 21<sup>a</sup> ed., New York. 2005.

ASAOKA, S. ; YAMAMOTO, T. ; KONDO, S. ; HAYAKAWA, S. Removal of hydrogen sulfide using crushed oyster shell from pore water to remediate organically enriched coastal marine sediments. **Bioresour Technol**. v. 100, p. 4127-4132, 2009.

BARBOSA, R. M. et. al. **A Toxicidade de Despejos (lodos) de Estações de Tratamento de Água à daphnia similis (ceadocera, crustacea)**. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária. Porto Alegre. 2000.

BARROSO, M.M. **Influência das micro e macropropriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2007.

BARROSO, M.M. **Gerenciamento de Resíduos Gerados no Tratamento de Água**. Engenharia Ambiental. UNIR. Abril, 2009.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento**. 3aed. rev. - Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 408 p. 2006. COMPESA. **Companhia Pernambucana de Saneamento**. Abastecimento de Água. Disponível em: <<http://www.compesa.com.br/arquivos/saneamento/botafogo.pdf>>.

Acesso em 12 de maio de 2013.

CORDEIRO, J. S. **Importância no tratamento e disposição adequada de lodo de ETAs** (Capítulo I). Coordenador: Reali, M. A. P. Noções gerais de tratamento

e disposição de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água.** Tese Doutorado - SHS - EESC, USP - 342p. São Carlos, 1993.

CPRH. **Agência Estadual de Meio Ambiente.** Disponível em:

[http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/41\\_QualidadeDasAguas.pdf](http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/41_QualidadeDasAguas.pdf). Acesso em, 13 de setembro de 2014.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D. B, VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água.** Editora LDiBe, São Carlos, SP, 2011.

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

FERREIRA FILHO, S.S. ; WAELKENS, B.E. Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua disposição em estações de tratamento de esgotos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.14, n.3, p. 317-326, 2009.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB 2008.** Rio de Janeiro, RJ. 2010

I

BGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades.** Rio de Janeiro, RJ. 2014. Disponível em:

<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=260680>.

Acesso

em

21/03/2014

JANUÁRIO, G.F. ; FERREIRA FILHO, S.S. Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 2, 2007.

REALI, M. A. P. **Noções gerais de tratamento e disposição final do lodo de estações de tratamento de água**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES. 240 p. 1999.

REALI, M. A. P. ; PATRIZZI, L. J. ; CORDEIRO, J. S. **Noções gerais de tratamento e disposição final do lodo de estações de tratamento de água**. Projeto PROSAB. Cap. 4. Rio de Janeiro: ABES. 240 p. 1999.