

**UNIVERSIDADE DE SOROCABA  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS TECNOLÓGICOS E  
AMBIENTAIS**

**Maria Gabriela Ortiz Ladwig**

**OXIDAÇÃO AVANÇADA COMO PRÉ-TRATAMENTO DO TEREFTALATO DE  
POLIETILENO NA DEGRADAÇÃO MICROBIOLÓGICA COM *GORDONIA  
HONKONGENSIS***

**Sorocaba/SP  
2026**

**Maria Gabriela Ortiz Ladwig**

**OXIDAÇÃO AVANÇADA COMO PRÉ-TRATAMENTO DO TEREFTALATO DE  
POLIETILENO NA DEGRADAÇÃO MICROBIOLÓGICA COM *GORDONIA  
HONKONGENSIS***

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Márcio Squina

**Sorocaba/SP  
2026**

### Ficha Catalográfica

L158o Ladwig, Maria Gabriela Ortiz  
Oxidação avançada como pré-tratamento do tereftalato de polietileno na  
degradação microbiológica com *Gordonia honkongensis* / Maria Gabriela  
Ortiz Ladwig. – 2026.  
58 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Márcio Squina.  
Dissertação (Mestrado em Processos Tecnológicos e Ambientais) –  
Universidade de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2026.

1. Biodegradação. 2. Polietilenotereftalatos. 3. Processo oxidativo  
avançado . I. Squina, Fábio Márcio, orient. II. Universidade de Sorocaba.  
III. Título.

Elaborada por Maria Carla P. F. Gonçalves – CRB-8/6721

**Maria Gabriela Ortiz Ladwig**

**OXIDAÇÃO AVANÇADA COMO PRÉ-TRATAMENTO DO TEREFALATO DE  
POLIETILENO NA DEGRADAÇÃO MICROBIOLÓGICA COM *GORDONIA  
HONKONGENSIS***

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Aprovado em: 06/02/2026

BANCA EXAMINADORA:

*Fabio M Squina*

Prof. Dr. Fábio Márcio Squina  
Presidente da banca  
Universidade de Sorocaba

*ADRIANE MEDEIROS FERREIRA*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Adriane de Medeiros Ferreira  
Universidade de Sorocaba



Prof. Dr. Denicezar Angelo Baldo  
Universidade de Sorocaba

Dedico este trabalho aos meus professores,  
colegas de laboratório e àqueles que, de  
alguma forma, contribuíram para meu  
crescimento científico e pessoal.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, com todo o meu carinho meu melhor amigo e amor da minha vida, Francisco, meu maior suporte em todos os momentos. Sua paciência, incentivo e companheirismo tornaram esta jornada muito mais leve e significativa.

À minha avó Vera e à minha mãe Érica, minha base e minha rede de apoio mais sólida. Obrigada por cada gesto de cuidado, por cada palavra de força e por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava.

Aos meus sogros, Suzana e Mario, por confiarem no meu potencial e me acolherem sempre com tanto carinho.

Expresso minha profunda gratidão aos meus colegas de laboratório, José Pedro, Nicole e Tamires, que foram meus principais parceiros nesta pesquisa, compartilhando desafios, conquistas e muitos aprendizados. Estendo também meu agradecimento aos demais colegas, Emily, Matheus e Ellen, cuja convivência, suporte e trocas foram igualmente importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Denicezar, agradeço pelo conhecimento compartilhado e pelo auxílio generoso nas técnicas de análise, que tanto contribuíram para a qualidade desta pesquisa. À Professora Adriane, minha referência em engenharia e ciência dos materiais, agradeço por ser inspiração e por mostrar, através de sua trajetória, o impacto transformador do conhecimento.

Por fim, deixo meu sincero agradecimento ao meu orientador, Professor Fábio, pela orientação dedicada, pela confiança depositada em mim e pela oportunidade de realizar este trabalho. Sua condução firme foi essencial para que esta pesquisa se concretizasse.

“Olhem de novo esse ponto. É aqui, é a nossa casa, somos nós. Nele, todos a quem ama, todos a quem conhece, qualquer um sobre quem você ouviu falar, cada ser humano que já existiu, viveram as suas vidas. (...) Não há, talvez, melhor demonstração da tola presunção humana do que esta imagem distante do nosso minúsculo mundo. Para mim, destaca a nossa responsabilidade de sermos mais amáveis uns com os outros, e para preservarmos e protegermos o “pálido ponto azul”, o único lar que conhecemos até hoje.”

*-Carl Sagan, Pale Blue Dote, 1994.*

## RESUMO

A poluição plástica representa um dos maiores desafios ambientais atuais, agravado pela crescente produção e pela persistência de materiais plásticos, como o tereftalato de polietileno (PET), cujo descarte inadequado reforça a necessidade de estratégias de degradação mais eficientes. Nesse contexto, este trabalho avaliou o uso da peroxonação, um Processo Oxidativo Avançado (POA), como pré-tratamento capaz de modificar a estrutura química e a morfologia de filmes PET, para potencializar sua biodegradação pela cepa *Gordonia hongkongensis* (BR7). Os filmes foram submetidos ao tratamento oxidativo e posteriormente cultivados por 90 dias, sendo caracterizados por ATR-FTIR, MEV, ângulo de contato e perda gravimétrica. O pré-tratamento promoveu a introdução de grupos funcionais oxigenados, redução da hidrofobicidade, aumento da rugosidade superficial e formação de fissuras, tornando o polímero mais acessível à colonização microbiana. Após o cultivo, observou-se maior diminuição das bandas nativas do PET, maior área de degradação, perda gravimétrica superior e evidências morfológicas de biodeterioração acentuada nos filmes previamente oxidados. Em conjunto, os resultados demonstram que a oxidação avançada potencializa de forma significativa a ação microbiológica sobre o PET e pode atuar como etapa preparatória eficaz em processos integrados de tratamento de resíduos plásticos, destacando o potencial da combinação entre abordagens químicas e biológicas para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes.

**Palavras-chave:** Processos Oxidativo Avançados; Biodegradação; Pré-Tratamento; Polietilenotereftalatos.

## ABSTRACT

Plastic pollution represents one of the greatest current environmental challenges, exacerbated by the increasing production and persistence of plastic materials such as Polyethylene Terephthalate (PET), whose improper disposal reinforces the need for more efficient degradation strategies. In this context, this study evaluated the use of peroxone, an Advanced Oxidation Process (AOP), as a pretreatment capable of modifying the chemical structure and morphology of PET films to enhance their biodegradation by the strain *Gordonia hongkongensis* (BR7). The films were subjected to oxidative treatment and subsequently cultivated for 90 days, followed by characterization through ATR-FTIR, SEM, contact angle analysis and gravimetric loss. The pretreatment promoted the introduction of oxygenated functional groups, reduced hydrophobicity, increased surface roughness, and induced fissure formation, making the polymer more accessible to microbial colonization. After cultivation, a greater decrease in native PET bands, increased degraded surface area, higher gravimetric loss, and morphological evidence of intensified biodeterioration were observed in the pre-oxidized films. Taken together, the results demonstrate that advanced oxidation significantly enhances the microbiological action on PET and can serve as an effective preparatory step in integrated plastic waste treatment processes, highlighting the potential of combining chemical and biological approaches to develop more sustainable and efficient solutions.

**Keywords:** Advanced Oxidation Processes; Biodegradation; Pretreatment; Polyethylene Terephthalate.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PET	Tereftalato de Polietileno
PE	Polietileno
POA	Processo Oxidativo Avançado
O <sub>3</sub>	Ozônio
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de Hidrogênio
BR7	Cepa <i>Gordonia hongkongensis</i>
PUU	Plásticos de Uso Único
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
MPs	Microplásticos
NPs	Nanoplásticos
BHET	Bis(2-hidroxietil) tereftalato
TPA	Ácido Tereftálico
EG	Etileno Glicol
DMT	Dimetil Tereftalato
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
H <sub>2</sub>	Gás Hidrogênio
CH <sub>4</sub>	Gás Metano
H <sub>2</sub> O	Água
MHET	Mono (2-hidroxietil) Tereftalato
FTIR	Infravermelho com Transformada de Fourier
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
POP	Poluentes Orgânicos Persistentes
•OH	Radical Hidroxila
•R	Radical Orgânico
ROO•	Radical Peroxil
OH <sup>-</sup>	Íon Hidroxila
O <sub>2</sub>	Oxigênio Molecular
HO <sub>2</sub> •	Radical Hidroperoxil
SDS	Dodecil Sulfato de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
TB	Terrific Broth

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### Figuras

Figura 1 - Fluxograma dos processos de solvólise do PET.....	18
Figura 2 - Etapas do processo de biodegradação.....	21
Figura 3 – Degradação enzimática simplificada do PET .....	23
Figura 4 – Hidroxilação do benzeno por radicais hidroxil .....	29
Figura 5 - Representação esquemática do sistema experimental de peroxonação utilizado como pré-tratamento oxidativo.....	34

### Imagens

Imagem 1 – Dimensões do filme PET.....	32
Imagem 2 – Sistema para análise de ângulo de contato dos filmes PET.....	37
Imagem 3- Microscopia eletrônica de varredura dos filmes PET com e sem tratamento .....	42
Imagem 4 – Ângulo de contato Filme PET com e sem tratamento por POA.....	43
Imagem 5 – Microscopia eletrônica de varredura dos filmes PET após cultivo em cepa <i>Gordonia hongkongensis</i> (BR7).....	48

### Gráficos

Gráfico 1 - Número de publicações por subgrupo temático relacionadas à degradação polimérica, processos oxidativos avançados e biodegradação .....	30
Gráfico 2 – Quantificação de ozônio dissolvido .....	38
Gráfico 3 – ATR-FTIR filmes PET com e sem tratamento por POA .....	40
Gráfico 4 – Ângulo de contato médio filmes PET com e sem tratamento .....	43
Gráfico 5 – ATR-FTIR amostras PET pós-processo de autoclavagem.....	44
Gráfico 6 – ATR-FTIR comparação PET POA e PET POA autoclavado .....	45
Gráfico 7 – ATR-FTIR filme PET pós cultivo em cepa BR7 .....	46
Gráfico 8 – ATR-FTIR filme PET POA pós cultivo em cepa BR7 .....	46
Gráfico 9 - Diminuição percentual da absorbância dos picos característicos do PET com e sem POA pós cultivo com BR7 .....	47
Gráfico 10 – Perda gravimétrica dos filmes PET após cultivo em cepa BR7.....	49

### Quadros

Quadro 1 - Principais métodos de reciclagem de polímeros .....	16
Quadro 2 - Espécies geradas por alguns dos processos oxidativos avançados mais conhecidos .....	27
Quadro 3 - Modos vibracionais associados às bandas observadas no ATR-FTIR do polímero PET .....	39

### Tabelas

Tabela 1 - Análise da influência do tratamento por POA na perda gravimétrica dos filmes PET .....	41
---	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Poluição plástica</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Estratégias de reciclagem de plásticos</b> .....	<b>15</b>
2.2.1	Reciclagem mecânica ou física .....	17
2.2.2	Reciclagem química .....	17
<b>2.3</b>	<b>Biodegradação</b> .....	<b>21</b>
2.3.1	Biodegradação do PET .....	22
2.3.2	<i>Gordonia hongkongensis</i> (BR7).....	24
<b>2.4</b>	<b>Pré-tratamentos aplicados à biodegradação de polímeros sintéticos</b> .....	<b>25</b>
2.4.1	Processos Oxidativos Avançados (POA) .....	26
<b>2.5</b>	<b>Panorama bibliométrico e lacunas de pesquisa</b> .....	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIAS</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Limpeza dos polímeros</b> .....	<b>32</b>
<b>4.2</b>	<b>Quantificação de ozônio dissolvido</b> .....	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Pré-tratamento por peroxonação</b> .....	<b>33</b>
<b>4.4</b>	<b>Cultivo microbiológico <i>G. hongkongensis</i> (BR7)</b> .....	<b>34</b>
<b>4.5</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b> .....	<b>35</b>
<b>4.6</b>	<b>Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier com Reflexão Total Atenuada (ATR-FTIR)</b> .....	<b>35</b>
<b>4.7</b>	<b>Estimativa de degradação por ATR-FTIR</b> .....	<b>35</b>
<b>4.8</b>	<b>Análise de Ângulo de contato</b> .....	<b>36</b>
<b>4.9</b>	<b>Análise de perda gravimétrica</b> .....	<b>37</b>
<b>4.10</b>	<b>Análises estatísticas</b> .....	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>52</b>
	<b>APÊNDICE A - ESTRATÉGIA DE BUSCA E DETALHAMENTO DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA</b> .....	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Embora os polímeros sintéticos tenham promovido avanços tecnológicos e benefícios em diversas áreas, seu descarte inadequado desencadeou uma crise ambiental de proporções globais. A poluição plástica constitui um problema difuso e persistente, cujos impactos se estendem a todos os compartimentos ecológicos, comprometendo a qualidade dos recursos hídricos, alterando as propriedades físico-químicas do solo, introduzindo contaminantes na atmosfera e, conseqüentemente, afetando de forma significativa a integridade e a viabilidade da flora e da fauna (MacLeod et al., 2021).

Entre esses materiais, o tereftalato de polietileno (PET) destaca-se por ser leve, resistente, durável, transparente e apresentar excelente barreira a gases e elevada resistência química, características que o tornam amplamente utilizado em embalagens, especialmente em garrafas de bebidas (Bhanderi; Joshi; Patel, 2023). Em 2020, um estudo baseado na avaliação do ciclo de vida e na análise do fluxo de materiais examinou o consumo de PET em 12 regiões (41 países), registrando a produção de 7.297,7 Kt de resina PET virgem. Dos resíduos gerados, cerca de 42% foram destinados a aterros e 35% à incineração, o que evidencia os desafios na gestão sustentável desse polímero (Duan et al., 2024).

O polietileno (PE), por sua vez, figura entre os principais plásticos utilizados em embalagens de uso único, devido à sua excelente relação resistência-peso, boas propriedades de barreira e baixo custo de produção. Em 2018, a indústria global de PE movimentava aproximadamente 100.000 Kt, correspondendo a 31% do mercado mundial de plásticos (Dey et al., 2021)

Considerando a elevada produção e descarte desses materiais, torna-se imprescindível avaliar as alternativas de remediação disponíveis. A reciclagem mecânica, atualmente a principal tecnologia empregada, é restrita a poucos tipos de polímeros, como PET e PE, e resulta em materiais de menor qualidade. A reciclagem química desponta como alternativa promissora, mas ainda enfrenta obstáculos relacionados a custos e eficiência (Garcia; Robertson, 2017). Nesse cenário, a biodegradação mediada por microrganismos e enzimas tem recebido crescente atenção, abrindo perspectivas para a degradação biotecnológica e para o bio-upcycling, isto é, a conversão de resíduos plásticos em produtos de maior valor agregado (Lee et al., 2023). Tal avanço representa uma mudança de paradigma no manejo de resíduos poliméricos, ao integrar processos sustentáveis que, além de mitigar o impacto ambiental, exploram o potencial econômico da valorização dos subprodutos gerados pela degradação biológica.

Para otimizar a biodegradação, o pré-tratamento dos polímeros desempenha papel fundamental, promovendo modificações físico-químicas que aumentam a rugosidade superficial e introduzem grupos funcionais polares, como carbonila, hidroxila e carboxila. Essas alterações elevam a hidrofiliabilidade do material e favorecem a interação com microrganismos e enzimas. Além disso, o processo provoca a fragmentação das cadeias poliméricas e a redução da cristalinidade, tornando o polímero mais suscetível à ação enzimática e acelerando sua degradação (Ciuffi; Fratini; Rosi, 2024).

Entre as técnicas de pré-tratamento, destacam-se os processos oxidativos avançados (POA), que geram radicais livres altamente reativos, como os radicais hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ), capazes de degradar poluentes orgânicos, incluindo plásticos. Ao atuarem na superfície dos microplásticos, esses processos promovem modificações químicas nas cadeias poliméricas, reduzindo a hidrofobicidade e favorecendo a colonização microbiana e a ação enzimática. Apesar dos custos relativamente elevados de implementação, os POA apresentam alta eficácia e baixo impacto ambiental, sendo empregados principalmente como etapa preparatória para tratamentos biológicos subsequentes (Bule Možar et al., 2023).

Nesse contexto, o Laboratório de Ciências Moleculares da Universidade de Sorocaba (LaCiMo – UNISO) vem desenvolvendo pesquisas voltadas ao isolamento de bactérias capazes de degradar PET e PE, bem como à caracterização e obtenção das enzimas por elas secretadas. Entretanto, tais processos ainda apresentam limitações, como baixa taxa de conversão e lentidão na biodegradação, reforçando a necessidade de aplicação de pré-tratamentos que aumentem a eficiência do processo.

O presente projeto propõe adaptar a metodologia descrita por Hu, Lim e Hu (2023), empregando a peroxonação, um processo oxidativo avançado que combina ozônio ( $\text{O}_3$ ) e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), como pré-tratamento para a biodegradação de filmes de PET, com a cepa *Gordonia honkongensis* (BR7), previamente estudada pelo grupo de pesquisa LaCiMo – UNISO.

Essa técnica é bem estabelecida, e distingue-se pela geração superior de radicais  $\bullet\text{OH}$  em comparação à ozonização isolada. Apresenta menor produção de resíduos, baixo consumo energético, potencial de escalonamento e facilidade de aplicação em escala laboratorial. Considerando a escassez de estudos que investiguem os processos oxidativos avançados como etapa preparatória para a degradação microbiológica, a presente pesquisa mostra-se de elevada relevância científica e tecnológica.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Poluição plástica

Nas últimas décadas, observou-se um crescimento expressivo na produção e no consumo de plásticos, passando de cerca de 1,7 milhão de toneladas por ano em 1950 para mais de 367 milhões em 2020. As projeções indicam que esse volume pode atingir 590 milhões de toneladas até 2050, totalizando um acúmulo de aproximadamente 8,1 bilhões de toneladas desde meados do século XX (Hoang, 2022). Atualmente, o consumo global anual de plástico é estimado em 450 milhões de toneladas métricas, o que equivale a cerca de 57 kg por pessoa. Desse total, 350 milhões de toneladas tornam-se resíduos, dos quais 80 milhões são descartados de forma inadequada, o que contribui significativamente para a poluição ambiental (Joshi; Vashishth, 2024).

Estima-se que aproximadamente 76% de todo o plástico já produzido tenha se transformado em resíduo, sendo disposto em aterros sanitários, lixões ou diretamente nos ambientes naturais. A má gestão desses resíduos, especialmente os derivados de plásticos de uso único, tem intensificado a contaminação de ecossistemas aquáticos, terrestres e atmosféricos (Walker, 2024).

Os plásticos de uso único (PUUs) são materiais projetados para aplicações de curta duração, sendo descartados imediatamente após o uso. Exemplos típicos incluem sacolas plásticas, talheres descartáveis, embalagens primárias e secundárias de alimentos industrializados, recipientes de bebidas e cosméticos. Tais materiais são amplamente utilizados devido às suas propriedades físico-químicas vantajosas, como leveza, resistência mecânica, baixo custo, inércia química e boas propriedades de barreira. Os principais polímeros utilizados na fabricação de PUUs incluem o PE, o PET, o polipropileno (PP) e o poliestireno (PS) (Idris et al., 2023; Kamalakkannan et al., 2022).

Fatores físicos e químicos ambientais promovem a fragmentação desses materiais em microplásticos (MPs) e nanoplásticos (NPs), que têm sido detectados em diversos compartimentos ecológicos. A radiação ultravioleta, proveniente da exposição solar, induz processos de foto-oxidação, enquanto a ação de agentes mecânicos, como vento, ondas e abrasão, favorece a desintegração física dos polímeros (Yang et al., 2024).

Os microplásticos afetam significativamente os ecossistemas terrestres, alterando propriedades físico-químicas do solo, como densidade aparente, porosidade e capacidade de retenção hídrica. Além disso, atuam como estressores para comunidades microbianas,

interferindo na diversidade, na atividade metabólica e na distribuição de microrganismos edáficos (Maqbool; Soriano; Gómez, 2023).

Em ambientes aquáticos, o impacto é igualmente preocupante. A ingestão de partículas plásticas por organismos marinhos e de água doce pode afetar diversas cadeias alimentares, comprometendo a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. Estima-se que mais de 700 espécies aquáticas, de microfauna a vertebrados de grande porte, já tenham sido afetadas por partículas plásticas e seus contaminantes associados, como metais pesados e aditivos tóxicos (Van Genuchten, 2023).

A presença de MPs na atmosfera também representa uma via emergente de contaminação. Essas partículas podem atuar como vetores de poluentes atmosféricos, ampliando sua dispersão e contribuindo para a formação de compostos tóxicos. Estudos indicam riscos à saúde humana, incluindo efeitos respiratórios e cardiovasculares, além de impactos na qualidade do ar e nos ciclos biogeoquímicos (Ou, 2024).

No corpo humano, micro e nanoplásticos podem induzir estresse oxidativo, inflamações, desequilíbrios hormonais e neurotóxicos, além de atuarem como veículos de substâncias químicas e patógenos. Tais interações podem causar danos celulares e alterar funções fisiológicas essenciais (Fontes et al., 2024).

Os principais desafios no gerenciamento de resíduos plásticos estão relacionados à predominância de plásticos de uso único e à baixa eficiência das estratégias de reciclagem atuais. A ausência de infraestrutura adequada, aliada à falta de políticas públicas robustas e campanhas educativas, limita a participação da população nos processos de coleta seletiva, triagem e reaproveitamento. A complexidade dos sistemas de reciclagem e a desinformação sobre o destino dos resíduos dificultam a adesão às práticas sustentáveis (Sahu et al., 2024).

## **2.2 Estratégias de reciclagem de plásticos**

As diferentes abordagens para a reciclagem de plásticos podem ser classificadas em quatro categorias principais, cada uma com características específicas em relação ao nível de processamento, à qualidade do material reciclado e impactos ambientais. O quadro a seguir ilustra os quatro principais métodos de reciclagem, com sua definição, pontos fortes e desvantagens.

**Quadro 1 - Principais métodos de reciclagem de polímeros**

<i>Tipo de reciclagem</i>	<i>Outros nomes</i>	<i>Descrição do processo</i>	<i>Qualidade do material resultante</i>	<i>Prós</i>	<i>Contras</i>
Primária	Mecânica simples / Física	Reprocessamento direto de resíduos limpos e homogêneos para produzir o mesmo produto.	Alta, próxima ao material original, desde que o resíduo seja limpo e homogêneo.	Processo simples, baixo custo, baixo impacto ambiental, amplamente difundido industrialmente.	Exige resíduos limpos e homogêneos; contaminações comprometem a qualidade final; limitado a processos industriais; pouco aplicado em resíduos pós-consumo.
Secundária	Mecânica avançada	Processamento de plásticos contaminados ou misturados, resultando em materiais com menor desempenho.	Inferior ao polímero virgem (downcycling), podendo apresentar propriedades mecânicas reduzidas.	Permite reaproveitar resíduos heterogêneos; maior aplicabilidade prática quando há mistura de materiais.	Alteração das propriedades do material (downcycling); produtos com menor valor agregado e durabilidade; pode gerar resíduos adicionais.
Terciária	Química	Quebra do polímero em monômeros ou outros compostos químicos valiosos por processos químicos ou térmicos.	Alta, comparável ao polímero virgem.	Recupera matéria-prima com alta qualidade; promove circularidade; pode tratar resíduos contaminados.	Alto custo energético e de reagentes; processos complexos; pode gerar subprodutos perigosos; ainda pouco difundido.
Quaternária	Recuperação energética	Incineração controlada para conversão de resíduos plásticos em energia térmica ou elétrica.	Não gera novo plástico; gera apenas energia.	Reduz o volume de resíduos; alternativa para materiais não recicláveis.	Emissões de gases de efeito estufa e poluentes; não fecha o ciclo do plástico; perda do material.

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de: (Prajapati et al., 2021)

### 2.2.1 Reciclagem mecânica ou física

É o método mais estabelecido e amplamente utilizado, em que a recuperação e o reprocessamento do plástico são realizados por meio de processos que não alteram a estrutura química dos polímeros. É dividido nas seguintes etapas: coleta, triagem e classificação, limpeza, redução de tamanho, reprocessamento por fusão e moldagem. Na etapa de coleta, o material plástico é coletado de diversas fontes, como residências, estabelecimentos e indústrias. Na triagem e classificação, o material é separado por tipo de polímero, por meio de tecnologias avançadas, para evitar misturas que comprometem a qualidade do reciclado.

Durante a limpeza, os resíduos e alguns aditivos são removidos para que não comprometam a qualidade do produto. Em seguida, o plástico é triturado em fragmentos menores, chamados flakes ou pellets, que facilitam a sua manipulação. Os fragmentos são então fundidos em temperatura controlada e processados em extrusoras, novamente triturados, e estão prontos para serem utilizados como matéria-prima para novos produtos plásticos. Porém, a reciclagem mecânica apresenta desafios e limitações, como a perda de propriedades físicas após múltiplos ciclos, presença de contaminantes que dificultam o reprocessamento e dificuldade nos processos de separação e reciclagem de polímeros mistos (Alaghemandi, 2024; Jiang; Bateer, 2025).

### 2.2.2 Reciclagem química

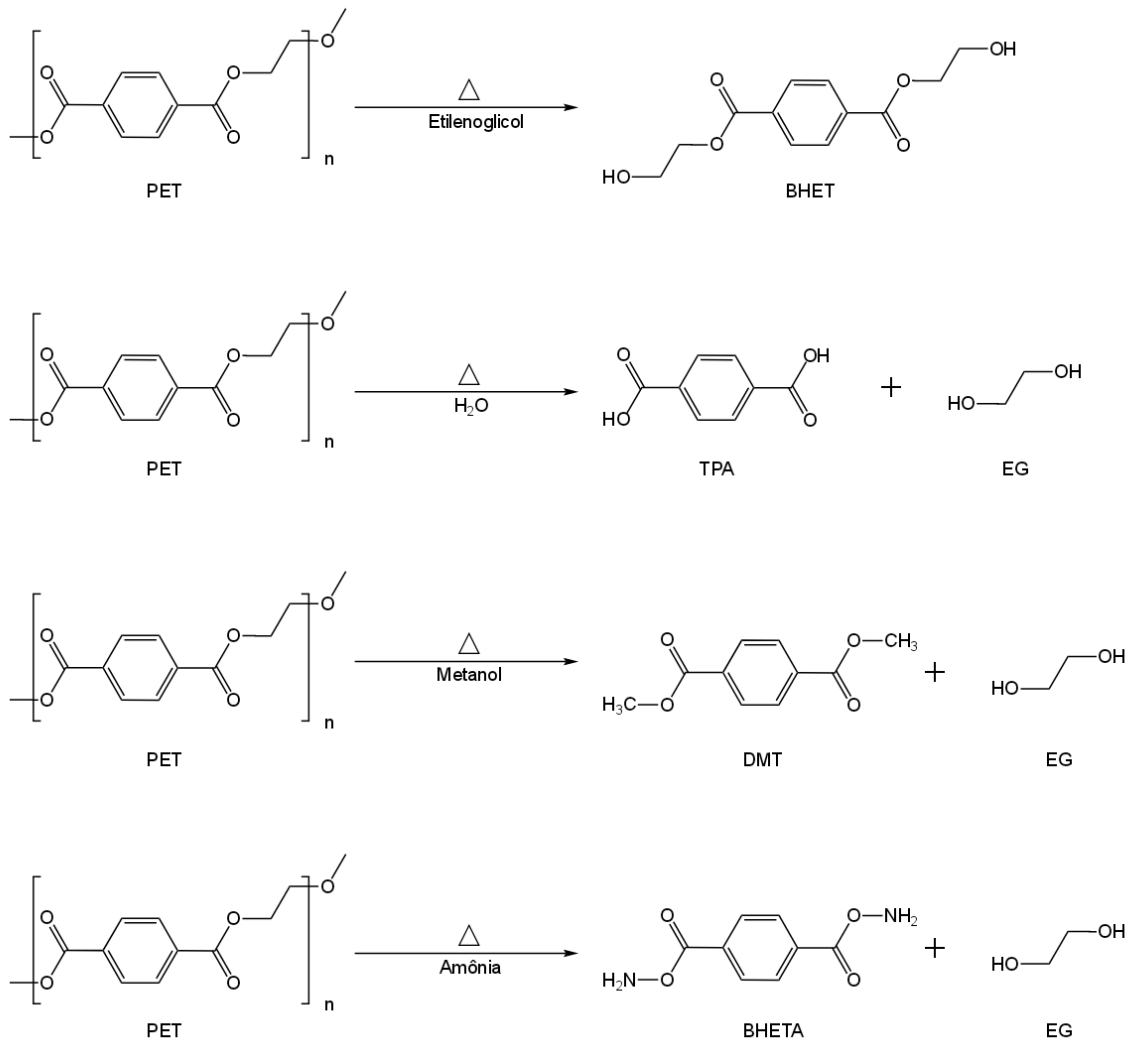
É uma abordagem inovadora e promissora para o tratamento de resíduos plásticos, pois supera muitas das limitações associadas aos métodos primário e secundário de reciclagem. Atua no nível molecular, decompondo os polímeros em seus monômeros ou em intermediários valiosos para a indústria, que são reutilizados para produzir novos plásticos com qualidade equivalente à fabricados a partir de polímero virgem (Jiang et al., 2022).

#### 2.2.2.1 Solvolise

Os processos de solvolise utilizam solventes orgânicos para quebrar as cadeias poliméricas em produtos de baixo peso molecular. É um método que opera em condições de temperatura relativamente brandas, entre 80 °C e 280 °C. É um método muito eficaz para polímeros com cadeias oxigenadas, como ésteres e éteres, presentes em polímeros como o PET. Os principais processos de solvolise são: hidrólise, glicólise, metanólise e aminólise (Chen; Hu,

2024; Jiang et al., 2022; Martínez-Narro; Hassan; Phan, 2024). A figura 1 ilustra os produtos obtidos a partir do processo de solvolise do PET com os solventes orgânicos citados e seus respectivos produtos.

**Figura 1 - Fluxograma dos processos de solvólise do PET.**



Fonte: Elaboração Própria. Adaptado de: Chen; Hu (2024)

Ao reagirmos o PET com um excesso de glicóis, particularmente com o etilenoglicol, o grupo hidroxila cliva as ligações éster do PET, gerando bis(2-hidroxiethyl) tereftalato (BHET), um monômero utilizado na síntese do PET. Este processo é denominado glicólise. Para acelerar a reação e obter maior rendimento, a glicólise ocorre em temperaturas próximas a 200 °C, na presença de catalisadores como acetato de zinco ou carbonato de sódio. A eficiência do processo é dependente dos parâmetros, portanto, quando a concentração do glicol e do

catalisador, a temperatura e o tempo de reação são otimizados, os rendimentos da conversão em BHET são de 77% a 100% (Jiang et al., 2022; Martínez-Narro; Hassan; Phan, 2024)

Na reação de hidrólise, as moléculas de água são utilizadas para quebrar as ligações éster do PET, formando ácido tereftálico (TPA) e etilenoglicol (EG). Essa reação ocorre em condições elevadas de temperatura, entre 200 °C e 300 °C, e pode ser realizada em meio ácido, alcalino ou neutro. A hidrólise ácida utiliza ácidos fortes para catalisar a reação e produzir TPA e EG, mas requer etapas posteriores de neutralização, enquanto a hidrólise alcalina utiliza bases fortes como catalisadores, que convertem TPA em seu sal, tereftalato de sódio. A hidrólise neutra ocorre sem catalisadores agressivos, mas requer temperaturas e pressões de operação mais elevadas, o que eleva o custo e o consumo energético (Jiang et al., 2022; Martínez-Narro; Hassan; Phan, 2024).

Semelhante a glicólise, a metanólise é um processo de transesterificação, onde o metanol reage com o éster presente na cadeia do PET, gerando dimetil tereftalato (DMT) e EG. Esse processo geralmente requer catalisadores específicos para aumentar a eficiência e a velocidade da reação, podendo ocorrer em condições moderadas de temperatura e pressão (Alaghemandi, 2024; Chen; Hu, 2024; Martínez-Narro; Hassan; Phan, 2024).

Na aminólise, o polímero reage com compostos nitrogenados, que rompem suas ligações químicas. É usada para atacar grupos éster ou amidas, formando produtos intermediários com grupos amida ou amina na estrutura. No PET, a aminólise produz bis(2-hidroxietil) tereftalamida (BHETA), que pode ser utilizada na produção de outros materiais de valor agregado. A aminólise é um tipo específico de aminólise que utiliza amônia ou compostos de amônio para romper as ligações poliméricas. A despolimerização do PET, por aminólise, gera BHETA e EG. Ambas envolvem a quebra química dos polímeros por reação com compostos contendo nitrogênio, porém a aminólise utiliza aminas orgânicas enquanto a aminólise utiliza amônia, e ambas permitem recuperar monômeros ou intermediários químicos para reutilização na manufatura de novos polímeros ou materiais (Alaghemandi, 2024; Jiang et al., 2022).

Os processos de solvólise produzem materiais de alta qualidade, gerando monômeros e intermediários com propriedades comparáveis às do material virgem. Mas requer condições específicas de reação, o que exige controle rigoroso, além do uso de catalisadores potencialmente tóxicos e prejudiciais ao meio ambiente. Além disso, sua efetividade se limita a alguns tipos específicos de polímeros mais suscetíveis à quebra química, sendo pouco eficiente no processamento de poliolefinas. Todos esses fatos impactam na viabilidade econômica e ambiental desses processos de reciclagem (Alaghemandi, 2024; Chen; Hu, 2024; Jiang et al., 2022; Martínez-Narro; Hassan; Phan, 2024)

### 2.2.2.2 Termólise

Termólise é um processo de decomposição térmica pelo qual materiais, como resíduos plásticos, são quebrados em compostos menores por meio do aquecimento a temperaturas elevadas. É um termo geral que abrange métodos como a pirólise e a gaseificação, que utilizam o calor para transformar o plástico em produtos úteis sem combustão completa (Alaghemandi, 2024; Jiang et al., 2022; Jiang; Bateer, 2025).

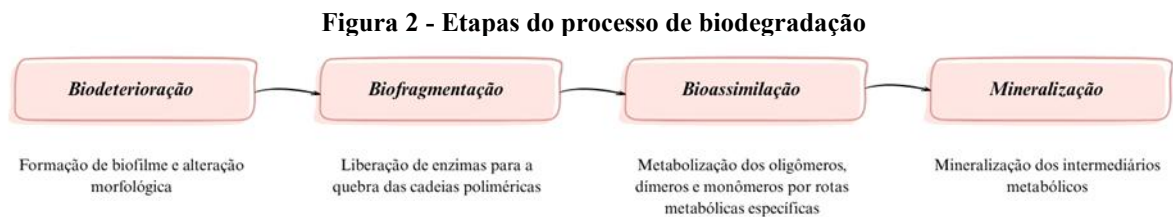
A gaseificação é um processo termoquímico que converte resíduos plásticos em produtos de valor comercial. O plástico é parcialmente oxidado na presença controlada de agentes gasificantes, como ar, oxigênio ou vapor d'água, a temperaturas entre 700 °C e 1500 °C. A quebra das cadeias leva à formação de um gás combustível, composto por monóxido e dióxido de carbono (CO e CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), conhecido como syngas. É um processo versátil que permite o uso de misturas plásticas com resíduos, sem necessidade de processos prévios. No entanto, requer altas temperaturas de operação e gera gases tóxicos com grande impacto ambiental (Alaghemandi, 2024; Chen; Hu, 2024; Jiang et al., 2022).

A pirólise é um processo de reciclagem química que consiste na decomposição térmica dos resíduos plásticos na ausência de oxigênio, geralmente em temperaturas entre 300 °C e 900 °C. Durante a pirólise, as longas cadeias poliméricas dos plásticos são quebradas, gerando produtos como óleo de pirólise, gases e resíduos sólidos. O óleo produzido pode ser utilizado como matéria-prima para a fabricação de novos plásticos ou como combustível. A pirólise é eficaz para o tratamento de plásticos mistos e contaminados que não podem ser reciclados mecanicamente, proporcionando uma forma de reutilização desses materiais. Contudo, o processo é altamente consumidor de energia devido às elevadas temperaturas necessárias, o que implica custos elevados e potenciais emissões de gases de efeito estufa se energias não renováveis forem utilizadas para sua operação (Chen; Hu, 2024; Jiang; Bateer, 2025).

As opções mais usuais de reciclagem apresentam grandes pontos contrários, com ênfase no consumo de energia. Portanto, há uma necessidade urgente de desenvolver novas técnicas de reciclagem que priorizem a sustentabilidade ambiental e minimizem o impacto ecológico, ao abordar as limitações dos métodos atuais. A pesquisa sobre biodegradação tem crescido rapidamente, impulsionada pela necessidade de soluções sustentáveis para os desafios ambientais atuais (Singh Jadaun et al., 2022a; Thew et al., 2023)

## 2.3 Biodegradação

O termo biodegradação refere-se ao processo pelo qual microrganismos, como fungos e bactérias, decompõem um determinado material em compostos mais simples (Kumar Tiwari; Gautam; Maurya, 2018). Segundo Lv et al. (2024) e Thew et al. (2023) esse processo ocorre em quatro etapas: biodeterioração, biofragmentação, bioassimilação e mineralização, como demonstrado na figura a seguir.



Fonte: Elaboração própria.

Na etapa inicial, microrganismos colonizam a superfície do plástico e formam biofilmes, estruturas complexas compostas por células aderidas e matriz extracelular, que favorecem sua fixação e crescimento (Kumar Tiwari; Gautam; Maurya, 2018; Pathak; Navneet, 2017). A presença do biofilme provoca alterações físicas no polímero, como o surgimento de fissuras e a diminuição da hidrofobicidade relativa, preparando o material para a ação enzimática (Lv et al., 2024; Pathak; Navneet, 2017). Esse é um processo dinâmico, influenciado tanto pelas condições ambientais quanto pelas características do polímero. Por esse motivo, a formação de biofilmes em superfícies plásticas constitui um desafio para os microrganismos, devido à dificuldade de adesão inicial a materiais tipicamente hidrofóbicos (Thew et al., 2023).

Durante a biofragmentação, os microrganismos secretam enzimas extracelulares específicas, como lacases, cutinases, esterases e hidroxilases, que atuam sobre as longas cadeias poliméricas, fragmentando-as em oligômeros, dímeros e monômeros menores (Kumar Tiwari; Gautam; Maurya, 2018). Essas enzimas promovem reações de oxidação e hidrólise, introduzindo grupos funcionais como carbonila, carboxila e hidroxila, o que aumenta a solubilidade do material e facilita seu aproveitamento pelo metabolismo celular (Lv et al., 2024). A eficiência e a velocidade dessa etapa variam conforme as propriedades do polímero, como a cristalinidade, o peso molecular e a presença de grupos funcionais (Thew et al., 2023).

Os fragmentos monoméricos gerados são assimilados pelas células microbianas por meio de processos metabólicos internos, principalmente por vias como a  $\beta$ -oxidação e o ciclo do ácido cítrico (Pathak; Navneet, 2017). Esse metabolismo permite que os microrganismos

utilizem compostos derivados do plástico como fonte de carbono e energia, sustentando seu crescimento e bioatividade (Kumar Tiwari; Gautam; Maurya, 2018).

Por fim, os intermediários metabólicos são completamente mineralizados, resultando na liberação de CO<sub>2</sub>, água (H<sub>2</sub>O) e sais no ambiente. Essa etapa representa a conversão final dos polímeros sintéticos em compostos inorgânicos, integrando os materiais plásticos ao ciclo natural do carbono e contribuindo para a redução do impacto ambiental causado pela poluição por plástico (Kumar Tiwari; Gautam; Maurya, 2018; Thew et al., 2023). A mineralização é influenciada por fatores ambientais e pela capacidade metabólica dos microrganismos presentes (Pathak; Navneet, 2017).

A degradação biológica dos polímeros está diretamente relacionada à composição de sua cadeia principal, estruturas que contêm heteroátomos, como ésteres, amidas ou éteres, são mais suscetíveis à ação enzimática, pois apresentam ligações quimicamente mais reativas que podem ser mais facilmente rompidas por microrganismos, facilitando a assimilação das moléculas resultantes. Em contrapartida, polímeros com cadeia principal formada exclusivamente por ligações carbono-carbono, como o polietileno, possuem uma estrutura quimicamente mais estável e resistente, tornando-se menos acessíveis à degradação microbiana e exigindo tratamentos prévios ou condições ambientais específicas para que sua decomposição ocorra de forma eficaz (Kumar Tiwari; Gautam; Maurya, 2018; Pathak; Navneet, 2017).

### 2.3.1 Biodegradação do PET

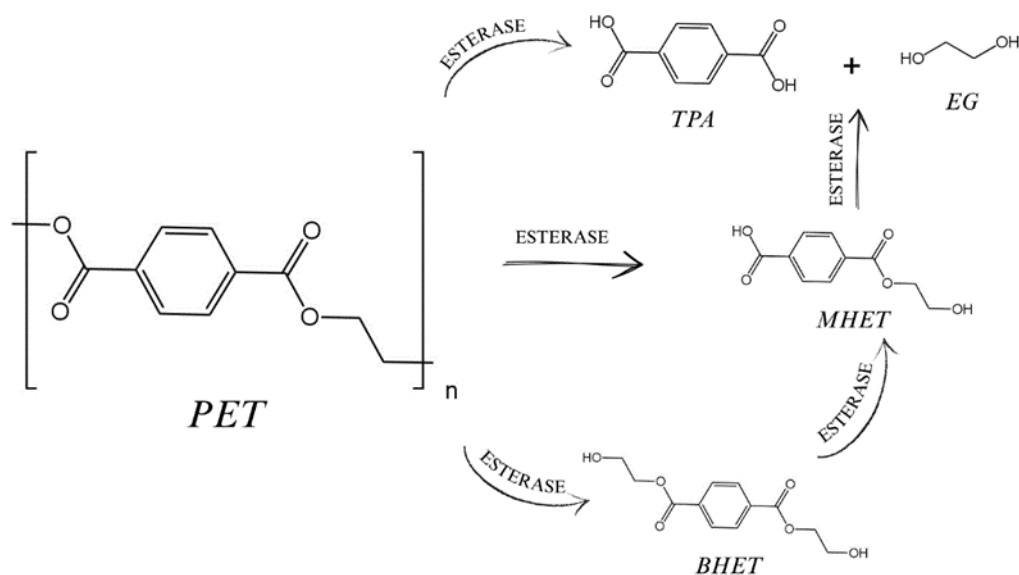
O PET é um polímero amplamente utilizado na indústria devido ao seu conjunto de propriedades físico-químicas, mecânicas e térmicas. Presente principalmente em embalagens alimentícias, é um copolímero termoplástico de condensação, da família dos poliésteres, constituído pelos monômeros TPA e EG (Callister Jr.; Rethwisch, 2018).

O PET apresenta um conjunto de propriedades físico-químicas que justificam sua ampla aplicação na indústria de embalagens. Em sua forma amorfa, o polímero é transparente, enquanto, na forma semicristalina, torna-se translúcido, possibilitando diferentes usos conforme o grau de cristalinidade. Além disso, o PET é leve, apresenta rigidez variando de semirrígida a rígida e apresenta elevada resistência a impactos mecânicos. Suas características de barreira a gases e à umidade, somadas à sua natureza inerte e ao fato de não exigir plastificantes durante a produção, contribuem para sua estabilidade e segurança em contato com alimentos e bebidas. O material também pode ser combinado com outros polímeros, obtendo propriedades complementares, ou ter sua superfície modificada para ajustar o desempenho. Em

conjunto, essas características tornam o PET um dos polímeros mais utilizados no setor de embalagens (Nisticò, 2020).

No processo de biodegradação, a fragmentação do PET é iniciada por enzimas extracelulares secretadas por microrganismos, normalmente da família das  $\alpha/\beta$ -hidrolases, que promovem a hidrólise das ligações éster do polímero (Roman et al., 2024a; Singh Jadaun et al., 2022b). Esse processo resulta na liberação de seus monômeros, TPA e EG, além de intermediários como BHET e mono(2-hidroxi) tereftalato (MHET). O BHET pode ser convertido em MHET por enzimas degradadoras. De maneira semelhante, o MHET é degradado em TPA e EG, completando a degradação do polímero em compostos assimiláveis (Qiu et al., 2024). A figura 3 apresenta uma esquematização desse processo.

**Figura 3 – Degradação enzimática simplificada do PET**



Fonte: Elaboração própria.

Na revisão sistemática conduzida por Benavides Fernández et al. (2022) foram identificados 36 gêneros bacterianos com potencial para a biodegradação do PET, destacando-se *Bacillus spp.* e *Pseudomonas spp.*. O trabalho também evidenciou o uso de cepas geneticamente modificadas de *Escherichia coli* como hospedeiras para a expressão heteróloga da enzima PETase, com o objetivo de aumentar a eficiência catalítica da degradação enzimática. Entre os 30 gêneros fúngicos relatados, *Aspergillus spp.* figuram entre os mais citados devido à sua capacidade enzimática para a degradação de poliésteres sintéticos. Além disso, a revisão

apontou o potencial de microalgas, em especial *Spirulina spp.*, como organismos emergentes com atividade relevante na degradação do PET.

### 2.3.2 *Gordonia hongkongensis* (BR7)

O gênero *Gordonia*, pertencente ao grupo das actinobactérias, distingue-se por sua diversidade metabólica e pela capacidade de catalisar reações enzimáticas raramente observadas em outros microrganismos. Essas características conferem-lhe relevância em processos de biodegradação, biotransformação, biorremediação e produção de biossurfactantes, especialmente na degradação de xenobióticos e polímeros de lenta biodegradabilidade (Arenskötter; Bröker; Steinbüchel, 2004).

Nos últimos anos, diferentes cepas de *Gordonia* têm sido investigadas quanto à sua capacidade de degradar compostos recalcitrantes. Wang et al. (2023) avaliaram a cepa *Gordonia polyisoprenivorans* B251, previamente mantida por dois anos em hexadecano, e posteriormente cultivada em filmes de PE. Durante o cultivo, observou-se a formação de biofilme na superfície do polímero, acompanhada do surgimento de fissuras. As análises de FTIR revelaram a introdução de grupos funcionais hidroxila, carbonila e éter, bem como de ligações C=C, indicando modificações oxidativas na matriz do PE.

De forma semelhante, Rong, Xu e Wu (2024) relataram que a cepa *Gordonia* sp. Z-2, isolada de fragmentos plásticos coletados em praias da China, promoveu uma redução de 23,22% na massa molecular do PE após 30 dias de cultivo. Neste estudo, a análise por FTIR demonstrou a formação de novos grupos funcionais, enquanto os produtos de degradação identificados incluíram alcanos, álcoois, ácidos graxos e ésteres. Esses resultados sugerem que determinadas cepas de *Gordonia* são capazes de utilizar polímeros como fonte parcial de carbono, embora não seja possível concluir que o processo leva à mineralização completa do material.

A degradação de uma mistura de seis ftalatos por cepas de *Gordonia* foi investigada por Kanaujiya, Sivashanmugam e Pakshirajan (2022), que obtiveram taxas próximas a 100% em concentrações iniciais elevadas ao longo de 156 horas.

O estudo de Chandramouli Swamy et al. (2024), conduzido com a cepa *Gordonia* CN2K isolada de áreas de gerenciamento de resíduos sólidos, investigou seu potencial na degradação de microplásticos de PET utilizando o polímero como única fonte de carbono. Após 45 dias de incubação, observou-se uma taxa de degradação de 40,43%, evidenciando a capacidade metabólica da cepa em utilizar o material polimérico como substrato.

O estudo de (Steiner et al., (2025) avaliou o potencial enzimático de três cepas de *Gordonia* sp., a partir das quais foram identificadas e sintetizadas enzimas do tipo cutinase. Essas enzimas demonstraram atividade hidrolítica sobre grânulos de PET, promovendo sua degradação com liberação de TPA como produto.

Esses achados indicam que cepas desse gênero podem produzir hidrolases ativas sobre ligações éster aromáticas, o que levanta a hipótese de que enzimas semelhantes secretadas por essas cepas possam, em contextos específicos, contribuir para a degradação de polímeros derivados de ácido tereftálico, como o PET.

O Laboratório de Ciências Moleculares da Universidade de Sorocaba (LaCiMo – UNISO) desenvolveu estratégias de enriquecimento microbiano a partir de solos contaminados por resíduos plásticos, com o intuito de avaliar a aptidão de comunidades bacterianas para a degradação de polímeros recalcitrantes, em especial o PET (Ramos, 2025; Roman et al., 2024b). Nesse contexto, dois consórcios microbianos foram estabelecidos e caracterizados quanto ao seu potencial degradativo, revelando alterações químicas e morfológicas no polímero, as quais foram confirmadas por análises de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier com reflexão total atenuada (ATR - FTIR) e de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A partir desses consórcios, foi possível isolar cepas com capacidade singular para atuar na despolimerização do PET, entre as quais se destaca *G. hongkongensis*, atualmente objeto de investigação sistemática pelo grupo, em razão de sua versatilidade metabólica e do potencial biotecnológico associado à degradação de polímeros aromáticos e à bioconversão de plásticos em produtos de maior valor agregado.

## **2.4 Pré-tratamentos aplicados à biodegradação de polímeros sintéticos**

O pré-tratamento envolve um conjunto de processos físicos e/ou químicos aplicados aos polímeros para alterar sua estrutura e propriedades, tornando-os mais suscetíveis a mecanismos de degradação subsequentes. Entre os métodos físicos, destacam-se a radiação, a aplicação de energia térmica e a redução do tamanho das partículas. Já os métodos químicos incluem o uso de solventes, ácidos, bases e agentes oxidantes. Esses processos são capazes de romper ligações, introduzir grupos funcionais reativos, promover alterações na cadeia polimérica (Amanna; Rakshit, 2025; Crystal Thew et al., 2024; Dewi et al., 2025).

Além disso, alterações morfológicas como o aumento da rugosidade e a formação de fissuras e poros, contribuem para a ampliação da área de contato e para a estabilidade e

densidade do biofilme, potencializando o processo de biodegradação (Amanna; Rakshit, 2025; Crystal Thew et al., 2024). O pré-tratamento pode reduzir o peso molecular e a cristalinidade do polímero por meio da quebra de cadeias poliméricas, facilitando a penetração de enzimas específicas e aumentando a disponibilidade de sítios ativos para a hidrólise (Amanna; Rakshit, 2025; Ciuffi; Fratini; Rosi, 2024). Dessa forma, essa etapa preliminar é fundamental para superar a elevada resistência química e estrutural dos plásticos, sobretudo aqueles de natureza hidrofóbica, otimizando os mecanismos microbianos e enzimáticos envolvidos na degradação e acelerando de forma significativa a bioconversão do material. (Mat Yasin; Akkermans; Van Impe, 2022).

Entre as diversas alternativas de pré-tratamento, os processos oxidativos têm se destacado por oferecerem uma opção mais sustentável, pois operam em condições amenas e geram poucos resíduos. A oxidação é um fenômeno que ocorre naturalmente quando os polímeros são expostos ao ambiente, resultando na alteração gradual de suas cadeias. Contudo, esse processo espontâneo é lento e incompleto, o que resulta em degradação superficial. Assim, a aplicação de métodos oxidativos controlados torna-se fundamental para acelerar e intensificar esse processo (Oh; Stache, 2024b).

#### 2.4.1 Processos Oxidativos Avançados (POA)

Radicais livres são espécies químicas com pelo menos um par de elétrons desemparelhados, o que as torna altamente reativas. Os POAs são tecnologias que empregam esses radicais para degradar poluentes orgânicos persistentes (POPs), geralmente tóxicos e não biodegradáveis. Por meio da geração *in situ* de espécies altamente reativas, esses processos são capazes de converter compostos complexos em moléculas mais simples, passíveis de biodegradação ou até mesmo de mineralização completa. (Kumari; Kumar, 2023; Manna; Sen, 2022; WANG; XU, 2012).

Os POAs têm sido amplamente aplicados no tratamento de águas residuais industriais, hospitalares e na remoção de pesticidas, corantes, fármacos e outros contaminantes recalcitrantes. Entre suas principais vantagens destacam-se a alta eficiência na degradação de poluentes de difícil remoção, a baixa formação de subprodutos tóxicos em comparação com métodos convencionais, e a possibilidade de integração com processos biológicos, o que contribui para o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis de tratamento (Ma et al., 2021).

A formação de radicais pode ocorrer por diferentes mecanismos, variando conforme o método utilizado para sua geração, seja físico, químico ou uma combinação entre ambos. A complexidade e o potencial de aplicação industrial também dependem do mecanismo de geração. O Quadro 2 apresenta uma visão geral dos principais processos oxidativos avançados atualmente em estudo.

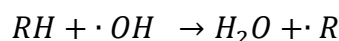
**Quadro 2 - Espécies geradas por alguns dos processos oxidativos avançados mais conhecidos**

<i>Método</i>	<i>Reagentes</i>	<i>Espécies geradas</i>
Ozonização (O <sub>3</sub> )	O <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O	HO <sub>2</sub> •, HO <sub>3</sub> •, O <sub>2</sub> ••, O <sub>3</sub> ••, O <sub>4</sub> ••, •OH, H <sup>+</sup> e O <sub>2</sub>
O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Peroxona)	O <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	•OH e HO <sub>2</sub> •
O <sub>3</sub> /UV/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Ozônio + UV+ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	•OH, O•, O <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV+ H <sub>2</sub> O	•OH e HO <sub>2</sub> •
Fenton	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Fe <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O	•OH, HO <sub>2</sub> •, OH <sup>-</sup> , H <sup>+</sup> , Fe <sup>2+</sup> e Fe <sup>3+</sup>
Foto-Fenton	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Fe <sup>2+</sup> + UV+ H <sub>2</sub> O	•OH, HO <sub>2</sub> •, OH <sup>-</sup> , H <sup>+</sup> , Fe <sup>2+</sup> e Fe <sup>3+</sup>
Fotocatálise	Semicondutor + UV+ H <sub>2</sub> O	•OH e O <sub>2</sub> •
Sonólise	Ultrassom + H <sub>2</sub> O	•OH, HO <sub>2</sub> • e O•
Plasma	Descarga elétrica + H <sub>2</sub> O	•OH, H•, e, H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> e O•
Radiação gama	Radiação ionizante + H <sub>2</sub> O	•OH, H <sup>+</sup> , e <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e H <sub>2</sub>
Métodos eletroquímicos	Corrente elétrica (anodo/cátodo) + H <sub>2</sub> O	•OH, H <sup>+</sup> , e <sup>-</sup> e H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>

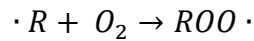
Fonte: Elaboração própria. Referências: Mahmoodi e Pishbin (2025); Pandis et al. (2022); Priyadarshini et al. (2022)

O radical hidroxila (•OH) é o mais amplamente empregado, estando presente em quase todos os POA's. Entre suas principais vantagens, destacam-se a elevada reatividade, decorrente do elétron desemparelhado no oxigênio, além de ser não tóxico, não corrosivo e possuir curto tempo de meia-vida. Além disso, apresenta um dos maiores potenciais redox conhecidos (E° = 2,8 V), características que o tornam altamente atrativo para o tratamento de poluentes orgânicos (Manna; Sen, 2022).

A degradação de poluentes orgânicos mediada pelo •OH pode ocorrer por três mecanismos distintos, dependendo da natureza química do contaminante, com potencial para gerar uma cadeia de reações oxidativas na molécula do poluente. A abstração de hidrogênio consiste na remoção de um átomo de hidrogênio da molécula do poluente pelo radical •OH, resultando na formação de água e de um radical orgânico livre (•R) (reação 1), em que R representa a cadeia. Na presença de oxigênio molecular, esse radical reage para gerar radicais peroxil (ROO•) (reação 2) (Cuerda-Correa; Alexandre-Franco; Fernández-González, 2019).

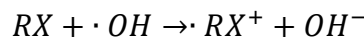


Reação 1



Reação 2

Na via de transferência de elétrons ocorre a ionização dos compostos. O radical  $\bullet OH$  recebe elétrons e se torna o íon hidroxila ( $OH^-$ ), enquanto o composto se torna um cátion altamente reativo, passivo de clivagem, rearranjos ou subsequente hidrólise (reação 3)(Cuerda-Correa; Alexandre-Franco; Fernández-González, 2019).

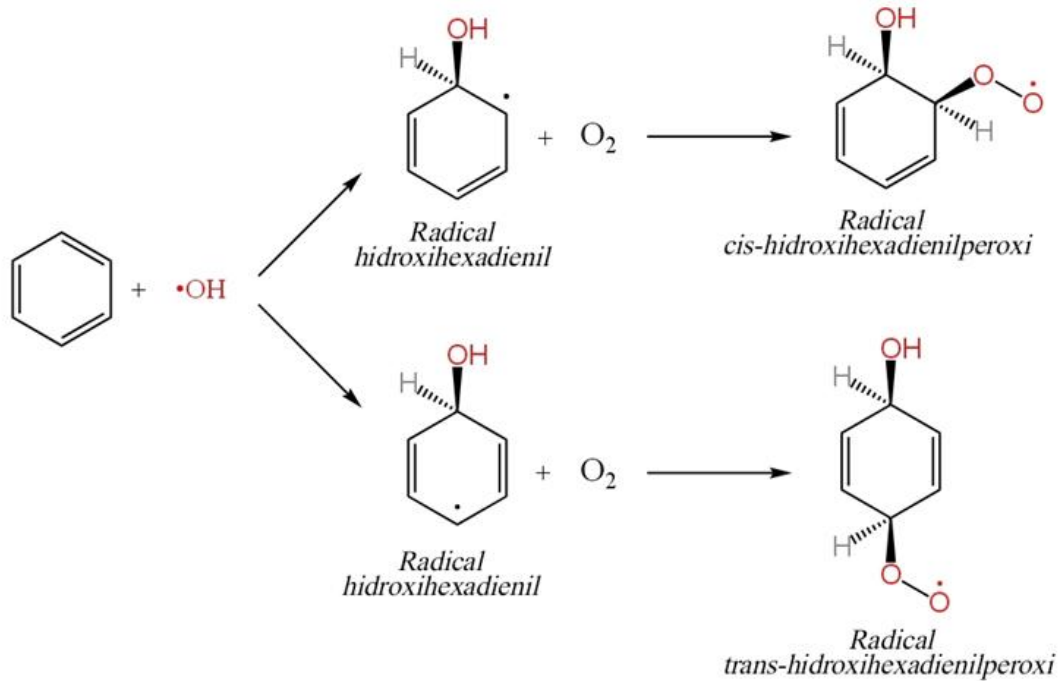


Reação 3

Na degradação por hidroxilação, o radical  $\bullet OH$  ataca regiões de alta densidade eletrônica, substituindo uma das ligações  $\pi$  presentes em compostos aromáticos e alifáticos. No caso do anel benzênico, o  $\bullet OH$  liga-se a um dos carbonos do anel, rompendo temporariamente a aromaticidade e deslocando o par de elétrons disponível, formando o radical hidroxiciclohexadienil. Em seguida, esse intermediário reage rapidamente com o oxigênio molecular ( $O_2$ ) dissolvido no meio, formando o radical hidroxiciclohexadienilperoxi. Esses radicais são instáveis, e podem levar a uma cisão do anel ou à liberação de radicais hidroperóxil ( $HO_2\bullet$ ) a depender do meio reacional onde se encontra (Cuerda-Correa; Alexandre-Franco; Fernández-González, 2019; Pan; Schuchmann; Von Sonntag, 1993; Van Buren et al., 2020). A figura 4 representa esse caminho reacional na oxidação do benzeno por  $\bullet OH$ .

A unidade repetitiva do PET apresenta, em sua estrutura, um anel benzênico bissubstituído, o que o torna suscetível ao processo de oxidação mencionado. Os grupos oxigenados que podem ser inseridos contribuem para a redução da hidrofobicidade do polímero, facilitando a adesão do biofilme. Conseqüentemente, tais alterações estruturais contribuem para a superação das barreiras físico-químicas impostas pela matriz polimérica, favorecendo a etapa inicial da biodegradação e ampliando o potencial dos processos oxidativos como pré-tratamentos eficazes.

Figura 4 – Hidroxilação do benzeno por radicais hidroxil

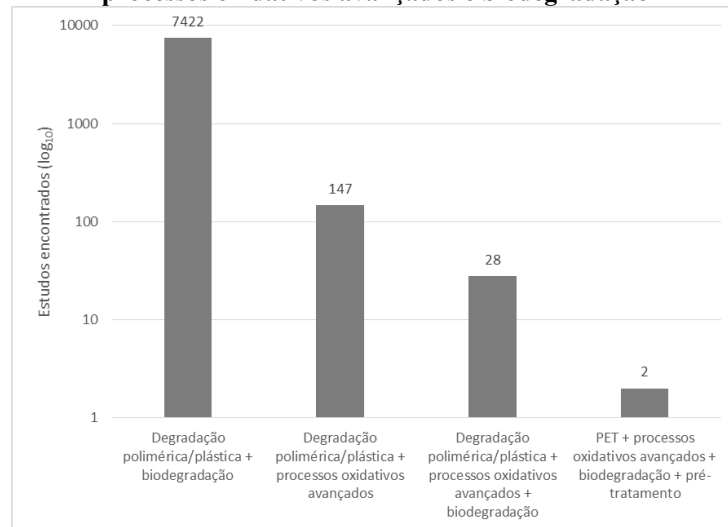


Fonte: Elaboração própria. Adaptado de: Pan, Schuchmann e Von Sonntag (1993)

## 2.5 Panorama bibliométrico e lacunas de pesquisa

A análise bibliométrica foi conduzida na base de dados Web of Science, utilizando o campo Topic (TS), que abrange títulos, resumos e palavras-chave. A estratégia de busca foi estruturada progressivamente, combinando diferentes eixos temáticos relacionados à degradação de materiais poliméricos, a processos oxidativos avançados (POAs) e à biodegradação. Com o objetivo de ampliar a cobertura da literatura sem comprometer a especificidade do escopo, foram empregados sinônimos amplamente utilizados, incluindo os termos polímero, plástico, microplástico e nanoplástico, sempre associados a expressões relacionadas à degradação. Adicionalmente, operadores booleanos e de proximidade (NEAR/3) foram utilizados para assegurar uma relação conceitual direta entre os termos e reduzir a recuperação de estudos não alinhados ao tema. A busca contemplou publicações indexadas entre 2010 e 2025, de modo a refletir a evolução recente da área. Os detalhes completos das estratégias de busca, das strings booleanas e dos critérios de refinamento adotados encontram-se apresentados no Apêndice A.

**Gráfico 1 - Número de publicações por subgrupo temático relacionadas à degradação polimérica, processos oxidativos avançados e biodegradação**



Legenda: Distribuição do número de registros recuperados no Web of Science para os diferentes subgrupos temáticos analisados. O eixo vertical foi representado em escala logarítmica (base 10) devido à ampla variação no número de publicações entre os subgrupos, permitindo melhor visualização comparativa. As buscas consideraram publicações no período de 2010 a 2025.

Os resultados obtidos evidenciaram um elevado número de publicações quando os eixos temáticos foram avaliados isoladamente. Foram identificados 7.422 registros relacionados à degradação polimérica por vias biodegradativas e 147 registros sobre a degradação de materiais poliméricos associada a processos oxidativos avançados. No entanto, ao integrar os três eixos — degradação polimérica, processos oxidativos avançados e biodegradação — o número de publicações foi drasticamente reduzido, totalizando apenas 28 registros.

Visando aprofundar a análise no material de interesse deste trabalho, a estratégia de busca foi refinada para o PET, incluindo explicitamente termos relacionados à aplicação de processos oxidativos avançados como etapa de pré-tratamento. Esse refinamento resultou na identificação de apenas dois artigos. A análise qualitativa desses registros, baseada na leitura de títulos, resumos e, quando necessário, do texto completo, revelou que apenas um deles apresentava aderência conceitual ao tema, sendo um artigo de revisão. O segundo trabalho não abordava diretamente a integração entre processos oxidativos avançados, como o pré-tratamento, e a subsequente biodegradação do PET.

Dessa forma, a análise bibliométrica evidencia uma lacuna significativa na literatura científica, caracterizada pela ausência de estudos experimentais que avaliem sistematicamente o uso de processos oxidativos avançados como etapa de pré-tratamento visando potencializar a biodegradação do PET. Essa lacuna justifica e fundamenta a proposta do presente trabalho, que busca contribuir para o avanço do conhecimento na interface entre a degradação química e a biodegradação de polímeros.

### 3 OBJETIVO

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial dos Processos Oxidativos Avançados, por meio da peroxonação, como etapa de pré-tratamento de baixo impacto ambiental para promover e intensificar a degradação microbiológica de filmes PET em cultivo com a cepa bacteriana BR7.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência do pré-tratamento por POA na perda de massa do polímero;
- Comparar as características químicas do polímero, com e sem pré-tratamento, antes e após o processo de degradação, por meio de Espectroscopia do Infravermelho com Transformada de Fourier com reflexão total atenuada (ATR - FTIR)
- Comparar as características morfológicas do polímero, **com e sem pré-tratamento**, antes e após o processo de degradação, por meio de microscopia eletrônica de varredura e de ângulo de contato.

## 4 METODOLOGIAS

Com o objetivo de avaliar o impacto do pré-tratamento na degradação microbológica e enzimática, filmes de PET bi-axial transparente (Sigma Aldrich/GF31588229-5EA), com dimensões de 30 mm x 30 mm x 0,05 mm (imagem 1), foram submetidos a pré-tratamento seguido de ensaio microbiológico.



Fonte: Elaboração própria

### 4.1 Limpeza dos polímeros

Os polímeros foram higienizados em frascos do tipo Erlenmeyer contendo solução de dodecil sulfato de sódio (SDS) a 2% (m/v). O sistema foi submetido à agitação em incubadora shaker refrigerada, modelo SL-222 (SOLAB, Brasil), operando a 50 °C e 150 rpm, durante 4 horas. Em seguida, os materiais foram enxaguados com água ultrapura e, posteriormente, secos em estufa microbológica, modelo 410-2D (Ethik Technology, Brasil), mantida a 50 °C por 12 horas (Dhaka et al., 2022; Liu et al., 2024). Essa limpeza foi realizada previamente ao processo de peroxonação e após os cultivos microbiológicos, para a remoção do biofilme.

### 4.2 Quantificação de ozônio dissolvido

A quantificação do ozônio diluído foi realizada por meio de análise espectrofotométrica na região do UV-Vis, conforme a metodologia descrita por Hu; Lim; Hu, (2023) no equipamento Espectrofotômetro UV-VIS feixe duplo modelo Genesys 50 da Thermo Fisher Scientific. O ozônio foi borbulhado em 500 mL de água Milli-Q em um frasco lavador de gás de 500 mL, mantida a 15 °C, e as medições de absorvância foram realizadas a cada 10 minutos. A detecção do ozônio baseou-se em sua absorção a 258 nm, utilizando o coeficiente de

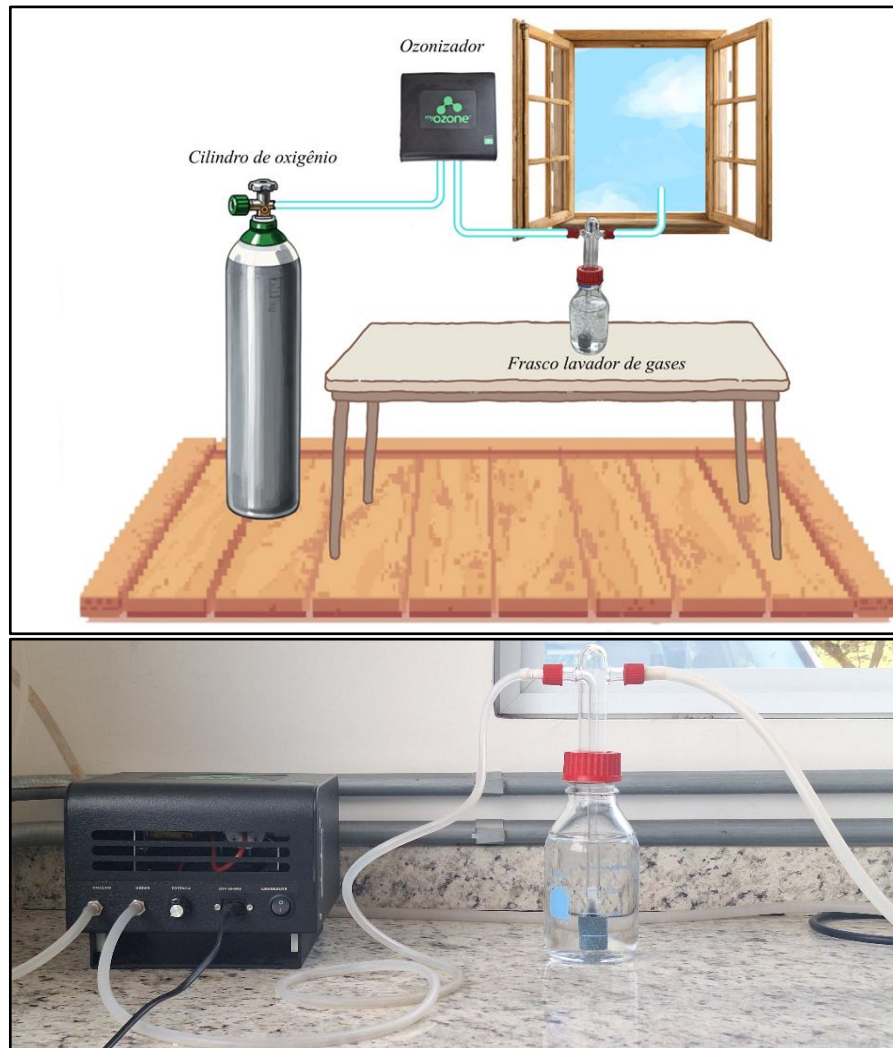
absortividade molar de  $3000 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ . As concentrações de ozônio foram calculadas aplicando a Lei de *Lambert-Beer* aos valores de absorbância obtidos.

### 4.3 Pré-tratamento por peroxonação

Esta metodologia é uma adaptação do procedimento descrito por Hu; Lim; Hu, (2023), com modificações nas condições experimentais e parâmetros operacionais. A oxidação avançada foi conduzida em bateladas com duração total de 8 horas, em frasco lavador de gás com placa porosa. Cada ensaio foi realizado com 500 mL de água ultrapura, com pH ajustado a 10,0 por meio da adição de solução de hidróxido de sódio (NaOH) a  $0,05 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ . Adicionaram-se 1,0 g de filme PET a cada batelada; este foi previamente cortado em quadrados de 30 mm x 30 mm x 0,05 mm.

No início e a cada 2 horas de experimento, foi introduzido  $\text{H}_2\text{O}_2$  na quantidade necessária para atingir uma concentração de  $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , a fim de manter a efetividade do processo oxidativo ao longo do tempo de reação. O sistema foi mantido à temperatura constante de  $15 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ . O gás ozônio, gerado *in situ* por um ozonizador da marca My Ozone - modelo P3, alimentado com oxigênio hospitalar de alta pureza, foi continuamente borbulhado no meio reacional, que, após 30 minutos de borbulhamento, atingiu o ponto de saturação de ozônio dissolvido, estabilizando-se na concentração de  $10,5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

**Figura 5 - Representação esquemática do sistema experimental de peroxonação utilizado como pré-tratamento oxidativo**



Fonte: Elaboração própria.

#### 4.4 Cultivo microbiológico *G. hongkongensis* (BR7)

Adaptando a metodologia desenvolvida por Ramos (2025), inicialmente foi preparado um pré-inóculo em tubos do tipo Falcon de 50 mL contendo 25 mL de meio Terrific Broth (TB) estéril inoculado com cepa *G. hongkongensis*, estes foram incubados a 28 °C por 24 horas sob agitação de 150 RPM em estufa shaker (Modelo INCU-SHAKER 10LR, da marca Benckmark). Em seguida, transferiu-se o equivalente a 5% (v/v) desse pré-inóculo, referente ao volume final desejado, para frascos Erlenmeyer de 125mL contendo 50mL de meio mínimo M9 (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>: 3,00 g/L, NaCl: 0,50 g/L, Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>: 6,75 g/L, NH<sub>4</sub>Cl: 1,00 g/L), 0,1% de glicose, 0,1% de triptona e adicionado ~0,1 g de filme plástico PET autoclavados (CHO et al., 2025; YUN et al.,

2023; ZAMPOLLI et al., 2024). O período de cultivo foi de 90 dias, nos mesmos parâmetros do pré-inóculo, com repiques quinzenais no mesmo meio de cultura.

#### 4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a análise morfológica da superfície, as amostras secas foram fixadas em suportes metálicos (stubs) utilizando fita condutiva de carbono e posteriormente recobertas com uma camada de ouro de 15nm (metalização no equipamento DII-29010SCTR Smart Coater) a fim de conferir condutividade elétrica adequada para a análise. As imagens foram obtidas por MEV no equipamento modelo JSM-IT200, da marca JEOL, em diferentes ampliações, com o objetivo de identificar alterações morfológicas, formação de fissuras, rugosidade e evidências de degradação superficial (Walter et al., 2022).

#### 4.6 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier com Reflexão Total Atenuada (ATR-FTIR)

Após o processo de limpeza, os fragmentos dos ensaios foram analisados por espectroscopia no infravermelho, com transformada de Fourier, no equipamento Agilent Cary 630. As aferições foram realizadas no modo ATR (Reflexão Total Atenuada), na faixa espectral de 500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , com o objetivo de identificar possíveis modificações químicas na estrutura dos filmes poliméricos. Os grupos foram analisados em triplicata, e os espectrogramas foram elaborados com base nos valores médios obtidos para cada ponto.

#### 4.7 Estimativa de degradação por ATR-FTIR

Usando os espectrogramas obtidos por ATR-FTIR, um comparativo entre as amostras pós-cultivo em cepa BR7 foi realizado ao aplicar as equações 1 e 2 aos picos de decréscimo na intensidade da absorbância. Essa metodologia é semelhante à utilizada por Fernández-Sanmartín et al. (2024) e permite estimar a alteração nas amostras.

**Equação 1 – Estimativa da alteração nas análises de ATR-FTIR para as amostras sem POA**

$$\text{Decréscimo (\%)}' = \frac{(\text{ABS controle BR7} - \text{ABS BR7})}{\text{ABS controle BR7}} \times 100$$

Onde ABS controle BR7 representa o valor médio da absorvância em um determinado número de onda das amostras controle (cultivo BR7), e ABS BR7 representa o valor médio no mesmo número de onda das amostras de cultivo BR7 após o período de cultivo.

**Equação 2 - Estimativa da alteração nas análises de ATR-FTIR para as amostras com POA**

$$\text{Decréscimo (\%)}'' = \frac{(\text{ABS controle POA BR7} - \text{ABS POA BR7})}{\text{ABS controle POA BR7}} \times 100$$

De maneira semelhante, para as amostras pré-tratadas com POA, a incógnita ABS controle POA BR7 representa o valor médio da absorvância em um determinado número de onda das amostras controle cultivo POA BR7, e ABS POA BR7 representa o valor médio no mesmo número de onda das amostras cultivo POA BR7 após o período de cultivo.

#### **4.8 Análise de Ângulo de contato**

A partir de uma adaptação da metodologia desenvolvida por Zou et al. (2024) o esquema demonstrado pela imagem 2 foi montado. O filme polimérico foi posicionado sobre uma laminula, e o sistema todo foi alinhado com um nível a laser (Exbom 12 Fepro-NL1230 Linhas) e uma régua. O equivalente a 10 µL de água Milli-Q foi pipetado sobre os filmes poliméricos, a uma distância fixa de 1 cm, e uma imagem foi capturada com a câmera de um smartphone acoplada a uma lente macro. Foram analisados os filmes de PET virgem e de POA, como controles, e os cultivos BR7 e POA BR7, para comparar a influência do tratamento na degradação. O processo foi realizado em triplicata para cada grupo. O ângulo das gotas foi analisado com ferramentas do software do microscópio ZEISS Primostar 3.

**Imagem 2 – Sistema para análise de ângulo de contato dos filmes PET**



Fonte: Elaboração própria.

#### **4.9 Análise de perda gravimétrica**

A perda gravimétrica dos filmes foi determinada antes e depois do tratamento com POA, bem como antes e após o cultivo bacteriano. Para assegurar a acurácia das medições, os filmes passaram previamente por um procedimento padronizado de limpeza e secagem, removendo resíduos superficiais sem alterar a massa do material. O procedimento adotado é semelhante ao utilizado por Chandramouli Swamy et al. (2024). A perda de massa foi então calculada utilizando a seguinte equação:

##### **Equação 3 – Perda gravimétrica percentual**

$$\text{perda gravimétrica}\% = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100$$

Onde  $P_i$  é o peso inicial do filme e  $P_f$ , o peso final do filme.

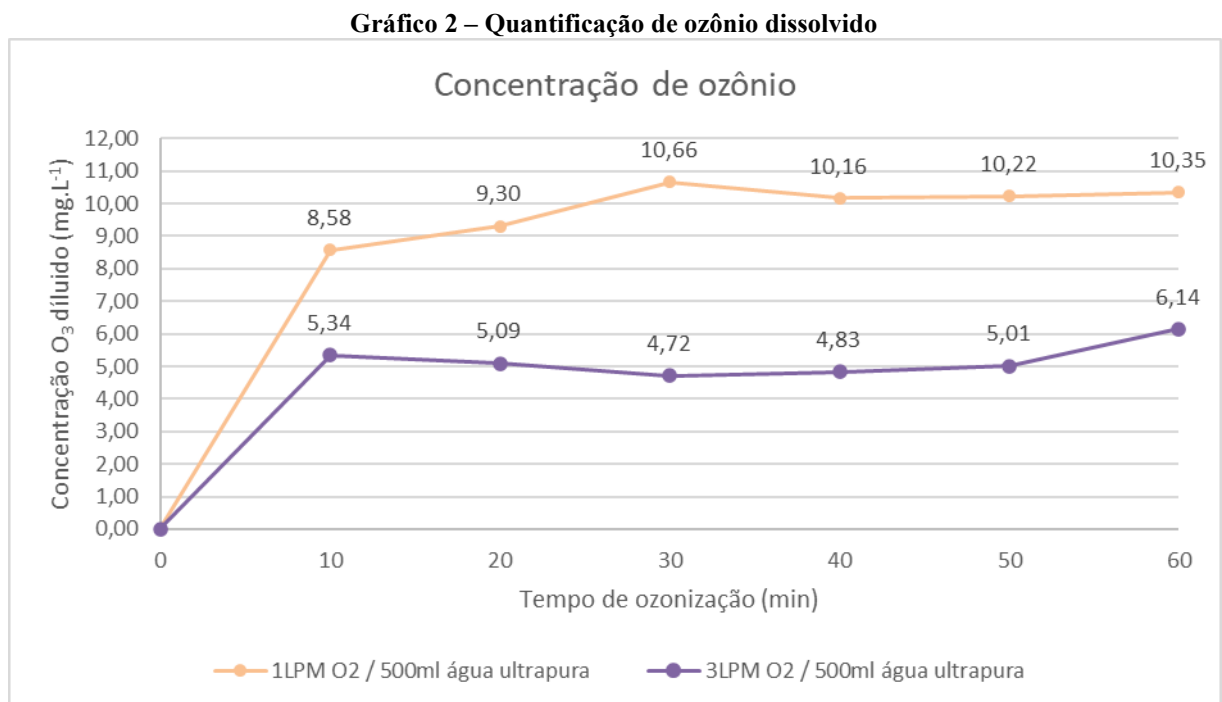
#### **4.10 Análises estatísticas**

Todos os ensaios foram realizados em triplicatas e a análise T-teste foi realizada nos dados de análise de perda gravimétrica e na análise de ângulo de contato.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente pesquisa possui caráter exploratório, uma vez que busca avaliar a aplicação de uma metodologia previamente estabelecida para a degradação de microplásticos como etapa de pré-tratamento por POAs visando à biodegradação. Para isso, foi adotada como referência a metodologia proposta por Hu, Lim e Hu (2023), originalmente desenvolvida para a degradação de microplásticos, a fim de investigar sua adequação e potencial como pré-tratamento oxidativo. Nesse contexto, a vazão de oxigênio foi analisada como parâmetro operacional, com o objetivo de identificar as condições capazes de proporcionar uma concentração de  $O_3$  dissolvido semelhante àquela empregada na metodologia de referência, assegurando a comparabilidade dos resultados e a consistência do processo.

O gráfico a seguir apresenta a concentração de ozônio dissolvido obtida a partir de diferentes vazões de oxigênio em 500 mL de água.



Fonte: Elaboração própria.

A vazão de 1 LPM de  $O_2$  proporcionou uma concentração de  $O_3$  dissolvido semelhante à utilizada por Hu, Lim e Hu (2023). Portanto, a vazão de 1 LPM foi selecionada como padrão para o processo de peroxonação, pois proporciona a concentração necessária com menor consumo de  $O_2$ .

Para uma análise adequada do polímero PET, é essencial identificar, primeiramente, os picos característicos (ou nativos) do material, pois servem de referência para avaliar eventuais

modificações estruturais ou químicas. O Quadro 3 apresenta os números de onda correspondentes e suas respectivas atribuições vibracionais.

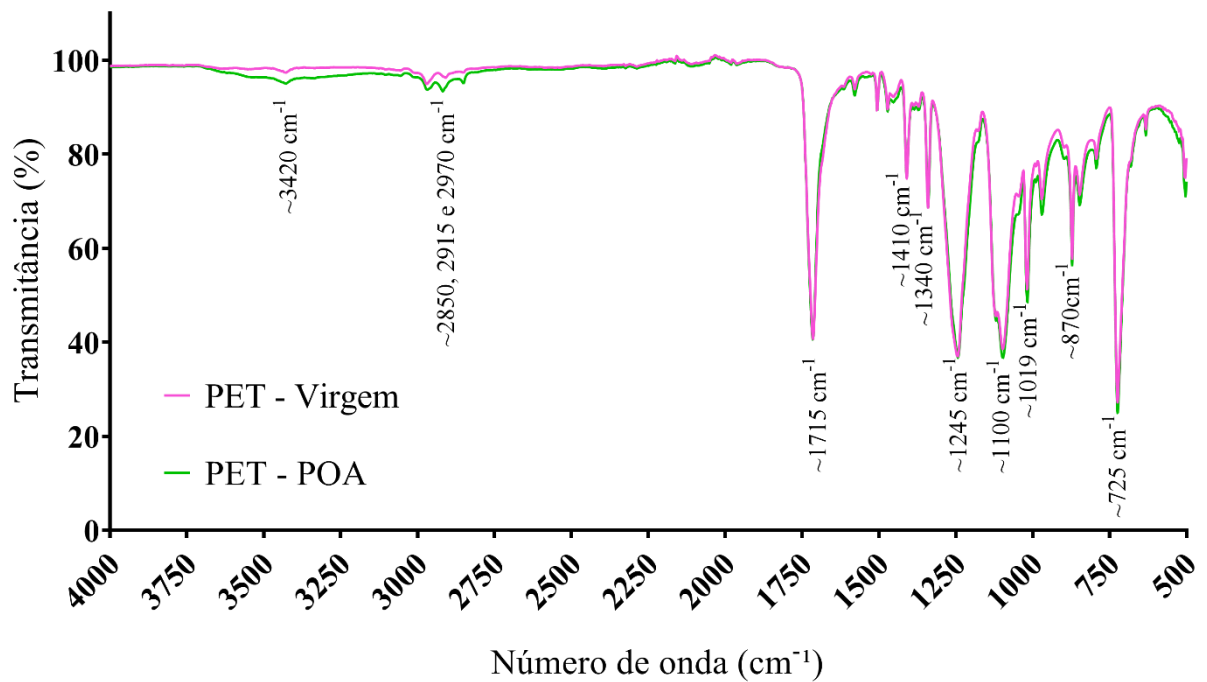
**Quadro 3 - Modos vibracionais associados às bandas observadas no ATR-FTIR do polímero PET**

<i>Número de onda (cm<sup>-1</sup>)</i>	<i>Atribuição vibracional</i>
2970	CH <sub>3</sub> estiramento assimétrico
2915	C≡H estiramento do grupo metino
2850	CH <sub>2</sub> estiramento simétrico
1715	C=O estiramento em éster
1410	C-C estiramento "ring mode ou ring breathing"
1340	C-H deformação angular no plano + C-C estiramento no anel
1245	C-C-O estiramento assimétrico em éster
1100	O-C-C estiramento simétrico em éster
1015	C-H deformação angular no plano em anel aromático
870 e 725	C-H deformação fora do plano em anel benzênico para-substituído
OBS.: <i>Ring mode ou ring breathing</i> é o estiramento simultâneo de todas as ligações C-C em um anel	

Fonte: Elaboração própria. Referência: Coates (2000) e Smith (2018)

A análise por espectroscopia no infravermelho (ATR-FTIR) (Gráfico 3) evidenciou alterações nos picos característicos do material após o tratamento por POA. Observou-se o surgimento sutil de bandas atribuídas ao estiramento do grupo hidroxila (–OH), em torno de 3420 cm<sup>-1</sup>, indicando a introdução de grupos oxigenados na superfície do polímero como consequência da oxidação. Adicionalmente, verificou-se um aumento na intensidade das bandas associadas às ligações C–H, localizadas aproximadamente em 2850, 2915 e 2970 cm<sup>-1</sup>, o que pode estar relacionado a modificações estruturais nas cadeias poliméricas, como alterações no ambiente químico dos grupos alifáticos após o tratamento (Coates, 2000; Smith, 2018).

Gráfico 3 – ATR-FTIR filmes PET com e sem tratamento por POA



Legenda: PET Virgem) Filme PET sem processamento. PET – POA) Filme PET tratado por POA.

Fonte: Elaboração própria.

Essas modificações espectrais podem estar associadas à ocorrência de processos de oxidação e hidrólise parcial das cadeias poliméricas, com a possível formação de extremidades hidroxiladas em decorrência do tratamento por POA. O surgimento da banda atribuída ao estiramento do grupo hidroxila ( $\text{-OH}$ ), em torno de  $3420\text{ cm}^{-1}$ , sugere a introdução de grupos oxigenados na superfície do PET, embora não permita, de forma isolada, a confirmação de mecanismos específicos de clivagem. Ainda assim, a presença desses grupos pode indicar alterações químicas iniciais na matriz polimérica, potencialmente relevantes para etapas subsequentes de degradação.

Resultados semelhantes foram reportados por Lin et al. (2024), que investigaram a degradação de microplásticos de PET por oxidação avançada via processo eletro-Fenton e observaram, por FTIR, o surgimento de uma nova banda larga em aproximadamente  $3432\text{ cm}^{-1}$ , atribuída ao estiramento do grupo  $\text{-OH}$  na superfície do polímero tratado. Nesse sentido, os resultados do presente estudo mostram-se coerentes com a literatura, indicando que o tratamento por POA pode promover tanto a introdução de grupos hidroxilados quanto alterações em grupos estruturais do polímero, dependendo das condições e do tipo de processo oxidativo empregado.

As alterações observadas nos espectros de FTIR são compatíveis com processos mediados por  $\bullet\text{OH}$ , os quais podem envolver diferentes rotas reacionais, incluindo abstração de

hidrogênio, transferência de elétrons ou hidroxilação de regiões de maior densidade eletrônica. No entanto, o ATR-FTIR fornece informações globais sobre grupos funcionais e não permite a identificação precisa do mecanismo reacional predominante. A elucidação da rota específica exigiria o emprego de técnicas complementares, como espectroscopia de ressonância magnética nuclear (NMR), capaz de identificar alterações estruturais no ambiente químico do polímero, ou espectroscopia de fotoelétrons excitados por Raios X (XPS), que permite caracterizar a natureza e o estado químico dos grupos oxigenados formados na superfície do material.

Em conjunto, essas mudanças espectrais sugerem que o POA promoveu a funcionalização superficial do material, potencialmente aumentando sua polaridade e reatividade, aspectos relevantes para as etapas subsequentes de biodegradação. O grau reduzido de alteração espectral pode indicar que o pré-tratamento atuou predominantemente na superfície do material, sem induzir fragmentação significativa da estrutura polimérica. Essa interpretação é corroborada pela ausência de perda de massa estatisticamente significativa (T-teste), apresentada na Tabela 1, reforçando a hipótese de modificação superficial sem degradação substancial da matriz do PET.

**Tabela 1 - Análise da influência do tratamento por POA na perda gravimétrica dos filmes PET**

<i>ANÁLISE GRAVIMÉTRICA POA PET</i>			
Ensaio	Inicial (g)	Final (g)	Diferença %
Massa Ensaio 1	1,0083	1,0068	0,15
Massa Ensaio 2	1,0085	1,0101	-0,16
Massa Ensaio 3	1,0140	1,0137	0,03

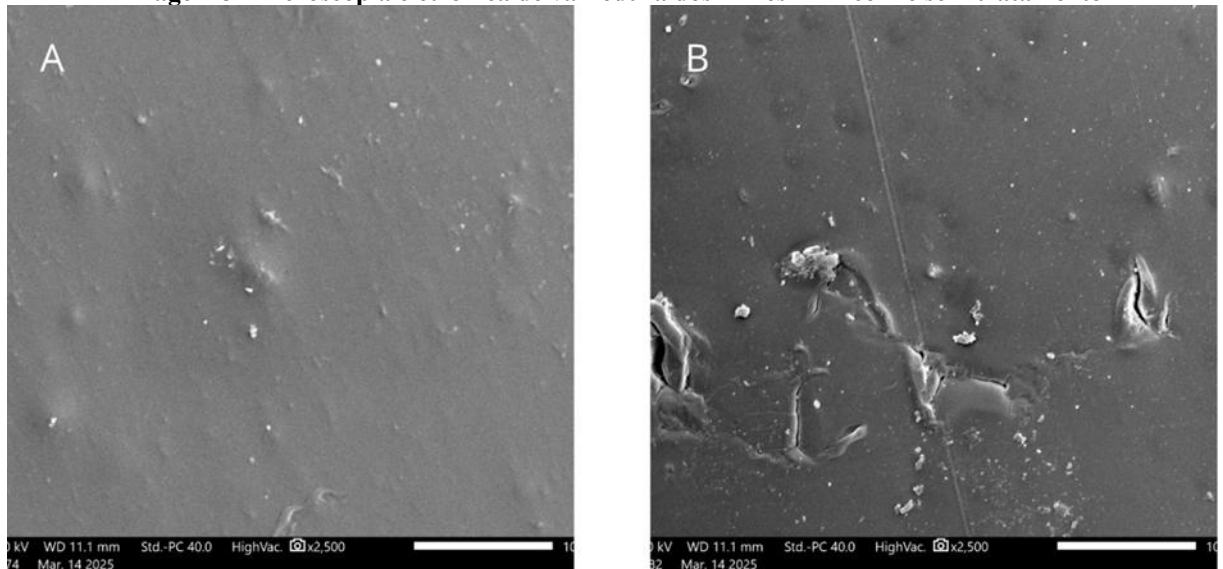
Valor P=0,95 ∴ P>0,05 Não significativo

Fonte: Elaboração própria.

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Imagem 3) evidenciou alterações morfológicas na superfície do polímero submetido ao tratamento por POA. Observou-se a presença de pequenas rachaduras, irregularidades e sinais de erosão superficial, ausentes ou menos pronunciados no material não tratado, indicando modificações induzidas pelo processo oxidativo. Essas alterações podem estar associadas à ação de espécies reativas geradas durante o POA, que promovem ataques localizados à superfície do polímero e resultam em mudanças na topografia do material. As micrografias obtidas apresentam semelhanças com aquelas descritas por (Ioakeimidis et al., 2016) que analisaram garrafas de PET fabricadas nas décadas de 1990 e 2000 e expostas por longos períodos ao ambiente marinho, nas quais foram observados padrões comparáveis de degradação superficial. Dessa forma, os resultados reforçam a interpretação de que o tratamento por POA promove um processo de

envelhecimento oxidativo acelerado do PET, induzindo alterações morfológicas compatíveis com aquelas observadas após anos de degradação natural, porém alcançadas em apenas 8 horas de tratamento.

**Imagem 3- Microscopia eletrônica de varredura dos filmes PET com e sem tratamento**

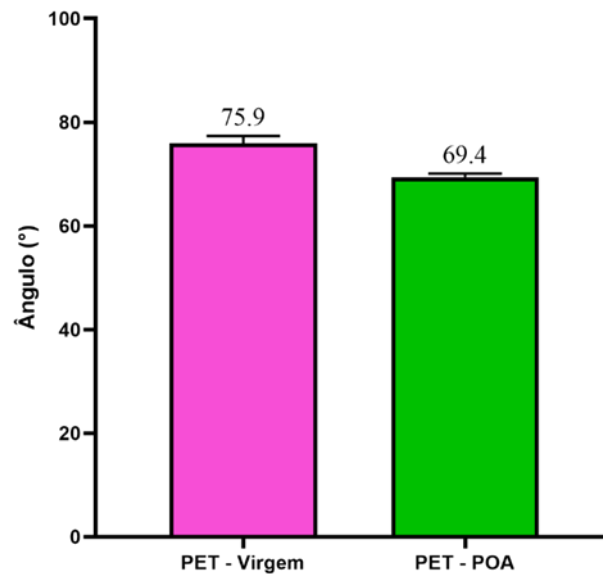


Legenda: A) Filme PET sem processamento. B) Filme PET tratado por POA. Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, os resultados de MEV reforçam a interpretação de que o tratamento com POA promove um processo de envelhecimento oxidativo acelerado do PET, induzindo alterações morfológicas compatíveis com as observadas após anos de degradação natural, porém alcançadas em apenas 8 horas de tratamento.

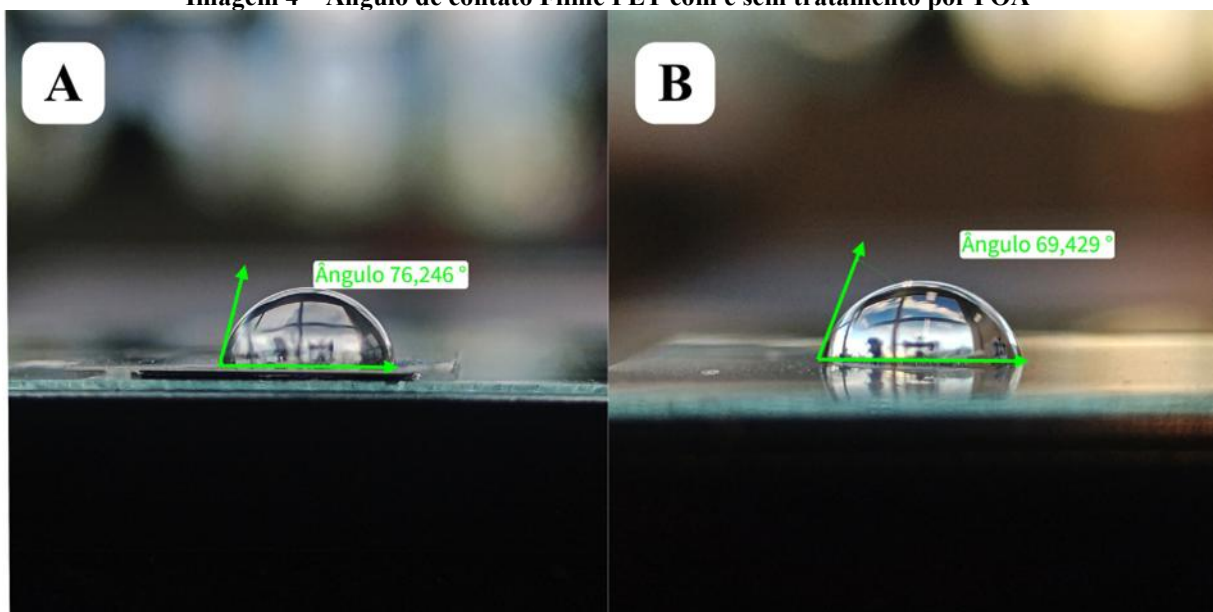
A introdução de grupos funcionais oxigenados na estrutura do polímero resultou em uma pequena, porém significativa, diminuição da hidrofobicidade das amostras, conforme demonstrado no Gráfico 4 e na imagem 4. Foram analisadas triplicatas de cada amostra, e o gráfico apresenta a média com a barra de erro. O teste estatístico (Teste-T) obteve valor  $p < 0,05$ , indicando que houve uma diferença significativa entre as amostras. Essa modificação pode favorecer interações com o meio aquoso e, potencialmente, influenciar a adesão microbiana (Amanna; Rakshit, 2025; Crystal Thew et al., 2024).

**Gráfico 4 – Ângulo de contato médio filmes PET com e sem tratamento**



Legenda: PET- Virgem) Filme PET sem processamento. PET - POA) Filme PET tratado por POA. Fonte: Elaboração própria.

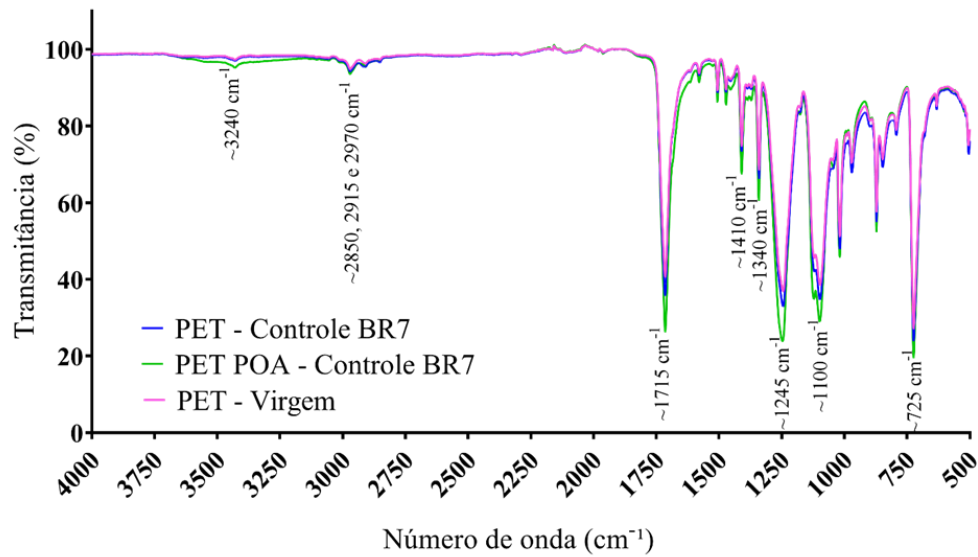
**Imagem 4 – Ângulo de contato Filme PET com e sem tratamento por POA**



Legenda: A) Filme PET sem processamento. B) Filme PET tratado por POA. Fonte: Elaboração própria.

O processo de autoclavagem é indispensável em estudos laboratoriais envolvendo bactérias mesofílicas, uma vez que, garante condições adequadas de esterilidade. Assim, foi realizada a análise dos polímeros após a autoclavagem (gráfico 5) com o objetivo de verificar possíveis alterações estruturais, considerando que esse tratamento térmico pode modificar a cristalinidade do material e influenciar a intensidade de grupos específicos observados nas análises.

Gráfico 5 – ATR-FTIR amostras PET pós-processo de autoclavagem

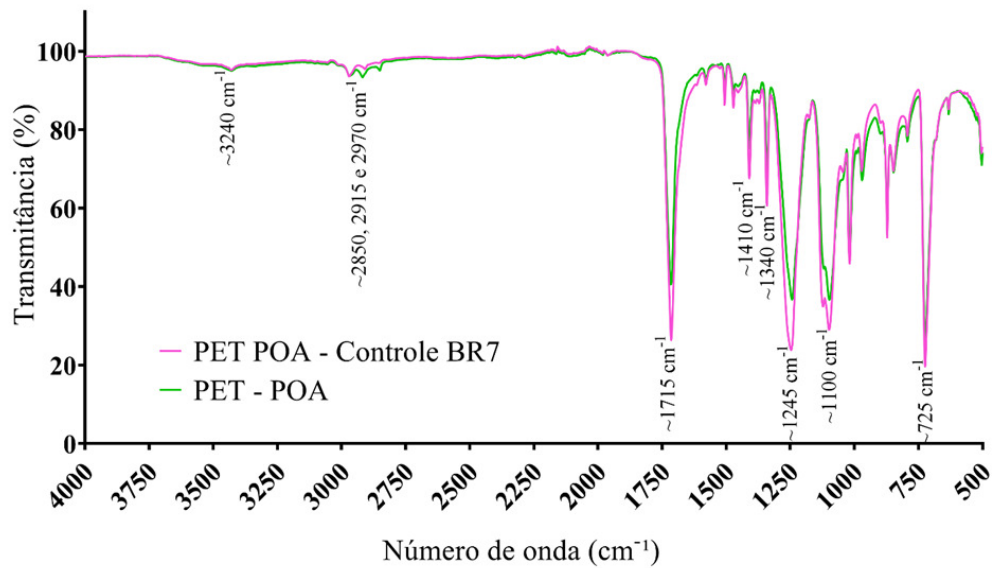


Legenda: PET – Controle BR7) Filme PET autoclavado e usado como controle do cultivo com cepa BR7. PET POA – Controle BR7) Filme PET tratado por POA, autoclavado e usado como controle do cultivo com cepa BR7. PET – Virgem) Filme PET sem processamento. Fonte: Elaboração própria.

O espectrograma indica aumento na intensidade dos grupos característicos do PET, principalmente dos três grupos ligação éster ( $\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1245\text{ cm}^{-1}$  e  $1715\text{ cm}^{-1}$ ) e dos picos de vibração do anel ( $\sim 725\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1340\text{ cm}^{-1}$  e  $1410\text{ cm}^{-1}$ ). De acordo com Callister Jr. e Rethwisch (2018), quando a temperatura é elevada acima da temperatura de transição vítrea (temperatura em que a cadeia passa a ganhar movimentação), ocorre um rearranjo na organização tridimensional da estrutura, criando regiões de maior organização. Esse processo aumenta a cristalinidade do polímero e, conseqüentemente, a sua densidade. Polímeros mais cristalinos tendem a apresentar picos característicos mais intensos, o que poderia explicar a intensificação dos picos observados no espectrograma. Esse efeito teve maior intensidade no filme PET tratado com POA; porém, nenhum relato semelhante foi encontrado, o que sugere a necessidade de um estudo mais aprofundado em pesquisas posteriores.

A comparação entre a amostra pré-tratada por POA e a respectiva amostra pré-tratada e autoclavada, utilizada como controle do cultivo (Gráfico 6), indica que a autoclavagem não alterou os grupos hidroxila introduzidos pelo processo oxidativo. Por outro lado, observou-se uma diminuição na intensidade dos picos referentes a grupos alifáticos, previamente intensificados durante o pré-tratamento com POA.

Gráfico 6 – ATR-FTIR comparação PET POA e PET POA autoclavado

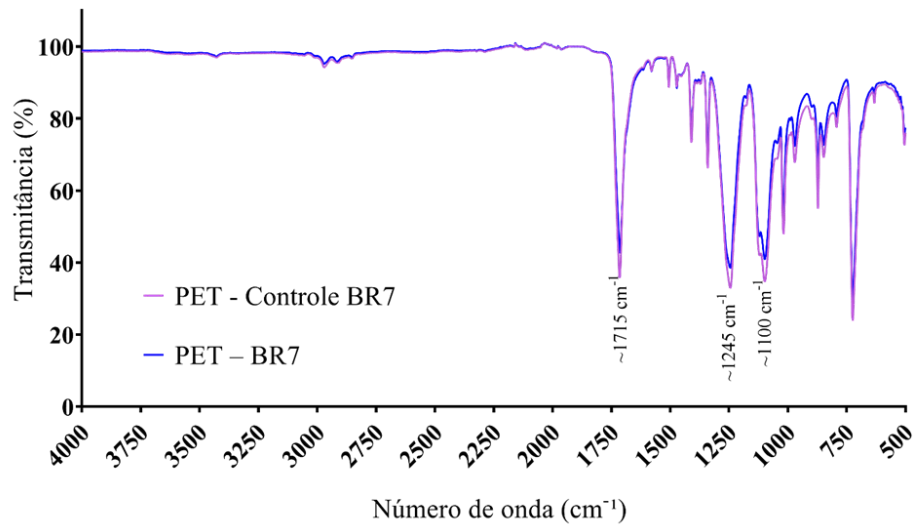


Legenda: PET POA) Filme PET tratado por POA. PET POA – Controle BR7) Filme PET tratado por POA, autoclavado e usado como controle no cultivo com cepa BR7. Fonte: Elaboração própria.

Em função das alterações observadas, a avaliação da biodegradação dos polímeros, com e sem tratamento, por ATR-FTIR foi realizada utilizando como controle as amostras denominadas “controle cultivo BR7”. Essas amostras foram submetidas ao processo de autoclavagem, assim como as amostras cultivadas, com o objetivo de assegurar que as diferenças observadas nos espectros fossem atribuídas ao efeito do cultivo bacteriano, e não a modificações decorrentes do processo de esterilização.

Os espectros de ATR-FTIR das amostras de PET após o cultivo com a cepa BR7 (Gráfico 7) evidenciaram uma diminuição na intensidade das bandas associadas às ligações éster, localizadas aproximadamente em 1100, 1245 e 1715  $\text{cm}^{-1}$ , indicando modificações nessa região da molécula. Essas alterações são compatíveis com processos de clivagem das ligações éster do PET, frequentemente associados à degradação do polímero.

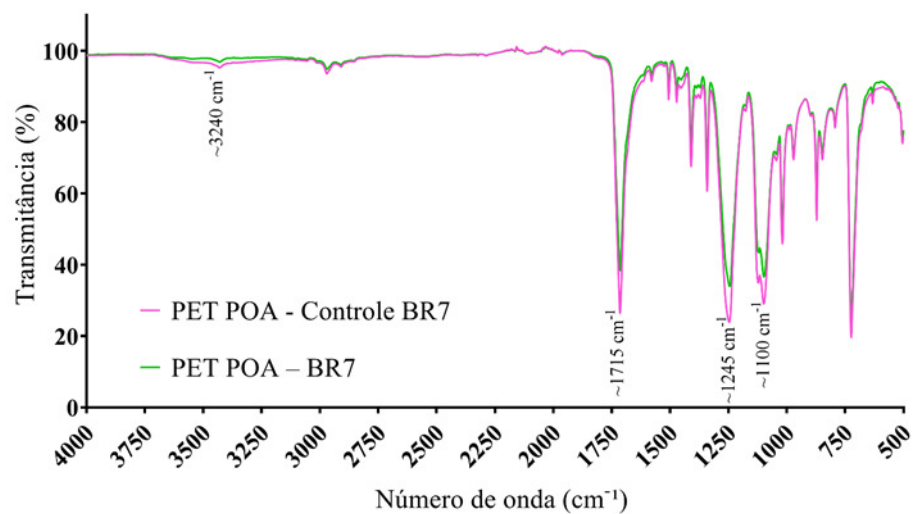
Gráfico 7 – ATR-FTIR filme PET pós cultivo em cepa BR7



Legenda: PET – Controle BR7) Filme PET autoclavado e usado como controle no cultivo com cepa BR7. PET-BR7) Filme PET autoclavado e cultivado com cepa BR7. Fonte: Elaboração própria.

Para as amostras submetidas ao pré-tratamento por POA e, posteriormente, cultivadas com a cepa BR7 (Gráfico 8), observou-se igualmente a redução da intensidade dos picos correspondentes às ligações éster, além de alterações em bandas previamente geradas pelo próprio processo oxidativo. No entanto, com base apenas nos espectros de ATR-FTIR, não é possível quantificar a extensão da degradação ou estabelecer qual condição resultou em maior grau de degradação do polímero, sendo possível apenas inferir uma redução mais pronunciada na intensidade dos picos associados aos grupos éster nas amostras pré-tratadas.

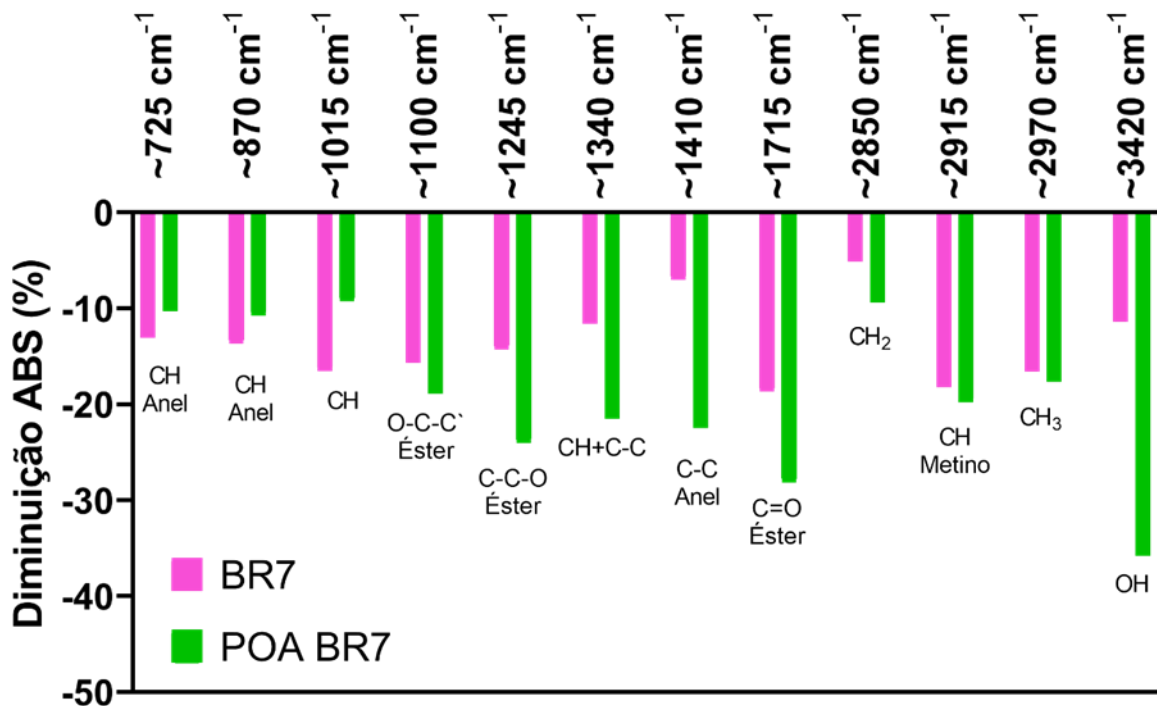
Gráfico 8 – ATR-FTIR filme PET POA pós cultivo em cepa BR7



Legenda: PET POA – Controle BR7) Filme PET tratado por POA, autoclavado e usado como controle no cultivo com cepa BR7. PET POA- BR7) Filme PET tratado por POA, autoclavado e cultivado com cepa BR7. Fonte: Elaboração própria.

Para uma melhor comparação do grau de degradação dos filmes com e sem pré-tratamento por POA após o cultivo com a cepa BR7, o Gráfico 9 apresenta um comparativo da diminuição percentual das absorvâncias obtidas por ATR-FTIR, considerando os cultivos em relação aos respectivos controles. Essa análise foi realizada em modo absorvância, com o objetivo de manter os parâmetros adotados no protocolo de referência.

**Gráfico 9 - Diminuição percentual da absorvância dos picos característicos do PET com e sem POA pós cultivo com BR7**



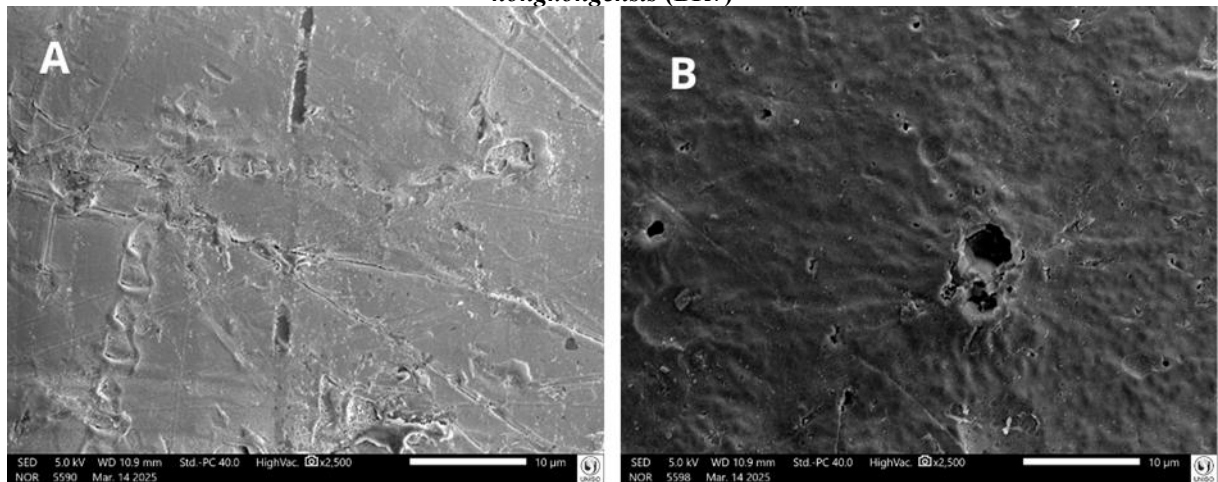
Legenda: BR7) Filmes PET autoclavados e cultivados com cepa BR7. POA BR7) Filmes PET tratados por POA, autoclavados e cultivados com cepa BR7. O gráfico aponta a diminuição percentual nos picos indicados após o processo de cultivo com cepa BR7. Fonte: Elaboração Própria.

A análise detalhada do Gráfico 9 evidencia diferenças no padrão de degradação entre as amostras cultivadas com a cepa BR7 com e sem pré-tratamento por POA. No cultivo sem pré-tratamento, observou-se maior diminuição relativa nas bandas em 725, 870 e 1015 cm<sup>-1</sup>, associadas a deformações C-H fora do plano e no plano do anel benzênico, indicando que, nessa condição, as alterações se concentraram preferencialmente em grupos relacionados à estrutura aromática do polímero. Em contrapartida, as amostras submetidas ao pré-tratamento por POA apresentaram maior redução de intensidade na maioria dos demais números de onda avaliados, especialmente aqueles associados às ligações éster e às cadeias alifáticas do PET, como as bandas em 1715 cm<sup>-1</sup> (C=O em éster), 1245 cm<sup>-1</sup> (C-C-O em éster), 1100 cm<sup>-1</sup> (O-C-C em éster) e nas regiões de estiramento C-H (2970, 2915 e 2850 cm<sup>-1</sup>).

Esses resultados sugerem que o pré-tratamento por POA favorece uma degradação mais direcionada às ligações éster e à matriz alifática do polímero durante o cultivo bacteriano, enquanto, na ausência de pré-tratamento, as modificações observadas tendem a se concentrar em grupos associados ao anel aromático. Ressalta-se que, embora essa análise permita identificar diferenças no padrão de alteração dos grupos funcionais, o ATR-FTIR não permite a quantificação absoluta do grau de degradação, sendo os resultados interpretados como indicativos de rotas de degradação distintas entre os sistemas avaliados.

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou diferenças marcantes na morfologia superficial dos filmes de PET entre as amostras com e sem pré-tratamento com POA (Imagem 5), com alterações mais pronunciadas nos grupos pré-tratados. Nos filmes submetidos ao pré-tratamento, observou-se a presença de áreas degradadas mais extensas, caracterizadas pela formação de cavidades, fissuras e irregularidades superficiais, o que indica maior interação entre o microrganismo e a matriz polimérica.

**Imagem 5 – Microscopia eletrônica de varredura dos filmes PET após cultivo em cepa *Gordonia hongkongensis* (BR7)**



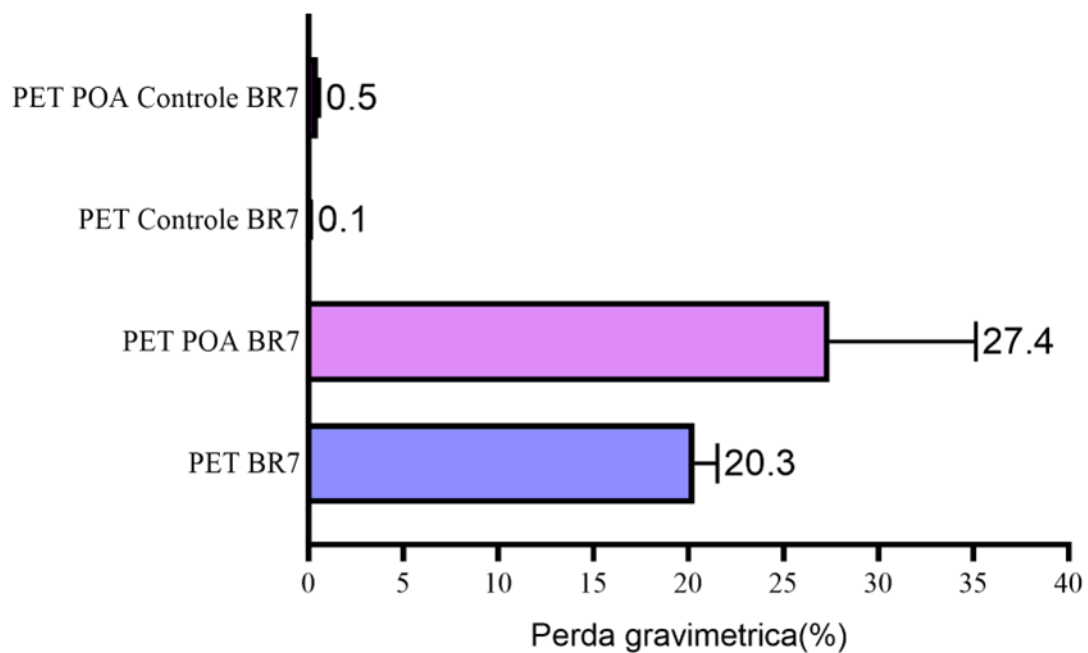
Legenda: A) Filmes PET autoclavados e cultivados com cepa BR7. B) Filmes PET tratados por POA, autoclavados e cultivados com cepa BR7. Fonte: Elaboração própria.

Esse padrão morfológico sugere que o pré-tratamento com POA promove modificações na superfície do PET que favorecem a ação bacteriana, potencializando o processo de degradação. As alterações observadas apresentam similaridade com as reportadas por Walter et al. (2022), em estudos com a cepa *Ideonella sakaiensis* aplicada à degradação de embalagens alimentícias, bem como com os resultados descritos por Yoshida et al. (2016), no trabalho seminal que caracterizou a capacidade degradativa dessa bactéria sobre o PET.

Os resultados de perda gravimétrica corroboram as evidências obtidas nas análises morfológicas, uma vez que diferenças expressivas de massa foram observadas entre os grupos

avaliados. Não foram identificadas variações significativas nos grupos de controle, indicando a estabilidade do material na ausência de atividade biológica. Em contraste, os grupos cultivados com a cepa BR7, com e sem pré-tratamento por POA, apresentaram reduções mensuráveis de massa (Gráfico 9), sendo a maior perda observada nas amostras previamente oxidada. Embora a perda gravimétrica seja esperada em ensaios de biodegradação, os resultados sugerem que o pré-tratamento com POA intensifica a degradação microbiológica do PET, possivelmente por promover modificações estruturais que tornam o polímero mais suscetível à ação bacteriana.

Gráfico 10 – Perda gravimétrica dos filmes PET após cultivo em cepa BR7



Legenda: PET BR7) Filmes PET autoclavados e cultivados com cepa BR7. PET POA BR7) Filmes PET tratados por POA, autoclavados e cultivados com cepa BR7. PET Controle BR7) Filme PET autoclavado e usado como controle no cultivo com cepa BR7. PET POA – Controle BR7) Filme PET tratado por POA, autoclavado e usado como controle no cultivo com cepa BR7. Fonte: Elaboração própria.

Embora a perda gravimétrica seja esperada em ensaios de biodegradação, os resultados sugerem que o pré-tratamento por POA intensifica a degradação microbiológica do PET, possivelmente por promover modificações estruturais que tornam o polímero mais suscetível à ação bacteriana.

De forma integrada, os resultados obtidos por ATR-FTIR, MEV e perda gravimétrica indicam que o pré-tratamento por Processos Oxidativos Avançados potencializou os efeitos da degradação microbiológica, refletindo-se em alterações estruturais mais intensas, modificações morfológicas mais pronunciadas e maior perda de massa. Assim, os dados convergem para a hipótese de que o POA atua como um pré-tratamento eficiente para aumentar a suscetibilidade do PET à degradação microbiológica.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a peroxonação, aplicada como Processo Oxidativo Avançado (POA), promoveu modificações estruturais e morfológicas relevantes nos filmes de PET. As análises por ATR-FTIR evidenciaram o surgimento de grupos funcionais oxigenados, enquanto as micrografias de MEV revelaram alterações morfológicas como rachaduras, erosões e aumento da rugosidade superficial. Essas transformações foram acompanhadas por redução da hidrofobicidade, observada pela diminuição do ângulo de contato, tornando o polímero mais suscetível à colonização microbiana.

De forma integrada, as análises após o cultivo bacteriano confirmaram que o pré-tratamento oxidativo reduziu a recalcitrância do PET e potencializou a ação da cepa *Gordonia hongkongensis* (BR7). Os filmes previamente submetidos ao POA apresentaram maior diminuição das bandas características no ATR-FTIR, modificações morfológicas mais pronunciadas no MEV e maior perda gravimétrica em comparação às amostras sem tratamento, todas avaliadas sob as mesmas condições e no mesmo período de 90 dias. Esses resultados indicam que a atuação dos radicais hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ) foi determinante para intensificar a degradação microbiológica.

Embora os dados experimentais evidenciem a eficácia do processo, o caminho reacional detalhado da oxidação do PET mediada por  $\bullet\text{OH}$  ainda não está completamente elucidado. Persistem lacunas na literatura quanto aos mecanismos específicos de ataque radicalar e à evolução dos grupos oxigenados formados durante o processo. Investigações complementares, como análises por XPS e espectroscopia de RMN, poderiam fornecer informações mais aprofundadas sobre o ambiente químico e as ligações formadas ou rompidas, contribuindo para a compreensão mecanística do sistema.

Do ponto de vista tecnológico, a biodegradação isolada do PET é reconhecida como um processo lento e oneroso. Nesse contexto, a integração entre pré-tratamento oxidativo e degradação microbiológica mostra-se promissora, pois a aceleração do processo biológico pode reduzir o tempo de residência do material em sistemas de cultivo, compensando os custos adicionais da etapa oxidativa e tornando o processo globalmente mais atrativo sob os aspectos econômicos e ambientais.

Como perspectiva futura, destaca-se a necessidade de otimização sistemática dos parâmetros do pré-tratamento, como tempo de exposição, concentração de oxidantes e condições operacionais, visando maximizar a eficiência do processo e reduzir o tempo global

de degradação. A consolidação dessa abordagem como tecnologia aplicável em escala dependerá do equilíbrio entre desempenho, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental.

Assim, este trabalho evidencia que a oxidação avançada pode atuar como etapa preparatória eficiente em processos integrados de degradação do PET, reforçando o potencial da combinação entre estratégias químicas e biológicas para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficazes no tratamento de resíduos plásticos.

## REFERÊNCIAS

ALAGHEMANDI, Mohammad. Sustainable Solutions Through Innovative Plastic Waste Recycling Technologies. **Sustainability**, v. 16, n. 23, p. 10401, 27 nov. 2024.

AMANNA, Ruth; RAKSHIT, Sudip K. Pretreatment of polyethylene terephthalate (PET) using physicochemical methods and their effects on biodegradation. **Biotechnology for the Environment**, v. 2, n. 1, p. 2, 10 fev. 2025.

ARENSKÖTTER, Matthias; BRÖKER, Daniel; STEINBÜCHEL, Alexander. Biology of the Metabolically Diverse Genus *Gordonia*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, n. 6, p. 3195–3204, jun. 2004.

BENAVIDES FERNÁNDEZ, Cesar David *et al.* Microbial degradation of polyethylene terephthalate: a systematic review. **SN Applied Sciences**, v. 4, n. 10, p. 263, 8 out. 2022.

BHANDERI, Khodidas K.; JOSHI, Jeimin R.; PATEL, Jigar V. Recycling of polyethylene terephthalate (PET Or PETE) plastics – An alternative to obtain value added products: A review. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 100, n. 1, p. 100843, jan. 2023.

BULE MOŽAR, Kristina *et al.* Potential of Advanced Oxidation as Pretreatment for Microplastics Biodegradation. **Separations**, v. 10, n. 2, p. 132, 15 fev. 2023.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2018.

CHEN, Shaoqin; HU, Yun Hang. Advancements and future directions in waste plastics recycling: From mechanical methods to innovative chemical processes. **Chemical Engineering Journal**, v. 493, p. 152727, ago. 2024.

CIUFFI, Benedetta; FRATINI, Emiliano; ROSI, Luca. Plastic pretreatment: The key for efficient enzymatic and biodegradation processes. **Polymer Degradation and Stability**, v. 222, p. 110698, abr. 2024.

COATES, John. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. *In: Encyclopedia of Analytical Chemistry*. [S.l.]: Wiley, 2000.

CRYSTAL THEW, Xue Er *et al.* Enhancing plastic biodegradation process: strategies and opportunities. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 44, n. 3, p. 477–494, 2 abr. 2024.

CUERDA-CORREA, Eduardo Manuel; ALEXANDRE-FRANCO, María F.; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, Carmen. Advanced Oxidation Processes for the Removal of Antibiotics from Water. An Overview. **Water**, v. 12, n. 1, p. 102, 27 dez. 2019.

DEWI, Sukmanita *et al.* Evaluation of Pretreatment Strategies and Combinations of Enzymes for Degradation of Polyethylene Terephthalate. **Journal of Polymer Science**, v. 63, n. 13, p. 2770–2781, 23 jul. 2025.

DEY, Ayan *et al.* Challenges and possible solutions to mitigate the problems of single-use plastics used for packaging food items: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, n. 9, p. 3251–3269, 10 set. 2021.

DHAKA, Vaishali *et al.* Biological degradation of polyethylene terephthalate by rhizobacteria. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 55, p. 116488–116497, 23 abr. 2022.

DUAN, Chenxingyu *et al.* Global Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Supply Chain Resource Metabolism Efficiency and Carbon Emissions Co-Reduction Strategies. **Sustainability**, v. 16, n. 10, p. 3926, 8 maio 2024.

FERNÁNDEZ-SANMARTÍN, Paola *et al.* ATR-FTIR characterisation of daily-use plastics mycodegradation. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 286, p. 117232, nov. 2024.

FONTES, Bernardo Lannes Monteiro *et al.* The possible impacts of nano and microplastics on human health: lessons from experimental models across multiple organs. **Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B**, v. 27, n. 4, p. 153–187, 18 maio 2024.

GARCIA, Jeannette M.; ROBERTSON, Megan L. The future of plastics recycling. **Science**, v. 358, n. 6365, p. 870–872, 17 nov. 2017.

HOANG, Tham C. Plastic pollution: Where are we regarding research and risk assessment in support of management and regulation? **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 18, n. 4, p. 851–852, 1 jun. 2022.

HU, Jinyuan; LIM, Fang Yee; HU, Jiangyong. Ozonation facilitates the aging and mineralization of polyethylene microplastics from water: Behavior, mechanisms, and pathways. **Science of The Total Environment**, v. 866, p. 161290, mar. 2023.

IDRIS, Siti Norliyana *et al.* The degradation of single-use plastics and commercially viable bioplastics in the environment: A review. **Environmental Research**, v. 231, p. 115988, ago. 2023.

IOAKEIMIDIS, C. *et al.* The degradation potential of PET bottles in the marine environment: An ATR-FTIR based approach. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 23501, 22 mar. 2016.

JIANG, Jie *et al.* From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 106867, fev. 2022.

JIANG, Xiaoli; BATEER, Buhe. A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, 18 jan. 2025.

JOSHI, Sanjay Kumar; VASHISHTH, Akshita. Plastonomics: Impact of Plastic on Ecosystem and the World Economy. *In: Advanced Strategies for Biodegradation of Plastic Polymers*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 405–420.

KAMALAKKANNAN, Sivappirakasam *et al.* Life Cycle Assessment of Selected Single-Use Plastic Products towards Evidence-Based Policy Recommendations in Sri Lanka. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14170, 30 out. 2022.

KANAUJIYA, Dipak Kumar; SIVASHANMUGAM, Selvanayagi; PAKSHIRAJAN, Kannan. Biodegradation and toxicity removal of phthalate mixture by *Gordonia* sp. in a continuous stirred tank bioreactor system. **Environmental Technology & Innovation**, v. 26, p. 102324, maio 2022.

KUMAR TIWARI, Aadrsh; GAUTAM, Manisha; MAURYA, Hardesh K. RECENT DEVELOPMENT OF BIODEGRADATION TECHNIQUES OF POLYMER. **International Journal of Research -GRANTHAALAYAH**, v. 6, n. 6, p. 414–452, 30 jun. 2018.

KUMARI, Preeti; KUMAR, Aditya. ADVANCED OXIDATION PROCESS: A remediation technique for organic and non-biodegradable pollutant. **Results in Surfaces and Interfaces**, v. 11, p. 100122, maio 2023.

LEE, Ga Hyun *et al.* Biotechnological Plastic Degradation and Valorization Using Systems Metabolic Engineering. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 20, p. 15181, 14 out. 2023.

LIN, Yinghui *et al.* Efficient degradation and mineralization of polyethylene terephthalate microplastics by the synergy of sulfate and hydroxyl radicals in a heterogeneous electro-Fenton-activated persulfate oxidation system. **Journal of Hazardous Materials**, v. 478, p. 135635, out. 2024.

LIU, Renju *et al.* Polyethylene terephthalate (PET)-degrading bacteria in the pelagic deep-sea sediments of the Pacific Ocean. **Environmental Pollution**, v. 352, p. 124131, jul. 2024.

LV, Shiwei *et al.* Biodegradation of Typical Plastics: From Microbial Diversity to Metabolic Mechanisms. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 1, p. 593, 2 jan. 2024.

MA, Dengsheng *et al.* Critical review of advanced oxidation processes in organic wastewater treatment. **Chemosphere**, v. 275, p. 130104, jul. 2021.

MACLEOD, Matthew *et al.* The global threat from plastic pollution. **Science**, v. 373, n. 6550, p. 61–65, 2 jul. 2021.

MAHMOODI, Mohammadreza; PISHBIN, Esmail. Ozone-based advanced oxidation processes in water treatment: recent advances, challenges, and perspective. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, n. 7, p. 3531–3570, 19 jan. 2025.

MANNA, Madhumita; SEN, Sujit. Advanced oxidation process: a sustainable technology for treating refractory organic compounds present in industrial wastewater. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 10, p. 25477–25505, 14 mar. 2022.

MAQBOOL, Ahsan; SORIANO, María-Auxiliadora; GÓMEZ, José Alfonso. Macro- and micro-plastics change soil physical properties: a systematic review. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 12, p. 123002, 1 dez. 2023.

MARTÍNEZ-NARRO, Gerardo; HASSAN, Samaila; PHAN, Anh N. Chemical recycling of plastic waste for sustainable polymer manufacturing – A critical review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 2, p. 112323, abr. 2024.

MAT YASIN, Najwa; AKKERMANS, Simen; VAN IMPE, Jan F. M. Enhancing the biodegradation of (bio)plastic through pretreatments: A critical review. **Waste Management**, v. 150, p. 1–12, ago. 2022.

NISTICÒ, Roberto. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. **Polymer Testing**, v. 90, p. 106707, out. 2020.

OH, Sewon; STACHE, Erin E. Recent advances in oxidative degradation of plastics. **Chemical Society Reviews**, v. 53, n. 14, p. 7309–7327, 2024a.

OH, Sewon; STACHE, Erin E. Recent advances in oxidative degradation of plastics. **Chemical Society Reviews**, v. 53, n. 14, p. 7309–7327, 2024b.

OU, Yantong. Atmospheric chemistry of microplastics: Transport, environmental impacts, and governance. **Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection**, v. 1, n. 10, 31 dez. 2024.

PAN, Xian-Ming; SCHUCHMANN, Man Nien; VON SONNTAG, Clemens. Oxidation of benzene by the OH radical. A product and pulse radiolysis study in oxygenated aqueous solution. **Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2**, n. 3, p. 289, 1993.

PANDIS, Pavlos K. *et al.* Key Points of Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Wastewater, Organic Pollutants and Pharmaceutical Waste Treatment: A Mini Review. **ChemEngineering**, v. 6, n. 1, p. 8, 18 jan. 2022.

PATHAK, Vinay Mohan; NAVNEET. Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 4, n. 1, p. 15, 23 dez. 2017.

PRAJAPATI, Ravindra *et al.* Recovery and Recycling of Polymeric and Plastic Materials. *In: [S.l.: S.n.]*. p. 15–41.

PRIYADARSHINI, Monali *et al.* Advanced oxidation processes: Performance, advantages, and scale-up of emerging technologies. **Journal of Environmental Management**, v. 316, p. 115295, ago. 2022.

QIU, Jiarong *et al.* A comprehensive review on enzymatic biodegradation of polyethylene terephthalate. **Environmental Research**, v. 240, p. 117427, jan. 2024.

RAMOS, Murilo Antonio. **DESENVOLVIMENTO DE UMA LINHAGEM DE GORDONIA HONGKONGENSIS À DEGRADAÇÃO DE PLÁSTICO PET**. Sorocaba: Universidade de Sorocaba, 2025.

ROMAN, Ellen Karen Barreto *et al.* Plastic-degrading microbial communities reveal novel microorganisms, pathways, and biocatalysts for polymer degradation and bioplastic production. **Science of The Total Environment**, v. 949, p. 174876, nov. 2024a.

ROMAN, Ellen Karen Barreto *et al.* Plastic-degrading microbial communities reveal novel microorganisms, pathways, and biocatalysts for polymer degradation and bioplastic production. **Science of The Total Environment**, v. 949, p. 174876, nov. 2024b.

RONG, Zhen; XU, Xue-Wei; WU, Yue-Hong. Biodegradation of low-density polyethylene film by two bacteria isolated from plastic debris in coastal beach. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 278, p. 116445, jun. 2024.

SAHU, Adyasha *et al.* Constraints of Conventional Strategies in Managing Plastic Waste and Future Challenges. *In: **Advanced Strategies for Biodegradation of Plastic Polymers***. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 35–56.

SINGH JADAUN, Jyoti *et al.* Biodegradation of plastics for sustainable environment. **Bioresource Technology**, v. 347, p. 126697, mar. 2022a.

SINGH JADAUN, Jyoti *et al.* Biodegradation of plastics for sustainable environment. **Bioresource Technology**, v. 347, p. 126697, mar. 2022b.

SMITH, Brian. **Infrared Spectral Interpretation**. [*S.l.*]: CRC Press, 2018.

SRIVASTAVA, Pallavi; SAJI, Joel; MANICKAM, Natesan. Biodegradation of polyethylene terephthalate (PET) by *Brucella intermedia* IITR130 and its proposed metabolic pathway. **Biodegradation**, v. 35, n. 5, p. 671–685, 9 ago. 2024.

THEW, Crystal Xue Er *et al.* Recent advances and challenges in sustainable management of plastic waste using biodegradation approach. **Bioresource Technology**, v. 374, p. 128772, abr. 2023.

VAN BUREN, Jean *et al.* Ring-Cleavage Products Produced during the Initial Phase of Oxidative Treatment of Alkyl-Substituted Aromatic Compounds. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 13, p. 8352–8361, 7 jul. 2020.

VAN GENUCHTEN, Erlijn. How Plastic Pollution Impacts Aquatic Animals. *In: **A Guide to a Healthier Planet***. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 63–68.

WALKER, Tony R. Consuming Plastics. *In: **Consuming the Environment***. London: Routledge, 2024. p. 105–117.

WALTER, Andreas *et al.* Biodegradation of different PET variants from food containers by *Ideonella sakaiensis*. **Archives of Microbiology**, v. 204, n. 12, p. 711, 16 dez. 2022.

WANG, Hongzhe *et al.* Biofilm formation promoted biodegradation of polyethylene in *Gordonia polyisoprenivorans* B251 isolated from bacterial enrichment acclimated by hexadecane for two years. **Chemosphere**, v. 344, p. 140383, dez. 2023.

WANG, JIAN LONG; XU, LE JIN. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 3, p. 251–325, fev. 2012.

YANG, Yulu *et al.* Plastic wastes (PWs) and microplastics (MPs) formation: Management, migration, and environmental impact. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 3, p. 112926, jun. 2024.

YOSHIDA, Shosuke *et al.* A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). **Science**, v. 351, n. 6278, p. 1196–1199, 11 mar. 2016.

ZOU, Yunqian *et al.* A Simplified Approach for Dynamic Contact Angle Measurements. **Journal of Chemical Education**, v. 101, n. 9, p. 3883–3890, 10 set. 2024.

## APÊNDICE A - ESTRATÉGIA DE BUSCA E DETALHAMENTO DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Este apêndice apresenta as estratégias de busca adotadas para a análise bibliométrica, bem como os critérios de refinamento utilizados para a identificação de lacunas na literatura. As buscas foram realizadas na base de dados Web of Science, utilizando o campo Topic (TS), que contempla títulos, resumos e palavras-chave. O período analisado compreendeu publicações indexadas entre 2010 e 2025.

Com o objetivo de ampliar a cobertura da literatura e reduzir ruídos, foram empregados sinônimos para o termo polímero, incluindo plástico, microplástico e nanoplástico, sempre associados a expressões relacionadas à degradação. Adicionalmente, foram utilizados operadores booleanos e de proximidade (NEAR/3) para garantir relação conceitual direta entre os termos pesquisados. As buscas foram realizadas no dia 30 de janeiro de 2026.

### A.1 Estratégias de busca por subgrupo

**Subgrupo 1** — Degradação polimérica/plástica associada a processos oxidativos avançados

Objetivo: identificar estudos que abordem a aplicação de processos oxidativos avançados em contextos de degradação de materiais poliméricos.

*Termo de busca: (("polymer degradation" OR "plastic degradation" OR "microplastic degradation" OR "nanoplastic degradation" OR (degrad\* NEAR/3 polymer\*) OR (degrad\* NEAR/3 plastic\*) OR (degrad\* NEAR/3 microplastic\*) OR (degrad\* NEAR/3 nanoplastic\*)) AND ("advanced oxidation process\*" OR AOP\* OR "oxidative process\*"))*

Número de registros recuperados: 147

**Subgrupo 2** — Degradação polimérica/plástica por vias biodegradativas

Objetivo: mapear a literatura relacionada à biodegradação microbiana e/ou enzimática de materiais poliméricos.

*Termo de busca: (("polymer degradation" OR "plastic degradation" OR "microplastic degradation" OR "nanoplastic degradation" OR (degrad\* NEAR/3 polymer\*) OR (degrad\**

*NEAR/3 plastic\*) OR (degrad\* NEAR/3 microplastic\*) OR (degrad\* NEAR/3 nanoplastic\*)) AND (biodegrad\* OR biodeteriorat\* OR "microbial degradation" OR "enzymatic degradation"))*

Número de registros recuperados: 7.422

### **Subgrupo 3 — Integração entre processos oxidativos avançados e biodegradação**

Objetivo: identificar estudos que integrem processos oxidativos avançados e biodegradação no contexto da degradação de materiais poliméricos.

*Termo de busca: (("polymer degradation" OR "plastic degradation" OR "microplastic degradation" OR "nanoplastic degradation" OR (degrad\* NEAR/3 polymer\*) OR (degrad\* NEAR/3 plastic\*) OR (degrad\* NEAR/3 microplastic\*) OR (degrad\* NEAR/3 nanoplastic\*)) AND ("advanced oxidation process\*" OR AOP\* OR "oxidative process\*") AND (biodegrad\* OR "microbial degradation" OR "enzymatic degradation"))*

Número de registros recuperados: 28

#### **A.2 Refinamento específico para o PET**

Objetivo: identificar estudos que avaliem o uso de processos oxidativos avançados como etapa de pré-tratamento seguida de biodegradação do PET.

*Termo de busca: (("polyethylene terephthalate" OR PET) AND ("advanced oxidation process\*" OR AOP\* OR "oxidative process\*") AND (biodegrad\* OR degrad\*) AND ("pre-treatment" OR pretreatment))*

Número de registros recuperados: 2

## Dissertação Maria Gabriela Versão Final.pdf

Documento número #6b230b99-3584-4a61-be7a-f22d356e99de

Hash do documento original (SHA256): 8cd338e1d5d27e99f9c463a0abc043376af91b8e21e3dddf3d22ac434aec8eb7

### Assinaturas

✓ **Denicezar Angelo Baldo**  
CPF: 351.150.058-32  
Assinou em 27 fev 2026 às 09:58:20




Denicezar Angelo Baldo

✓ **ADRIANE DE MEDEIROS FERREIRA**  
Assinou em 27 fev 2026 às 10:02:57



ADRIANE DE MEDEIROS FERREIRA

✓ **Fabio M. Squina**  
CPF: 212.532.048-70  
Assinou em 27 fev 2026 às 11:48:08



Fabio M. Squina

### Log

- 27 fev 2026, 09:53:32 Operador com email denicezar.baldo@prof.uniso.br na Conta dc776021-c8fe-4c95-aeb8-1de863db8ea6 criou este documento número 6b230b99-3584-4a61-be7a-f22d356e99de. Data limite para assinatura do documento: 29 de março de 2026 (09:53). Finalização automática após a última assinatura: habilitada. Idioma: Português brasileiro.
- 27 fev 2026, 09:57:36 Operador com email denicezar.baldo@prof.uniso.br na Conta dc776021-c8fe-4c95-aeb8-1de863db8ea6 adicionou à Lista de Assinatura: denicezar.baldo@prof.uniso.br para assinar, via E-mail.
- Pontos de autenticação: Token via E-mail; Nome Completo; CPF; endereço de IP; Assinatura manuscrita. Dados informados pelo Operador para validação do signatário: nome completo Denicezar Angelo Baldo e CPF 351.150.058-32.
- 27 fev 2026, 09:57:36 Operador com email denicezar.baldo@prof.uniso.br na Conta dc776021-c8fe-4c95-aeb8-1de863db8ea6 adicionou à Lista de Assinatura: fabio.squina@prof.uniso.br para assinar, via E-mail.
- Pontos de autenticação: Token via E-mail; Nome Completo; CPF; endereço de IP; Assinatura manuscrita. Dados informados pelo Operador para validação do signatário: nome completo Fabio M. Squina.

- 27 fev 2026, 09:57:36 Operador com email denicezar.baldo@prof.uniso.br na Conta dc776021-c8fe-4c95-aeb8-1de863db8ea6 adicionou à Lista de Assinatura: adriane.ferreira@prof.uniso.br para assinar, via E-mail.
- Pontos de autenticação: Token via E-mail; Nome Completo; endereço de IP; Assinatura manuscrita. Dados informados pelo Operador para validação do signatário: nome completo ADRIANE DE MEDEIROS FERREIRA.
- 27 fev 2026, 09:58:20 Denicezar Angelo Baldo assinou. Pontos de autenticação: Token via E-mail denicezar.baldo@prof.uniso.br. CPF informado: 351.150.058-32. Assinatura manuscrita com hash SHA256 prefixo d7b225(...), vide anexo blob. IP: 201.92.132.152. Componente de assinatura versão 1.1393.0 disponibilizado em <https://app.clicksign.com>.
- 27 fev 2026, 10:02:57 ADRIANE DE MEDEIROS FERREIRA assinou. Pontos de autenticação: Token via E-mail adriane.ferreira@prof.uniso.br. Assinatura manuscrita com hash SHA256 prefixo cdba27(...), vide anexo manuscript\_27 fev 2026, 10-02-26.png. IP: 179.241.19.69. Localização compartilhada pelo dispositivo eletrônico: latitude -23.5216453 e longitude -47.464284. URL para abrir a localização no mapa: <https://app.clicksign.com/location>. Componente de assinatura versão 1.1393.0 disponibilizado em <https://app.clicksign.com>.
- 27 fev 2026, 11:48:08 Fabio M. Squina assinou. Pontos de autenticação: Token via E-mail fabio.squina@prof.uniso.br. CPF informado: 212.532.048-70. Assinatura manuscrita com hash SHA256 prefixo a56b41(...), vide anexo manuscript\_27 fev 2026, 11-47-38.png. IP: 104.28.63.144. Localização compartilhada pelo dispositivo eletrônico: latitude -23.54494020160233 e longitude -47.46746911092852. URL para abrir a localização no mapa: <https://app.clicksign.com/location>. Componente de assinatura versão 1.1393.0 disponibilizado em <https://app.clicksign.com>.
- 27 fev 2026, 11:48:09 Processo de assinatura finalizado automaticamente. Motivo: finalização automática após a última assinatura habilitada. Processo de assinatura concluído para o documento número 6b230b99-3584-4a61-be7a-f22d356e99de.



## Documento assinado com validade jurídica.

Para conferir a validade, acesse <https://www.clicksign.com/validador> e utilize a senha gerada pelos signatários ou envie este arquivo em PDF.

As assinaturas digitais e eletrônicas têm validade jurídica prevista na Medida Provisória nº. 2200-2 / 2001

Este Log é exclusivo e deve ser considerado parte do documento nº 6b230b99-3584-4a61-be7a-f22d356e99de, com os efeitos prescritos nos Termos de Uso da Clicksign, disponível em [www.clicksign.com](http://www.clicksign.com).

## Anexos

### Denicezar Angelo Baldo

Assinou o documento em 27 fev 2026 às 09:58:20

#### ASSINATURA MANUSCRITA

Assinatura manuscrita com hash SHA256 prefixo d7b225(...)

A handwritten signature in black ink is written over a semi-transparent watermark. The watermark consists of a dashed rectangular box containing the text 'Cik REPRODUÇÃO PROIBIDA 27/02/2026 09:57:53'.

Denicezar Angelo Baldo  
blob

## ADRIANE DE MEDEIROS FERREIRA

Assinou o documento em 27 fev 2026 às 10:02:57

### ASSINATURA MANUSCRITA

Assinatura manuscrita com hash SHA256 prefixo cdba27(...)



ADRIANE DE MEDEIROS FERREIRA  
27/02/2026 10:02:57

ADRIANE DE MEDEIROS FERREIRA  
manuscript\_27 fev 2026, 10-02-26.png

## Fabio M. Squina

Assinou o documento em 27 fev 2026 às 11:48:08

### ASSINATURA MANUSCRITA

Assinatura manuscrita com hash SHA256 prefixo a56b41(...)



Fabio M. Squina  
27/02/2026 11:48:08

Fabio M. Squina  
manuscript\_27 fev 2026, 11-47-38.png