

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Pedro Henrique da Rocha

**Avaliação da recuperação de biopolímeros de lodo residual de processo biológico de  
tratamento de efluentes**

Florianópolis

2022

Pedro Henrique da Rocha

**Avaliação da recuperação de biopolímeros de lodo residual de processo biológico de  
tratamento de efluentes**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.  
Orientador: Dr. Nelson Libardi

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rocha, Pedro Henrique da  
Avaliação da recuperação de biopolímeros de lodo residual  
de processo biológico de tratamento de efluentes / Pedro  
Henrique da Rocha ; orientador, Nelson Libardi, 2022.  
51 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,  
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Biopolímeros. 3.  
Recuperação de recursos. I. Libardi, Nelson. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Pedro Henrique da Rocha

**Avaliação da recuperação de biopolímeros de lodo residual de processo biológico de  
tratamento de efluentes**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel  
em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de  
Engenharia Sanitária e Ambiental

Local, 17 de março de 2022.



Documento assinado digitalmente  
Maria Elisa Magri  
Data: 24/03/2022 14:00:41-0300  
CPF: 044.011.369-50  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof.(a) Maria Elisa Magri, Dr  
Coordenador do Curso

**Banca.Examinadora:**



Documento assinado digitalmente  
Nelson Libardi Junior  
Data: 24/03/2022 11:27:46-0300  
CPF: 052.684.639-93  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Nelson Libardi Junior, Dr.(a)  
Orientador(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.(a) Maria Elisa Magri, Dr.  
Avaliador(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dayane Domingos, Dr.(a)  
Avaliador(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Darci Tecilla e Jaison Luis da Rocha, aos meus familiares, professores, colegas de classe e aos meus amigos, que sempre estiveram comigo.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, que sempre me apoiaram em todas as circunstâncias.

Aos amigos que moram junto comigo e sempre ajudaram no meu crescimento.

Aos amigos que fiz na universidade e fora dela.

Ao meu orientador Nelson, que colaborou com o tema deste trabalho e por ser um excelente profissional. Sem ele esse trabalho não seria possível.

Ao LABEFLU por me conceder acesso a sua estrutura de laboratório e a todos que me acompanharam durante os longos dias de análise.

A todos os professores e professoras do curso, são todos excelentes profissionais em que me espelho.

À UFSC e todos seus funcionários. Foram anos memoráveis dentro dessa universidade, anos que levarei sempre em minha memória.

E a todas as pessoas que em algum momento, desde que breve, estiveram presente e colaboraram de alguma forma. Meus sinceros agradecimentos a todos!

## RESUMO

O lodo residual de processos biológicos de tratamento de efluentes é gerado em grandes quantidades e é responsável pela maior parte dos custos totais de uma ETE. Dentre os componentes do lodo residual, o EPS (Extracellular Polymeric Substances), como são chamados os biopolímeros, são polissacarídeos extracelulares resultantes do metabolismo microbiano, responsáveis pela agregação microbiana na forma de flocos biológicos em sistemas biológicos de tratamento de efluentes. O EPS do lodo residual vem sendo avaliado para diversas aplicações, como biofloculante e adsorvente em processos de tratamento de efluentes, impermeabilizante na indústria de papel e construção civil, retardante de chama para a indústria têxtil e, na agricultura, como agente de liberação controlada de nutrientes. Portanto, a recuperação de biopolímeros do lodo excedente de processos biológicos de tratamento é uma estratégia para alinhar os processos de uma ETE com o conceito de economia circular, que prioriza o uso sustentável e o valoriza os recursos. Estudos para avaliar o potencial de recuperação de biopolímeros do lodo gerado nas ETE são fundamentais para impulsionar o desenvolvimento dos processos de recuperação de recursos. Neste trabalho, o lodo residual de uma ETE municipal, desaguado por centrifugação, foi extraído e caracterizado, onde apresentou rendimento de recuperação de EPS de 19,4% em termos de sólidos voláteis do lodo. O EPS extraído foi caracterizado em termos de proteínas (156,4 mg/g), substâncias húmicas (25,24 mg/g), e polissacarídeos (71,54 mg/g). Sendo assim, foi possível apresentar a recuperação do EPS do lodo residual como uma estratégia de recuperação de recursos integrada à ETE Insular, como contribuição para impulsionar a transição das unidades de tratamento para unidades de recuperação de recursos.

**Palavras-chave:** Biopolímeros, Lodo Aeróbio, Recuperação de recursos.

## ABSTRACT

Residual sludge from biological wastewater treatment processes is generated in large quantities and is responsible for most of the total costs of an WWTP. Among the components of residual sludge, EPS (Extracellular Polymeric Substances), or biopolymers, are extracellular polysaccharides resulting from microbial metabolism, responsible for microbial aggregation in the form of microbial flocks in biological wastewater treatment systems. The EPS from residual sludge has been evaluated for several applications, such as a bioflocculant and adsorbent in wastewater treatment processes, waterproofing in the paper and civil construction industry, flame retardant for the textile industry and, in agriculture, as a controlled release agent of nutrients. Therefore, the recovery of biopolymers from the excess sludge from biological treatment processes is a strategy to align the processes of an WWTP with the concept of circular economy, which prioritizes sustainable use and values resources. Studies to rate the potential for recovery of biopolymers from the sludge generated in WWTP's are essential to boost the development of resource recovery processes. In this work, the residual sludge from a municipal WWTP, dewatered by centrifugation, was extracted and characterized, and showed an EPS recovery yield of 19.4% in terms of volatile sludge solids. The extracted EPS was characterized in terms of proteins (156.4 mg/g), humic substances (25.24 mg/g), and polysaccharides (71.54 mg/g). Therefore, it was possible to present the recovery of EPS from residual sludge as a resource recovery strategy integrated to the Insular WWTP, as a contribution to boost the transition from treatment units to resource recovery facilities.

**Keywords:** Biopolymers. Aerobic Sludge. Resource recovery.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do Sistema de Lodos Ativados por Aeração Prolongada.....	20
Figura 2: Imagem aérea da ETE Insular .....	27
Figura 3: Fluxograma do processo de tratamento da ETE Insular .....	28
Figura 4: Lodo centrifugado após descongelar.....	29
Figura 5: Processo de extração e recuperação do EPS .....	31
Figura 6: Extração do EPS .....	31
Figura 7: EPS extraído e armazenado em tubos falcon .....	32
Figura 8: Realização do ensaio em bancada para análise da concentração de polissacarídeos	35
Figura 9: Teor de sólidos secos e de umidade do lodo.....	37
Figura 10: Rendimento de recuperação do EPS .....	38
Figura 11: Concentração de polissacarídeos, proteínas e substâncias húmicas no no EPS.....	40

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Preparação das amostras de concentração de proteínas e ácidos húmicos.....	34
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características e quantidades do lodo produzido em lodos ativados.....	21
Tabela 2: Parâmetros operacionais das centrífugas.....	24
Tabela 3: Capacidade e eficiência atual da ETE Insular. ....	28
Tabela 4: Série de sólidos do lodo residual centrifugado.....	36
Tabela 5: Teor de sólidos do EPS.....	38
Tabela 6: Comparação de EPS extraído de lodos aeróbios e anaeróbios .....	39
Tabela 7: Constituintes de EPS (mg/g), de acordo com o método de extração.....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALE – *Alginate-like exopolymers*

CASAN - Companhia Catarinense de Águas e Saneamento

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO – Demanda biológica de oxigênio

DNA - Ácido Desoxirribonucléico

DQO – Demanda química de oxigênio

EDTA - Ácido etilenodiaminotetracético

EPS – *Extracellular polymeric substances*

ETE – Estação de tratamento de esgoto

LABEFLU – Laboratório de efluentes líquidos e gasosos

pH - Potencial Hidrogeniônico

SF – Sólidos fixo

ST – Sólidos totais

SV – Sólidos voláteis

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

URR - Unidades de Recuperação de Recursos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivos.....	17
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	Tratamento de Águas Residuárias .....	18
2.2	Lodo Ativado de Aeração Prolongada.....	19
2.3	Gerenciamento do Lodo .....	21
2.4	Processo de centrifugação .....	23
2.5	Recuperação dos Biopolímeros no Lodo Residual.....	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>27</b>
3.1	Caracterização da área de estudo.....	27
3.2	Recuperação de biopolímeros.....	29
<b>3.2.1</b>	<b>Coleta e armazenamento do lodo centrifugado .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Teor de sólidos e umidade do lodo .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Extração do EPS .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Cálculo para o rendimento de recuperação de EPS do lodo .....</b>	<b>33</b>
3.3	Caracterização do EPS.....	33
<b>3.3.1</b>	<b>Concentração de proteínas e ácidos húmicos.....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Concentração de ácido glucurônico e glicose .....</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>36</b>
4.1	Série de Sólidos e Teor de Umidade do Lodo Residual .....	36
4.2	Teor de Sólidos e Recuperação de EPS.....	37
<b>4.2.1</b>	<b>Teor de sólidos .....</b>	<b>37</b>
4.3	Caracterização do EPS.....	39
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>

<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma estratégia que vem sendo estudada para agregar interesse e valor nos processos de tratamento de efluentes, é o de considerar as estações de tratamento de efluentes (ETE) como unidades de recuperação de recursos (URR) ou biorrefinarias, e não somente como um sistema de tratamento. A legislação mais rigorosa quanto ao grau de tratamento dos efluentes e a necessidade de plantas autossuficientes, ou mesmo positivas, em termos de energia e recursos são os principais fatores para a pesquisa e desenvolvimento de novas configurações de ETE (SANCHO et al., 2019). As ETE tratam e minimizam o potencial poluidor das águas residuárias, mas, ao fazê-lo, também contribuem para a emissão de poluentes sólidos e gasosos. No entanto, a recuperação de energia (por exemplo, digestão anaeróbia) e a recuperação de recursos (por exemplo, reuso de água, fósforo, nitrogênio, biopolímeros, etc) permitem compensar os impactos ambientais adversos do tratamento de efluentes (HAO et al., 2019).

A recuperação de recursos é um caminho promissor para compensar os impactos ambientais negativos. No entanto, processos de recuperação mais eficientes e a recuperação de produtos de alto valor agregado são necessários para se obter uma compensação total dos impactos negativos dos processos de tratamento. Assim, são necessárias mais pesquisas sobre caminhos alternativos de recuperação de recursos (HAO et al., 2019; SANCHO et al., 2019). Uma transição das ETE para URR é reconhecida como uma solução promissora para superar esses obstáculos (WANG et al., 2015).

Ao discutir as estratégias de valorização do lodo, é necessário considerar que estas podem causar poluição durante seu processamento e aplicação. Portanto, impactos ambientais e avaliação de segurança ambiental de estratégias de valorização dos resíduos devem ser discutidos e analisados. A recuperação de recursos é benéfica para o meio ambiente porque pode aliviar a pressão sobre recursos escassos (SHI et al., 2018). A avaliação dos aspectos econômicos e ambientais para a valorização de biomassa é uma questão que merece aprofundamento, tendo em vista que os custos de operação podem ser muito elevados, ou os processos de recuperação dos bioprodutos podem gerar uma fonte secundária de poluição ou consumo de energia, o que limitaria a aplicação do conceito de biorefinaria no contexto de países em desenvolvimento, como o Brasil (SHEN et al., 2015; SHI et al., 2018). A transição de ETE para um sistema de recuperação de recursos é reconhecido como uma solução promissora para superar questões de sustentabilidade. Contudo, ainda é incerto se essa abordagem pode de fato reduzir os impactos ambientais de uma ETE.

De acordo com Wang et al. (2015), países em desenvolvimento devem adaptar-se melhor aos modelos de recuperação de recursos que incluam a recuperação na forma de bioenergia e na redução do uso de produtos químicos na ETE. Os autores sugerem que estudos mais aprofundados específicos para cada caso sejam efetuados, para que seja validada a hipótese da transição de uma ETE para uma URR.

O lodo excedente, ou residual, é um dos principais resíduos dos processos biológicos de tratamento de efluentes e seu custo de processamento responde por quase metade do capital operacional total (DE VALK et al., 2019). O lodo residual de processos biológicos de tratamento de efluentes possui em sua composição, dentro outras substâncias, as substâncias poliméricas extracelulares (EPS). EPS são biopolímeros secretados pela biomassa microbiana durante o metabolismo celular, auxiliando na formação do floco biológico ou na agregação de partículas para a formação de biofilme. São compostos por proteínas, polissacarídeos, DNA, lipídios, glicoproteínas e substâncias húmicas (SEVIOUR et al., 2018). Esses biopolímeros atraíram interesse tecnológico recente (FENG et al., 2020) pois possuem características de hidrofobicidade, capacidade geleificante, além de possuírem em sua composição biomoléculas de interesse. Os EPS possuem o potencial de serem aplicados na área industrial, ambiental e agricultura, em substituição a outros polímeros biológicos ou sintéticos comerciais, bem como aditivos ou fontes de nutrientes (FENG et al., 2019).

O EPS pode constituir considerável fração do lodo biológico, sendo que a sua recuperação pode ser vantajosa tanto como biomaterial extraído de um resíduo, como quanto um processo para a redução da massa de lodo residual, resultando em redução nos custos de disposição.

Uma economia circular prioriza o uso sustentável e o valor dos recursos, eliminando o desperdício e beneficiando tanto a economia quanto o meio ambiente. Ela oferece uma alternativa ao cenário atual predominante, onde os recursos são usados para um propósito e depois descartados (ROEST et al., 2015). (HOUSE OF COMMONS, 2014). Portanto, a extração de biopolímeros do lodo de esgoto está alinhada com o conceito de economia circular. Estudos para avaliação de sua recuperação de biomassa residual de ETE são necessários para impulsionar a transformação de uma ETE em uma biorefinaria.

Desse maneira, a busca pela implementação do processo de extração de EPS de ETE's se caracteriza como um passo importante para a transformação em URR's.



## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar e caracterização dos biopolímeros extraídos no lodo biológico residual de uma ETE em escala real.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Coletar e caracterizar o lodo biológico residual da ETE Insular da Companhia Catarinense de Saneamento (CASAN);
- Extrair o EPS do lodo residual e avaliar seu rendimento de recuperação;
- Caracterizar o EPS quanto à sua concentração em proteínas, polissacarídeos e ácidos húmicos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

O tratamento de águas residuárias pode ser definido como um processo formado por uma série de operações, com o objetivo de remover substâncias indesejáveis, ou transformá-las em outras substâncias que tenham forma aceitável (JORDÃO & PESSOA, 1995). As estações de tratamento de esgotos (ETEs) são unidades operacionais, que através de processos físicos, químicos ou biológicos, removem as cargas poluentes do efluente, devolvendo as águas servidas em conformidade com os padrões exigidos pela legislação ambiental para os corpos hídricos. Para esgotos predominantemente domésticos, os parâmetros mais importantes e que merecem destaque são: sólidos, indicadores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e indicadores de contaminação fecal (VON SPERLING, 1996).

Os parâmetros físico-químico-biológicos, em sua maioria, estão relacionados com grandezas quantitativas, sendo quase sempre expressa em forma de concentração. Desse modo, a vazão de esgotos influi diretamente na estimativa de massa de poluentes presentes no esgoto, assim como no dimensionamento das unidades de tratamento e na avaliação dos impactos no meio ambiente.

Os processos físicos são caracterizados principalmente pelos processos de remoção das substâncias fisicamente separáveis dos líquidos ou que não se encontram dissolvidos (temperatura, cor, odor e turbidez). Já os processos químicos, são aqueles em que há utilização de produtos químicos, e raramente adotados isoladamente (sólidos, DBO, DQO, pH, etc). São utilizados quando o emprego dos processos físicos e biológicos não atendem, ou não atuam eficientemente nas características que se deseja reduzir ou remover, ou podem ter sua eficiência melhorada. Por fim, os processos biológicos dependem da ação de microrganismos (bactérias, fungos, vírus, helmintos) presentes no esgoto (JORDÃO & PESSOA, 2005).

Devido à grande geração de lodo, em torno de 150-200 mil toneladas por ano (ANDREOLI et al., 2001), o lodo representa uma fonte potencial de subprodutos. Assim, um modo de mitigar os efeitos negativos dos processos produtivos atuais, valorizando a biomassa e minimizando a geração de resíduo, é a realização da sua conversão em produtos com valor agregado. (MOHAN et al., 2016).

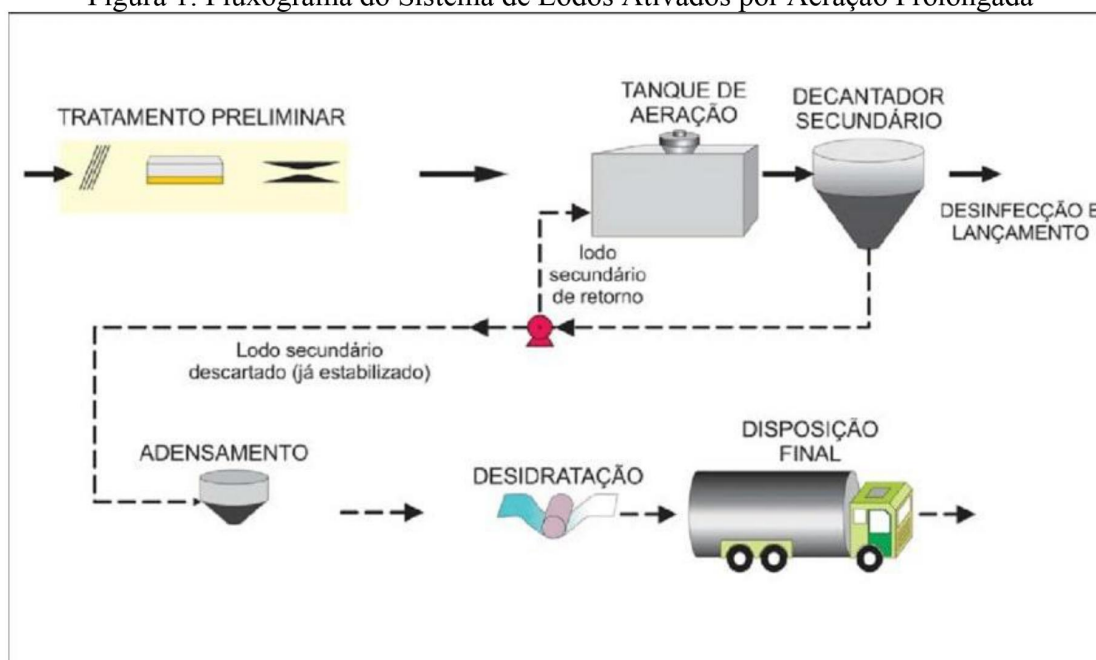
## 2.2 LODO ATIVADO DE AERAÇÃO PROLONGADA

Dentre os processos de tratamento biológico, o sistema de Lodos Ativados é atualmente o mais utilizado, a nível mundial, para a depuração de efluentes sanitários e industriais caracterizados por contaminação de carga orgânica e/ou produtos nitrogenados, em situações em que é necessária uma elevada qualidade do efluente e reduzidos requisitos de área (VON SPERLING, 2002). De acordo com o Atlas de Esgoto, da Agência Nacional de Águas (ANA, 2020), 37% das ETE's utilizam a tecnologia de reatores anaeróbios, 35% lagoas de estabilização e 10% o sistema de lodos ativados. Entretanto, de acordo com Chernicharo et al., (2018) aponta que na região centro-sul do Brasil, nas ETE's de grande porte, ou seja, naquelas que atendem mais de 100.000 habitantes, o sistema de lodos ativados é o mais utilizado (44%), além do tratamento preliminar com disposição oceânica (26%) e reatores UASB (22%).

O princípio do processo baseia-se na oxidação bioquímica para remoção de compostos orgânicos e inorgânicos presentes no esgoto bruto, mediada por uma população microbiana diversificada e mantida em suspensão num meio aeróbio, que se utiliza do substrato presente no efluente para se desenvolver. A eficiência do processo depende, dentre outros fatores, da capacidade de floculação da biomassa ativa e da composição dos flocos formados. As unidades fundamentais que integram um sistema de lodos ativados constituem-se basicamente de um tanque de aeração, de um decantador secundário e da recirculação do lodo. Podendo as variantes do sistema serem adaptadas para incluir remoções biológicas de nitrogênio e fósforo (WANNER et al., 2021, VON SPERLING, 2002)

O tratamento de lodos ativados de aeração prolongada (fluxo contínuo) é representado na Figura 1. Esta variante se difere do sistema convencional, pois como o processo de estabilização do lodo ocorre dentro do próprio sistema e a fim de evitar a geração de alguma outra forma de lodo que necessite posterior estabilização, neste tipo de processo não se faz necessário a utilização de um decantador primário, conseqüentemente não há unidades de digestão de lodo (VON SPERLING, 2002).

Figura 1: Fluxograma do Sistema de Lodos Ativados por Aeração Prolongada



Fonte: Adaptado pelo Autor, de Von Sperling (2006).

Os sistemas de lodos ativados por aeração prolongada têm como características a elevada idade de lodo (18-30 dias) e maior tempo de detenção hidráulica (16 - 24h) em comparação com o sistema convencional de lodos ativados (4 - 10 dias) e (6 - 8h). Ainda, a razão Alimento/Microrganismo ( $0,07 - 0,15 \text{ KgDBO/KgSSV.d}$ ) é menor que aquela para o sistema convencional ( $0,25 - 0,5 \text{ KgDBO/KgSSV.d}$ ), o que representa menor disponibilidade de alimento. Sendo assim, a biomassa utiliza o próprio material celular, através da respiração endógena, resultado na estabilização da biomassa no próprio reator (VON SPERLING, 2002).

A Tabela 1 apresenta os valores de produção de lodos para os sistemas de lodos ativados convencional e lodos ativados com aeração prolongada. Em um sistema de lodos ativados, a quantidade típica que se refere à produção de lodo é de 50 gramas por dia para cada habitante (METCALF e EDDY, 1991). Por outro lado, Von Sperling e Gonçalves (2001) estudando a produção de lodos em ETE para diferentes processos de tratamento constataram que a produção em sistema convencional é de 60 - 80 g SS por dia, para cada habitante.

Tabela 1: Características e quantidades do lodo produzido em lodos ativados

Variante do sistema	Teor de Sólidos Secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.dia)	Volume de lodo (L/hab.dia)
<b>Lodos Ativados Convencional</b>			
Lodo Primário	2,0-6,0	35-45	0.6-2.2
Lodo Secundário	0,6-1,0	25-35	2.5-6.0
Total	1,0-2,0	60-80	3.1-8.2
<b>Lodos Ativados Aeração Prolongada</b>			
	0,8-1,2	40-45	3.3-5.6

Fonte: Adaptado pelo Autor, de Von Sperling (2006).

A partir da Tabela 1, vê-se que entre os processos listados, o sistema de lodo ativado convencional produz um grande volume de lodo a ser tratado. Neste processo, o lodo não é digerido no tanque de aeração, porque seu tempo de residência (idade do lodo) é muito baixo para que seja efetivo. Já no sistema de aeração prolongada, a geração de lodo é menor, que se deve ao fato do lodo permanecer mais tempo dentro do sistema e estar submetido ao processo de decaimento endógeno.

### 2.3 GERENCIAMENTO DO LODO

O gerenciamento do lodo de estações de tratamento de esgotos é uma atividade altamente complexa e de alto custo, que se mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados dos sistemas de tratamento (ANDREOLI et al., 2001). Segundo Andreoli et al. (2001), o tratamento do lodo é parte integrante do processo de gerenciamento de lodos. As principais etapas do tratamento de lodo são:

- Adensamento: remoção de umidade (redução de volume);
- Estabilização: remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis);
- Condicionamento: preparação para desidratação (principalmente mecânica);
- Desaguamento: remoção de umidade (redução de volume);
- Higienização: remoção de organismos patogênicos;
- Disposição final: destinação final dos subprodutos.

O objetivo primário do adensamento é reduzir o volume de lodo e aumentar a eficácia do manuseio do lodo subsequente ou dos processos de tratamento tais como: a estabilização do lodo, desidratação ou transporte (EPA, 1978; WPCF 1980). Já a estabilização dos lodos tem por objetivos principais a redução de microrganismos patogênicos e a eliminação de maus odores devido à redução parcial ou total do processo de putrefação, que atua sobre a matéria volátil. A estabilização permite que a água contida no lodo bruto se separe mais facilmente dos sólidos nos processos de desidratação e, além disso, reduz o volume de lodo a ser removido diariamente das ETE (VON SPERLING, 1997).

Segundo Miki, Andrigueti e Alem Sobrinho (2001), o condicionamento é um processo para melhorar as características de separação das fases sólido-líquido do lodo, seja por meios físicos ou químicos. Já o desaguamento dos lodos digeridos tem como objetivo retirar parte da água contida no lodo, reduzindo assim o teor de umidade do mesmo. Metcalf e Eddy, (1991) apresentam diversos motivos que justificam a redução do volume de água dos lodos, entre eles estão os custos de transporte do lodo para o local de disposição final tornam-se, significativamente, menores quando o volume do lodo se reduz através da desidratação e também o lodo da desidratação é normalmente mais fácil de ser manipulado que o lodo adensado ou líquido. Dependendo do destino final adotado para o lodo de esgoto, ele precisará ou não passar pelas etapas de estabilização e higienização, estas garantem a estabilidade do lodo com redução de maus odores e patógenos, consequente redução de vetores e de elementos tóxicos de origem orgânica ou mineral (ANDREOLI, 2001).

As opções de destino final para o lodo de ETE são: aplicação em áreas degradadas, disposição em aterros sanitários, incineração e aplicação na agricultura e em florestas. Para a aplicação do lodo no solo, deve-se considerar uma série de fatores como: tipo de solo, tipo de cultura agrícola, metais pesados no solo e no lodo, contaminantes químicos presentes no lodo, contaminantes biológicos presentes no lodo (PRIM, 2011). A Resolução CONAMA Nº 375 de 2006, atualizada pela Resolução 498/2020, estabelece critérios, a serem respeitados, e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados.

O processo de incineração consiste na secagem e combustão do material. Além da emissão de gases e material particulado, o processo ocasiona a liberação de uma quantidade de cinzas consideradas relativamente inertes. Como vantagens do processo pode-se citar a redução do volume e redução ou destruição dos compostos orgânicos tóxicos (EPA, 1989). Apesar da

considerável redução de volume de lodo, a incineração não pode ser considerada como disposição final, porque as cinzas residuais requerem uma disposição final adequada. A disposição final em aterros sanitários é a mais comum (ANDREOLI et al., 2001).

O aterro sanitário é hoje o método apropriado mais difundido no Brasil para a disposição final de resíduos sólidos. Ele é definido como uma técnica de aterramento que se dá através da compactação dos resíduos na forma de camadas, cobertas periodicamente com terra ou outro material inerte, produzindo uma degradação biológica natural e lenta, até a mineralização da matéria biodegradável (FEAM, 2012). Esse método possui uma das mais eficientes e seguras técnicas de destinação de resíduos sólidos, visto que permite um controle eficiente e seguro do processo e apresenta uma boa relação custo-benefício. Além disso, pode receber vários tipos de resíduos, em diferentes quantidades, e é adaptável a qualquer tipo de comunidade, independentemente do tamanho (VAN ELK, 2007). A disposição em aterros necessita, no entanto, de cuidados especiais em relação à seleção de local, a características de projeto que evitem a percolação de lixiviado, à drenagem dos gases gerados e ao tratamento do chorume produzido, além de uma operação eficiente que evite a proliferação de vetores (ANDREOLI et al., 2001).

#### 2.4 PROCESSO DE CENTRIFUGAÇÃO

A desidratação (ou desaguamento) dos lodos digeridos tem como objetivo retirar parte da água contida no lodo, reduzindo assim o teor de umidade dele. O processo de desidratação pode ser realizado através de leitos de secagem, lagoas de lodo, filtro prensa, centrífuga, filtro prensa de esteiras e secagem térmica (ANDREOLI et al., 2001).

As centrífugas são equipamentos que se destinam à desidratação do lodo, separando os sólidos da água por diferença da força centrífuga. A concentração dos sólidos que entram na centrífuga é de 3 a 5 % e a concentração de sólidos no lodo desidratado varia de 20 a 30 %. As centrífugas operam com uma alimentação contínua, e removem sólidos por meio de um transportador em espiral e descarga contínua do líquido. O líquido efluente da centrífuga deve retornar ao início do tratamento, sendo misturado com o esgoto afluente à estação. A centrífuga separa a torta de lodo desidratado e o clarificado, denominado também de “centrado”. Essa separação ocorre devido à diferença de densidade entre os sólidos do lodo e a água circundante. Esse processo de separação assemelha-se com o que ocorre num decantador por gravidade. No

entanto, a centrífuga utiliza uma força de 500 a 3000 vezes a força da gravidade (MIKI; ANDRIGUETI; ALÉM SOBRINHO, 2001).

Quanto à aplicabilidade, segundo a EPA (1987), a centrífuga pode ser usada para adensamento ou desidratação. A percentagem de sólidos pode ser variada por mudanças dos parâmetros operacionais. As fases operacionais da desidratação mecânica de lodos, por centrífuga, podem ser assim resumidas: alimentação das centrífugas, adição de polieletrólito ou polímero, centrifugação, retorno do efluente líquido e descarga do lodo desidratado. A Tabela 2 apresenta os parâmetros operacionais das centrífugas.

Tabela 2: Parâmetros operacionais das centrífugas

<b>Parâmetro</b>	<b>Quantidade</b>
Captura de sólidos estimada	80% a 95%
Concentração de sólidos na torta estimada	20% a 30%
Consumo de polímero para lodo misto digerido	4 a 6 kg/ton ST

Fonte: Adaptado pelo Autor, de Von Sperling (2006).

Como mencionado, no processo de centrifugação ocorre a adição de polímeros junto ao lodo misto. Os polímeros são moléculas orgânicas e hidrossolúveis de cadeia molecular longa e peso molecular alto. A principal função dos polímeros é aumentar o tamanho das partículas do lodo. Este aumento de tamanho resulta num decréscimo da área superficial específica por peso unitário de sólidos do lodo. Desde que a resistência à desidratação é relacionada com perdas por atrito superficial, um aumento no tamanho da partícula reduzirá a área superficial na matriz do lodo, melhorando assim, as taxas de desidratação (HAAK, 2011).

Há três tipos de polímeros que podem ser usados em tratamento de água: catiônico, aniônico e noniônico. O catiônico é aquele que quando dissolvido em água se ioniza, adquire carga positiva e atua como um autêntico cátion. O aniônico, de maneira semelhante, adquire carga negativa e atua como ânion. O noniônico é aquele que não se ioniza em água. Os polímeros noniônicos não são polieletrólitos, mas são incluídos nessa categoria devido à semelhança de suas aplicações (SANTOS FILHO, 1985). De acordo com o Water Environment Federation (1991), os polímeros estão disponíveis em cinco formas físicas de apresentação: sólida/pó, líquida, emulsão, gel e em solução do tipo “mannich”.



A especificação do melhor polímero a ser utilizado deve ser analisada através da elaboração de testes em laboratório que representa o mais próximo da realidade possível o processo de desaguamento do lodo. Tal especificação não deverá ser efetuada baseando-se unicamente nos resultados experimentais obtidos, mas, também em uma análise do binômio polímero-dosagem (AWWA, 2005). As análises deverão ser efetuadas diretamente nos equipamentos de desaguamento, porém, na impossibilidade, poderá ser efetuado de maneira mais simples em laboratório, de forma que seja possível a seleção do polímero e da sua dosagem (FERREIRA et al., 1998). Os resultados da utilização de dosagem de polímero sobre o desaguamento do lodo são geralmente evidentes. Os teores de desaguamento aumentam consideravelmente com o aumento da dosagem de polímero (YUZHU, 1996).

## 2.5 RECUPERAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS NO LODO RESIDUAL

Apesar dos processos convencionais de gerenciamento do lodo residual reduzirem as quantidades de lodo gerado, ainda se tem como o problema o grande volume de lodo que é produzido nas estações de tratamento de esgotos, onde a demanda de disposição de lodo biológico fica em torno de 150-200 mil toneladas por ano (ANDREOLI et al., 2001).

Sendo assim, a recuperação de recursos provenientes do lodo residual vem sendo estudada para agregar valor e recuperar materiais dos resíduos, reduzindo o consumo de energia, emissão de gases do efeito estufa e conseqüentemente, a geração de desperdício de uma ETE. Grande porção do peso seco do lodo são substâncias poliméricas extracelulares, sendo essas aplicáveis em vários campos, sendo assim, seu potencial como biomaterial pode ser explorado. Dentre as possíveis aplicações, destacam-se: impermeabilização na indústria de papel e celulose, retardante de chama para a indústria têxtil, impermeabilizante para processos de construção civil, como biofloculante e ou adsorvente de nutrientes em processos de tratamento de efluentes e na agricultura, sendo que o EPS possui propriedade de retenção de água e nutrientes, para a liberação controlada em agricultura de precisão (KIM et al., 2020, FENG et al., 2019). Um produto registrado denominado “Kaumera” é um derivado de EPS com aplicações como agente de cura de cimento e revestimento de sementes, além de ser retardante de chama (KEHREIN et al., 2020a, 2020b).

O uso de polímeros sintéticos para processos de agregação de flocos biológicos, ou mesmo nos processos de desaguamento de lodo são prática comum nas ETE com processos biológicos. Esses polímeros sintéticos possuem muitas desvantagens; possuem custo elevado,

tóxicos ao processo biológico e podem poluir o meio ambiente quando de sua disposição (GRIFFIN, 2001). Assim, o alto potencial de floculação, baixo custo, e a sustentabilidade dos biopolímeros naturais, como quitosana, alginato de sódio e floculantes microbianos estão sendo pesquisados como alternativas para os polímeros sintéticos usados em processos de tratamento. Sendo assim, os EPS extraídos do lodo residual podem apresentar-se como uma alternativa interessante para preencher esta demanda ambiental (MORE, 2012).

As substâncias poliméricas extracelulares microbianas (EPS) são uma mistura complexa de polímeros de alto peso molecular excretada por microrganismos, produzida a partir da quebra celular e matéria orgânica adsorvida dos efluentes (SHENG, 2010). Os principais componentes (polissacarídeos, proteínas, substâncias húmicas e ácidos nucleicos) no EPS exibem um efeito crucial nos processos de adesão e agregação microbiana e promovem a formação e estabilidade da estrutura da comunidade microbiana (FLEMMING, 2010). O EPS pode reduzir os efeitos adversos das substâncias tóxicas nas células podendo ser fonte de carbono e energia para os microrganismos na ausência de nutrientes (TIAN, 2008 & HORN, 2001).

No entanto, a produção e composição do EPS é influenciada por diversos fatores, como tipo de substrato (fontes de carbono e razão de nitrogênio de carbono), condição de operação (oxigênio dissolvido, forças de cisalhamento, tempo de retenção de lodo e tempo de retenção hidráulica), estágio de crescimento e solução química (pH, força iônica e cátion bivalente) e presença de substâncias tóxicas (fármacos e metais pesados) (SHENG, 2006).

Para uma aplicação mais prática, a extração e recuperação de uma quantidade suficiente de EPS do lodo se torna um pré-requisito (FELZ et al., 2016). Do ponto de vista da economia circular, o EPS extraído do lodo residual pode ser considerado um recurso a ser utilizado, graças às suas características peculiares.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na ETE Insular (Figura 2), que está localizada no município de Florianópolis – Santa Catarina, no bairro Centro (27°36'0.27"S; 48°33'21.47"O). A estação atende a população dos bairros Centro, Agronômica, Trindade, Prainha, José Mendes, Morro da Cruz, Saco dos Limões, Santa Mônica, Costeira, Itacorubi, Córrego Grande, Pantanal, Carvoeira e Serrinha (CASAN, 2019).

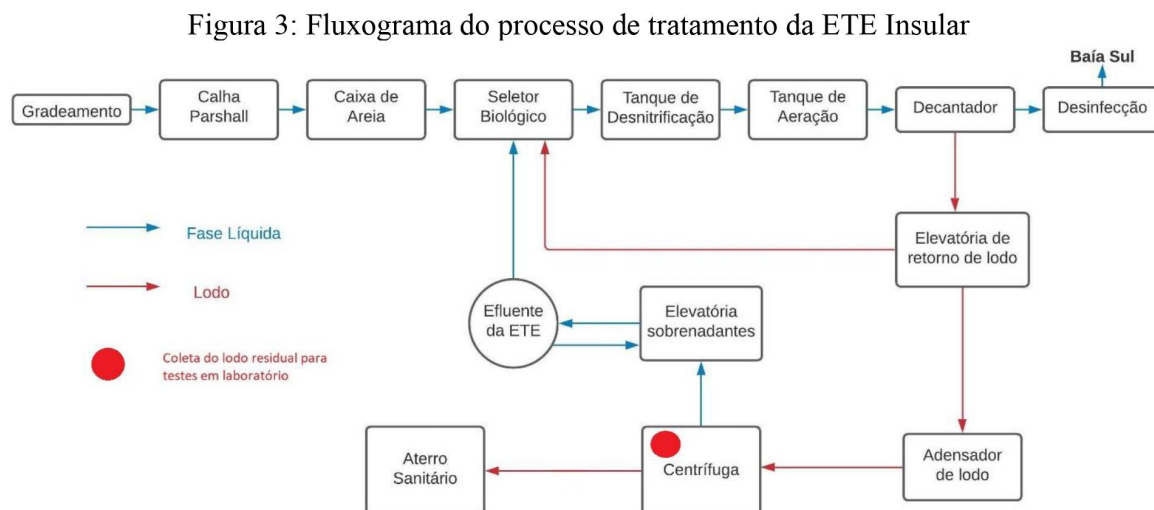
Figura 2: Imagem aérea da ETE Insular



Fonte: Google Earth (2021).

A ETE Insular tem operação 24 horas por dia, com uma capacidade instalada atual de 278 L/s, atendendo uma população de aproximadamente 225 mil habitantes, utilizando como forma de tratamento o processo de lodos ativados com aeração prolongada. A estação possui tratamento preliminar (gradeamento, caixa de areia e medidor de vazão), tratamento biológico

(seletor biológico, câmara de desnitrificação, tanque de aeração e decantador secundário) e por fim, a desinfecção por cloro gás (CASAN, 2019). O fluxograma dos processos de tratamento da ETE está descrito na Figura 3, a baixo:



Fonte: Estudo de Concepção do Esgotamento Sanitário de Florianópolis (2019).

Propriedades importantes do processo de lodos ativados com aeração prolongada estão apresentadas na Tabela 3, onde informações da capacidade instalada atual, eficiência de remoção e população atual atendida estão representadas.

Tabela 3: Capacidade e eficiência atual da ETE Insular.

<b>Processo de Lodos Ativados com Aeração Prolongada</b>		
Capacidade Instalada Atual	278	L/s
População Atendida Atualmente	225 mil	Habitantes
DBO do efluente tratado	≤ 30	mg/L
N-Amonical do efluente tratado	≤ 3	mg/L
Nitrato do efluente tratado	≤ 15	mg/L

Fonte: CASAN, (2019).

## 3.2 RECUPERAÇÃO DE BIOPOLÍMEROS

### 3.2.1 Coleta e armazenamento do lodo centrifugado

No dia 15 de outubro de 2021, o lodo foi coletado após a centrifugação, que é a última etapa do tratamento do lodo na ETE Insular. O lodo centrifugado foi armazenado em um recipiente de 1,5 litros de capacidade e previamente higienizado. Depois de realizada a coleta, o lodo foi armazenado em um freezer (-3°C) localizado no Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos (LABEFLU), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Na Figura 4 é possível observar a aparência do lodo residual coletado na ETE insular.

Figura 4: Lodo centrifugado após descongelar



Fonte: Autor (2021).

### 3.2.2 Teor de sólidos e umidade do lodo

Amostras de lodo foram utilizadas para a realização da série de sólidos, onde foram calculados os valores de Sólidos Totais, Sólidos Fixos e Sólidos Voláteis. Os ensaios foram realizados em triplicata, de acordo com o Standard Methods (APHA, 2017). Pequenas quantidades de lodo, variando entre 3 e 5 gramas, foram colocados em cadinhos de porcelana, pesados, e em seguida mantidos em estufa (105°C) por 24 horas. Retirando os cadinhos da

estufa, seguiram para a mufla ( $\pm 550^{\circ}\text{C}$ ) por 20 minutos e pesados. O teor de sólidos foi calculado conforme equações abaixo:

$$\text{Sólidos Totais } (g) = p1(g) - p0(g) \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{Sólidos Fixos } (g) = p2(g) - p0(g) \quad \text{Equação 2}$$

$$\text{Sólidos Voláteis } (g) = ST(g) - SF(g) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$p0$  = peso do cadinho;

$p1$  = peso do cadinho + lodo centrifugado após 24h na estufa;

$p2$  = peso do cadinho + lodo centrifugado após 20 minutos na mufla

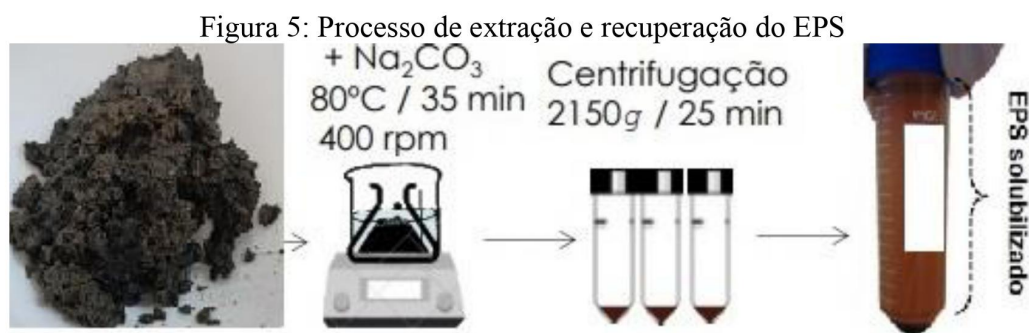
De acordo com Andreoli et al., (2006), a relação entre o teor de sólidos secos e a umidade do lodo residual pode ser calculada de acordo com a Equação 4, descrita abaixo:

$$\text{Umidade } (\%) = 100 - \text{Sólidos Totais } (\%) \quad \text{Equação 4}$$

Desse modo, é possível calcular a porcentagem de umidade diminuindo a porcentagem de Sólidos Totais (ST) por 100. A umidade influencia nas propriedades mecânicas do lodo, sendo que estas influenciam no tipo de manuseio e de disposição final do lodo, dessa forma, o teor de umidade do lodo tem grande influência no volume a ser manuseado (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).

### 3.2.3 Extração do EPS

A metodologia de extração do EPS do lodo oriundo do processo de lodos ativados aeração prolongada foi realizado de acordo com Felz et al (2016), conforme Figura 5 a baixo.



Fonte: adaptado pelo Autor (2022).

Para a extração, 15 g de biomassa previamente centrifugada foram adicionadas à 250 mL de água deionizada, aquecida à 80°C, acrescida de 1,25g de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, sob agitação durante 35 minutos utilizando agitador magnético com rotação de 400 rpm. Esta etapa de extração do EPS a partir do lodo está representado na Figura 6.

Figura 6: Extração do EPS



Fonte: Autor (2021).

O material proveniente do processo de extração do EPS foi colocado em tubos Falcon e levados para a centrífuga por 25 minutos. Após a centrifugação, o sobrenadante foi coletado, que é onde se encontra o EPS solubilizado e o material sedimentado foi descartado.

O líquido sobrenadante, que representa a fração de EPS, foi utilizado no ensaio de série de sólidos. A série de sólidos foi realizada em triplicata, de acordo com Standard Methods (APHA, 2017). Conforme visto na Figura 7, onde pode-se observar o EPS extraído.

$$Sólidos\ Totais_{EPS} \left( \frac{g}{L} \right) = \frac{[p1(g) - p0(g)]}{V_{EPS} (L)} \quad \text{Equação 5}$$

$$Sólidos\ Fixos_{EPS} \left( \frac{g}{L} \right) = \frac{[p2(g) - p0(g)]}{V_{EPS} (L)} \quad \text{Equação 6}$$

$$Sólidos\ Voláteis_{EPS} \left( \frac{g}{L} \right) = ST_{EPS} \left( \frac{g}{L} \right) - SF_{EPS} \left( \frac{g}{L} \right) \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

p0 = peso da membrana;

p1 = peso da membrana + EPS após 24h na estufa;

p2 = peso da membrana + EPS após 2h na mufla.

Figura 7: EPS extraído e armazenado em tubos falcon



Fonte: Autor (2021).



### 3.2.4 Cálculo para o rendimento de recuperação de EPS do lodo

Para calcular o rendimento do EPS proveniente do lodo, foram relacionados o teor de sólidos voláteis por grama de EPS, e o teor de sólidos voláteis por grama de lodo da amostra de lodo (ANDREOLI et al., 2001). A Equação 8 abaixo demonstra o cálculo do rendimento de EPS do lodo.

$$\text{Rendimento do EPS (\%)} = \frac{\text{SV EPS (gSV EPS/g EPS)}}{\text{SV lodo (gSV lodo/g lodo)}} * 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

SV EPS = Sólidos voláteis por grama de EPS;

SV lodo = Sólidos voláteis por grama de lodo.

Deve-se ressaltar que a eficiência de extração do EPS pode sofrer alterações significativas de acordo com o método de extração utilizado.

## 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO EPS

Nesta etapa, foram realizados os testes laboratoriais para caracterizar o EPS extraído do lodo residual, onde estão descritos os métodos utilizados para obtenção dos resultados.

### 3.3.1 Concentração de proteínas e ácidos húmicos

Foram realizadas análises para a determinação das concentrações de proteínas e ácidos húmicos nas amostras de EPS extraídas do lodo. A análise definida foi a proposta por Frølund et al. (1995). As amostras de EPS foram diluídas 10 vezes e na sequência, as soluções X e Y foram preparadas, tendo suas composições definidas como:

Solução X:

- 1 mL de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) 1%
- 1 mL de tartarato de sódio e potássio ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 2%
- 49 mL de hidróxido de sódio (NaOH) 0,2M
- 49 mL de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 4%

Solução Y:

- 1 mL de tartarato de sódio e potássio ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 2%
- 49 mL de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) 0,2M
- 49 mL de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 4%
- 1 mL de água destilada

Com as amostras de EPS e as soluções preparadas, se dá sequência a análise em duas séries, X e Y, em tubos de ensaio com tampa. Os padrões de proteínas são tratados somente como Solução X enquanto os padrões dos ácidos húmicos somente como Solução Y. O Quadro 1 a baixo exemplifica o ensaio realizado:

Quadro 1: Preparação das amostras de concentração de proteínas e ácidos húmicos

Série X	Série Y
1 mL de amostra diluída	
5mL de solução X	5 mL de solução Y
30 segundos de agitação no vórtex seguido de 10 minutos de repouso	
Adicionar 0,5 mL de Folin-Ciocalteu	
30 segundos de agitação no vórtex seguido de 10 minutos de repouso no escuro	

Fonte: Autor (2021).

Depois das amostras ficarem em repouso, é realizada a leitura de absorbância das amostras no espectrofotômetro, utilizando uma curva previamente preparada, em comprimento de onda de 750 nm. De acordo com os valores de absorbância de cada série, é possível fazer o cálculo da concentração de proteína e ácidos húmicos do EPS proveniente do lodo coletado.

As substâncias húmicas são derivadas da decomposição de vegetais, animais e microrganismos. As substâncias húmicas são inclusive categorizadas em ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina. Em processos biológicos de tratamento de efluentes, essas substâncias são adsorvidas pela biomassa e podem, inclusive, prejudicar o processo de tratamento (LIU et al., 2019). Em processos de digestão anaeróbia, as substâncias húmicas podem contabilizar de 6 a 20% dos sólidos voláteis do lodo residual (LI et al., 2021)

### 3.3.2 Concentração de ácido glucurônico e glicose

Para o cálculo da concentração de polissacarídeos do EPS, foram utilizados os padrões de ácidos glucurônicos e glicose, de acordo com o procedimento adotado por Dubois et al. (1956) e adaptado por Rondel et al. (2013). As amostras de EPS foram diluídas 10, 20 e 30 vezes e inseridas em tubos de ensaio (Figura 8). Na sequência, ocorre a adição do reagente Antrona, que se refere à uma diluição de 0,2 gramas de Antrona em 100 mL de ácido sulfúrico concentrado (36N). A proporção da mistura deve ser de 1:2 (amostra/reagente).

Figura 8: Realização do ensaio em bancada para análise da concentração de polissacarídeos



Fonte: Autor (2021).

A amostra com os reagentes é agitada por 20 segundos em um vórtex, coberta com papel alumínio e deixada em banho maria a 100°C por 15 minutos. Os tubos são então retirados do banho maria, e resfriados até temperatura ambiente por 10 minutos para seguir com a leitura no espectrofotômetro, nas curvas com comprimentos de onda de 560 e 620 nm. Dado os resultados de absorbância obtidos nas leituras, fica possível calcular a concentração de ácido glucurônico e de glicose presentes nas amostras do EPS.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa, estão apresentados os resultados obtidos através dos testes em laboratório com o EPS proveniente do lodo residual.

### 4.1 SÉRIE DE SÓLIDOS E TEOR DE UMIDADE DO LODO RESIDUAL

Os experimentos do teor de sólidos do lodo centrifugado foram realizados em triplicata, a fim de aumentar a confiabilidade dos dados obtidos. Os resultados obtidos do teste para o teor de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Série de sólidos do lodo residual centrifugado

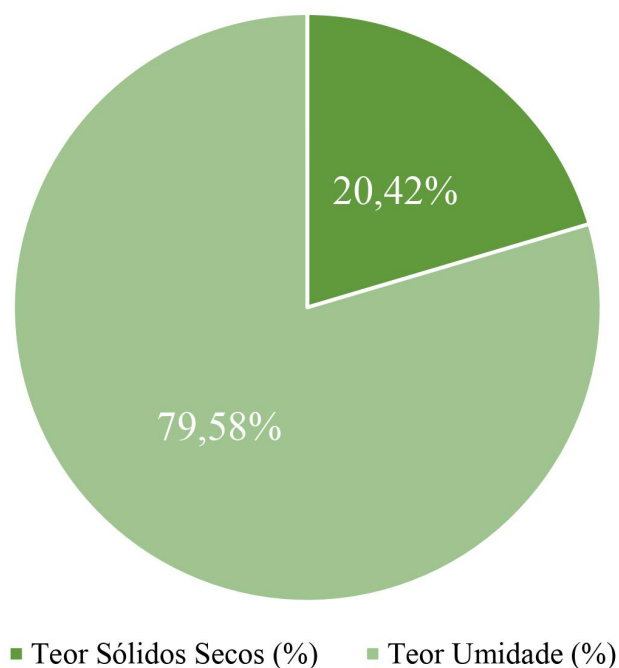
<b>Amostra</b>	<b>Sólidos Totais (mg/g)</b>	<b>Sólidos Voláteis (mg/g)</b>	<b>Sólidos Fixos (mg/g)</b>
1	211	129	83
2	202	124	78
3	199	122	78
<b>Média</b>	<b>204 ± 0,5</b>	<b>125 ± 3,5</b>	<b>79 ± 2,6</b>

Fonte: Autor (2022).

De acordo com a tabela, foi feito o cálculo da média e do desvio padrão entre as três amostras, a fim de se obter um resultado mais conciso. O valor médio dos sólidos totais (ST) foi de  $204 \pm 0,5$  gramas, para os sólidos voláteis (SV) foi de  $125 \pm 3,5$  gramas e por fim, para os sólidos fixos (SF), um valor médio de  $79 \pm 2,6$  gramas.

Neste trabalho, os resultados da série de sólidos foram representados em termos de miligramas de sólido por grama de lodo centrifugado, ou seja, mg/g. O lodo após o processo de centrifugação já possuía uma característica sólida, sendo impossível sua representação em termos de volume, como normalmente é realizado para o licor misto ou lodo adensado.

Figura 9: Teor de sólidos secos e de umidade do lodo



Fonte: Autor (2022).

O cálculo da umidade do lodo residual foi realizado conforme metodologia, onde os sólidos totais foram divididos pelas massas de lodo utilizadas no procedimento laboratorial. O resultado médio encontrado para o teor de sólidos secos foi calculado a partir dos resultados apresentados no gráfico da Figura 9 a cima, com um valor de  $20,42 \pm 0,6\%$ .

De acordo com Andreoli et. al. (2001), o lodo residual de processo de lodos ativados de aeração prolongada, após desidratação por centrifugação possui entre 15 a 20% de teor de sólidos secos, o que está de acordo com o encontrado neste trabalho.

## 4.2 TEOR DE SÓLIDOS E RECUPERAÇÃO DE EPS

### 4.2.1 Teor de sólidos

Para os teores de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV), os testes foram realizados em quadruplicata, conforme apresentado na Tabela 5.

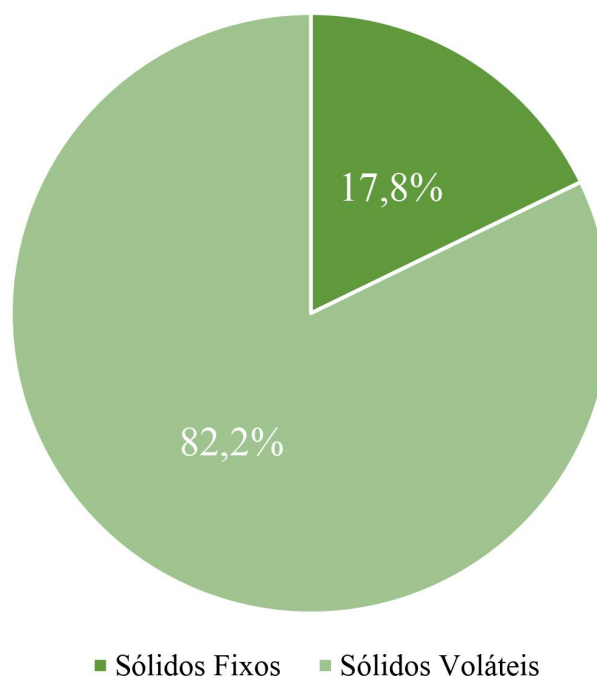
Tabela 5: Teor de sólidos do EPS

Amostra	Sólidos Totais (mg/L)	Sólidos Fixos (mg/L)	Sólidos Voláteis (mg/L)
1	315	55	260
2	345	30	315
3	280	65	215
4	275	50	225
<b>Média</b>	<b>298±0,03</b>	<b>53±0,01</b>	<b>243±0,04</b>

Fonte: Autor (2022).

O valor médio dos sólidos voláteis ( $243\pm 0,04$  mg/L) é muito próximo ao de sólidos totais ( $298\pm 0,03$  mg/L), o que indica que 82,2% do EPS constitui-se de material orgânico que foi vaporizado na mufla durante o ensaio da série de sólidos. O gráfico da Figura 10 apresenta os percentuais de cada fração da série de sólidos obtida neste experimento.

Figura 10: Série de Sólidos do EPS



Fonte: Autor (2022).

O rendimento de extração do EPS foi realizado de acordo com a metodologia proposta, utilizando-se os valores de sólidos voláteis do EPS e do lodo. De acordo com os cálculos realizados, o rendimento de EPS foi de 194,4 mgEPS/gLodo em termos de sólidos voláteis, ou seja, um rendimento de 19,4%.

A Tabela 6 apresenta uma comparação entre os métodos de recuperação do EPS de lodos aeróbios e anaeróbios (LIU e FANG, 2002).

Tabela 6: Comparação de EPS extraído de lodos aeróbios e anaeróbios

<b>Lodo</b>	<b>Método de Extração</b>	<b>EPS Total (mg/gSV)</b>	<b>Referência</b>
Aeróbio	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 80°C	194,4	Este trabalho
Aeróbio	Formaldeído - NaOH	165	Liu e Fang, 2002
Aeróbio	Resina de troca catiônica	109	Rudd et al., 1984
Aeróbio	80°C	58	Liu et al., 2001
Acidogênico	Formaldeído - NaOH	179	Liu e Fang, 2002
Metanogênico	Formaldeído - NaOH	102	Liu e Fang, 2002
Metanogênico	Fenol	91	Veiga et al., 1997
Metanogênico	Formaldeído em 100°C	74	Fang e Jia, 1996

Fonte: Adaptado de Liu e Fang (2002).

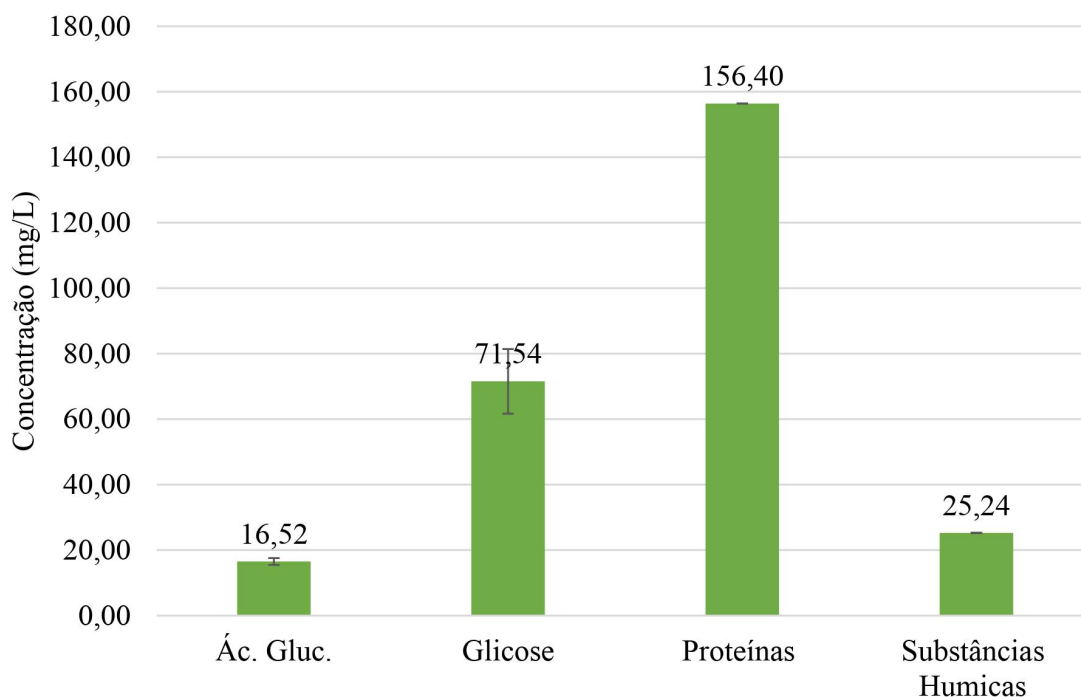
Desse modo, é possível realizar a comparação do resultado obtido com referências encontradas. O valor encontrado neste trabalho foi superior àqueles encontrados por outros autores. Entretanto, o rendimento de extração depende do método empregado bem como da amostra de lodo utilizada.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO EPS

No processo de caracterização do EPS, foram avaliadas as concentrações de ácidos húmicos, polissacarídeos, em termos de ácido glucurônicos e glicose, e proteínas, em termos de BSA.

Para se obter os valores de ácidos húmicos, proteínas e polissacarídeos, foram realizadas leituras no espectrofotômetro, a fim de ter como resultados os valores absorvância e por fim, a concentração.

Figura 11: Concentração de polissacarídeos, proteínas e substâncias húmicas no EPS



Fonte: Autor (2022).

Como visto no gráfico da Figura 11, pode se observar que o valor médio da concentração de proteínas encontrado foi de  $156,40 \pm 0,046$  mg proteína/L EPS. Do mesmo modo, foi obtida a concentração de ácidos húmicos, onde o valor médio obtido foi de  $25,24 \pm 0,045$  mg acid. húmicos/L EPS.

Em relação à concentração de ácido glucurônico, foi encontrada a concentração de  $16,52 \pm 1,04$  mg ácid.gluc./L EPS. Da mesma maneira, foi obtida a concentração de glicose, onde o valor médio foi de  $71,54 \pm 9,87$  mg glicose /L EPS.

Os componentes do EPS, especialmente as proteínas (PN) e polissacarídeos (PS), e suas características têm uma grande influência nas propriedades superficiais do lodo, como hidrofobicidade, eletronegatividade e estrutura espacial (FANG et al., 2018). PS contribui para a estrutura e formação de flocos e grânulos biológicos e o PN contribui para a sua estabilidade, hidrofobicidade e cargas superficiais (FENG et al., 2021).

De acordo com a Tabela 7, pode-se comparar com outras formas de extração de EPS de lodos aeróbios:



Tabela 7: Constituintes de EPS (mg/g), de acordo com o método de extração

Extração	Polissacarídeos (mg/g)	Proteínas (mg/g)	Substâncias Húmicas (mg/g)	Ácido Urônico (mg/g)
<b>Formaldeído - NaOH</b>	40,5 ± 1,7	54,6 ± 2,0	50,4 ± 3,7	4,2 ± 0,4
<b>EDTA</b>	12,4 ± 1,2	22,9 ± 0,5	59,2 ± 2,5	2,1 ± 0,4
<b>Formaldeído - Ultrassom</b>	28,9 ± 0,9	20,4 ± 1,0	18,9 ± 1,5	1,8 ± 0,1
<b>Resina de troca catiônica</b>	12,7 ± 0,4	17,6 ± 0,9	16,4 ± 0,8	1,2 ± 0,2
<b>Formaldeído</b>	15,9 ± 1,0	12,3 ± 0,3	10,9 ± 0,6	1,1 ± 0,1
<b>Controle</b>	7,7 ± 0,1	7,9 ± 0,1	6,4 ± 0,3	0,5 ± 0,1

Fonte: Adaptado de Liu e Fang (2002).

De acordo com Liu e Fang (2002), os métodos de extração possuem grande influência sobre a composição do EPS recuperado. O método utilizando formaldeído e NaOH resultou nos maiores valores de PS, PN e substâncias húmicas, ou seja, maiores rendimentos foram obtidos para essas substâncias. Porém, vale ressaltar que a composição do EPS depende também da origem do lodo que é analisado. Böder (2021) encontrou valores similares de proteínas e substâncias húmicas, porém, maiores concentrações de polissacarídeos, quando analisado o licor misto de um processo de lodos ativados em reator de batelada sequencial (RBS) e o lodo de um reator UASB. Para o reator RBS, as concentrações de ácido glucurônico e glicose foram de  $165,1 \pm 61,3 \text{ mg}_{\text{Ác.gluc}}/\text{LEPS}$  e  $297,13 \pm 31,2 \text{ mg}_{\text{glic}}/\text{LEPS}$ , enquanto para o reator UASB foram de  $107,7 \pm 55,8 \text{ mg}_{\text{Ác.gluc}}/\text{LEPS}$  e  $333,5 \pm 156,4 \text{ mg}_{\text{glic}}/\text{LEPS}$ . Em relação à proteínas e ácidos húmicos, o autor encontrou para o reator RBS  $155,76 \pm 0,0002 \text{ mg}_{\text{BSA}}/\text{LEPS}$  e  $30,07 \pm 0,23 \text{ mg}_{\text{humic}}/\text{LEPS}$ , e para o reator UASB,  $155,64 \pm 0,0002 \text{ mg}_{\text{BSA}}/\text{LEPS}$  e  $35,75 \pm 0,27 \text{ mg}_{\text{humic}}/\text{LEPS}$ .

Em comparação ao trabalho de Böder (2021), as menores concentrações de polissacarídeos podem estar relacionadas com o processo de lodos ativados com aeração prolongada, que possui como característica, a redução de biomassa devido à respiração endógena e ao consumo de material celular. Os polissacarídeos presentes nos biopolímeros seriam uma fonte de energia facilmente assimilável pela biomassa, resultando em menores concentrações no EPS, quando comparado a outros processos, como o RBS e o UASB.

Os ácidos glucurônicos são uma classe dos ácidos urônicos, que em conjunto com os ácidos manurônicos, são responsáveis pela polimerização do alginato e do ALE ((alginate-like exopolymer), extraído de lodo granular residual. Os ácidos glucurônicos influenciam nas propriedades elásticas do ALE (alginate-like exopolymer), um biopolímeros presente no EPS

de lodo residual. A análise de polissacarídeos utilizando ácido glucurônico como ao invés da glicose, torna esta análise mais específica para os açúcares responsáveis pela polimerização (SCHAMBECK et al., 2020).

As substâncias húmicas contidas no EPS têm uma estrutura altamente heterogênea e fenólica que resulta em várias propriedades de interação microbiana como a melhoria da nitrificação e desnitrificação de amônio, quelação de metais, aumento da solubilização e degradação de xenobióticos. As substâncias húmicas são a forma dominante de matéria orgânica no ambiente e são os produtos de transformações bióticas e abióticas de restos vegetais, animais e microbianos. Embora sua estrutura altamente complexa e heterogênea forneça resistência à biodegradação, algumas linhagens microbianas podem utilizá-los como fonte de nutrientes, bem como transportadores de elétrons extracelulares. Além disso, substâncias húmicas podem fornecer solubilização de substratos pouco solúveis, aumentam a degradação de poluentes e possuem propriedades de quelação de metais (KULIKOVA e PERMINOVA, 2021). O EPS possui em sua composição substâncias húmicas e oligonucleotídeos que já foram reportados como estimulantes do crescimento vegetal para plantas, além das características físico-químicas do EPS que resultam em seu poder de retenção de água e biodegradabilidade (MIKULA et al., 2020). Sendo assim, as substâncias húmicas presentes no EPS podem contribuir para aplicações ambientais, auxiliando na quelação de metais em processos de adsorção ou biofloculação, bem como na agricultura.

## 5 CONCLUSÃO

Os EPS são importantes tanto para a manutenção da estrutura dos flocos biológicos em sistemas de lodos ativados e, de acordo com os resultados encontrados, a quantidade de EPS no lodo biológico da ETE estudada (194,4mg/g) está dentro da faixa de concentração indicada pela literatura. Ainda, o rendimento encontrado indica que o EPS contabiliza aproximadamente 20% da massa de sólidos voláteis do lodo residual, após o processo de desaguamento por centrifugação. Desta forma, existe um potencial inexplorado de recuperação de biopolímeros do lodo residual, bem como a possibilidade de redução do volume do lodo, para redução de custos de disposição.

A composição do EPS indica que ele possui potencial para diversas aplicações, entretanto, o método de extração e o tipo de lodo residual influenciam nas concentrações de proteínas, polissacarídeos e ácidos húmicos. O sistema de lodo ativado por aeração prolongada pode ter influência na redução da concentração de polissacarídeos no EPS, em comparação a outros processos biológicos de tratamento.

O processo de desaguamento por centrifugação já instalado e em operação na ETE, resulta em lodo residual com teor de sólidos (20,42%), adequado para o processo de extração de EPS, não requerendo etapas prévias de remoção de umidade. Assim, uma unidade de recuperação de EPS já contaria com parte dos equipamentos instalados na ETE, reduzindo custos.

Foi possível concluir que o lodo residual da ETE insular possui EPS que pode ser extraído e recuperado, para ser utilizado posteriormente para diversas aplicações, mediante estudos em escalas de bancada e piloto.

## 6 RECOMENDAÇÕES

Algumas recomendações para os próximos trabalhos sobre o tema:

- Estudos de outros métodos de extração para aumentar o rendimento de recuperação de EPS do lodo residual;
- Realizar os testes de aplicação do EPS como agente auxiliar de formação de floco do licor misto no sistema de lodos ativados da ETE;
- Avaliar o impacto das substâncias húmicas no metabolismo da comunidade microbiana através de testes respirométricos;
- Avaliar o efeito da adição de EPS sobre o processo de desaguamento do lodo;
- Avaliação da viabilidade econômica para utilização do EPS em larga escala;

## 7 REFERÊNCIAS

ABU-ORF MM, GRIFFIN P, DENTEL SK (2001) Chemical and physical pre-treatment of ATAD biosolids for dewatering. **Water Science and Technology** 44: 309-314

**AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS** (Brasil). Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas. [S. 1.], 2019. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh1/atlas-esgotos>. Acesso em: 28 de nov. 2021.

**AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS** (Brasil). Atlas Esgotos: Atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil / **Agência Nacional de Águas**. - Brasília: ANA, 2020

ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F.; Lodos de esgotos: tratamento e disposição final. 3. ed. Belo Horizonte: **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná**, 2001. 484 p

ANDREOLI, C.V.; FERREIRA, A. C.; CHERUBINI, C.; TELES, C. R.; CARNEIRO, C.; FERNANDES, F. Higienização do Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: **RiMa, ABES**, 2001. Cap. 4, p. 87 – 117.

APHA / AWWA / WEF Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 21. Ed Washington, DC: **APHA / AWWA / WCF**, 2005.

APHA. Standard methods for the examination for water and wastewater. 23rd. ed. **American Public Health Association**, Washington, DC: American Water Works. 2017.

BODER, E. H. Potencial de Recuperação de Biopolímeros de Lodo Aeróbio e Anaeróbio de Sistemas de Tratamento de Efluentes em Escala Real. **Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)**, Trabalho de Conclusão de Curso. 2021.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430/2011, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da União**, n. 92, p. 89-89, 2011

CHERNICHARO, C.A.L. et al. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: Tecnologias mais empregadas. Revista DAE, 2018. DOI: 10.4322/dae.2018.028

DUBOIS, Michel et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Process design manual: sludge treatment and disposal. Washington, DC.: **Environmental Protection Agency**, 1978. v. 2, 155p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Design manual: dewatering municipal wastewater sludges. Washington, DC.: **Environmental Protection Agency**, Sept. 1987. 193 p. EPA Number: 625187014.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Use and disposal of municipal wastewater sludge: environmental regulations and technology. Washington, DC.: **Environmental Protection Agency**, Mar. 1989. 76 p.

FANG F. et al. Effect of high salinity in wastewater on surface properties of anammox granular sludge. **Chemosphere**, (2018). 210:366–375

FEAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Aproveitamento Energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais. Belo Horizonte: **FEAM**, 2012. 163 p.

FERREIRA, S.S; SOBRINHO P. A. Considerações sobre o tratamento de lodos de estações de água. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, 1998.

FELZ, Simon et al. Extraction of structural extracellular polymeric substances from aerobic granular sludge. **Journal of Visualized Experiments**, [s. l.], v. 2016, n. 115, p. 1–8, 2016.

FENG, C., LOTTI, T., CANZIANI, R., LIN, Y., TAGLIABLUÈ, C., MALPEI, F., 2021. Extracellular biopolymers recovered as raw biomaterials from waste granular sludge and potential applications: A critical review. **Sci. Total Environ.** 753, 142051. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142051>

FENG, Cuijie et al. Extracellular polymeric substances extraction and recovery from anammox granules: Evaluation of methods and protocol development. **Chemical Engineering Journal**, v. 374, p. 112-122, 2019.

FENG, C., WELLES, L., ZHANG, X., PRONK, M., DE GRAAFF, D., van Loosdrecht, M., 2020. Stress-induced assays for polyphosphate quantification by uncoupling acetic acid uptake and anaerobic phosphorus release. **Water Res.** 169, 115228.

FLEMMING, H. & WINGENDER, J. The biofilm matrix. **Nat. Rev. Microbiol.** 8, 623–633 (2010).

FRØLUND, B., GRIEBE, T., NIELSEN, P. H.. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 43, n. 4, p. 755-761, 1995.

HAO, X.; WANG, X.; LIU, R.; et al. Environmental impacts of resource recovery from wastewater treatment plants. **Water Research**, v. 160, p. 268–277, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.068>>.

HAAK, W. Condicionamento químico de lodo de estação de tratamento de água com monitoramento através de potencial. 2011. 235 f. Dissertação (Mestrado) **Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, 2011.

HOUSE OF COMMONS. Growing a circular economy: Ending the throwaway society. HC-214. Londres: **House of Commons/ Environmental Audit Committee**, 2014.

JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A. Tratamento de esgotos domésticos. 4ª ed. Rio de Janeiro: **ABES**. 2005. 906 p.

KEHREIN, P., VAN LOOSDRECHT, M., OSSEWEIJER, P., GARFÍ, M., DEWULF, J., POSADA, J., 2020a. A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants-market supply potentials, technologies and bottlenecks. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 6, 877–910. <https://doi.org/10.1039/c9ew00905a>

KEHREIN, P., VAN LOOSDRECHT, M., OSSEWEIJER, P., POSADA, J., 2020b. Exploring resource recovery potentials for the aerobic granular sludge process by mass and energy balances – energy, biopolymer and phosphorous recovery from municipal wastewater. **Environ. Sci. Water Res. Technol.** 6, 2164–2179.

KIM, N.K., MAO, N., LIN, R., BHATTACHARYYA, D., VAN LOOSDRECHT, M.C., LIN, Y., 2020. Flame retardant property of flax fabrics coated by extracellular polymeric substances recovered from both activated sludge and aerobic granular sludge. **Water Res.** 170, 115344

KREYENSCHULTE, D., KRULL, R., MARGARITIS, A., 2014. Recent advances in microbial biopolymer production and purification. **Crit. Rev. Biotechnol.** 34, 1–15.

KULIKOVA, N., PERMINOVA, I., 2021. Interactions between Humic Substances and Microorganisms and Their Implications for Nature-like Bioremediation Technologies 1–32.

LEIGH JA, COPLIN DL (1992) Exopolysaccharides in plant-bacterial interactions. **Annu Rev Microbiol** 46: 307-346.

LIU H., FANG H. P. H. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges. **Journal of Biotechnology** 95 (2002) 249–256

LIU, Ranbin et al. Dynamics of humic substance composition during anaerobic digestion of excess activated sludge. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 145, p. 104771, 2019.

LI, Ji et al. Relieving the inhibition of humic acid on anaerobic digestion of excess sludge by metal ions. **Water Research**, v. 188, p. 116541, 2021.

METCALF & EDDY, INC. Wastewater engineering treatment, disposal and reuse. 3rd ed. **New York: McGraw-Hill**, 1991. 1334 p. (McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering).

MIKI, M. K.; ANDRIGUETI, E. J.; ALEM SOBRINHO, P. Tratamento da fase sólida. In: TSUTIYA, M.T. Biossólidos na agricultura. São Paulo: **SABESP**, 2001. cap. 3, p. 41-87.

MIKULA, K., IZYDORCZYJ, G., SKRZYPCZAK, D., MIRONIUK, M., MOUSTAKAS, K., WITEK-KROWIAK, A., CHOJNACKA, K., 2020. Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture – **A review. Sci. Total Environ.** 712.

MOHAN, S. V. et al. Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy: Critical review and future perspectives. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 215, p. 2–12, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.130>

MORE TT, YAN S, HOANG NV, TYAGI RD, SURUMPALLI RY (2012a) Biochemical diversity of the bacterial strains and their biopolymer producing capabilities in wastewater sludge. **Bioresource Technology** 121: 304-311.

NOUHA K, YAN S, TYAGI RD, SURUMPALLI RY (2015) EPS Producing Microorganisms from Municipal Wastewater Activated Sludge. **J Pet Environ Biotechnol** 7: 255

PAYNE, J., MCKEOWN, P., JONES, M.D., 2019. A circular economy approach to plastic waste. **Polym. Degrad. Stab.** 165, 170–181.

PRIM, E. C. C. Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto sanitário como material de cobertura de aterro sanitário. Tese (Doutorado) - **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis**, 2011.



ROBERSON EB, FIRESTONE MK (1992) Relationship between Desiccation and Exopolysaccharide Production in a Soil Pseudomonas sp. **Appl Environ Microbiol** 58(4): 1284-1291.

ROEST, H.; LOOSDRECHT, M.; LANGKAMP, E. J.; UIJTERLINDE, C. Recovery and reuse of alginate from granular Nereda sludge. **Research & Innovation**. April. 2015.

RONDEL, Caroline; MARCATO-ROMAIN, Claire-Emmanuelle; GIRBAL-NEUHAUSER, Elisabeth. Development and validation of a colorimetric assay for simultaneous quantification of neutral and uronic sugars. **Water research**, v. 47, n. 8, p. 2901-2908, 2013.

SANCHO, I.; LOPEZ-PALAU, S.; ARESPOCHAGA, N.; CORTINA, J. L. New concepts on carbon redirection in wastewater treatment plants: A review. **Science of the Total Environment**, v. 647, p. 1373–1384, 2019. Elsevier B.V.

SANTOS FILHO, F. Tecnologia de Tratamento de Água para a Indústria. São Paulo: **Nobel**, 1973.

SCHAMBECK, CÁSSIO MORAES et al. Biopolymers recovery: dynamics and characterization of alginate-like exopolymers in an aerobic granular sludge system treating municipal wastewater without sludge inoculum. **Journal of environmental management**, v. 263, p. 110394, 2020

SCHAMBECK, CÁSSIO MORAES. Recuperação de biopolímeros semelhantes ao alginato a partir do lodo biológico de esgoto: quantificação, caracterização e aplicação. . **Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)**, Tese de Doutorado. 2020.

SEVIOUR, T., DERLON, N., DUEHOLM, M.S., FLEMMING, H.-C., GIRBAL-NEUHAUSER, E., HORN, H., et al., 2018. Extracellular polymeric substances of biofilms: suffering from an identity crisis. **Water Res.** 151, 1–7.

SHEN, Y.; LINVILLE, J. L.; URGUN-DEMIRTAS, M.; MINTZ, M. M.; SNYDER, S. W. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 346–362, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.129>>.

SHENG, G. P., Yu H. Q. & Li X. Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review. **Biotechnol. Adv.** 28, 882–894 (2010).

SHENG, G. P., Yu, H. Q. & Yue, Z. Factors influencing the production of extracellular polymeric substances by *Rhodopseudomonas acidophila*. **Int. Biodeter. Biodegr.** 58, 89–93 (2006).

SHI, S.; XU, G.; YU, H.; ZHANG, Z. Strategies of valorization of sludge from wastewater treatment. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 93, n. 4, p. 936–944, 2018.

TIAN, Y. Behaviour of bacterial extracellular polymeric substances from activated sludge: a review. **Int. J. Environ. Pollut.** 32, 78–89 (2008).

VAN ELK, A. Redução de emissões na disposição final. **Ministério do Meio Ambiente**. 2007.44 p

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR**, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6). p. 13–16.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG**, 1995. 240 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).

VON SPERLING, M. Lodos ativados. 3ª Ed. Volume 4. Belo Horizonte: **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais**, 2005.

VON SPERLING, Marcos. Princípios do tratamento biológico de água residuárias. 2. ed. Belo Horizonte: **Universidade Federal de Minas Gerais**, 1996.

VON SPERLING, M. Lodos Ativados: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. v. 4. 2 ed. Belo Horizonte: **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade de Minas Gerais**. 416 p. 1997.

WANNER, J. et al. The development in biological wastewater treatment over the last 50 years. *Water Sci Technol*, 2021. DOI: 10.2166/wst.2021.095

WANG, X.; MCCARTY, P. L.; LIU, J.; et al. Probabilistic evaluation of integrating resource recovery into wastewater treatment to improve environmental sustainability. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 5, p. 1630–1635, 2015.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION – WEF. Design of municipal wastewater treatment plants, Alexandria: WEF, 1991, 2v. /**WEF Manual of Practice No. 8, ASCE Manual and Report of Engineering Practice No. 76/**

WATER ENVIRONMENT FEDERATION – WEF. Design of municipal wastewater treatment plants. **Alexandria, VA: Water Environment Federation; New York, NY: American Society of Civil Engineers, 1992.** (WEF manual of practice, n. 8). (ASCE manual and report on engineering practice, n. 76).

WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION – WPCF. Sludge thickening: manual of practice, n. FD-1. **Facilities treatment and disposal.** Washington, DC, 1980. 163 p.

YUZHU, W. Condicionamento de lodo de estação de tratamento de água: estudo de caso. 1996. 419 f. Dissertação (Mestrado) - **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 1996.

ZENG, J. et al. Composition and aggregation of extracellular polymeric substances (EPS) in hyperhaline and municipal wastewater treatment plants. **Sci. Rep.** 6, 26721; (2016).