

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Química – Araraquara

**AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE BIOGÁS POR BIOMASSA ANAERÓBIA
UTILIZANDO MICROPLÁSTICOS COMO SUBSTRATO**

Trabalho de Conclusão de Curso

THAÍS DEVAKI OSÓRIO PAMFILIO

ARARAQUARA

2025

THAÍS DEVAKI OSÓRIO PAMFILIO

**AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE BIOGÁS POR BIOMASSA ANAERÓBIA
UTILIZANDO MICROPLÁSTICOS COMO SUBSTRATO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Química da universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita filho” como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Lorena Oliveira Pires

ARARAQUARA
2025

P185a Pamfilio, Thaís Devaki Osório
Avaliação da geração de metano por biomassa anaeróbia utilizando microplásticos como substrato / Thaís Devaki Osório Pamfilio. -- Araraquara, 2025
40 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara
Orientadora: Lorena Oliveira Pires

1. Microplásticos. 2. Digestão anaeróbia. 3. Biogas. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

THAÍS DEVAKI OSÓRIO PAMFILIO

AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE METANO POR BIOMASSA ANAERÓBIA UTILIZANDO MICROPLÁSTICOS COMO SUBSTRATO

Aprovado em:

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Lorena Oliveira Pires

Instituto de Química - UNESP, Araraquara

Prof. Dra. Geisa Albini

Instituto de Química - UNESP, Araraquara

Prof. Dra. Maria Angélica Martins Costa

Instituto de Química - UNESP, Araraquara

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e ao Instituto de Química do *campus* de Araraquara pela oportunidade e pela estrutura oferecida. Ao Departamento de Engenharia Química, pelo suporte nas análises. Ao CNPq pelo apoio para a realização desta pesquisa.

Agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Lorena Oliveira Pires. Sua orientação, suas críticas, paciência e disponibilidade foram essenciais não apenas para a conclusão deste trabalho, mas para meu amadurecimento como profissional e pesquisadora. Obrigada por orientar este trabalho e por me incentivar com tanta dedicação.

Aos membros da banca examinadora, Profa. Dra. Geisa Albini e Profa. Dra. Maria Angélica Martins Costa por aceitarem o convite e pelas valiosas contribuições que certamente enriquecerão este trabalho.

Às minhas amigas e colegas de laboratório, Ingrid do Prado e Larissa Patrícia Passarini pela amizade, pelas discussões, companhias no sábado de manhã e por tornarem a rotina de pesquisa mais leve. Aos meus amigos da Turma 08 que sempre se fizeram presentes com palavras de apoio, incentivos e passadinhas na janela do laboratório.

À minha família, meus pais, Wylton Pamfílio e Rosamaria Pamfílio, e minha irmã, Livia Pamfílio, por todo o amor incondicional, interesse no trabalho, por nunca me deixarem duvidar da minha capacidade e por todos os sacrifícios que fizeram para que eu chegasse até esse momento. Esta conquista é nossa!

RESUMO

O presente trabalho investigou o impacto da crescente contaminação por microplásticos (MPs) nos processos biológicos de Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), focando na digestão anaeróbia. Diante da lacuna científica sobre a interação dessas partículas com microrganismos anaeróbios, o estudo avaliou o efeito da adição cumulativa de uma mistura de MPs (PET, PVC e PE) em reatores de bancada operados em batelada. O experimento foi dividido em quatro fases sequenciais: uma Controle (sem MPs) e três com concentrações crescentes de MPs, monitorando-se a produção de biogás, a remoção de DQO e os parâmetros de estabilidade (pH, alcalinidade, ácidos voláteis). Os resultados revelaram um efeito dual e dose-dependente: a menor concentração de MPs provocou um forte estímulo na produção de biogás (+87,2%), enquanto concentrações mais altas atenuaram progressivamente este efeito. Paradoxalmente, a fase de maior produção de biogás coincidiu com a menor eficiência na remoção de DQO (queda de 44,2% para 24,0%), sugerindo que os MPs atuaram como "carreadores", otimizando a conversão de substrato simples em biogás, mas prejudicando a remoção da matéria orgânica total. O sistema manteve-se físico-quimicamente estável durante todo o processo, validando que os efeitos observados foram uma consequência direta da presença dos MPs. Conclui-se que o lodo anaeróbio atua como um sumidouro para essas partículas (retenção >70%), e que a interação dos MPs com a biomassa é complexa, envolvendo um balanço entre um estímulo físico (efeito carreador) em baixas doses e uma potencial inibição química (lixiviação de aditivos) em doses mais elevadas.

Palavras-chave: Digestão Anaeróbia; Microplásticos; Biogás; Atividade Metanogênica Específica

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia produtiva do plástico.....	11
Figura 2 - Consumo de plásticos no ano de 2021 no Brasil	12
Figura 3 - Consumo de plásticos por ciclo	12
Figura 4 - Exemplos de formatos de microplásticos	14
Figura 5 - Fluxo estimado de partículas de microplástico em uma estação de tratamento de esgoto com processos de tratamento primário, secundário e terciário	16
Figura 6 – Processos de utilização de recursos e resíduos da digestão anaeróbia.....	17
Figura 7 – Etapas da digestão anaeróbica de materiais orgânicos.....	18
Figura 8 – Detalhe do reator utilizado nos ensaios.....	21
Figura 9 - Esquema de montagem dos ensaios para medida da produção de biogás	22
Figura 10 - Configuração da montagem do ensaio de AME	22
Figura 11 – Volume cumulativo de biogás em função do tempo de digestão (Ensaio 0 - Controle).....	27
Figura 12 - Comparativo do volume de biogás acumulado em função do tempo para o Ensaio 0 – Controle e os Ensaios 1, 2 e 3 (com adição cumulativa de MPs).....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaios Experimentais e Concentração de MPs.....	23
Tabela 2 – Análises de Monitoramento dos Reatores	24
Tabela 3 – Concentração média de ST, STF e STV do Lodo Anaeróbio no Início dos Ensaios	25
Tabela 4 - Concentração média de ST, STF e STV do Lodo Anaeróbio no Fim dos Ensaios.	25
Tabela 5 - Redução Absoluta e Variação Percentual dos Parâmetros de Sólidos	26
Tabela 6 - Parâmetros da Produção de Biogás nos Diferentes Ensaios	29
Tabela 7 - Eficiência na Remoção de DQO nos Diferentes Ensaios.....	30
Tabela 8 - Valores de pH no Início e Final de Cada Ensaio.....	31
Tabela 9 - Parâmetros de Estabilidade ao Final de Cada Fase Ensaio	32
Tabela 10 - Quantificação e Recuperação de Microplásticos (MPs) em Diferentes Ensaios...	33

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1.	POLÍMEROS	9
1.1.1.	Polietileno (PE)	9
1.1.2.	Policloreto de Vinila (PVC)	10
1.1.3.	Politeraftalato de Etileno (PET)	10
1.2.	INDÚSTRIA DO PLÁSTICO	10
1.3.	MICROPLÁSTICOS	13
1.3.1.	Impactos	14
1.3.2.	Microplásticos em estações de tratamento de efluentes (ETE)	15
1.4.	DIGESTÃO ANAERÓBIA	16
1.5.	ATIVIDADE METANOGÊNICA ESPECÍFICA (AME)	18
1.6.	JUSTIFICATIVA	19
2.	OBJETIVOS	20
2.1.	OBJETIVO GERAL	20
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1.	APARATO EXPERIMENTAL E CONDIÇÕES GERAIS	21
3.2.	INÓCULO E SUBSTRATOS	22
3.2.1.	Inóculo	22
3.2.2.	Substrato Sintético	22
3.2.3.	Amostra Sintética de Microplásticos	23
3.3.	CONDUÇÃO DOS ENSAIOS	23
3.4.	MÉTODOS ANALÍTICOS	23
3.4.1.	Análise de Sólidos	23
3.4.2.	Monitoramento Físico-Químico	23
4.	RESULTADOS	25
4.1.	ANÁLISE DE SÓLIDOS	25
4.2.	PRODUÇÃO DE BIOGÁS	26
4.2.1.	Nota sobre a composição do biogás	29

4.3.	DQO	30
4.4.	MONITORAMENTO DE pH	31
4.5.	ANÁLISE DE ALCALINIDADE E ÁCIDOS VOLÁTEIS	31
4.6.	QUANTIFICAÇÃO E RETENÇÃO DE MICROPLÁSTICOS	33
4.7.	Limitações do estudo	33
5.	CONCLUSÃO	35
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

1.1. POLÍMEROS

Polímeros são macromoléculas formadas por monômeros ligados por ligação covalente. Os polímeros se diferenciam principalmente com base na estrutura química do monômero, no número médio de meros por cadeia e no tipo de ligação covalente (CANEVAROLO JR, 2010).

Muitas propriedades físicas dos polímeros dependem do comprimento da molécula, ou seja, de sua massa molar. Como os polímeros apresentam uma ampla faixa de valores de massa molar, suas propriedades podem variar significativamente. Essa característica é explorada comercialmente para produzir diferentes grades de polímeros, adaptando-os a aplicações específicas e técnicas de processamento (CANEVAROLO JR, 2010).

O avanço científico possibilitou o desenvolvimento de uma ampla variedade de polímeros para diversas aplicações. Dessa forma, é possível classificá-los de diferentes maneiras, sendo a mais comum baseada em seu comportamento mecânico, dividindo-os em três categorias principais: plásticos, elastômeros (borrachas) e fibras (CANEVAROLO JR, 2010).

- **Plásticos** – um material polimérico sólido na temperatura de utilização, normalmente a ambiente ou próximo a ela. Podem ser subdivididos em termoplásticos (ex: Polietileno – PE, Polipropileno – PP, Policloreto de Vinila – PVC), termorrígidos (ex.: resina de fenol-formaldeído, epóxi, etc.) e baroplásticos;
- **Elastômeros** – polímeros que na temperatura ambiente podem deformar-se no mínimo duas vezes o seu comprimento inicial, retomando ao comprimento original rapidamente depois de retirado o esforço (ex: borracha vulcanizada);
- **Fibras** – termoplástico orientado (com um sentido longitudinal dito eixo principal da fibra) satisfazendo a condição geométrica de $L/D \geq 100$. A orientação das cadeias e dos cristais aumenta a resistência mecânica desta classe de materiais, tornando-os possíveis de serem usados na forma de fios finos.

1.1.1. Polietileno (PE)

O polietileno (PE) é um polímero termoplástico constituído pela repetição do monômero etileno. O grande interesse desse polímero pela indústria plástica ocorre devido a sua facilidade de fabricação e seu baixo custo, compondo assim a terça parte da produção mundial total de polímeros termoplásticos (BECERRA, 2015). Existem cinco tipos de polietileno que podem ser produzidos variando as condições reacionais e do sistema catalítico empregado na

polimerização: Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE), Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE), Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE), Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE) e Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD ou ULDPE) (COUTINHO, MELLO e MARIA, 2003).

1.1.2. Policloreto de Vinila (PVC)

O policloreto de vinila (PVC) é um polímero produzido a partir do monômero cloreto de vinila (MVC). Na sua forma pura não possui aplicação industrial, devido às suas características físicas e químicas, para a fabricação de produtos em PVC, é necessária a adição aditivos que determinam suas características finais. As maiores aplicações do produto estão na construção civil, em tubos para condução de água e esgoto, e na medicina, sendo o melhor e mais seguro produto para a fabricação de bolsas de sangue e soro, tubos endotraqueais, cateteres cardiovasculares, entre outros (IBPVC, 2025).

1.1.3. Politereftalato de Etileno (PET)

O politereftalato de etileno (PET) está dentre os termoplásticos mais popularmente conhecidos devido a sua larga utilização e presença de mercado. O polímero é obtido pela policondensação do ácido tereftálico com o etileno glicol produzindo um polímero heterogêneo, aromático e que possui um grupo funcional éster na composição do monômero. O PET é um material de engenharia que combina propriedades como rigidez, tenacidade, resistência ao calor, estabilidade dimensional, capacidade de isolamento elétrico, boa resistência química, boa resistência às intempéries e baixa permeabilidade a gases. As principais aplicações do PET estão na indústria têxtil para a fabricação de filamentos de poliéster e a indústria de embalagens como garrafas de bebidas (SOARES, 2021).

1.2. INDÚSTRIA DO PLÁSTICO

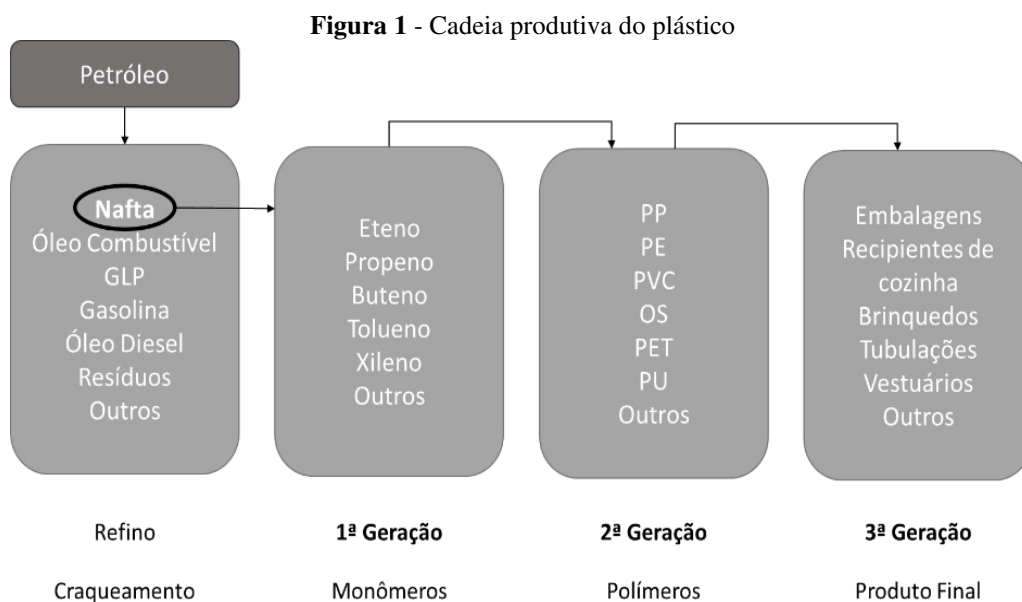
A principal matéria prima da produção de polímeros plásticos é a nafta, uma fração do petróleo obtida junto com GLP, óleos combustíveis, gasolina, querosene e outros a partir de um processo conhecido por destilação fracionada (CANEVAROLO JR, 2010).

Após o refino da nafta, ela passa para a indústria de primeira geração, em que é submetida a etapas de *cracking* térmico onde são obtidas moléculas insaturadas na fase gasosa: etileno, propileno, butadieno, buteno, isobutileno. Essas moléculas são monômeros que serão separadas e aproveitadas para a síntese dos polímeros. (CANEVAROLO JR, 2010; OLIVATTO, 2017).

Em seguida, a indústria de segunda geração é a responsável por formar as resinas poliméricas, em *pallets* ou na forma de pó (CETESB, 2011).

Por fim, a indústria de terceira geração recebe os *pallets* e molda e confecciona o plástico através de processos característicos da indústria plástica: injeção, extrusão, sopro, rotomoldagem, moldagem por compressão e moldagem por transferência (CETESB, 2011). O produto final pode ser produzido utilizando apenas a resina pura do polímero como também pode receber tratamento químico por aditivos, tais como cargas, lubrificantes, antibloqueios, anti-estáticos, *anti-fogging*, pigmentos, etc., alterando textura, cor, resistência e forma de acordo com o que é desejado (OLIVATTO, 2017).

A Figura 1 mostra um esquema da cadeia produtiva do plástico, desde o óleo bruto até o produto final.

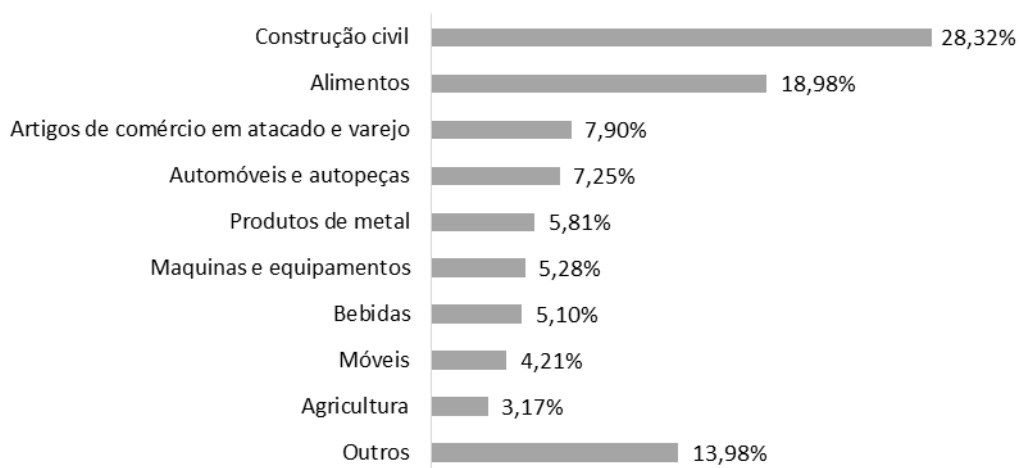


Fonte: Adaptado de OLIVATTO (2017)

Desde o início da produção industrial no século XIX e XX, a comercialização de plásticos aumentou de forma exponencial. Entre 1950 a 2023, a produção mundial passou de 1,7 para 413,8 milhões toneladas (PLASTICS EUROPE, 2024). Dados de 2021 do IBGE e ABIPLAST, ilustrados na Figura 2, mostram os principais setores com maior consumo de plásticos no Brasil. A construção civil lidera com o maior percentual (28,32%), seguidas pelos setores de alimentos (18,98%), artigos de comércio em atacado e varejo (7,90%), automóveis e autopeças (7,25%), produtos de metal (5,81%), máquinas e equipamentos (5,28%), bebidas (5,10%), móveis (4,21%), agricultura (3,17%) e outros setores (13,98%) (ABIPLAST, 2023). Sem dúvidas, essas

aplicações abrangem uma ampla variedade de produtos, devido à facilidade de fabricação, baixo custo, resistência à água, produtos químicos, temperatura e luz.

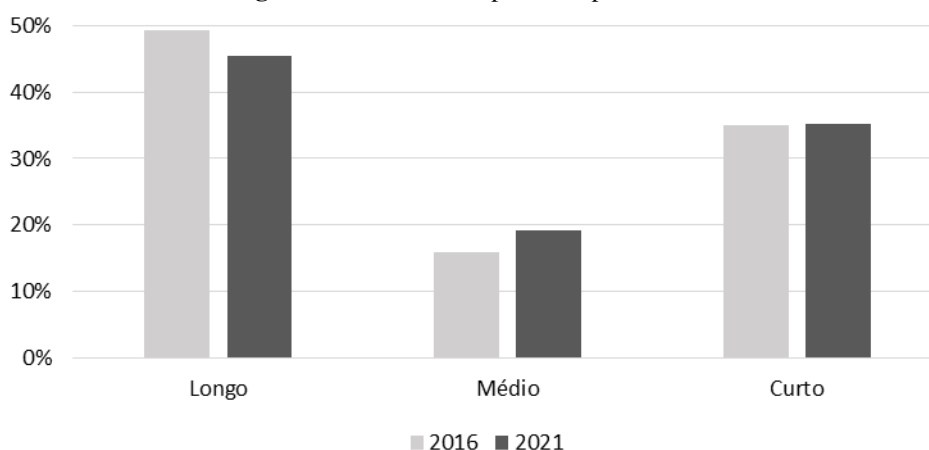
Figura 2 - Consumo de plásticos no ano de 2021 no Brasil



Fonte: Adaptado de AMBIPLAST (2023)

Outro fator importante a ser citado no consumo de plástico no Brasil, é que mais de um terço de todo o plástico consumido no Brasil em 2021 foi de ciclo curto, ciclo de vida de até um ano (ABIPLAST, 2023). Nota-se pela Figura 3 uma diminuição no consumo de plásticos de ciclo longo, ciclo de vida superior a 5 anos, e um aumento no uso de plásticos de ciclo médio, ciclo de vida entre 1 e 5 anos.

Figura 3 - Consumo de plásticos por ciclo



Fonte: Adaptado de ABIPLAST (2023) e ABIPLAST (2018)

Embora a durabilidade dos materiais plásticos tenha sido inicialmente considerada uma característica positiva, atualmente se constitui num sério problema ambiental e social. Polímeros sintéticos são resistentes ao ataque microbiano, devido a uma série de fatores: dureza,

absorção limitada de água e tipo de estrutura química; dificultando a sua degradação quando dispostos de forma inadequada na natureza, tornando sua persistência bastante longa (CANGEMI, SANTOS e NETO, 2005).

1.3. MICROPLÁSTICOS

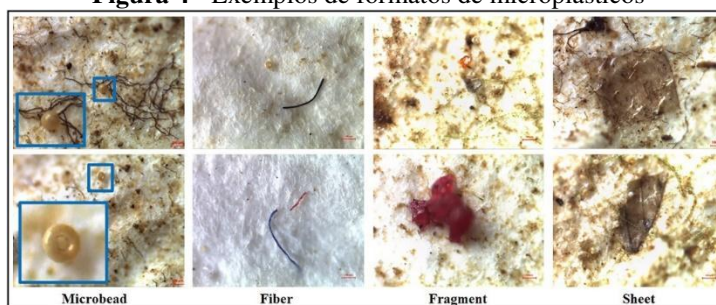
A presença de detritos plásticos no ambiente marinho foi registrada pela primeira vez no início da década de 1970 (CARPENTER e SMITH, 1972). Desde então, o interesse da comunidade científica sobre a ocorrência e os impactos desses resíduos no ecossistema aquático tem crescido significativamente.

A partir de 2004, pesquisadores vem chamando atenção para a poluição de partículas plásticas microscópicas. Microplásticos (MPs) são definidos pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) como partículas de polímeros orgânicos sintéticos com tamanho inferior a 5 mm.

Microplásticos são classificados quanto a sua origem, podendo ser do tipo primários ou secundários. MPs primários são intencionalmente produzidos em tamanhos microscópios como esfoliantes em produtos de limpeza e cosméticos, *glitter* para trabalhos de artesanato e também cosméticos, além de *pallets* usados como matéria prima para produção de plásticos. MPs secundários incluem fibras e fragmentos resultantes da degradação de plásticos maiores. A fragmentação pode ocorrer durante o uso de materiais como tecidos sintéticos, tintas e pneus, ou após ao descarte no ambiente (TALVITIE, MIKOLA, *et al.*, 2017; EERKES-MEDRANO, THOMPSON e ALDRIDGE, 2015).

Apesar da longevidade, o material plástico não é imune a degradação podendo se fragmentar no ambiente marinho devido à interação com diversos fatores ambientais. Entre eles, destacam-se a radiação UV, a presença de oxigênio, variações de temperatura, umidade, ação das ondas e contato com contaminantes (BARNES *et al.*, 2009).

Outra classificação comum para microplásticos se dá pelo seu formato. Fibras, fragmentos, microesferas e folhas estão entre as principais ocorrências (Figura 4).

Figura 4 - Exemplos de formatos de microplásticos

Fonte: HIDAYATURRAHMAN e LEE (2019)

Quimicamente, microplásticos são classificados pelo tipo de polímero constituinte, as principais ocorrências de microplásticos são dos tipos: Os microplásticos mais comuns em ambientes aquáticos são aqueles a base de polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC) e politeraftalato de etileno (PET) (WANG, *et al.*, 2018).

1.3.1. Impactos

A presença de fragmentos plásticos de tamanhos microscópicos tem sido detectada em ambientes extremos, evidenciando a ampla disseminação desses poluentes. Estudos recentes identificaram partículas de microplásticos no intestino de pequenos crustáceos que habitam fossas oceânicas, indicando que até mesmo os ecossistemas abissais são impactados pela contaminação plástica (JAMIESON e LINLEY, 2019). Da mesma forma, amostras coletadas no pico do Monte Everest, o ponto mais alto da Terra, revelam a deposição dessas partículas em altitudes extremas, possivelmente transportadas por correntes atmosféricas ou pela atividade humana na região (NAPPER, DAVIES, *et al.*, 2020). Foram encontrados detritos plásticos dentro do cérebro humano, considerado um dos mais protegidos tecidos, levantando preocupações sobre os potenciais efeitos neurotóxicos e os mecanismos pelos quais essas partículas podem atravessar barreiras biológicas e afetar a saúde (AMATO-LOURENÇO, *et al.*, 2024).

MPs podem servir tanto como fontes quanto veículos de contaminantes. Além da fragmentação, a degradação dos polímeros também favorece a liberação dos aditivos químicos, tais como, estabilizantes, corantes, plastificantes, retardantes de chama, entre outros, os quais são empregados na formulação do polímero para atingir as características necessárias ao uso pretendido no produto final (MONTAGNER, *et al.*, 2021). Por outro lado, os plásticos também podem adsorver contaminantes inorgânicos e orgânicos, uma vez que a fragmentação dos plásticos aumenta a área de superfície exposta, resultando em uma maior capacidade de adsorção. Vários MPs no ambiente aquático foram encontrados contaminados com poluentes orgânicos persistentes (POPs) e metais pesados (ALIMI, *et al.*, 2018).

Outro grande problema dos microplásticos, principalmente em ambientes marinhos são sua presença em organismos vivos, uma vez que as pequenas partículas de microplásticos são confundidos com alimento e são introduzidas na cadeia alimentar e passam a se acumular podendo atingir inclusive a cadeia alimentar humana (WANG, *et al.*, 2018).

1.3.2. Microplásticos em estações de tratamento de efluentes (ETE)

Diversas atividades cotidianas, como uso de cosméticos e a lavagem de roupas, contribuem significativamente para a liberação de MPs em ambientes aquáticos, principalmente por meio de sistemas de tratamento de efluentes (ETE).

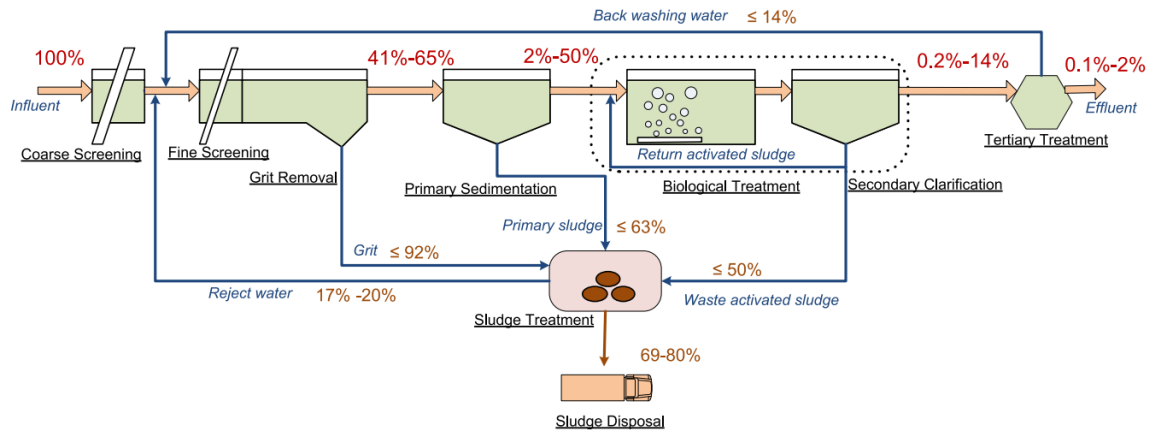
As microesferas presentes em cosméticos e produtos de higiene pessoal (PHP) como pastas de dente, esmaltes, maquiagens, limpadores faciais entre outros podem atingir concentrações superiores a 50 mil partículas por grama de produto (UNEP, 2015). Estima-se que, diariamente, cerca de 15 mg de microesferas por pessoa são liberadas no sistema de esgoto. Testes em laboratório, utilizando um sistema biológico de tratamento de esgoto, indicaram que aproximadamente 52% dessas partículas são retidas no lodo ativado. (KALČÍKOVÁ, *et al.*, 2017).

Durante o processo de lavagem de roupas, inúmeras fibras de tecidos naturais e sintéticos são liberadas no efluente sendo as sintéticas as mais preocupantes devido à sua persistência no meio ambiente. As fibras sintéticas podem atingir concentrações superiores a 300 mg/kg de tecido lavado, com uma única peça de roupa liberando mais de 1900 fibras por lavagem (CESA, TURRA e BARUQUE-RAMOS, 2017). As fibras desprendidas são despejadas no sistema de esgoto doméstico e encaminhadas para as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Em países onde grande parte da população não dispõe de rede coletora ou tratamento de esgoto adequado, o impacto ambiental da liberação de microplásticos é ainda mais grave, pois os efluentes são descarregados diretamente nos corpos d'água.

De acordo com estudos de Sun *et al.* (2019), a concentração de MPs em ETE era de até 10.044 partículas/L no afluente e, após o tratamento de esgoto, essa quantidade foi reduzida para menos de 447 partículas/L.

Etapas de tratamento secundário em ETEs se mostraram eficientes para remover cerca de 0,2 a 14% da quantidade inicial de microplásticos (Figura 5). No entanto, ainda não está claro como os microplásticos interagem com os microrganismos para a remoção dos microplásticos (SUN, *et al.*, 2019).

Figura 5 - Fluxo estimado de partículas de microplástico em uma estação de tratamento de esgoto com processos de tratamento primário, secundário e terciário

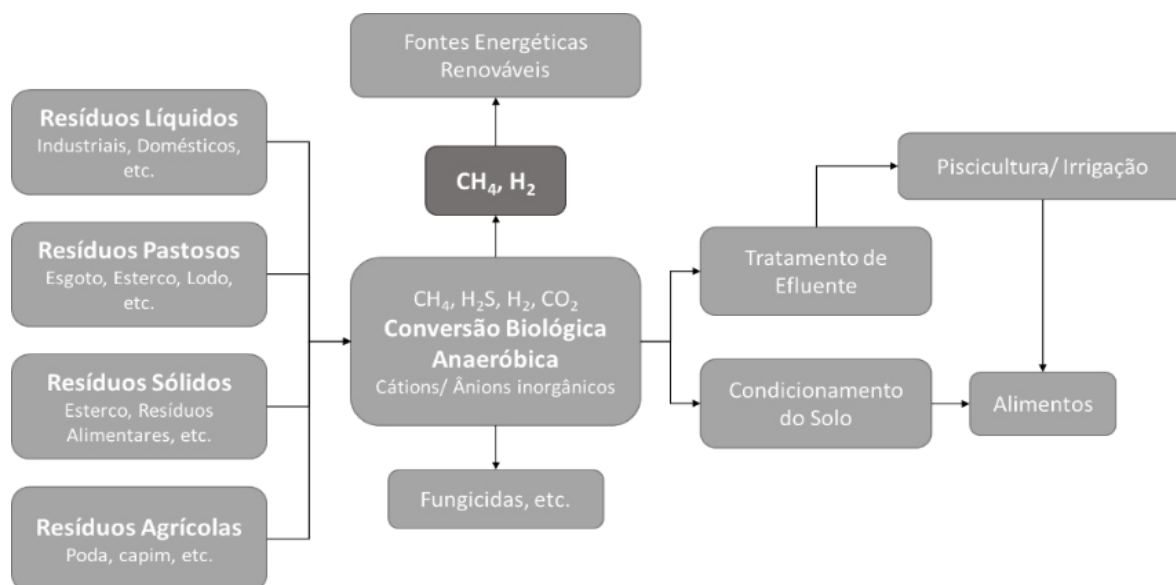


Fonte: (SUN, DAI, *et al.*, 2019)

Assim, compreender a dinâmica entre microplásticos e microrganismos nas ETEs é fundamental para aprimorar estratégias de mitigação e desenvolver processos mais eficientes de remoção desses contaminantes.

1.4. DIGESTÃO ANAERÓBIA

O processo de digestão anaeróbia consiste na degradação de materiais orgânicos em ambiente sem oxigênio, pela atuação de bactérias e outros microrganismos. Isto tem como resultado elementos inorgânicos, tais como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), amônia (NH₃), compostos sulfurados, gás hidrogênio (H₂) e água, dentre outros. Estes produtos, em especial o metano, contribui para a diversificação da matriz energética brasileira, oferecendo oportunidades e alternativas mais sustentáveis de biocombustíveis, e ao mesmo tempo gerar compostos de potencial uso energético (MARCHI, BRESSIANI e BARBOSA, 2014; SIMÕES, 2017; VIANA, 2011).

Figura 6 – Processos de utilização de recursos e resíduos da digestão anaeróbia

Fonte: Adaptado de MARCHI, BRESSIANI e BARBOSA (2014)

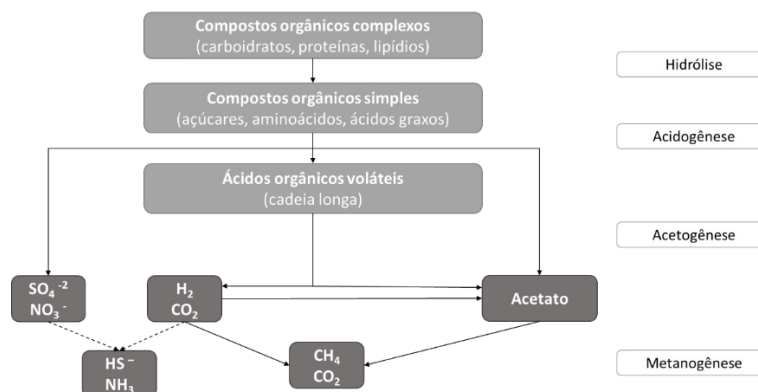
Há diversas alternativas e aplicações derivadas de mecanismos biotecnológicos anaeróbios com grande potencial para a recuperação e aproveitamento de resíduos orgânicos. A Figura 6 apresenta exemplos e variações dentro desse campo de estudo, que permite a conversão e reutilização de resíduos provenientes de diversas fontes orgânicas, transformando-os em componentes de valor agregado, como combustíveis (metano e hidrogênio), fertilizantes, compostos à base de enxofre e até efluentes tratados, que podem ser utilizados na irrigação agrícola. Além disso, a Figura 6 ilustra diferentes origens de resíduos, rotas de conversão e produtos resultantes, destacando como esses materiais podem ser reinseridos no setor produtivo como novas fontes de matéria-prima.

A digestão anaeróbia ocorre na presença de bactérias adaptadas a realizar este processo fermentativo, transformando a matéria orgânica por vias metabólicas conhecidas, que ocorrem ordenadamente para a produção de biogás. Basicamente, este processo pode ser dividido em quatro etapas, sendo elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese

A primeira consiste na hidrólise dos compostos orgânicos em constituintes menores, podendo então serem usados pelos microrganismos. Na segunda etapa os organismos fermentativos modificam estes produtos em substâncias intermediárias, como ácido lático, acético e álcoois. Posteriormente, na terceira etapa, moléculas orgânicas sofrem oxidação, gerando gases como hidrogênio e carbônico, por meio das bactérias acetogênicas. Por último, temos a metanogênese, produção de metano, executada pelas bactérias metanogênicas. Sobre a via metabólica, esta pode ser inibida em alguma etapa, por algum material nocivo aos

organismos ou por alterações de pH, temperatura, nutrientes e concentração, dentre outros, impondo as condições mais próximas do ideal. O fluxograma da Figura 7 exemplifica o processo de digestão anaeróbica.

Figura 7 – Etapas da digestão anaeróbica de materiais orgânicos



Fonte: Adaptado de SIMÕES (2017)

Caso queira-se produzir metano no reator anaeróbio, devem estar presentes os microrganismos produtores de acetato, formiato, hidrogênio e gás carbônico, pois pela rota metabólica do processo, estes compostos podem ser convertidos diretamente em metano na atuação das bactérias metanogênicas mencionadas (SIMÕES, 2017).

Outro fator importante é a temperatura do processo, pois ela pode prejudicar o processo ou degradar algum composto. A digestão anaeróbia pode ocorrer em três temperaturas diferentes que tem as seguintes classificações: mesofílica (30°C a 35°C), termofílica (aproximadamente em torno de 50°C a 55°C) ou então hipertermofílica (temperaturas superiores, em média de 85°C a 110°C), sendo a escolha entre elas dependente da cultura bacteriana (METCALF e EDDY, 2014)

1.5. ATIVIDADE METANOGÊNICA ESPECÍFICA (AME)

A atividade metanogênica específica (AME) é um fator determinante da eficiência da digestão anaeróbia, representando o potencial máximo do lodo em converter substratos, como acetato e $\text{H}_2\text{CO}_2^{-1}$, em metano. Esta conversão é avaliada em laboratório sob condições otimizadas, com quantidades conhecidas de biomassa (gSTV) e substratos (gDQO) (AQUINO, *et al.*, 2007; CHERNICHARO, 1997; HYARIC, *et al.*, 2010).

Os procedimentos do teste de AME variam conforme as concentrações de lodo, substrato e nutrientes, além do volume de *headspace* e do método de quantificação do metano (AQUINO, CHERNICHARO, *et al.*, 2007).

Como a produção de biogás depende da atividade bacteriana, fatores que afetam a sobrevivência das bactérias metanogênicas influenciam diretamente sua formação. Alguns dos principais fatores que devem ser controlados são estanqueidade ao ar – as bactérias metanogênicas são estritamente anaeróbicas; temperatura – a taxa das reações bioquímicas aumenta com a temperatura elevando a produção de biogás e a porcentagem de metano no biogás (faixa ideal de 30 a 40°C, com ótimo a 35°C); alcalinidade, ácidos voláteis e pH – a estabilidade do reator pode ser comprometida pelo acúmulo de ácidos voláteis sobrevivendo a uma estreita faixa de pH (6,5 a 7,5); e nutrientes – os principais nutrientes para as populações microbianas são: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B12 (LONGARETTI, MEIRA, *et al.*, 2019; HYARIC, CHARDIN, *et al.*, 2010).

No sentido de se avaliar a atividade metanogênica de diferentes grupos de microrganismos sob a presença de diferentes tóxicos, diferentes pesquisas estão sendo realizadas. Dentro do grupo de pesquisa, Braga (2022) avalia a produção de biogás em reatores anaeróbicos realizando co-digestão de resíduos alimentares e glicerol bruto.

1.6. JUSTIFICATIVA

Conforme detalhado, as Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) são tanto uma barreira quanto uma rota de disseminação de microplásticos (MPs), e o lodo anaeróbio atua como um sumidouro para essas partículas (KALČÍKOVÁ, *et al.*, 2017). No entanto, como apontado por Sun *et al.* (2019), a interação entre os MPs e os microrganismos anaeróbios ainda não está clara, existindo uma lacuna científica significativa sobre o real impacto deste poluente nos processos de tratamento biológico.

Portanto, justifica-se este estudo pela necessidade de preencher essa lacuna. Esta pesquisa investigou-se a presença de MPs pode comprometer a eficiência da digestão anaeróbia – seja pela liberação de aditivos tóxicos (MONTAGNER *et al.*, 2021) ou por interações físicas – e avalia o risco ambiental associado à contaminação do lodo gerado, principal destino dessas partículas no sistema.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar a produção de biogás como indicador indireto da atividade metanogênica durante a digestão anaeróbia de resíduos contendo microplásticos, utilizando substrato sintético simulando esgoto sanitário.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o consumo de matéria orgânica ao longo do processo, por meio da análise de DQO e sólidos (ST, SV e SF), nas diferentes condições experimentais.
- Investigar o efeito da adição cumulativa de microplásticos sobre a atividade metanogênica, verificando possíveis efeitos estimulantes ou inibitórios na produção de biogás.
- Monitorar a estabilidade do processo anaeróbio, por meio do acompanhamento de parâmetros físico-químicos, como pH, alcalinidade e ácidos voláteis, diante da presença de microplásticos.
- Determinar a retenção e o destino dos microplásticos no sistema, estimando a fração de partículas recuperadas e retidas no lodo anaeróbio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. APARATO EXPERIMENTAL E CONDIÇÕES GERAIS

Os ensaios para determinar a AME foram conduzidos, em duplicata, em frascos com capacidade máxima para 500 ml, dos quais 300 ml foram volume útil e 200 mL de *headspace* (Figura 8). A temperatura do sistema foi mantida constante em 37°C por meio de um banho térmico.

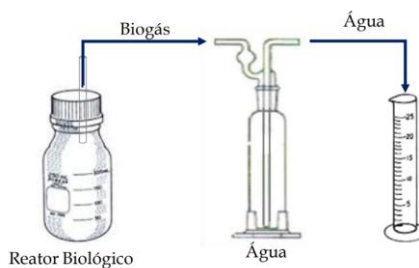
Figura 8 – Detalhe do reator utilizado nos ensaios



Fonte: Própria autora, 2025

A produção de biogás foi quantificada por um sistema de deslocamento de volume de água, utilizando frascos lavadores acoplados no topo de cada frasco reator, de acordo com a metodologia de Aquino *et al* (2007) ilustrado na Figura 9. O monitoramento da produção de biogás por deslocamento de volume foi feito a cada 30 minutos após agitação manual do frasco, e acompanhado até o término da produção.

Figura 9 - Esquema de montagem dos ensaios para medida da produção de biogás



Fonte: BRAGA (2022)

Uma foto real da montagem dos experimentos realizados é apresentada na Figura 10, onde são mostrados os reatores em duplicata, o banho térmico, os frascos lavadores e as provetas coletoras.

Figura 10 - Configuração da montagem do ensaio de AME



Fonte: Própria autora, 2025

3.2. INÓCULO E SUBSTRATOS

3.2.1. Inóculo

Os reatores foram inoculados com lodo industrial proveniente de reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) tratando esgoto sanitário. Este lodo vem sendo usado com sucesso em estudos recentes em nosso grupo de pesquisa sobre a degradação de tóxicos por processos anaeróbios.

3.2.2. Substrato Sintético

Foi utilizado um substrato sintético simulando esgoto sanitário, formulado como descrito por Duarte *et al.* (2006), composto por extrato de levedura, sacarose, bicarbonato de sódio,

NaCl, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Em cada reator, a proporção utilizada foi de 150 ml de inóculo para 150 ml de substrato.

3.2.3. Amostra Sintética de Microplásticos

A amostra de microplásticos foi elaborada utilizando partículas de *glitter* (copolímero de PET e PVC) e microesferas de PE utilizadas na formulação de esfoliantes corporais.

Os materiais selecionados foram separados por peneiras de diferentes faixas granulométricas, utilizando-se a fração retida entre 1 mm e 75 μm .

3.3. CONDUÇÃO DOS ENSAIOS

O estudo foi realizado de maneira sequencial para avaliar o efeito da adição cumulativa de microplásticos. Foram realizados quatro ensaios, utilizando o mesmo lodo, visando a uma adaptação da biomassa a concentrações crescentes de MPs.

A Tabela 1 detalha a massa de MPs adicionada em cada etapa e a massa total acumulada no reator ao longo do experimento.

Tabela 1 - Ensaios Experimentais e Concentração de MPs

Ensaio	Descrição	Massa de MPs Adicionada no Ensaio (g)	Massa Acumulada de MPs no Frasco (g)
0 - Controle	Sem adição de MPs	0	0
1	Primeira adição de MPs	0,018	0,018
2	Segunda adição de MPs	0,03	0,048
3	Terceira adição de MPs	0,036	0,084

Fonte: Própria autora, 2025

3.4. MÉTODOS ANALÍTICOS

3.4.1. Análise de Sólidos

O lodo utilizado como inóculo foi submetido a análises de sólidos, em duplicata, no início da operação dos reatores para a determinação da quantidade de sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV) e fixos (STF) de acordo com metodologia descrita em *American Public Health Association*, *American Water Works Association* e *Water Environment Federation* (2005).

3.4.2. Monitoramento Físico-Químico

Para o monitoramento do desempenho do sistema, foram coletadas amostras do afluente e efluente dos reatores no início e ao final de cada ensaio. Foram realizadas análises de pH,

alcalinidade, ácidos voláteis, DQO e microplásticos. As análises, o método e a referência estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Análises de Monitoramento dos Reatores

Parâmetro	Método	Referência
pH	Potenciométrico	APHA (2005)
Ácidos voláteis [mg Hac/L]	Titulométrico	Dilalo e Albertson (1969)
Alcalinidade [mg CaCO ₃ /L]	Titulométrico	Ripley et al (1986)
DQO	Espectofotométrico	APHA (2005)
Microplásticos [mg/L]	Gravimétrico	Massura (2015)

Fonte: Própria autora, 2025

4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISE DE SÓLIDOS

Segundo o método proposto, pode-se encontrar os valores de ST, STF e STV para o inóculo no início dos ensaios. Os valores estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Concentração média de ST, STF e STV do Lodo Anaeróbio no Início dos Ensaios

Parâmetro	Amostra Inicial
ST [mg/mL]	18,481
STF [mg/mL]	3,178
STV [mg/mL]	15,303

Fonte: Própria autora, 2025

A análise realizada nas amostras de lodo anaeróbio resultou em uma fração orgânica média de 82,80%, indicando uma alta predominância de matéria volátil em relação ao total de sólidos presentes. Esses valores sugerem que o lodo possui um elevado teor de compostos orgânicos biodegradáveis, característica favorável para processos de digestão anaeróbia e produção de biogás.

Ao final dos ensaios de digestão anaeróbia, a análise de sólidos foi realizada novamente, a fim de avaliar as alterações na composição do lodo. Os valores de ST, STF e STV encontrados estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Concentração média de ST, STF e STV do Lodo Anaeróbio no Fim dos Ensaios

Parâmetro	Amostra Final
ST [mg/mL]	11,524
STF [mg/mL]	2,761
STV [mg/mL]	8,762

Fonte: Própria autora, 2025

A partir dos valores de ST e STV obtidos ao final dos ensaios, foi calculada a fração orgânica remanescente no lodo, que resultou em uma média de 75,91%.

Para quantificar a eficiência do processo na remoção de matéria orgânica contendo microplásticos, foi calculada a redução absoluta e a variação percentual de cada parâmetro de sólidos, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Redução Absoluta e Variação Percentual dos Parâmetros de Sólidos

Parâmetro	Redução Absoluta	Variação [%]
ST [mg/mL]	6,957	-37,65%
STF [mg/mL]	0,417	-13,12%
STV [mg/mL]	6,540	-42,74%
Fração Orgânica	6,89 p.p.	-8,32%

p.p = pontos percentuais

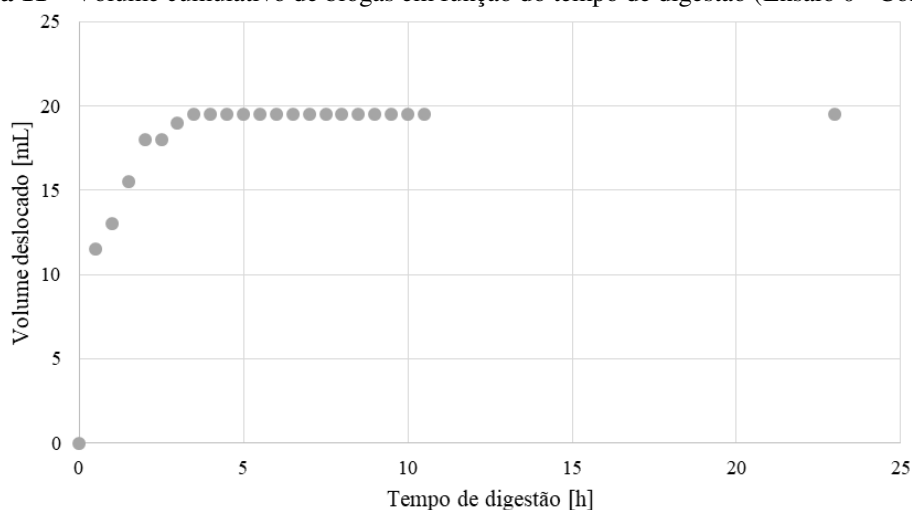
Fonte: Própria autora, 2025

Os dados mostram que houve remoção de matéria orgânica durante o ensaio. A remoção mais expressiva foi observada nos Sólidos Totais Voláteis (STV), com uma variação percentual de -42,74%, o que corresponde à conversão de 6,540 mg/mL de matéria orgânica. Consequentemente, a Fração Orgânica do lodo foi reduzida em 6,89 pontos percentuais. Estes resultados confirmam a atividade biológica e o consumo de substrato orgânico pelos microrganismos, evidenciando a eficiência do processo de digestão anaeróbia mesmo na presença das concentrações de microplásticos testadas.

4.2. PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A avaliação do desempenho do reator anaeróbio foi realizada por meio do monitoramento da produção acumulada de biogás ao longo do tempo. A análise foi dividida em duas etapas: primeiramente, o estabelecimento de uma condição de referência (Ensaio 0 – Controle) e, subsequentemente, a avaliação do impacto da adição de microplásticos em concentrações crescentes (Ensaio 1 a 3).

A primeira fase do experimento foi dedicada ao estabelecimento da linha de base operacional, correspondendo à condição Controle, na ausência de microplásticos. Após o período de aclimação e estabilização da biomassa, foi obtido o perfil de produção de biogás representativo do sistema, conforme ilustrado na Figura 11. Este resultado serve como referência para todas as comparações.

Figura 11 – Volume cumulativo de biogás em função do tempo de digestão (Ensaio 0 - Controle)

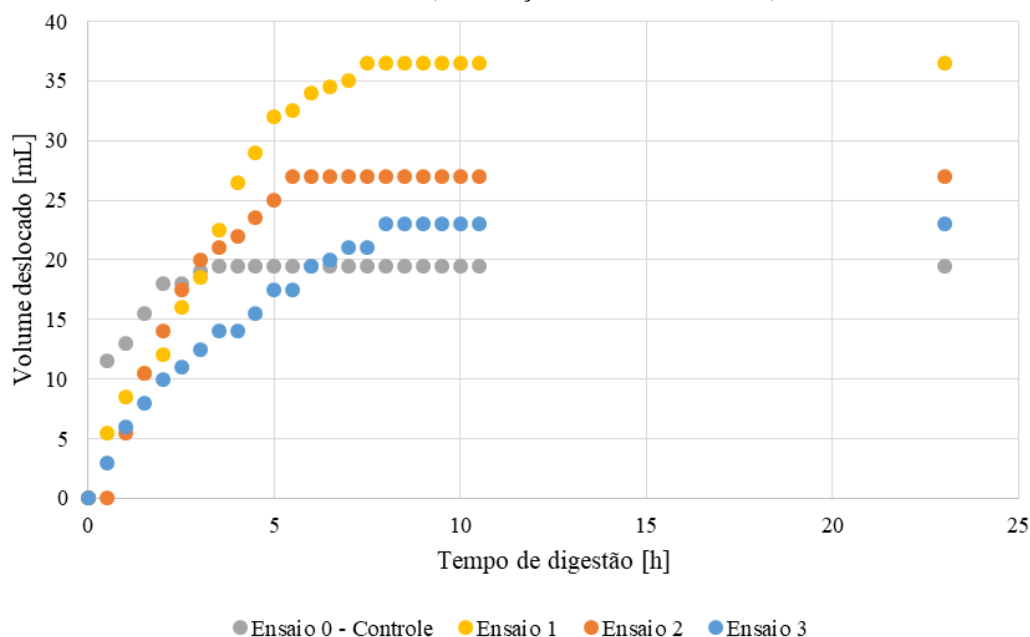
Fonte: Própria autora, 2025

Analisando a Figura 11, observa-se o perfil característico da produção de biogás. A curva apresenta uma fase inicial de rápida produção, que ocorre nas primeiras horas, seguida por uma gradual desaceleração até atingir um platô, indicando o esgotamento do substrato prontamente biodegradável.

Ao final do período de monitoramento de 23 horas, o volume total de biogás acumulado foi de 19,5 mL. A taxa máxima de produção, observada durante a fase de maior atividade metanogênica, foi de aproximadamente 4,56 mL/h. Estes valores de referência são o padrão utilizado para a avaliação quantitativa do impacto da adição de microplásticos nas fases subsequentes do estudo.

Após a definição da linha de base, o ensaio prosseguiu com a adição sequencial e cumulativa de microplásticos, dando origem aos Ensaios 1, 2 e 3. A Figura 12 apresenta o comparativo entre as curvas de produção de biogás acumulado para todas as fases do experimento, incluindo a condição Controle, permitindo uma análise visual direta do impacto dos MPs no processo de digestão anaeróbia.

Figura 12 - Comparativo do volume de biogás acumulado em função do tempo para o Ensaio 0 – Controle e os Ensaios 1, 2 e 3 (com adição cumulativa de MPs)



Fonte: Própria autora, 2025

A análise visual da Figura 12 sugere que a adição de microplásticos influenciou o processo de digestão anaeróbia.

No Ensaio 1, com a menor concentração de MPs (massa acumulada de 0,018 g), observou-se um notável estímulo no processo, com a curva de produção de biogás atingindo um patamar muito superior ao da condição Controle. O volume final de biogás produzido foi de 36,5 mL.

Com o aumento da concentração de MPs no Ensaio 2, com o acúmulo de 0,048 g, a produção de biogás foi reduzida em comparação com a fase anterior, embora ainda tenha se mantido acima do Controle, totalizando 27,0 mL.

Por fim, no Ensaio 3, com a maior concentração de MPs (massa acumulada de 0,084 g), o volume de biogás continuou a diminuir, aproximando-se do valor da condição Controle e finalizando em 23,0 mL.

Estes resultados indicam que a baixa concentração de microplásticos no Ensaio 1 parece ter um efeito estimulante na atividade metanogênica. No entanto, com o aumento da concentração nos Ensaios 2 e 3, esse benefício é progressivamente reduzido, sugerindo que concentrações mais elevadas podem introduzir efeitos inibitórios que se contrapõem ao estímulo inicial.

Para quantificar as observações, os principais parâmetros cinéticos foram calculados e comparados na Tabela 6. Foi avaliado o volume final de biogás produzido e a variação percentual deste em relação à condição Controle.

Tabela 6 - Parâmetros da Produção de Biogás nos Diferentes Ensaios

Ensaio	Massa acumulada de MPs [g]	Volume Acumulado de Biogás [mL]	Variação em relação ao Controle [%]
Controle	0	19,5	-
1	0,018	36,5	+ 87,2%
2	0,048	27,0	+ 38,5%
3	0,084	23,0	+ 17,9%

Fonte: Própria autora, 2025

Os dados da Tabela 6 confirmam o forte efeito estimulante da primeira adição de microplásticos, que resultou em um aumento de 87,2% na produção de biogás em relação ao Controle. Nas fases subsequentes, o estímulo diminuiu para 38,5% (Ensaio 2) e 17,9% (Ensaio 3), mas a produção de biogás nunca foi inferior à condição sem microplásticos.

Conforme apontado por Alimi *et al* (2018), a superfície dos plásticos possui alta capacidade de adsorção. Enquanto esse estudo focou em contaminantes, o presente trabalho sugere que um mecanismo análogo ocorreu com a matéria orgânica do substrato. Os MPs, em baixas concentrações, podem ter adsorvido seletivamente os compostos mais biodegradáveis, atuando como “pontes” que transportaram e concentraram este “alimento fácil” próximo à biomassa anaeróbia, intensificando a atividade metanogênica e a produção de biogás.

Apesar do estímulo inicial, o aumento da concentração de MPs nos Ensaios 2 e 3, resultou em uma progressiva redução do benefício. Uma explicação plausível para este fenômeno é a liberação de aditivos químicos presentes nos polímeros, como plastificantes e corantes, conforme descrito por Montagner *et al.* (2021). Em concentrações mais elevadas, a liberação desses compostos pode ter atingido um limiar tóxico para parte da comunidade metanogênica, introduzindo um efeito inibitório que se contrapôs ao estímulo físico do “efeito carreador”.

4.2.1. Nota sobre a composição do biogás

A produção de biogás neste estudo foi quantificada por meio do método de deslocamento de volume de água, procedimento amplamente empregado em ensaios de digestão anaeróbia devido à sua simplicidade experimental e boa reprodutibilidade, conforme discutido por Aquino (2007). Contudo, este método mede apenas o volume total e não permite determinar a composição do gás. A fração de metano é o principal indicador da eficiência do processo (KUNZ, STEINMETZ e AMARAL, 2019), e uma variação no volume total não reflete, necessariamente, uma alteração na eficiência metanogênica, podendo ser apenas uma flutuação na proporção entre CO₂ e CH₄.

Para estudos futuros, recomenda-se a adoção de métodos analíticos, como a cromatografia gasosa (KUNZ, STEINMETZ e AMARAL, 2019), para determinar a concentração exata de metano. A análise da composição do gás permitiria o cálculo de parâmetros mais robustos e uma interpretação mais aprofundada de como os microplásticos afetam as rotas metabólicas específicas da digestão anaeróbia, reforçando a confiabilidade das conclusões.

4.3. DQO

A eficiência do processo na remoção de matéria orgânica foi monitorada por meio da análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO) no afluente (início) e efluente (final) de cada ensaio. A Tabela 7 resume os valores médios obtidos e a eficiência de remoção para cada condição.

Tabela 7 - Eficiência na Remoção de DQO nos Diferentes Ensaio

Ensaio	DQO Inicial Média [mg/L]	DQO Final Média [mg/L]	Remoção de DQO [%]
Controle	564,86	314,95	44,24%
1	823,79	626,32	23,97%
2	700,88	485,38	30,75%
3	609,11	369,85	39,28%

Fonte: Própria autora, 2025

A condição Controle apresentou uma remoção de matéria orgânica de 44,24%, servindo como linha de base para o experimento. Após a primeira adição de microplásticos no Ensaio 1, a eficiência de remoção de DQO sofreu uma queda acentuada para 23,97%. Nas fases seguintes, com o aumento da concentração de MPs, observou-se uma recuperação gradual na eficiência, que atingiu 30,75% no Ensaio 2 e 39,28% no Ensaio 3, aproximando-se do valor obtido na condição Controle.

Um resultado notável e de grande importância para este estudo emerge ao comparar a remoção de DQO com a produção de biogás (Tópico 4.2). No Ensaio 1, enquanto a produção de biogás foi fortemente estimulada (aumento de 87,2%), a eficiência de remoção de matéria orgânica foi a mais baixa de todo o experimento.

Essa aparente contradição sugere um efeito seletivo dos microplásticos. Conforme a hipótese levantada, os MPs podem ter atuado como carreadores, adsorvendo e disponibilizando preferencialmente a fração de matéria orgânica mais facilmente biodegradável (como a sacarose do substrato) para os microrganismos. Isso explicaria a rápida conversão em biogás. Contudo,

ao mesmo tempo, os MPs podem ter dificultado a degradação de compostos mais complexos (como o extrato de levedura), resultando em uma menor remoção da DQO total.

4.4. MONITORAMENTO DE pH

O pH foi monitorado no início e ao final de cada fase experimental para avaliar a estabilidade do ambiente reacional. Manter o pH em uma faixa adequada é crucial para a atividade das bactérias metanogênicas. Os resultados obtidos para as quatro fases do estudo estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de pH no Início e Final de Cada Ensaio

Ensaio	pH Inicial	pH Final
Controle	6,98	7,13
1	7,46	7,38
2	7,47	7,45
3	7,43	7,38

Fonte: Própria autora, 2025

Os valores de pH inicial em todas as fases se mantiveram próximos da neutralidade. Ao final do período de digestão, as variações de pH foram mínimas. Na condição Controle, observou-se um leve aumento no pH final para 7,13, enquanto nas fases com microplásticos (Fases 2, 3 e 4), o pH final permaneceu extremamente estável, entre 7,38 e 7,45.

O resultado mais importante, no entanto, é que a solução de nutrientes manteve o pH na faixa ideal das arqueias metanogênicas, de 6,5 a 7,5 (AQUINO, *et al.*, 2007). Esse resultado sugere que o sistema possui uma excelente capacidade tampão, conseguindo neutralizar os ácidos orgânicos produzidos durante a digestão. Portanto, o pH não foi um fator inibitório para a atividade microbiana. As variações observadas na produção de biogás e na remoção de DQO não podem ser atribuídas a desequilíbrios de acidez, reforçando que são um efeito direto da presença dos microplásticos. A estabilidade do pH está diretamente relacionada à alcalinidade do sistema, que será discutida no próximo tópico.

4.5. ANÁLISE DE ALCALINIDADE E ÁCIDOS VOLÁTEIS

Para aprofundar a análise da estabilidade do reator, foram monitorados os parâmetros de Alcalinidade Parcial (AP), Alcalinidade Total (AT) e a concentração de Ácidos Voláteis (AV) ao final de cada ensaio. A relação entre a alcalinidade parcial e total (AP/AT) também foi calculada como um indicador chave do equilíbrio do processo. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de Estabilidade ao Final de Cada Fase Ensaio

Ensaio	Alcalinidade Parcial (AP) [mg CaCO ₃ /L]	Alcalinidade Total (AT) [mg CaCO ₃ /L]	Ácidos Voláteis (AV) [mg HAc/L]	Relação AP/AT
Controle	360,0	505,0	45,0	0,71
1	330,0	455,0	75,0	0,73
2	425,0	555,0	126,0	0,77
3	335,0	450,0	108,0	0,74

Fonte: Própria autora, 2025

Os dados da Tabela 9 demonstram a manutenção de uma elevada capacidade de tamponamento no sistema ao longo de todo o experimento. A Alcalinidade Total (AT) permaneceu robusta em todas as fases, variando entre 450,0 e 555,0 mg CaCO₃/L.

A concentração de Ácidos Voláteis (AV) se manteve em níveis baixos e controlados. O valor mais baixo, 45,0 mg HAc/L, foi registrado na condição Controle. Nas fases com microplásticos, houve um leve aumento na concentração de AV, com o pico de 126,0 mg HAc/L ocorrendo no Ensaio 2. No entanto, esses valores indicam que não houve acúmulo significativo de ácidos, mostrando que o consumo pela população metanogênica foi consistentemente eficiente.

De acordo com Ripley *et al.* (1986) valores de AP/AT superiores a 0,3 indicam a possível ocorrência de distúrbios no processo de digestão anaeróbia. Entretanto, Pereira et al. (2009) afirma que é possível ocorrer estabilidade no processo com valores diferentes de 0,3, devido às variações das características únicas de cada efluente.

Neste trabalho a relação AP/AT, um importante indicador da estabilidade da digestão anaeróbia, manteve-se em uma faixa muito estável, entre 0,71 e 0,77, apesar dos valores elevados dessa razão. Isso é evidenciado pelo baixo acúmulo de ácidos voláteis (abaixo de 126 mg/L) e, principalmente pela estabilidade do pH observada no tópico anterior (4.4).

Isso sugere que a alta alcalinidade do meio foi suficiente para neutralizar os ácidos orgânicos produzidos durante o curto período dos ensaios, prevenindo a acidificação do reator. Portanto, a estabilidade indicada por estes parâmetros reforça a conclusão de que as variações observadas na produção de biogás e na remoção de DQO não foram causadas por um desequilíbrio físico-químico, mas sim pelo efeito direto dos microplásticos na cinética da atividade microbiana.

4.6. QUANTIFICAÇÃO E RETENÇÃO DE MICROPLÁSTICOS

Para investigar o destino das partículas no sistema, foram realizados ensaios específicos para a quantificação de microplásticos (MPs) no final de cada ensaio, de acordo com Massura (2015). A análise teve como objetivos calcular a porcentagem de MPs recuperada, ou seja, que não ficou retida no lodo, e foi descartada juntamente com o efluente, permitindo assim estimar a eficiência de retenção. Os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Quantificação e Recuperação de Microplásticos (MPs) em Diferentes Ensaios

Ensaio	Massa Acumulada de MPs no Frasco (g)	Massa de MPs (g)	% MPs recuperado
1	0,018	0,005	27,78%
2	0,048	0,013	27,08%
3	0,084	0,021	25,60%

Fonte: Própria autora, 2025

Os resultados demonstram uma baixa taxa de recuperação de microplásticos em todas os ensaios realizados, com uma média geral de recuperação de aproximadamente 26,8%. Isso indica que, inversamente, a eficiência de retenção das partículas no lodo foi superior a 70% em todos os ensaios.

Este valor é ainda mais elevado que os 52% de retenção observados por Kalčíková *et al* (2017) em lodo aeróbio, sugerindo que as características do lodo anaeróbio podem favorecer uma agregação ainda maior. Essa alta retenção tem uma implicação ambiental significativa, indicando que o lodo de ETEs pode concentrar e transportar MPs para o ambiente quando disposto de forma inadequada.

A alta taxa de retenção confirma que o lodo anaeróbio atua como um sumidouro para os microplásticos no sistema, garantindo uma exposição contínua e prolongada da biomassa às partículas. Essa interação, evidenciada pela dificuldade de recuperação, reforça a hipótese de que os MPs facilitaram o "efeito carreador" de matéria orgânica. A mesma aderência que dificultou a extração pode ter otimizado o transporte de substrato para os microrganismos, explicando o estímulo na produção de biogás observado no início da exposição.

4.7. Limitações do estudo

Por fim, cabe destacar que os resultados apresentados devem ser interpretados à luz de outras limitações do delineamento experimental. O tempo reduzido do ensaio (23 horas) permitiu avaliar apenas o comportamento inicial do consórcio de bactérias, não sendo possível

extrapolar os achados para processos contínuos de longo prazo. Isso justifica, para trabalhos futuros, a realização de experimentos em reatores de fluxo contínuo para avaliar a adaptação microbiana ou efeitos de toxicidade crônica.

Em segundo lugar, como apontado no tópico 4.2.1 o método de monitoramento quantificou o volume total de biogás, mas sem discriminar sua composição. A ausência da determinação da fração de metano impede a avaliação direta da atividade metanogênica específica e da real eficiência de conversão do substrato em metano.

Além disso, as massas relativamente pequenas de MPs e a ausência de replicatas biológicas independentes restringem as generalizações. Desta forma, os resultados obtidos devem ser compreendidos como fortes indicativos de tendências sob as condições específicas testadas, e não como evidências conclusivas. A replicação do estudo com diferentes tipos de lodo e em maior escala é um passo necessário para validar a universalidade destes fenômenos.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da adição cumulativa de microplásticos (MPs) na estabilidade e desempenho da digestão anaeróbia. Contrariando a expectativa de uma toxicidade direta, os resultados demonstraram um efeito dual e dose-dependente: uma baixa concentração de MPs (0,018 g) estimulou a produção de biogás em 87,2%, enquanto concentrações mais elevadas (0,048 g e 0,084 g) atenuaram progressivamente este efeito (estímulo de 38,5% e 17,9% em relação às condições de controle). A principal conclusão deste estudo é que o impacto dos MPs em sistemas anaeróbios não é linear e depende de um balanço entre diferentes mecanismos. A fase de estímulo foi atribuída a um "efeito carreador" físico, onde os MPs adsorvem e disponibilizam substrato para a biomassa, enquanto a atenuação do efeito sugere uma sobreposição de mecanismos inibitórios, possivelmente químicos liberados na lixiviação dos MPs, em concentrações mais altas.

A pesquisa também concluiu que o lodo anaeróbio atua como um sumidouro para essas partículas, com uma taxa de retenção superior a 70%, o que tem implicações ambientais significativas para a disposição final deste lodo.

Em suma, os resultados deste trabalho contribuem para preencher uma lacuna no conhecimento sobre como os microplásticos interagem com os microrganismos em ETEs. A estabilidade do sistema, confirmada pelos parâmetros de pH e alcalinidade, garante que os efeitos observados são atribuíveis aos MPs. Essa compreensão é fundamental para avaliar os riscos e desenvolver estratégias de tratamento para este poluente emergente.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação dos polímeros (PET, PVC e PE) de forma isolada, para identificar o principal agente inibitório, bem como a análise química da lixiviação de aditivos no efluente para confirmar a hipótese de toxicidade. Para comprovar o "efeito carreador", sugere-se a análise da comunidade microbiana aderida à superfície dos plásticos. Por fim, a realização de ensaios de longa duração em reatores de fluxo contínuo e a análise da composição do biogás (fração de metano) são passos essenciais para validar estes fenômenos em condições operacionais mais realistas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. J. JAMIESON, L. S. R. B. W. D. K. R. S. B. P. B. E. N.; LINLEY, T. D. Microplastics and synthetic particles ingested by deep-sea amphipods in six of the deepest marine ecosystems on Earth. **Royal Society Open Science**, fev. 2019. ISSN <https://doi.org/10.1098/rsos.180667>.
- ABIPLAST. **Perfil das Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil**. Associação Brasileira de Indústrias de Plástico. São Paulo. 2018.
- ABIPLAST. **Perfil das Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil**. Associação Brasileira da Indústria do Plástico. São Paulo, p. 55. 2023.
- ALIMI, O. S. et al. Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport. **Environmental Science & Technology**, Quebec, v. 52, n. 4, p. 1704-1724, 2018.
- AMATO-LOURENÇO, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. **JAMA Network Open**, v. 7, n. 9, set. 2024. ISSN 10.1001/jamanetworkopen.2024.40018.
- ANDRADY, A. L. Microplastics in the marine environment. **Marine Pollution Bulletin**, Raleigh, v. 62, n. 8, p. 1596-1602, 2011.
- AQUINO, S. F. et al. Metodologias para determinação da Atividade Metanogênica Específica (AME) em Lodos Anaeróbicos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 192-201, abril 2007. ISSN <https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000200010>.
- BARNES, D. K. A. et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 364, n. 1526, p. 1985-1998, jul. 2009. ISSN 10.1098/rstb.2008.0205.
- BECERRA, A. F. C. Caracterização de PEAD Antes e Após Envelhecimento em Diferentes Meios e Condições. **Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Química e de Materiais**, Rio de Janeiro, 2015.
- BRAGA, A. I. **Avaliação da Produção de Biogás em Reatores Anaeróbicos alimentados com Resíduos Alimentares e Glicerol Bruto**. Universidade Estadual Paulista "Júlio De Mesquita Filho" - Instituto de Química - Araraquara. Araraquara, p. 56. 2022.
- CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, v. 1, 2010.
- CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M. D.; NETO, S. C. Biodegradação: Uma Alternativa para Minimizar os Impactos Decorrentes dos Resíduos Plásticos. **Química Nova na Escola**, v. 22, p. 17-25, Mar 2005.

- CARPENTER, E. J.; SMITH, K. Plastics on the Sargasso Sea surface. **Science**, v. 175, n. 4027, p. 1240-1241, 1972.
- CESA, F. S.; TURRA, A.; BARUQUE-RAMOS, J. Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: A review from textile perspective with a focus on domestic washings. **Science of The Total Environment**, v. 598, p. 1116-1129, nov. 2017. ISSN 10.1016/j.scitotenv.2017.04.172.
- CETESB. **Guia ambiental da indústria de transformação e reciclagem de materiais plásticos**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. São Paulo, p. 91. 2011. (ISBN 978-85-61405-29-8).
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbicos**. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 1997.
- COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; MARIA, L. C. D. S. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 1-13, 2003. ISSN <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005>.
- DUARTE, I. C. S. et al. Development of a Method by HPLC to Determine LAS and its Application in Anaerobic Reactors. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 17, n. 7, p. 1360-1367, Dec 2006.
- DUARTE, I. C. S. et al. Evaluation of the Microbial Diversity in Sequencing Batch Reactor Treating Linear Alkylbenzene Sulfonate under Denitrifying and Mesophilic Conditions Using Swine Sludge as Inoculum. **Agriculture, Agribusiness And Biotechnology**, v. 58, n. 3, p. 326-332, May/Jun 2015.
- EDDY; METCALF. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2003.
- EERKES-MEDRANO, D.; THOMPSON, R. C.; ALDRIDGE, D. C. Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. **Water Research**, v. 75, p. 63-82, 2015.
- HIDALGO-RUZ, V. et al. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 6, p. 3039-3600, mar. 2012. ISSN 10.1021/es2031505.
- HIDAYATURRAHMAN, H.; LEE, T.-G. A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: Identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process. **Marine Pollution Bulletin**, v. 146, p. 696-702, Set 2019.
- HYARIC, R. L. et al. Influence of substrate concentration and moisture content on the specific methanogenic activity of dry mesophilic municipal solid waste digestate spiked with

propionate. **Bioresource Technology**, Lyon, v. 102, n. 2, p. 822-827, s 2010. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.124>.

IBPVC. O que é PVC. **Instituto Brasileiro do PVC**, 2025. Disponível em: <<https://pvc.org.br/o-que-e-pvc/>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

KALČÍKOVÁ, G. et al. Wastewater treatment plant effluents as source of cosmetic polyethylene microbeads to freshwater. **Chemosphere**, v. 188, p. 25-31, 2017. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.131>.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L.; AMARAL, A. C. D. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. [S.l.]: Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1108617>>.

L. E. RIPLEY, W. C. B.; CONVERSE, L. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal WPCF**, v. 58, p. 106-111, 1986.

LONGARETTI, G. et al. Estudo da atividade metanogênica específica de diferentes lodos anaeróbios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 1139-1146, nov/dez 2019. ISSN 10.1590/S1413-41522019140730.

MARCHI, M. E. V.; BRESSIANI, P. D. A.; BARBOSA, M. P. **Digestão anaeróbia de resíduos orgânicos para cozinha industrial dos restaurantes Latife**. Trabalho de formatura (Curso de Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2014.

METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 5. ed. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MONTAGNER, C. C. et al. Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos. **Química Nova**, v. 44, n. 10, p. 1328-1352, Jun 2021.

NAPPER, I. E. et al. Reaching New Heights in Plastic Pollution - Preliminary Findings of Microplastics on Mount Everest. **One Earth**, v. 3, n. 5, p. 621-630, nov. 2020. ISSN 10.1016/j.oneear.2020.10.020.

OLIVATTO, G. P. Estudo sobre Microplásticos em Águas Superficiais na Porção Oeste da Baía de Guanabara. **Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO**, Rio de Janeiro, p. 11, maio 2017. ISSN <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.29926>.

OLIVEIRA, A. C. D. Remoção de microplástico de efluente sintético através de adsorventes tratados com microemulsão. **Programa de Pós Graduação em Química**, Natal - RN, 2023.

- PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MONTERANI, F. Effects of pH, acidity and alkalinity on the microbiota activity of an anaerobic sludge blanket reactor (UASB) treating pig manure effluents. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 157-168, 2009.
- PLASTICS EUROPE. **Plastics – the fast Facts 2023**. Plastics Europe AISBL. Bruxelas. 2023.
- PLASTICS EUROPE. **Plastics – the fast Facts 2024**. Plastics Europe AISBL. Bruxelas. 2024.
- SIMÕES, A. N. **Processamento do glicerol bruto em reatores anaeróbios de leito fluidificado, acidogênico e metanogênico, em temperatura mesofílica**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo. São Carlos. 2017.
- SOARES, E. A. Poli(tereftalato de etileno) (PET). **Plástico Industrial**, São Paulo, p. 07, dez. 2021.
- SUN, J. et al. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. **Water Research**, v. 152, p. 21-37, 2019.
- TALVITIE, J. et al. Solutions to microplastic pollution e Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. **Water Research**, v. 123, p. 401-407, Out 2017.
- UNEP. **Plastic in cosmetics. Are we polluting the environment through our personal care?** UNEP - UN Environment Programme. [S.l.], p. 38. 2015.
- VIANA, M. B. **Produção de biogás a partir de glicerol oriundo de biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2011.
- WANG, F. et al. Interaction of toxic chemicals with microplastics: A critical review. **Water Research**, v. 139, p. 208-2019, Ago 2018.
- XIANG, S. et al. Identification and Quantification of Microplastics in Aquaculture Environment. **Frontiers in Marine Science**, v. 8, 2021.