

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS CAMPUS POÇOS DE CALDAS

JÚLIA MAGALHÃES MARIANO

VINICIUS BOCAMINO TREVIZAN

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO PET E DO PVC: UMA ABORDAGEM
COMPARATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS**

POÇOS DE CALDAS – MG

2025

JULIA MAGALHÃES MARIANO
VINICIUS BOCAMINO TREVIZAN

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DO PET E DO PVC: UMA
ABORDAGEM COMPARATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS**

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Poços de Caldas.
Orientadora: Profa. Dra. Giselle Patrícia Sancinetti

POÇOS DE CALDAS – MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas Biblioteca Campus
Poços de Caldas

Mariano, Julia Magalhães.

Avaliação do ciclo de vida do PET e PVC : Uma abordagem
comparativa dos impactos ambientais / Julia Magalhães Mariano,
Vinicius Bocamino Trevizan. - Poços de Caldas, MG, 2025.

48 f. : il. -

Orientador(a): Giselle Patricia Sancinetti.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG,
2025.

Bibliografia.

1. Polímeros. 2. PET. 3. PVC. 4. Sustentabilidade. 5. Ciclo de Vida.
I. Trevizan, Vinicius Bocamino. II. Sancinetti, Giselle Patricia, orient.
III. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

JULIA MAGALHÃES MARIANO
VINICIUS BOCAMINO TREVIZAN

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DO PET E DO PVC: UMA
ABORDAGEM COMPARATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS**

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Poços de Caldas.

Orientadora: Profa. Dra. Giselle Patrícia Sancinetti

Aprovada em: 04 de dezembro de 2025

Prof^a. Dr^a. Giselle Patrícia Sancinetti

Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof.^a Dr.^a. Maurielen Guterres Dalcin

Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof^a. Dr^a. Grazielle Santos Silva Andrade

Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo comparar o politereftalato de etileno (PET) e o policloreto de vinila (PVC), analisando suas propriedades físico-químicas, aplicações industriais, ciclo de vida e impactos ambientais, com ênfase no setor de embalagens plásticas. Inicialmente, apresenta-se um panorama histórico e estrutural dos principais polímeros sintéticos, evidenciando o papel dos plásticos no desenvolvimento tecnológico e os desafios decorrentes de seu descarte em larga escala. Por meio da Análise do Ciclo de Vida (ACV), identificou-se que o PET se destaca pela elevada reciclabilidade, possibilidade de reprocessamento em ciclo fechado (“garrafa-para-garrafa”) e menor emissão de compostos tóxicos, enquanto o PVC apresenta maior complexidade ambiental devido à presença de cloro em sua estrutura, uso intensivo de aditivos presentes em sua composição final e riscos associados à liberação de dioxinas durante a degradação térmica ou incineração. O trabalho também discute tendências regulatórias globais que favorecem a substituição do PVC em embalagens, bem como o papel da economia circular e de instituições como a Ellen MacArthur Foundation na promoção de materiais com maior viabilidade sustentável. Conclui-se que, embora ambos os polímeros possuam relevância industrial, o PET se mostra tecnicamente mais adequado em termos de segurança alimentar, reciclabilidade e redução de impactos ambientais, consolidando-se como alternativa preferencial em embalagens de consumo.

Palavras-chaves: polímeros; PET; PVC; sustentabilidade; ciclo de vida; reciclagem; reprocessamento; impactos ambientais; Ellen MacArthur.

ABSTRACT

This study aims to compare polyethylene terephthalate (PET) and polyvinyl chloride (PVC), analyzing their physicochemical properties, industrial applications, life cycle, and environmental impacts, with emphasis on packaging systems. Initially, the work presents a historical and structural overview of the main synthetic polymers, highlighting the role of plastics in technological development and the challenges related to large-scale waste generation. Through Life Cycle Assessment (LCA), it was observed that PET stands out for its high recyclability, feasibility of closed-loop reprocessing (“bottle-to-bottle”), and lower emission of toxic compounds, whereas PVC presents greater environmental complexity due to its chlorine content, intensive use of additives, and the risk of dioxin release during thermal degradation or incineration. The research also discusses global regulatory trends that encourage the phase-out of PVC in packaging, as well as the role of the circular economy and institutions such as the Ellen MacArthur Foundation in promoting more sustainable materials. It is concluded that, although both polymers have industrial relevance, PET proves to be technically more suitable in terms of food safety, recyclability, and reduced environmental impact, consolidating itself as the preferred alternative for consumer packaging.

Keywords: polymers; PET; PVC; sustainability; life cycle; recycling; reprocessing; environmental impacts; Ellen MacArthur.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Polímeros mais representativos	14
Quadro 2 - Propriedades Físico Química	25
Quadro 3 - Processabilidade e Desempenho	26
Quadro 4 - Barreira e Estabilidade Térmica	26
Quadro 5 - Reciclabilidade e Sustentabilidade	26
Quadro 6 - Segurança Alimentar e toxicidade	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV Análise do Ciclo de Vida

CO₂ Dióxido de Carbono

DMT Dimetiltereftalato

EG Etilenoglicol

EMF Ellen MacArthur Foundation

EPA Environmental Protection Agency

HCl Ácido Clorídrico

NIR Near Infrared (Infravermelho Próximo)

ONU Organização das Nações Unidas

PCR Post-Consumer Recycled (Reciclado Pós-Consumo)

PCBs Policlorobifenilos

PEAD Polietileno de Alta Densidade

PET Polietileno Tereftalato

PP Polipropileno

PS Poliestireno

PTA Ácido Tereftálico Purificado

PTFE Politetrafluoretileno

PVC Policloreto de Vinila

rPET PET Reciclado (Polietileno Tereftalato Reciclado)

RRC Reutilizáveis / Recicláveis / Compostáveis

SSP Solid-State Polymerization (Polimerização em Estado Sólido)

UNEP United Nations Environment Programme

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 JUSTIFICATIVA	10
1.2 OBJETIVOS GERAIS	10
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 DIFERENTES TIPOS DE PLÁSTICOS.....	13
2.2 ESTRUTURA E MATÉRIA PRIMA.....	14
2.3 FUNCIONALIDADES E APLICAÇÕES.....	15
2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS E DESAFIOS DE SUSTENTABILIDADE	17
2.5 CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS PARA NOVAS TECNOLOGIAS.....	18
3 PVC (policloreto de vinila)	19
3.1 ESTRUTURA E PROPRIEDADES APLICADAS A EMBALAGENS.....	19
3.2 LIMITAÇÕES DO USO DE PVC EM EMBALAGENS.....	20
4 PET (Polietileno Tereftalato)	22
4.1 ESTRUTURA E PROPRIEDADES DO PET	22
4.2 USO DO PET EM EMBALAGENS	23
5 COMPARAÇÃO TÉCNICA ENTRE PET E PVC EM EMBALAGENS.....	25
6 PET VS PVC: COMPARATIVO TÉCNICO SOBA ÓTICA DA RECICLAGEM....	28
7 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV)	30
7.1 ACV PVC.....	30
7.2 ACV PET.....	31
8 METAS PARA REDUZIR O USO DE PVC EM EMBALAGENS.....	34
9 FUNDAÇÃO ELLEN MACARTHUR.....	36
9.1 EMF E A ABORDAGEM DO USO DE PVC e PET.....	37
10 ESTUDO DE CASO 1 – NESTLÉ BRASIL: SUBSTITUIÇÃO DE SLEEVES DE PVC E AMPLIAÇÃO DO USO DE RPET EM EMBALAGENS.....	38
11 ESTUDO DE CASO 2 – DANONE BRASIL: ELIMINAÇÃO DO PVC, <i>REDESIGN</i> DE EMBALAGENS E INTEGRAÇÃO DO RPET.....	40
12 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
13 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	44

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da indústria dos polímeros transformou profundamente a sociedade contemporânea, tornando os plásticos materiais essenciais para os setores de embalagens, construção civil, transporte, saúde e tecnologia. Dentre os polímeros sintéticos mais utilizados globalmente, destacam-se o politereftalato de etileno (PET) e o policloreto de vinila (PVC), ambos amplamente empregados na fabricação de embalagens devido às suas propriedades físico-químicas, versatilidade e baixo custo de produção. No entanto, a expansão do uso desses materiais também intensificou debates acerca dos impactos ambientais decorrentes de sua produção, consumo e descarte, principalmente em um cenário marcado pela crescente preocupação com a poluição plástica e com os limites dos modelos lineares de extração e descarte.

O avanço de políticas de sustentabilidade, associado ao fortalecimento da economia circular, tem incentivado a reavaliação crítica dos materiais utilizados na cadeia produtiva, especialmente aqueles de elevada persistência ambiental. Nesse contexto, comparar PET e PVC torna-se relevante não apenas sob a ótica técnico-industrial, mas também sob os aspectos regulatórios, toxicológicos e de gestão de resíduos. Enquanto o PET é reconhecido por seu elevado potencial de reciclagem em ciclo fechado, o PVC apresenta maior complexidade ambiental devido à presença de cloro em sua estrutura e à necessidade de aditivos potencialmente tóxicos, como plastificantes e estabilizantes na sua composição final.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar comparativamente através da Análise do Ciclo de Vida (ACV), as propriedades, aplicações, impactos ambientais do PET e do PVC, com foco no setor de embalagens. Para isso, são abordados aspectos históricos, estruturais e tecnológicos. O trabalho também discute tendências globais de regulação, iniciativas da economia circular e estratégias de substituição de materiais adotadas por empresas e órgãos internacionais.

A relevância desta investigação reside na necessidade de identificar alternativas que conciliam desempenho técnico com responsabilidade ambiental, contribuindo para decisões mais conscientes no desenvolvimento de materiais poliméricos e na formulação de políticas públicas voltadas à gestão sustentável de resíduos plásticos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A escolha por comparar o ciclo de vida do PET e do PVC justifica-se pela relevância desses polímeros dentro do setor de embalagens e pelos desafios ambientais associados ao seu uso. Embora ambos apresentem importância industrial consolidada, suas características químicas, rotas de reciclagem e impactos ao longo do ciclo de vida são substancialmente diferentes, o que influencia diretamente nas questões de sustentabilidade, saúde pública, segurança alimentar e políticas regulatórias.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

Comparar o politereftalato de etileno (PET) e o policloreto de vinila (PVC) por meio da Análise do Ciclo de Vida (ACV), avaliando suas propriedades físico-químicas, desempenho técnico, impactos ambientais, reciclabilidade e adequação às exigências de sustentabilidade no setor de embalagens.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar a origem, a evolução histórica e a estrutura dos dois polímeros, relacionando suas características às aplicações industriais;
- b) Avaliar as etapas que compõem o ciclo de vida de cada material, desde a obtenção da matéria-prima até o pós-consumo;
- c) Examinar a reciclabilidade do PET e do PVC, discutindo desafios técnicos, limitações e impactos ambientais associados;
- d) Investigar aspectos relacionados à segurança alimentar e à toxicidade, especialmente no que se refere à migração de compostos e à conformidade com normas regulatórias;
- e) Analisar tendências globais, políticas públicas e metas corporativas voltadas à redução do uso de PVC em embalagens e ao aumento do uso de rPET;
- f) Apresentar estudos de caso que evidenciem estratégias industriais voltadas à substituição de materiais e ao avanço da economia circular, permitindo sintetizar os resultados comparativos e formular recomendações técnicas fundamentadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os plásticos pertencem à ampla categoria dos polímeros, compostos formados por moléculas de grande massa, conhecidas como macromoléculas, constituídas pela repetição de pequenas unidades químicas, denominadas monômeros. Essa estrutura é responsável pelas propriedades que tornaram os polímeros tão importantes, como leveza, elasticidade, durabilidade e facilidade de moldagem. As características explicam o papel fundamental que tais materiais passaram a exercer na sociedade moderna, influenciando diretamente o desenvolvimento tecnológico e industrial (Marques, 2010).

Os polímeros podem ser classificados através de diferentes critérios, sendo um dos principais a sua origem. De acordo com essa divisão, há os naturais, encontrados na própria natureza, como o amido, a celulose, as proteínas, a borracha natural e os sintéticos, obtidos artificialmente por meio de processos industriais, geralmente a partir de compostos orgânicos derivados do petróleo (Santos, 2021). Dentre estes, destacam-se o polietileno, o poliestireno, o policloreto de vinila (PVC) e o polietileno tereftalato (PET), amplamente utilizados em embalagens, utensílios domésticos e equipamentos industriais. Outrossim, o avanço da engenharia química, de materiais, permitiu o desenvolvimento de polímeros com propriedades específicas, capazes de atender às exigências de diferentes segmentos produtivos tais como alta resistência mecânica, transparência e baixo custo (Marques, 2010).

Outra forma de classificação baseia-se no comportamento dos polímeros diante do calor, distinguindo-os em três grupos principais. Os termoplásticos amolecem quando aquecidos e podem ser moldados diversas vezes, retornando ao estado sólido ao esfriar. Os termorrígidos, por sua vez, tornam-se rígidos após moldagem, não podendo ser fundidos novamente. Já os elastômeros caracterizam-se por sua grande elasticidade e capacidade de deformação, sendo a borracha o exemplo mais conhecido. Dessa forma, vê-se que a estrutura molecular dos polímeros influencia diretamente suas propriedades físicas e a variedade de suas aplicações (Callister; Rethwisch, 2018).

Por volta do século I a.C., o âmbar, uma resina termoplástica proveniente da fossilização de secreções vegetais, passou a ser amplamente empregado na confecção de adornos (Bsognin Edir, 2012) e utensílios, configurando um exemplo primitivo de polímero natural moldável. Já no início do século I d.C., surgiram técnicas para o aquecimento e modelagem de chifres de animais, utilizadas na produção de pentes, botões e objetos domésticos, o que demonstra a habilidade humana em explorar e transformar substâncias orgânicas com propriedades semelhantes às dos plásticos modernos (Wiebeck; Harada, 2005).

O avanço significativo ocorreu no século XIX, quando o inventor Alexander Parkes apresentou, em 1862, a *Parkesine*, considerada o primeiro plástico sintético da história, obtido a partir da celulose tratada com ácido nítrico. Esse material representou um marco importante, pois inaugurou novas possibilidades de moldagem e produção em larga escala, abrindo caminho para o desenvolvimento da moderna indústria dos plásticos (Wiebeck; Harada, 2005).

No início do século XX, o químico belga Leo Hendrik Baekeland desenvolveu a baquelite (1907), o primeiro plástico totalmente sintético. Produzida a partir de fenol e formaldeído, apresenta elevada resistência térmica e propriedades isolantes, o que a tornou amplamente utilizada nas indústrias elétrica e automotiva. Em Portugal, sua produção iniciou-se em 1936 pela Sociedade Industrial de Produtos Eléctricos (SIPE), fundada por João Barbosa Corsino, o que simboliza a aproximação entre o meio científico e o setor industrial (Callapez, 2000).

A década de 1930 marcou uma fase de expansão da química dos polímeros, com o surgimento de materiais que revolucionaram o mercado. O policloreto de vinila (PVC) ganhou destaque na indústria elétrica e, posteriormente, nos setores da construção civil, embalagens e mobiliário. Paralelamente, o poliestireno passou a substituir materiais tradicionais como vidro e madeira em diversas aplicações (embalagens transparentes, frascos e recipientes descartáveis), enquanto o polietileno se popularizou na produção de sacolas, embalagens e recipientes, consolidando o uso doméstico do plástico (Callapez, 2002).

O polimetacrilato de metilo, conhecido como perspex, destacou-se como o primeiro “vidro orgânico” bem-sucedido, sendo amplamente empregado durante a Segunda Guerra Mundial na indústria aeronáutica e odontológica. Nesse mesmo período, surgiu o politetrafluoretileno (PTFE), ou teflon, inicialmente voltado a aplicações militares e posteriormente incorporado ao uso doméstico, especialmente em utensílios de cozinha. Dessa forma, é nítido como a década de 1940 foi decisiva para a consolidação dos plásticos e borrachas sintéticas como produtos de alta relevância comercial e tecnológica (Callapez, 2002).

Na década de 1950, novos avanços impulsionaram a diversificação dos polímeros. O polipropileno, sintetizado em 1954, destacou-se por sua resistência térmica e versatilidade, sendo amplamente utilizado em artigos domésticos e industriais. Poucos anos depois, em 1957, surgiram os policarbonatos, completando o grupo das principais famílias de plásticos conhecidas até hoje. A partir de então, a produção mundial de plásticos intensificou-se, refletindo o avanço científico e a demanda crescente da indústria moderna (Callapez, 2000).

Nas décadas seguintes, o rápido desenvolvimento tecnológico resultou em uma verdadeira explosão na criação de novos materiais e combinações poliméricas. Contudo, junto

ao progresso vieram também preocupações quanto ao destino e à degradação desses produtos. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas (ONU), são produzidas mais de 400 milhões de toneladas de plásticos por ano, o que equivale a cerca de 1 milhão de toneladas diárias. Desde a invenção do plástico, estima-se que já tenham sido fabricadas aproximadamente 8 bilhões de toneladas, número que evidencia tanto o impacto econômico quanto os desafios ambientais associados a esses materiais (ONU, 2023).

Dessa forma, compreende-se que a trajetória histórica dos plásticos reflete o próprio avanço tecnológico da humanidade, ao mesmo tempo em que expõe um paradoxo: o material que impulsionou a modernidade tornou-se também um dos maiores desafios ambientais contemporâneos. Assim, analisar comparativamente os impactos gerados por diferentes tipos de polímeros, como o PET e o PVC, mostra-se essencial para compreender suas distintas naturezas químicas, processos produtivos e consequências ecológicas.

2.1 DIFERENTES TIPOS DE PLÁSTICOS

Os plásticos englobam uma ampla gama de materiais poliméricos formados a partir da polimerização de monômeros orgânicos. Sua versatilidade, leveza e baixo custo de produção os tornaram indispensáveis em praticamente todos os setores industriais. Além disso, a diversidade estrutural dos polímeros permite ajustar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas conforme a aplicação desejada, o que explica sua presença em segmentos como embalagens, construção civil, transporte, medicina e tecnologia da informação (Wibeck; Harada, 2005).

Desde a consolidação da indústria petroquímica no século XX, os plásticos tornaram-se pilares do desenvolvimento econômico e tecnológico mundial. Eles substituíram materiais tradicionais como vidro, madeira e metal (em embalagens transparentes, utensílios descartáveis, embalagens alimentícias) por apresentarem maior eficiência energética na produção e versatilidade no *design* de produtos, tornando-se essenciais à manufatura moderna e ao avanço de tecnologias emergentes como a impressão 3D e os compósitos de engenharia. Entretanto, a expansão do consumo também trouxe desafios ambientais e sociais, impulsionando pesquisas voltadas à reciclagem e aos polímeros biodegradáveis, principalmente no Brasil, onde há crescimento na área de engenharia de materiais e sustentabilidade polimérica (Hopewell; Dvorak; Kosior, 2009).

O Quadro 1 apresenta alguns dos polímeros mais representativos, suas matérias-primas e principais aplicações:

Quadro 1 : Cadeia dos polímeros

Monômero	Polímero	Aplicações
$n \begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{H} \end{array}$ <p>Etileno</p>	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$ <p>Polietileno</p>	Sacolas plásticas e garrafas
$n \begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{CH}_3 \end{array}$ <p>Propileno</p>	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$ <p>Polipropileno</p>	Embalagens rígidas, tampas
$n \begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$ <p>Estireno</p>	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$ <p>Poliestireno</p>	Copos descartáveis, embalagens rígidas
$n \begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{Cl} \end{array}$ <p>Cloreto de vinila</p>	$\left(\begin{array}{cc} \text{F} & \text{F} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array} \right)_n$ <p>Policloreto de Vinila (PVC)</p>	Tubulações

Fonte: dos autores

2.2 ESTRUTURA E MATÉRIA-PRIMA

Como já visto anteriormente, os polímeros são macromoléculas formadas pela repetição de unidades estruturais denominadas monômeros. A disposição dessas cadeias e o grau de cristalinidade influenciam diretamente nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais. Vê-se que, conforme sua estrutura molecular e o tipo de ligação presente, podem

apresentar diferentes níveis de resistência, flexibilidade e estabilidade térmica, o que explica sua ampla utilização na indústria moderna (Spinacé; De Paoli, 2005).

O polietileno de alta densidade (PEAD) possui estrutura semicristalina, composta por regiões ordenadas responsáveis pela resistência mecânica e regiões amorfas que garantem flexibilidade. Destaca-se por sua excelente resistência química, estabilidade térmica e baixo custo de produção, sendo amplamente empregado em embalagens rígidas, recipientes industriais e tubulações (Canevarolo, 2010).

O polipropileno (PP), também semicristalino, apresenta baixa densidade e elevada rigidez, aliadas à resistência a impactos e temperaturas mais elevadas em comparação ao PEAD. Vê-se que tais características tornam o PP ideal para aplicações que exigem leveza e durabilidade, como componentes automotivos, utensílios domésticos e embalagens termoformadas (Santiago, 2020).

O politereftalato de etileno (PET) é resultante da polimerização entre o ácido tereftálico e o etilenoglicol, apresentando igualmente fases amorfas e cristalinas. O PET destaca-se pela resistência mecânica, transparência, estabilidade térmica e excelente barreira contra odores e gases, o que justifica seu uso em embalagens alimentícias e produtos industriais (Santiago, 2020).

O policloreto de vinila (PVC), obtido a partir do monômero de cloreto de vinila, recebe aditivos como plastificantes, estabilizantes e pigmentos que ampliam sua versatilidade. O PVC é um material leve, durável e resistente a agentes químicos, fungos e bactérias. Vê-se que, conforme o tipo de formulação, o PVC pode apresentar rigidez ou flexibilidade, sendo empregado em perfis de esquadrias, tubulações e revestimentos diversos (Vinhas, 2005).

Dessa forma, verifica-se que a estrutura molecular e o processo de obtenção de cada polímero são determinantes para definir suas propriedades e desempenho técnico. Assim, a compreensão das características químicas e morfológicas desses materiais não apenas esclarece suas diferenças, mas também fundamenta sua escolha em contextos industriais específicos.

2.3 FUNCIONALIDADES E APLICAÇÕES

As particularidades estruturais de cada polímero definem seu desempenho técnico e, por consequência, suas áreas de aplicação industrial. Vê-se que a relação entre cristalinidade, densidade, resistência térmica e comportamento mecânico determina a funcionalidade de cada material no mercado, justificando seu uso em segmentos tão distintos quanto embalagens,

automotivo, construção civil e até tecnologias emergentes como a manufatura aditiva (Sperling, 2006).

O polietileno de alta densidade (PEAD) destaca-se pela baixa densidade, elevada resistência química e boa processabilidade, fatores que sustentam seu emprego em embalagens rígidas, frascos para produtos de limpeza, tampas, dutos, brinquedos e peças automotivas. Devido à sua leveza, o PEAD pode flutuar, o que amplia sua utilidade em dispositivos náuticos e flutuadores. Sua presença crescente em filamentos para impressão 3D demonstra uma expansão tecnológica em andamento, ainda que com limitações de aderência entre camadas (Canevarolo, 2010).

O polipropileno (PP), por sua vez, é reconhecido pela elevada durabilidade e excelente resistência à fadiga, sendo o único polímero capaz de formar tampas articuladas do tipo dobradiça sem fissuras estruturais. É amplamente utilizado em embalagens alimentícias, utensílios domésticos, componentes eletrônicos, produtos hospitalares até peças automotivas sujeitas a impactos moderados. Também vem ganhando espaço na manufatura aditiva, especialmente em peças que exigem leveza e rigidez simultâneas (Rodrigues, 2018).

O politereftalato de etileno (PET) é aplicado majoritariamente na produção de embalagens transparentes, garrafas de bebidas carbonatadas, filmes alimentícios e fibras têxteis. Vê-se que sua elevada resistência ao impacto, estabilidade dimensional e baixa permeabilidade a gases justificam seu amplo uso no setor alimentício. Além disso, o PET apresenta boa reciclabilidade, podendo ser reprocessado por extrusão em faixas térmicas específicas entre 210 °C e 245 °C, sem perda significativa de desempenho (Spinacé; De Paoli, 2005).

O policloreto de vinila (PVC) possui uma das maiores versatilidades funcionais entre os polímeros analisados, devido à possibilidade de obter formulações rígidas ou flexíveis (Canevarolo, 2010). É amplamente empregado em tubulações hidráulicas, revestimentos de cabos elétricos, pisos, perfis de esquadria, bolsas de sangue, brinquedos e cartões magnéticos. Sua resistência a agentes químicos, fungos e intempéries sustenta seu uso prolongado na construção civil e no setor médico-hospitalar (Wypych, 2015).

Dessa forma, verifica-se que as funcionalidades e aplicações dos polímeros analisados decorrem diretamente de sua estrutura molecular e propriedades derivadas. Essa compreensão é essencial para a correta seleção de materiais em contextos técnicos e industriais. No subtópico 2,4 a seguir, serão abordados as propriedades físicas e os métodos de identificação desses polímeros, permitindo correlacionar suas características visuais, térmicas e mecânicas com as aplicações aqui apresentadas.

2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS E DESAFIOS DE SUSTENTABILIDADE

O desenvolvimento e a utilização em larga escala de polímeros sintéticos trouxeram benefícios industriais significativos, mas também resultaram em preocupações ambientais expressivas. Termoplásticos como PEAD, PP e PET apresentam a vantagem de serem recicláveis por remoldagem térmica; contudo, a reciclagem enfrenta limitações práticas, como contaminação, mistura de resinas, perda de propriedades mecânicas e baixa taxa de retorno pós-consumo. Além disso, o descarte inadequado, aliado à alta durabilidade desses materiais, contribui para a persistência de resíduos plásticos em ecossistemas terrestres e aquáticos (Spinacé, 2005).

O polipropileno (PP), embora amplamente utilizado por sua resistência térmica e química, apresenta baixa degradação natural, o que prolonga seu tempo de permanência no ambiente. Soma-se a isso o fato de que sua cadeia de reciclagem ainda é pouco consolidada no Brasil, o que reduz sua taxa de reaproveitamento industrial e amplia sua contribuição para o volume de resíduos descartados em aterros ou cursos d'água (Spinacé, 2005).

O politereftalato de etileno (PET), embora largamente reciclável, também gera preocupações ambientais. A produção contínua de embalagens descartáveis e a fragmentação do material ao longo do tempo favorecem a formação de microplásticos, que alcançam cadeias alimentares e sistemas hídricos. Além disso, sua reciclagem demanda elevado consumo energético nas etapas de coleta, triagem, lavagem e reprocessamento, o que reduz parte do benefício ambiental esperado da reutilização (Spinacé, 2005).

O policloreto de vinila (PVC) como já falado anteriormente neste trabalho é um polímero com maior impacto ambiental, tendo em sua composição alguns compostos à base de metais pesados, como o chumbo, podem contaminar o solo e os recursos hídricos após o descarte inadequado, dificultando sua reciclagem e aumentando os riscos toxicológicos associados. Assim, o PVC figura entre os polímeros de maior complexidade para destinação ambientalmente adequada (Sant'ana, s.d.).

Paralelamente aos efeitos ecológicos, a gestão de resíduos poliméricos envolve desafios sociais e econômicos, como a baixa valorização da reciclagem no mercado, a dependência de cooperativas para triagem manual, a escassez de políticas públicas efetivas de logística reversa e os altos custos energéticos e operacionais envolvidos no reaproveitamento de materiais. Esses fatores demonstram que a sustentabilidade dos polímeros não depende exclusivamente da sua reciclabilidade, mas da viabilidade sistêmica de todo o ciclo produtivo.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de soluções que transcendam o modelo tradicional de produção, uso e descarte, incorporando novas abordagens tecnológicas para mitigação dos impactos ambientais.

2.5 CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS PARA NOVAS TECNOLOGIAS

A aplicação de polímeros em tecnologias emergentes demanda o aperfeiçoamento de parâmetros de processamento, formulações e propriedades materiais. Na manufatura aditiva, por exemplo, o uso de polímeros semicristalinos como PEAD e PP exige controle preciso das temperaturas de extrusão e da mesa aquecida, a fim de evitar retração, delaminação e falhas de adesão entre camadas. Tais desafios demonstram que a adoção desses materiais na impressão 3D ainda requer avanços em engenharia de processo e otimização de desempenho (Sant'ana, 2018).

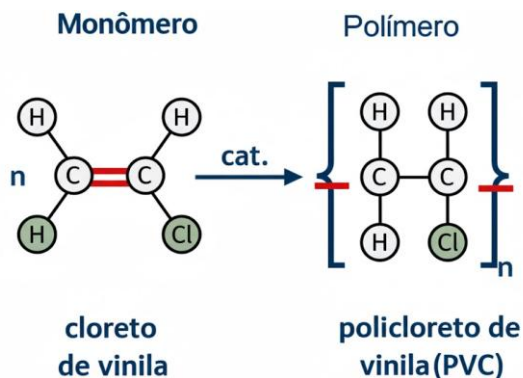
Outra vertente tecnológica em expansão é o desenvolvimento de novos materiais poliméricos, como biopolímeros, blendas funcionais e nanocompósitos, que buscam conciliar desempenho mecânico, processabilidade e menor impacto ambiental. A incorporação de cargas, aditivos inteligentes ou reforços nanotecnológicos tem permitido obter polímeros com maior resistência térmica, barreira a gases e biodegradabilidade controlada, ampliando o escopo de aplicações em setores como embalagens, medicina e construção civil (DaSilva, 2018).

Dessa forma, verifica-se que a inovação no campo dos polímeros depende da integração entre pesquisa científica, engenharia de materiais e necessidade industrial, superando limitações de desempenho, reciclabilidade e processamento. As tecnologias emergentes não substituem os materiais tradicionais de forma imediata, mas apontam para um avanço gradual em direção a sistemas produtivos mais eficientes, específicos e sustentáveis (Spinacé, 2005).

3 PVC (POLICLORETO DE VINILA)

O polímero PVC (policloreto de vinila) constitui um material termoplástico amplamente utilizado em diversos segmentos industriais, sendo caracterizado por sua versatilidade, baixo custo e adaptabilidade de formulação. Conforme a Figura 1, é um material obtido pela polimerização do monômero cloreto de vinila ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$), resultando em uma cadeia polimérica composta por unidades repetitivas de $-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$. Essa estrutura contém cerca de 57% de cloro e 43% de carbono e hidrogênio, o que confere ao PVC características diferenciadas em relação a outros plásticos, como alta resistência química, e estabilidade térmica (Lewandowski; Skórzewska, 2022).

Figura 1 – Esquema da reação de polimerização do cloreto de vinila para formação de PVC.



Fonte: imagem adaptada pelos autores de G. S. Park (1969).

3.1 ESTRUTURA E PROPRIEDADES DO PVC APLICADAS A EMBALAGENS

O processo de obtenção do PVC ocorre, geralmente, por polimerização em suspensão, emulsão ou massa, utilizando peróxidos como iniciadores. A escolha do método de polimerização influencia diretamente características como tamanho das partículas, pureza e propriedades finais do produto. O PVC em suspensão (S-PVC) é o tipo mais comum, sendo amplamente utilizado em aplicações rígidas, como tubos, perfis e embalagens termo formadas. Já o PVC em emulsão (E-PVC) é empregado em revestimentos, filmes e produtos flexíveis (Pearson, 1982).

Quimicamente, o PVC é um polímero polar, devido à presença do átomo de cloro em sua cadeia principal. Essa polaridade confere alta coesão intermolecular, tornando o material mais rígido e denso. No entanto, a incorporação de aditivos químicos, como plastificantes

(ftalatos e adipatos), transforma o PVC em um material flexível, possibilitando seu uso em filmes, tampas e embalagens maleáveis. Comercialmente, o PVC é encontrado em duas formas principais:

PVC rígido (RPVC): não contém plastificantes, apresenta alta resistência mecânica e boa transparência.

PVC plastificado (flexível): contém aditivos que reduzem a rigidez, aumentando a flexibilidade e elasticidade (Ding *et al.*, 2023).

O uso de aditivos é essencial, pois o PVC puro possui baixa utilidade prática, degradando-se rapidamente em temperaturas superiores a 160 °C, típicas de seu processamento. Entre todos os tipos de plásticos, o PVC é o que demanda maior quantidade de aditivos, com utilização de cerca de 73% de aditivos em sua composição (Napierska, 2024).

No contexto das embalagens, o PVC é tradicionalmente utilizado em filmes termoencolhíveis, tampas seladoras e películas de contato com alimentos. Na Europa, aproximadamente 185.000 toneladas de resina PVC destinam-se anualmente a essas aplicações (Napierska, 2024). Sua versatilidade, transparência e facilidade de processamento tornam o PVC adequado para aplicações que exigem desempenho técnico e boa aparência visual.

Contudo, o uso do PVC em embalagens tem sido alvo de debates relacionados à sustentabilidade e aos impactos ambientais. A presença de aditivos como plastificantes, estabilizantes e pigmentos pode dificultar a reciclagem e gerar substâncias tóxicas durante a degradação térmica ou incineração.

3.2 LIMITAÇÕES DO USO DO PVC EM EMBALAGENS

O uso do PVC em embalagens apresenta desafios significativos que vão além das limitações técnicas. Esse material depende de uma quantidade elevada de aditivos, e em embalagens de contato alimentar, foram identificadas mais de 400 substâncias diferentes em produtos de PVC, evidenciando a complexidade química e os potenciais riscos associados ao seu consumo (Napierska, 2024).

Além disso, a migração de plastificantes, estabilizantes e outros aditivos para os alimentos durante o contato, pode comprometer a segurança alimentar e a saúde humana. Essa preocupação tem levado órgãos reguladores da União Europeia a solicitar a substituição ou mesmo a proibição do PVC em embalagens alimentícias, demonstrando a seriedade do problema (Scheuchzer, 2023).

Outro desafio crítico é a reciclagem do PVC pós-consumo, que se mostra extremamente complexa. A mistura de diferentes formulações e fluxos de resíduos dificulta a separação eficiente do material, fazendo com que grande parte do PVC de embalagens de vida curta seja destinada a aterros sanitários ou incineradores, comprometendo a sustentabilidade e reforçando seu caráter problemático dentro da economia circular (Napierska, 2024).

4 PET (POLIETILENO TEREFALATO)

O Polietileno Tereftalato (PET) é um tipo de plástico da família dos poliésteres, muito usado na fabricação de embalagens, especialmente garrafas e potes. Ele é produzido pela reação entre o ácido tereftálico (ou seu derivado, o dimetil tereftalato) e o etilenoglicol, formando longas cadeias de ésteres. Essa estrutura química confere ao PET boa resistência mecânica, rigidez e estabilidade térmica, o que o torna ideal para aplicações que exigem durabilidade e proteção do produto (Raj *et al.*, 2023).

4.1 ESTRUTURA E PROPRIEDADES DO PET

Conforme a Figura 2 é possível observar que o PET pode se apresentar em duas formas principais: amorfa e semicristalina, dependendo das condições de processamento. Na forma amorfa, o material é transparente, apresenta boa barreira a gases e umidade e alta processabilidade, sendo amplamente empregado em garrafas de bebidas, filmes flexíveis e recipientes para alimentos que requerem visibilidade do conteúdo. Em contraste, a forma semicristalina confere ao polímero opacidade, maior resistência mecânica, estabilidade dimensional e térmica, sendo utilizada em embalagens que demandam maior rigidez e resistência a altas temperaturas, como potes para alimentos e peças técnicas (Polymers, 2024).

A cristalização do PET é fortemente influenciada por fatores como a temperatura de resfriamento, taxa de estiramento durante o processamento, tempo de resfriamento e presença de nucleantes ou outros aditivos. O controle da morfologia cristalina permite otimizar propriedades essenciais, incluindo resistência mecânica, barreira a gases e líquidos, transparência, resistência ao impacto e processabilidade, sendo crítico em aplicações que exigem desempenho consistente e confiável (Polymers, 2024).

Além de suas propriedades estruturais, o PET apresenta alta resistência à tração, resistência ao impacto, baixo peso específico, resistência química a ácidos e álcalis e boa estabilidade dimensional, tornando-o ideal para armazenamento, transporte e conservação de alimentos e bebidas. O polímero também é compatível com processos de esterilização e acondicionamento sob condições adversas, como altas temperaturas e variações de pressão.

Outro ponto relevante é a reciclabilidade do PET. Ele é amplamente reciclável por métodos mecânicos e químicos, contribuindo para a redução de resíduos plásticos e promovendo economia circular. Como é visto na Figura 3, as garrafas e embalagens de PET

reciclado (rPET) podem ser reintegradas à cadeia de produção de novos produtos, alinhando-se às demandas atuais por sustentabilidade e responsabilidade ambiental (Raj *et al.*, 2023).

Figura 2: Ciclo de reciclagem “garrafa-para-garrafa” do PET dentro da economia circular.



Fonte: adaptada pelos autores de Pinter *et al.* (2021).

4.2 USO DO PET EM EMBALAGENS

O PET é amplamente empregado na fabricação de embalagens rígidas e flexíveis, especialmente em garrafas para bebidas carbonatadas, águas minerais, sucos, lácteos e óleos comestíveis. Sua popularidade se deve à combinação de transparência, leveza, resistência e barreira a gases, características essenciais para a preservação da qualidade dos produtos (Marcelino; Gomes; Marangoni Júnior, 2025). O processo de conformação do PET em embalagens pode ocorrer por injeção, sopro ou injeção-sopro como visto na Figura 4, permitindo a criação de frascos com geometrias complexas e alto desempenho mecânico. Essas técnicas também possibilitam a produção de embalagens mais leves, contribuindo para a redução de custos logísticos e ambientais (Raj *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, observa-se um aumento significativo no uso do PET reciclado pós-consumo (rPET) em embalagens, especialmente no setor alimentício. Segundo Marcelino, Gomes e Marangoni Júnior (2025), o rPET tem se mostrado seguro para contato com alimentos, desde que os processos de reciclagem garantam a remoção de contaminantes e o controle adequado de substâncias migrantes. Essa prática está em conformidade com diretrizes internacionais de segurança alimentar e com os princípios de sustentabilidade e economia circular.

Entretanto, alguns estudos alertam para a necessidade de controle rigoroso durante o reprocessamento do material, pois substâncias de risco, como antimônio e acetaldeído, podem

migrar do PET reciclado para o alimento, dependendo das condições de processamento e uso (Agricultural, 2025). Assim, o avanço tecnológico e a melhoria dos sistemas de triagem e descontaminação são fundamentais para garantir a qualidade do rPET destinado a embalagens alimentícias.

Figura 3: Fluxograma do processo de fabricação de garrafas de PET por injeção e sopro.



Fonte: adaptada pelos autores de “The block diagram of the PET bottle production process” (Bal-dowska-Witos *et al.*, 2021).

Além disso, pesquisas recentes destacam que o PET, quando inadequadamente descartado, pode contribuir para a formação de microplásticos no ambiente, impactando ecossistemas aquáticos e terrestres (Environmental Chemistry Letters, 2025). Por essa razão, políticas de reciclagem e reaproveitamento têm sido amplamente incentivadas para mitigar esses efeitos e promover uma cadeia produtiva mais sustentável.

5 COMPARAÇÃO TÉCNICA ENTRE PET E PVC EM EMBALAGENS

Para a realização da comparação técnica entre PET e PVC em embalagens, com base na revisão dos tópicos 2, 3 e 4, foram elaborados seis quadros que sintetizam os principais critérios técnicos relacionados ao PET e ao PVC.

O Quadro 2 apresenta as propriedades físico-químicas dos dois polímeros, permitindo compreender como diferenças estruturais e térmicas influenciam o comportamento de cada material. Na sequência, o Quadro 3 reúne dados sobre processabilidade e desempenho, destacando parâmetros industriais relevantes, como condições de processamento e resistência mecânica, que auxiliam na avaliação do desempenho operacional de cada um.

O Quadro 4, reúne informações referentes às propriedades de barreira e à estabilidade térmica, aspectos fundamentais para aplicações que envolvem contato com alimentos e necessidade de proteção contra variações ambientais. Complementando essa análise, o Quadro 5 aborda a reciclabilidade e a sustentabilidade dos materiais, evidenciando o desempenho ambiental de cada polímero, seus potenciais de reaproveitamento e as limitações associadas ao ciclo de vida.

Considerando a importância do uso seguro em sistemas de embalagem, o Quadro 6 apresenta dados relacionados à segurança alimentar, incluindo conformidade com normas sanitárias e possíveis riscos de migração de compostos. Por fim, a Tabela 7 reúne informações sobre toxicidade, discutindo a presença de aditivos, a liberação de substâncias potencialmente nocivas e os impactos associados ao uso e descarte.

Quadro 2: Propriedades Físico-Químicas.

Propriedade	PET	PVC
Estrutura química	Poliéster linear (-CO-C ₆ H ₄ -CO-O-CH ₂ - CH ₂ -O-)	Polímero de cloreto de vinila, linear
Densidade (g/cm³)	1,38	1,30-1,45
Temperatura de transição vítrea (T_g)	70-80 °C	75-85 °C
Temperatura de fusão / decomposição	245-260 °C	Decomposição acima de 140 °C
Cristalinidade	Amorfo ou semicristalino	Baixa a moderada; depende do plastificante

Fonte: Elaborada pelos Autores (2025)

Quadro 3: Processabilidade e Desempenho.

Aspecto	PET	PVC
Principais processos	Injeção-sopro (ISBM), termoformagem	Extrusão, calandragem, sopro limitado
Limites de aplicação	Bebidas carbonatadas, líquidos pasteurizados	Filmes para alimentos secos, farmacêuticos
Transparência	Alta	Moderada
Controle de barreira	Alta, ajustável via cristalização	Limitada; sensível à plastificação

Fonte: Elaborada pelos Autores (2025)

Quadro 4: Barreiras e Estabilidade Térmica.

Propriedade	PET	PVC
Barreira a O₂	1–2 cm³·m⁻²·d⁻¹·atm⁻¹	3–5 cm³·m⁻²·d⁻¹·atm⁻¹
Barreira a CO₂	Excelente	Ruim
Propriedade	PET	PVC
Barreira a H₂O	Moderada	Boa em PVC plastificado, mas reduz rigidez
Estabilidade térmica	Até 260 °C	Até 140 °C

Fonte: Elaborada pelos Autores (2025)

Quadro 5: Reciclabilidade e Sustentabilidade.

Aspecto	PET	PVC
Reciclabilidade	Alta (rPET), ciclo fechado “garrafa-para-garrafa”	Limitada; plastificantes dificultam reciclagem
Impacto ambiental	Baixo; integração em economia circular	Alto se incinerado; liberação de dioxinas

Fonte: Elaborada pelos Autores (2025)

Quadro 6: Segurança Alimentar e Toxicidade.

Aspecto	PET	PVC
Migração de monômeros	Baixa; quimicamente inerte	Plastificantes podem migrar para alimentos gordurosos
Esterilização/ pasteurização	Suporta altas temperaturas	Limitado; deformação acima de 60–70 °C
Uso em contato direto com alimentos	Seguro	Restrito; melhor em filmes secundários ou rótulos
Risco ambiental	Microplásticos se descartado inadequadamente	Risco de cloretos e dioxinas na incineração

Fonte: Elaborada pelos Autores (2025)

A análise das tabelas evidencia que o PET apresenta superioridade técnica em aplicações de embalagens para bebidas carbonatadas, líquidos perecíveis e produtos que requerem barreira elevada a gases. Sua rigidez mecânica, estabilidade térmica e transparência permitem envase de líquidos quentes e pasteurizados, além de favorecer a percepção de qualidade do produto pelo consumidor.

Em contrapartida, o PVC destaca-se em filmes flexíveis, oferecendo alta flexibilidade e resistência química, mas com limitações em barreira a gases, estabilidade térmica e segurança alimentar. A presença de plastificantes e estabilizantes aumenta o risco de migração para alimentos, o que restringe seu uso em contato direto com líquidos ou alimentos perecíveis.

Do ponto de vista ambiental, o PET apresenta vantagens significativas, pois é altamente reciclável e compatível com economia circular, possibilitando a produção de rPET. O PVC, devido à dificuldade de reciclagem e potencial de geração de dioxinas e cloretos tóxicos, possui menor compatibilidade com sustentabilidade e exige gerenciamento rigoroso de resíduos. A escolha do polímero deve considerar tipo de produto, barreira exigida, estabilidade térmica, impacto ambiental e requisitos de segurança alimentar, sendo o PET preferido em aplicações que demandam desempenho técnico e sustentabilidade, enquanto o PVC é limitado a embalagens especializadas e filmes flexíveis.

6 PET VS PVC: COMPARATIVO TÉCNICO SOB A ÓTICA DA RECICLAGEM

O comportamento dos polímeros frente aos processos de reciclagem está intimamente ligado à sua estrutura química, estabilidade térmica e composição aditiva. O PET apresenta elevado potencial de reciclagem em ciclos fechados (ciclo garrafa-para-garrafa”) e o PVC demonstra fortes restrições técnicas, ambientais e regulatórias para reinserção sustentável em ciclos de produção.

O PET é um poliéster termoplástico semicristalino, com cadeias lineares formadas por unidades repetitivas de tereftalato e etilenoglicol. Essa estrutura confere-lhe alta estabilidade térmica, resistência química e ausência de halogênios, fatores que favorecem tanto a reciclagem mecânica quanto os processos químicos avançados de depolimerização. Na reciclagem mecânica, o PET é lavado, moído e reprocessado por extrusão; entretanto, sofre degradação de cadeia por hidrólise e oxidação térmica, reduzindo seu peso molecular e afetando propriedades ópticas e mecânicas. Esse fenômeno limita o número de ciclos e exige o uso de aditivos estabilizantes ou processos de *solid-state polymerization* (Estado sólido de Polimerização - SSP) para restauração da viscosidade intrínseca (Guo *et al.*, 2025).

Além disso, avanços recentes em reciclagem química do PET têm mostrado potencial para ciclos fechados com rendimento elevado. Por exemplo, estudos apontam a depolimerização usando solventes eutéticos, líquidos iônicos, catalisadores metálicos ou metal-orgânicos, resultando em recuperação de TPA (ácido tereftálico) e EG (etilenoglicol) com altas taxas de conversão. Guo *et al.* (2025) observaram que tecnologias emergentes permitem rendimentos acima de 90 % sob condições otimizadas.

De acordo com Al-Salem *et al.* (2022), o PET é o polímero mais reciclado do mundo, representando aproximadamente 55% de todas as embalagens plásticas recicladas globalmente. O desenvolvimento do rPET (PET reciclado) permite reincorporação em novas embalagens de alimentos e bebidas, algo que ainda não é amplamente possível com o PVC

Por outro lado, o PVC é um polímero vinílico que contém aproximadamente 57% em massa de cloro. Sua estrutura, quando submetida a temperaturas acima de 140 °C, sofre desidrocloração autocatalítica, liberando HCl gasoso e gerando cadeias insaturadas (polienos conjugados), o que resulta em escurecimento, perda de estabilidade e liberação de compostos tóxicos. Esse comportamento térmico inviabiliza a reciclagem mecânica convencional por extrusão múltipla, e a presença de plastificantes, estabilizantes metálicos e pigmentos torna o fluxo de resíduos extremamente heterogêneo. Em consequência, a reciclagem do PVC se

restringe a aplicações de baixo valor agregado ou a processos de *downcycling*, nos quais o material é reaproveitado em perfis, tubos ou tapetes industriais (Hill *et al.*, 2024).

Do ponto de vista de compatibilidade entre polímeros, a presença de PVC em correntes de reciclagem de PET é um dos principais contaminantes críticos. Mesmo pequenas quantidades (50–100 ppm) de PVC podem degradar o PET durante a fusão, gerando HCl e catalisando reações de hidrólise e degradação de cadeia, resultando em perda de transparência e coloração amarelada (Marcelino *et al.*, 2025). Por essa razão, processos industriais de reciclagem de PET incorporam etapas de triagem ótica por infravermelho (NIR) ou detecção por densidade diferencial, garantindo a separação completa de PVC antes da extrusão.

Em contrapartida, os processos de reciclagem química do PVC permanecem limitados pela geração de compostos clorados e pela dificuldade de estabilização térmica durante a pirólise. A degradação do PVC produz HCl e cloro orgânico, que podem formar dioxinas e furanos, substâncias altamente tóxicas e de persistência ambiental. Isso obriga à implementação de sistemas de captura e neutralização, tornando o processo economicamente inviável em larga escala (Hill *et al.*, 2024).

No contexto ambiental, o PET apresenta balanço energético mais favorável: sua reciclagem mecânica consome até 60 % menos energia que a produção virgem, e o rPET tem potencial de reduzir emissões de CO₂ em até 2,5 t por tonelada reciclada. Já o PVC, devido à presença de cloro e aditivos, enfrenta desafios no fim de vida, incluindo riscos de liberação de compostos tóxicos durante incineração e menor aceitação em programas de reciclagem pós-consumo (Ecosty, 2024). Além disso, políticas de restrição europeias e ISO 15270 desestimulam o uso de PVC em embalagens alimentícias, reforçando sua substituição por polímeros mais compatíveis com a economia circular, como PET, PP e PEAD.

7 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV)

Considerando todas as informações apresentadas anteriormente sobre o PET e o PVC, torna-se fundamental realizar uma análise do ciclo de vida completo de ambos os materiais. Essa abordagem permite comparar de maneira detalhada os impactos ambientais associados a cada um, desde a extração das matérias-primas até a destinação final dos produtos. Com esse estudo, é possível identificar diferenças significativas nos impactos ambientais e subsidiar decisões mais sustentáveis quanto ao uso desses polímeros.

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) constitui uma metodologia sistemática destinada a mensurar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de todas as etapas de sua existência. Essa abordagem abrange desde a extração das matérias-primas, passando pelas fases de processamento, fabricação, distribuição e uso, até sua destinação final ou eventual reaproveitamento (R1 Higiene, S.D).

Segundo a EPA (*Environmental Protection Agency, 2006*), a ACV é uma ferramenta de avaliação holística que permite identificar fluxos de energia, emissões e resíduos ao longo de todo o ciclo produtivo, contribuindo para decisões técnicas mais sustentáveis. Nessa perspectiva, a aplicação da ACV aos polímeros torna-se relevante diante da ampla utilização de plásticos e das consequências ambientais associadas ao seu descarte inadequado.

7.1 ACV DO PVC

O ciclo de vida do PVC tem início na etapa de produção, baseada na combinação de recursos fósseis e minerais. O polímero é obtido a partir da reação entre o etileno (derivado do petróleo) e o cloro resultante da eletrólise do cloreto de sódio. Dessa interação, forma-se o monômero cloreto de vinila (VCM), posteriormente polimerizado. Após a síntese, a resina de PVC passa por formulação com aditivos (plastificantes, estabilizantes, pigmentos etc.), que conferem diferentes propriedades físicas e ampliam seu campo de aplicação. A versatilidade do PVC permite sua utilização em produtos de longa vida útil, com durabilidade que pode variar entre 15 e 100 anos, como tubos, perfis e revestimentos, devido à resistência mecânica, baixa inflamabilidade e tolerância à umidade e radiação UV (Vinyplus, 2016).

Entretanto, as etapas de produção e transformação do PVC geram impactos ambientais expressivos. A síntese do monômero cloreto de vinila e do etileno dicloro pode liberar compostos organoclorados tóxicos, como dioxinas, furanos e PCBs, além de resíduos perigosos

estimados em cerca de um milhão de toneladas por ano. Outra etapa crítica ocorre na formulação final, na qual são adicionados plastificantes, sendo os ftalatos os mais recorrentes devido à função de flexibilizar o polímero (Fonseca,2004).

No estágio pós-consumo, a degradação do PVC ocorre em duas fases principais: (1) desidrocloração, em que há liberação de HCl e formação de estruturas conjugadas; e (2) condensação e fragmentação, com início da volatilização do material. Estudos demonstram que a taxa de degradação depende tanto das condições térmicas quanto da massa do polímero, sendo frequentemente observada por escurecimento, fissuração e alteração superficial. Pesquisas também relatam colonização microbiana posterior, evidenciando a progressão do processo de biodegradação (Pok *et. al.*, 2025).

A reciclagem do PVC pós consumo se torna complexa, cara e na maioria das vezes inviável, o que acarreta um ciclo de vida ainda mais prejudicial ao meio ambiente.

A diversidade de aditivos presentes na formulação do PVC, como plastificantes, estabilizantes térmicos, pigmentos e outros modificadores, dificulta a padronização dos processos de reciclagem. Além disso, a possível liberação de compostos tóxicos, especialmente substâncias cloradas geradas durante a degradação ou processamento inadequado, pode contaminar o material reciclado e comprometer a qualidade do produto final (Jiang, 2025).

Devido a essas características, o PVC precisa ser rigorosamente separado de outros polímeros nas etapas de triagem das recicladoras, evitando contaminações cruzadas. Esse procedimento adicional aumenta custos operacionais, eleva riscos ambientais e de segurança e reduz a produtividade do processo de reciclagem.

7.2 ACV DO PET

O ciclo de vida do PET inicia-se com a síntese dos seus principais precursores, o ácido tereftálico purificado (PTA) (ou o dimetiltereftalato (DMT)) e o etilenoglicol (EG), ambos derivados de petróleo ou gás natural. Nas etapas industriais, a produção do polímero envolve reações de esterificação e policondensação, que podem gerar subprodutos tóxicos, como metanol, compostos orgânicos voláteis e aldeídos. Resíduos líquidos provenientes da limpeza dos reatores também demandam tratamento adequado devido à presença de solventes e ácidos residuais (Tang *et. al.*, 2020).

Comparado ao PVC, o PET não libera dioxinas ou compostos clorados durante sua degradação térmica. No entanto, destaca-se por sua alta persistência ambiental quando descartado incorretamente, contribuindo para a geração de microplásticos e para o acúmulo em

aterros sanitários. A reciclabilidade, por outro lado, representa um ponto favorável em sua ACV: o PET pode ser reciclado diversas vezes, inclusive com reaplicação em embalagens alimentícias, o que reduz a necessidade de produção de resina virgem e, por consequência, o consumo energético e de matérias-primas fósseis (Tang *et al.*, 2020).

Lee *et al.* (2018) nos mostra que o uso de PET reciclado (rPET) promove menor extração de recursos naturais, reduz emissões associadas ao ciclo de produção e prolonga a vida útil do polímero em aplicações industriais. Contudo, a cadeia de reciclagem depende de fatores externos, como eficiência da coleta, pureza do resíduo e viabilidade econômica, elementos que ainda limitam o avanço do reaproveitamento em larga escala.

Atualmente, o PET destaca-se como um dos materiais com a cadeia de reciclagem mais bem estruturada no setor de polímeros, apresentando fluxos consolidados de coleta, triagem e reprocessamento que favorecem sua reinserção em novos ciclos produtivos. Dentro desse contexto, duas rotas principais ganham relevância: “garrafa para garrafa” e “garrafa para fibra”. A primeira refere-se ao processo de reciclagem em que garrafas pós-consumo são reprocessadas e transformadas novamente em novas garrafas, configurando um ciclo fechado (*closed loop*) que exige alto grau de pureza do material. Já a rota “garrafa para fibra” consiste na conversão das embalagens usadas em fibras têxteis, um ciclo aberto (*open loop*) que demanda menor pureza e apresenta grande aceitação industrial, especialmente no setor de tecidos e não tecidos.

A compreensão do desempenho circular dessas rotas é frequentemente avaliada por meio do *Material Circularity Indicator* (Indicador de circularidade de material - MCI), indicador proposto pela Fundação Ellen MacArthur que quantifica o nível de circularidade de um material em uma escala de 0 a 1, onde valores próximos de 1 representam maior retenção de valor e menor dependência de recursos virgens. Em sistemas reais de “*garrafa para garrafa*”, o MCI varia entre 0,20 e 0,31, o que indica que, embora o PET já opere em um modelo circular, ainda há dependência relevante de resina virgem devido às perdas no processo e à limitação na eficiência da coleta. Em um cenário otimizado, com maior retorno de embalagens e aumento do conteúdo reciclado, o MCI pode atingir 0,55 a 0,60, demonstrando um avanço significativo rumo à circularidade. Na rota “*garrafa para fibra*” os valores atuais alcançam cerca de 0,52, refletindo maior facilidade de reinserção do material; e, quando há reciclagem adicional das fibras produzidas, o MCI pode chegar a aproximadamente 0,70, representando um dos níveis mais altos de circularidade possíveis para o PET (Chairat, 2023).

Esses resultados reforçam que, quando apoiado por uma cadeia eficiente de coleta e processamento, o PET reciclado prolonga substancialmente sua vida útil em ciclos sucessivos,

reduzindo de forma expressiva a necessidade de recursos fósseis e a destinação do material para aterros sanitários, além de mitigar impactos ambientais associados ao ciclo de vida do produto.

No contexto brasileiro, Willers *et al.* (2013) ressalta que a adoção da ACV ainda está em desenvolvimento, o que reforça a necessidade de integrar essa metodologia às estratégias industriais e de gestão de resíduos. Ao comparar o ciclo de vida de diferentes embalagens, Valt (2021) demonstra que a incorporação de material reciclado, como o rPET, reduz significativamente os impactos ambientais associados à produção de polímeros virgens, comprovando que a etapa pós-consumo é decisiva na mitigação de danos ambientais.

Assim, torna-se evidente que a eficiência ecológica de materiais como PVC e PET depende não apenas de suas características intrínsecas, mas do modo como são inseridos em sistemas de produção, uso e reaproveitamento, reafirmando a ACV como ferramenta essencial para a tomada de decisões sustentáveis.

8 METAS PARA REDUZIR O USO DE PVC EM EMBALAGENS

A crescente preocupação ambiental associada ao acúmulo de resíduos plásticos e à toxicidade de compostos halogenados têm conduzido governos, instituições e empresas a estabelecer metas globais para redução do uso de PVC em embalagens. Embora não existam metas universais que determinem a eliminação total do PVC, há um conjunto robusto de políticas regulatórias, acordos voluntários e iniciativas de economia circular que, direta ou indiretamente, promovem sua substituição por polímeros com maior reciclabilidade, como o polietileno tereftalato (PET), o polipropileno (PP) e o polietileno de alta densidade (PEAD).

No contexto europeu, o Regulamento (UE) sobre Embalagens e Resíduos de Embalagens, aprovado em 2024 e com implementação em 2025, estabelece que todas as embalagens comercializadas na União Europeia devem ser recicláveis até 2030, além de impor metas de redução de uso de plástico de 5 % até 2030, 10 % até 2035 e 15 % até 2040, tomando 2018 como ano-base (European Commission, 2024). Essas diretrizes não nomeiam especificamente o PVC, mas, ao exigir reciclabilidade comprovada e ausência de substâncias perigosas, acabam por desincentivar o uso de materiais com maior impacto e complexidade no ciclo de vida, como o PVC, cuja reciclagem é energeticamente desfavorável e potencialmente tóxica devido à emissão de HCl e dioxinas durante o reprocessamento (Jiang; Zhu; Zhu, 2023).

Além disso, a restrição de substâncias de preocupação, como ftalatos, estabilizantes metálicos (chumbo, cádmio) e compostos fluorados (PFAS), afeta diretamente a cadeia de valor do PVC. Esses aditivos, tradicionalmente utilizados para conferir flexibilidade, estabilidade térmica e resistência à luz ultravioleta, estão cada vez mais regulados por políticas ambientais e de saúde pública, levando a um aumento no custo de formulação e a uma perda de competitividade frente a alternativas não-halogenadas (Hill *et al.*, 2024).

No âmbito do UK Plastics Pact, o Reino Unido avançou de forma significativa na eliminação de componentes que dificultam a reciclagem, como rótulos e selos de PVC em embalagens plásticas. Até 2025, os membros do pacto já haviam retirado 33 bilhões de itens plásticos classificados como problemáticos desde 2018 e reduziram em 57% o uso de PVC e PS considerados críticos para a reciclabilidade (Wrap, 2025). Além disso, o relatório anual 2023–2024 confirma que 96% das embalagens rígidas comercializadas pelos signatários já são desenhadas para ser recicláveis em sistemas de circuito fechado, alinhando-se às metas da *Ellen MacArthur Foundation* e da UNEP no âmbito do *New Plastics Economy Global Commitment* (Wrap, 2024).

Outros países europeus e asiáticos também adotaram metas quantitativas para incorporação de conteúdo reciclado em embalagens, o que reforça a substituição do PVC, dada sua baixa compatibilidade com fluxos de reciclagem mecânica e a inviabilidade de uso em contato alimentar quando reciclado. A Suécia, por exemplo, estabeleceu metas de que todas as embalagens plásticas contenham, em média, 30 % de material reciclado até 2030, promovendo a priorização de polímeros como PET e PEAD, que possuem infraestrutura de coleta e reprocessamento mais consolidada (United Nations, 2023).

No cenário global, o Acordo Internacional sobre Poluição por Plásticos, liderado pela ONU desde 2022, também vem pressionando a indústria a reduzir o uso de plásticos halogenados em aplicações descartáveis, recomendando a eliminação progressiva de materiais problemáticos para reciclagem, entre eles o PVC (Unep, 2024). O documento reconhece que a presença de cloro e aditivos organometálicos no PVC representa um risco para o cumprimento das metas de neutralidade de carbono e segurança química até 2050.

As empresas multinacionais de bens de consumo também vêm se adequando a esse cenário regulatório. Grandes fabricantes de alimentos e bebidas como Nestlé, Unilever, Coca-Cola e Danone anunciaram políticas corporativas de eliminação do PVC em suas linhas de embalagem, substituindo-o por PET, PEAD e PP, que apresentam melhor desempenho ambiental e maior aceitação regulatória (Ellen Macarthur Foundation, 2023). Essa tendência é reforçada por pressões de investidores e consumidores por transparência na pegada de carbono e circularidade dos materiais, consolidando o abandono progressivo do PVC em embalagens primárias e secundárias.

Em síntese, as metas globais de sustentabilidade e economia circular atuam em múltiplos níveis, regulatório, técnico e de mercado, para reduzir o uso de PVC em embalagens. Embora nem todas sejam explicitamente voltadas à proibição do material, o conjunto de restrições à reciclabilidade limitada, à presença de aditivos tóxicos e à pegada ambiental elevada torna o PVC cada vez menos viável em contextos regulados e ambientalmente conscientes. Assim, o futuro da embalagem sustentável tende a privilegiar polímeros compatíveis com a reciclagem em ciclo fechado e com baixa toxicidade intrínseca, consolidando o PET como uma das principais alternativas tecnicamente e ambientalmente viáveis

9 FUNDAÇÃO ELLEN MACARTHUR

A Ellen MacArthur Foundation (EMF) é uma organização sem fins lucrativos criada em 2010 pela britânica Dame Ellen MacArthur, dedicada a impulsionar a transição para a economia circular. Seu propósito é transformar o modelo linear tradicional, baseado em “extrair → produzir → descartar”, promovendo sistemas em que produtos, materiais e recursos permaneçam em uso pelo maior tempo possível, reduzindo a geração de resíduos, a extração de matérias-primas virgens e os impactos ambientais e à biodiversidade.

Essa fundação é importante porque atua como uma das maiores referências globais no tema, conectando empresas, governos, universidades e instituições para desenvolver pesquisas, ferramentas, políticas públicas e iniciativas práticas que aceleram a adoção de modelos sustentáveis. Ao promover inovação, fomentar conhecimento e influenciar decisões estratégicas em escala mundial, a EMF contribui diretamente para a construção de uma economia mais resiliente, regenerativa e alinhada aos limites do planeta.

A EMF é considerada como referência global no campo da economia circular, especialmente no ramo de plásticos e embalagens. Ela reúne empresas, governos, academia e ONGs para estimular inovação, metas compartilhadas e redes colaborativas. Por exemplo:

Em 2016 lançou a iniciativa *The New Plastics Economy*, que definiu uma visão para um sistema de plásticos em que os materiais não se tornem “resíduos”. Também Promove a rede global de “*Plastics Pacts*”, que firma compromissos regionais para reduzir o impacto dos plásticos e avançar na reciclabilidade e reutilização e produz relatórios e análises de impacto que mostram avanços e desafios, o que auxilia empresas e governos a definirem estratégias baseadas em dados concretos.

A reputação da EMF vem também de sua atuação: ao reunir múltiplos setores (marcas de bens de consumo, reciclagem, políticas públicas) e ao apontar que não basta reciclar, mas também redesenhar e eliminar materiais problemáticos.

Sendo os principais feitos da Fundação uma análise “*Plastics and the circular economy – deep dive*”, (Plásticos e economia circular – análise profunda) onde foi levantado que apenas cerca de 14% das embalagens plásticas eram recicladas mundialmente, e que cerca de 95% do valor econômico das embalagens plásticas se perdia no modelo linear.

Por meio do *Global Commitment* (um pacto entre empresas, governos e organizações coordenado pela EMF em parceria com *UN Environment Programme*) observa-se que aproximadamente 79% dos signatários têm planos para eliminar o uso de PVC em suas

embalagens.

Em estudos mais recentes, verificou-se que apesar de progresso, metas para 2025 ainda demandam aceleração: por exemplo, o uso de plástico virgem caiu modestamente, e retomar a meta de 100% de embalagens reutilizáveis/recicláveis/compostáveis (RRC) exige grandes esforços.

Esses dados demonstram que a EMF exerce papel de liderança técnico e mobilizador, criando termos comuns (como “economia circular”, “embalagem problemática”, “design para reciclagem”), influenciando políticas e práticas empresariais.

9.1 EMF E A ABORDAGEM AO USO DE PVC E PET

A EMF dedica atenção significativa aos polímeros usados em embalagens, em particular ao Policloreto de Vinila (PVC) e ao Politereftalato de Etileno (PET), pelas seguintes razões:

Na publicação “The New Plastics Economy – Rethinking the future of plastics” (A Nova Economia dos Plásticos – Repensando o futuro dos plásticos) , a EMF aponta que mesmo 0,005% de PVC contaminando a corrente de PET pode comprometer gravemente a qualidade do PET reciclado (causando fragilidade ou amarelamento) e, em decorrência, a EMF recomenda que embalagens rígidas ou componentes de PVC que possam entrar no fluxo de reciclagem de PET sejam eliminados ou substituídos sempre que possível. Em relatórios de progresso, constata-se que muitas empresas signatárias estão direcionando planos para eliminar o uso de PVC de suas embalagens até 2025.

O PET é apresentado pela EMF como um dos polímeros mais “recicláveis” quando bem projetado e coletado, mas a Fundação ressalta que mesmo para o PET há obstáculos: a necessidade de design para reciclagem (por exemplo, etiquetas removíveis, ausência de aditivos problemáticos, cores que não dificultem o processo). Também se destaca que o simples aumento de conteúdo reciclado pós-consumo (PCR) não é suficiente se o modelo de uso e descarte permanece linear: portanto, aposta-se em estratégias de reutilização, mono-materiais (embalagens compostas de somente um tipo de material) e sistemas fechados (garrafa para garrafa). No setor alimentício, por exemplo, a EMF relata que empresas têm migrado de PS ou embalagens mistas para copos de PET mais recicláveis.

Apesar dos avanços, a EMF ressalta que muitos dos alvos definidos (por exemplo, 100% de embalagens reutilizáveis/recicláveis/compostáveis até 2025) ainda estão longe de serem alcançados. Isso significa que para empresas de embalagem oportunidade e responsabilidade.

10 ESTUDO DE CASO 1 - NESTLÉ BRASIL: SUBSTITUIÇÃO DE SLEEVES DE PVC E AMPLIAÇÃO DO USO DE RPET EM EMBALAGENS

A Nestlé Brasil vem realizando uma transformação em seu portfólio de embalagens com foco em circularidade, substituindo componentes não 100% recicláveis, como rótulos de PVC e aumentando o conteúdo de PET reciclado (rPET) em seus produtos. Essa mudança integra a estratégia global da empresa, que desde 2019 publicou sua *Negative List of Packaging Materials*, documento que estabelece a eliminação progressiva do PVC, poliestireno expandido (EPS) e outros materiais considerados não recicláveis ou de difícil processamento (Nestlé, 2019).

No contexto técnico, o PVC foi identificado pela Nestlé como um dos principais contaminantes dos fluxos de reciclagem de PET, especialmente por causar degradação térmica e liberação de HCl durante o reprocessamento, afetando severamente a qualidade do rPET. A presença de rótulos em PVC em garrafas PET, mesmo em pequenas proporções, inviabiliza o processo de triagem automática por sensores NIR e compromete o rendimento do material reciclado. Por esse motivo, a empresa iniciou um programa de substituição sistemática dos rótulos de PVC por alternativas compatíveis, como rótulos termoencolhíveis de PETG e rótulos laváveis de polipropileno (PP). A transição tecnológica exigiu a revalidação de materiais junto aos fornecedores e a realização de testes industriais com laboratórios de triagem, garantindo que as novas soluções não interferissem na separação óptica e pudessem ser removidas facilmente no processo de lavagem do PET reciclável. A adoção de rótulos de PETG com densidade ajustada e tintas laváveis foi um marco importante, permitindo a triagem automática em plantas de reciclagem no Brasil, como as operadas por cooperativas parceiras na região Sudeste.

Além da substituição do PVC, a Nestlé ampliou o uso de PET reciclado pós-consumo (rPET) em suas garrafas de água e bebidas. A meta corporativa global estabelecia que todas as embalagens da companhia sejam recicláveis ou reutilizáveis até 2025, e que as garrafas de água contenham pelo menos 25% de rPET, meta já superada em algumas regiões (NESTLÉ, 2024). Apesar dos avanços obtidos nos últimos anos, a Nestlé ainda não alcançou integralmente sua meta corporativa de garantir que 100% de suas embalagens sejam recicláveis ou reutilizáveis até 2025. Segundo o *Non-Financial Statement* mais recente, publicado pela companhia, a empresa reconhece que atingir essa meta “será desafiador” devido a limitações técnicas e à disponibilidade de materiais e tecnologias de reciclagem (Nestlé, 2024a).

Em nível global, a Nestlé afirma que 86,8% de todas as suas embalagens já são recicláveis ou reutilizáveis, enquanto 86,4% das embalagens plásticas encontram-se “desenhadas para reciclagem”, ou seja, estruturadas para serem compatíveis com fluxos de reciclagem existentes (Nestlé, 2024b; Nestlé, 2024c). Esse conceito de *design* para reciclabilidade tem sido enfatizado pela empresa como estratégia central, reforçando a transição de materiais complexos para alternativas tecnicamente recicláveis.

Porém, o impacto ambiental da mudança é significativo. Segundo a Nestlé, cada 10% de rPET incorporado às garrafas reduz aproximadamente 7% das emissões de CO₂ associadas à embalagem, além de diminuir a demanda por matéria-prima virgem. Essa abordagem está alinhada à política de sustentabilidade corporativa, consolidada no relatório *Criação de Valor Compartilhado 2024/2025*, que prioriza a eliminação de materiais problemáticos e a transição para embalagens de “*design* para reciclabilidade” (Nestlé, 2025).

11 ESTUDO DE CASO 2 - DANONE BRASIL: ELIMINAÇÃO DO PVC, REDESIGN DE EMBALAGENS E INTEGRAÇÃO DE RPET

A Danone é uma das primeiras empresas globais de alimentos e bebidas a adotar uma “retirada total do PVC” em seu portfólio de embalagens, ação motivada tanto por razões ambientais quanto por desafios técnicos associados à reciclagem. Em 2021, no relatório *Global Commitment* da Ellen MacArthur Foundation, a Danone declarou oficialmente que o PVC seria completamente eliminado de suas embalagens até o final daquele ano, citando que o material “interfere na reciclagem do PET” e compromete a circularidade do sistema (Danone, 2021).

No caso brasileiro, a Danone adaptou a diretriz global à realidade local, onde a infraestrutura de reciclagem de PET e PP está em expansão, e a demanda por rPET de grau alimentício cresce rapidamente. Assim, a empresa iniciou a substituição de rótulos termoencolhíveis de PVC usados em garrafas e potes por alternativas compatíveis com o fluxo de reciclagem. Em diversos produtos da linha de iogurtes e bebidas lácteas, os rótulos de PVC foram trocados por rótulos de PET reciclável (PETG) e, em alguns casos, por rótulos de polipropileno moldados por injeção (IML), desenvolvidos em parceria com fornecedores locais como a Polyoak e a Braskem (Braskem, 2025).

Do ponto de vista técnico, a mudança eliminou o risco de contaminação do fluxo de rPET e aumentou a reciclabilidade das embalagens. A Danone também passou a adotar, em projetos piloto, o uso de resina PET reciclada (rPET) na produção de garrafas e potes de bebidas lácteas, garantindo compatibilidade de polímero e redução da pegada de carbono. O uso de rPET em embalagens alimentícias requer conformidade com a RDC nº 56/2012 da Anvisa, que define requisitos para materiais reciclados em contato com alimentos, e a empresa tem buscado fornecedores certificados para atender às normas.

Um exemplo concreto dessa estratégia foi a introdução, em 2025, de uma nova linha de embalagens de 100 g com 8% menos plástico, inspiradas em estruturas biomiméticas da natureza, desenvolvidas em parceria com a Braskem e a Cazoolo Design Lab (Braskem, 2025). Embora o projeto se concentre em redução de peso, ele faz parte da mesma lógica de eliminação de materiais críticos e aumento da circularidade por design.

Além das melhorias técnicas, a Danone Brasil implementou um programa de educação ambiental e logística reversa, integrando cooperativas de catadores na cadeia de coleta de PET pós-consumo, fortalecendo o ecossistema de reciclagem local. Essa abordagem sistêmica, que combina inovação de produto, design de materiais e inclusão social, exemplifica o conceito de “embalagem regenerativa”, central na estratégia *One Planet. One Health* da Danone.

Assim, o caso da Danone Brasil representa um modelo de integração entre engenharia de embalagem, sustentabilidade e conformidade regulatória. A substituição do PVC e o uso crescente de rPET refletem um compromisso técnico com a circularidade e o alinhamento às metas globais da Ellen MacArthur Foundation. A experiência brasileira reforça que a adoção de materiais compatíveis e recicláveis é viável em larga escala, desde que haja colaboração entre fabricantes, recicladores e fornecedores de polímeros.

12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento dos polímeros sintéticos, em especial dos plásticos, constituiu um marco na evolução tecnológica e industrial, viabilizando aplicações estratégicas em setores como embalagens, saúde, construção civil e tecnologia. A combinação de propriedades como baixa densidade, elevada resistência química, versatilidade e facilidade de processamento consolidou esses materiais como elementos essenciais na cadeia produtiva global. Entretanto, sua alta persistência ambiental e o descarte inadequado configuram desafios críticos para a sustentabilidade, exigindo abordagens integradas de gestão de resíduos e economia circular.

Entre os polímeros de maior relevância industrial, destacam-se o politereftalato de etileno (PET) e o policloreto de vinila (PVC), amplamente utilizados no setor de embalagens. O PET apresenta estrutura linear semicristalina, elevada resistência mecânica, transparência e excelente barreira a gases, além de compatibilidade com processos de reciclagem mecânica e química em ciclo fechado (“garrafa-para-garrafa”), o que reduz a demanda por resina virgem e minimiza impactos ambientais. Sua estabilidade térmica e ausência de halogênios conferem menor risco toxicológico durante o processamento e descarte.

Por outro lado, o PVC, embora versátil e economicamente atrativo, apresenta limitações estruturais que comprometem sua sustentabilidade. A presença de cloro na cadeia polimérica e a dependência de aditivos plastificantes e estabilizantes elevam a complexidade química e a toxicidade potencial do material. A degradação térmica do PVC resulta na liberação de HCl e na formação de dioxinas e furanos, classificados como poluentes orgânicos persistentes (POPs), com elevado potencial de bioacumulação e toxicidade ambiental. Além disso, sua baixa estabilidade térmica e heterogeneidade composicional tornam a reciclagem onerosa e tecnicamente restrita, enquanto a contaminação cruzada por PVC compromete fluxos de reciclagem de PET, inviabilizando a produção de rPET de grau alimentício.

A análise comparativa evidencia que o PET se consolida como a alternativa tecnicamente mais adequada para embalagens de consumo, conciliando desempenho funcional, segurança alimentar e menor impacto ambiental. O PVC, por sua vez, enfrenta restrições crescentes decorrentes de exigências regulatórias internacionais e de pactos globais de sustentabilidade, bem como dos desafios inerentes à sua reciclagem e ao potencial de contaminação ambiental.

Tendências globais, impulsionadas por iniciativas como as da Ellen MacArthur Foundation, e casos práticos de empresas líderes, como Nestlé e Danone Brasil, demonstram a viabilidade técnica e econômica da substituição do PVC por polímeros mais compatíveis com

a economia circular. Nesse contexto, a adoção de materiais recicláveis, o aprimoramento das tecnologias de triagem e descontaminação e o fortalecimento de políticas públicas são elementos essenciais para garantir a sustentabilidade da cadeia produtiva de embalagens.

Portanto, a seleção criteriosa de materiais, fundamentada em parâmetros técnico-científicos e alinhada às melhores práticas de sustentabilidade, é indispensável para a transição rumo a sistemas produtivos mais circulares, eficientes e ambientalmente responsáveis.

13 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo, recomenda-se aprofundar a análise do ciclo de vida dos polímeros por meio de diferentes abordagens. Primeiramente, sugere-se expandir a comparação para outros materiais utilizados em embalagens, como PP, PEAD, PS e biopolímeros, de modo a ampliar a compreensão de alternativas sustentáveis ao PVC. Trabalhos futuros também podem incluir a realização de uma ACV com dados primários obtidos diretamente da indústria, aumentando a precisão do inventário e a representatividade dos resultados.

Outra proposta relevante consiste na realização de um balanço detalhado de massa e energia ao longo das etapas do ciclo de vida do PET e do PVC. Essa abordagem permitiria quantificar com maior precisão os fluxos de matérias-primas, subprodutos, perdas de processo, emissões diretas e indiretas, bem como o consumo energético associado a cada etapa — desde a produção dos monômeros até o pós-consumo. A aplicação desse balanço possibilitaria identificar gargalos energéticos, rotas de maior intensidade de carbono, pontos críticos de geração de resíduos e oportunidades reais de otimização industrial.

REFERÊNCIAS

- AGRICULTURAL PRODUCTS PROCESSING AND STORAGE. **Review of risk substances in the recycling of food contact materials—polyethylene terephthalate (PET)**. v. 1, n. 4, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44462-025-00008-6>. Acesso em: 31 out. 2025.
- ANTANA, L.; ALVES, J. L.; NETTO, A. C. S.; MERLINI, C. **Estudo comparativo entre PETG e PLA para impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica**. *Matéria*, v. 23, n. 4, e12267, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mat/a/>. Acesso em: 29 out. 2025.
- BRASKEM. **Danone lidera inovação sustentável e lança embalagem mais leve inspirada na natureza**. 2025. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/danone-lidera-inovacao-sustentavel-e-lanca-embalagem-mais-leve-inspirada-na-natureza-e-com-menor-impacto-ambiental> .Acesso em: 31 out. 2025.
- CALLAPEZ, M. E.; COIMBRA, R. F.; MARQUES DA CRUZ, S.; CARVALHO, V.; FRANÇA DE SÁ, S. **A exposição Plasticidade – Uma História dos Plásticos em Portugal...** *MIDAS*, v. 12, Art. 2537, 2020. Disponível em: <https://journals.openedition.org/midas/2537>. Acesso em: 27 out. 2025.
- CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2018. Disponível em: <https://www.wiley.com>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência dos polímeros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2010. Disponível em: https://www.academia.edu/39992257/Ciencia_dos_polimeros_Canevarolo_Jr_Sebastiao_V. Acesso em: 16 nov. 2025.
- CHAIRAT, Sumonrat; GHEEWALA, Shabbir H. **Life cycle assessment and circularity of polyethylene terephthalate bottles...** *Environmental Research*, v. 236, p. 116788, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116788> . Acesso em: 16 nov. 2025.
- CHASSOT, Attico. **Os adornos nas civilizações pré-históricas sob a** *Competência*, v. 2, n. 1, 2009. Disponível em: <https://seer.senacrs.com.br/index.php/RC/article/view/59>. Acesso em: 25 out. 2025.
- DA SILVA, Triângulo; RODRIGUES, Y.; et al. **Bionanocompósitos poliméricos à base de montmorillonita**. *Química Nova*, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/>. Acesso em: 29 out. 2025.
- DANONE S.A. **Global Commitment Report 2021**. *Ellen MacArthur Foundation*, 2021. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/global-commitment-2021/signatory-reports/ppu/danone-sa> . Acesso em: 31 out. 2025.

DING, Q.; LI, H.; WANG, J.; CHEN, Y.; ZHOU, K. **The Key to Solving Plastic Packaging Wastes: Design for Recycling.** *Polymers*, v. 15, n. 6, p. 1485, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/polymers>. Acesso em: 31 out. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Global Commitment 2023 Progress Report.** Cowes, UK, 2023. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/global-commitment>. Acesso em: 31 out. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **The New Plastics Economy – Catalysing action.** Cowes, 2017. Disponível em: Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org>. Acesso em: 29 out. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **The New Plastics Economy – Rethinking the future of plastics.** Cowes: EMF; WEF; McKinsey, 2016. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org>. Acesso em: 29 out. 2025.

ENVIRONMENTAL CHEMISTRY LETTERS. **Occurrence, analysis, and toxicity of polyethylene terephthalate microplastics: a review** 2025. Disponível em: <https://link.springer.com>. Acesso em: 31 out. 2025.

FONSECA, Regina Célia Zimmermann da. **O PVC e a sustentabilidade ambiental: marcos históricos e o caso Amanco Brasil.** 2004. Dissertação — UFSC. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br>. Acesso em: 26 out. 2025.

GUO, Z.; WU, J.; WANG, J. **Chemical degradation and recycling of PET: a review.** *RSC Sustainability*, v. 3, p. 2111-2133, 2025. Disponível em: <https://pubs.rsc.org>. Acesso em: 01 nov. 2025.

HARPER, Charles A. **Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites.** 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2006. Disponível em: <https://www.mheducation.com>. Acesso em: 16 nov. 2025.

HILL, A. C.; CHANDLER, S. J.; PARKINSON, R. **PVC in Food Packaging: Risks, Processing and Alternatives.** *Journal of Polymer Engineering*, v. 45, n. 3, p. 187–204, 2024. Disponível em: <https://www.degruyter.com>. Acesso em: 31 out. 2025.

HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. **Plastics recycling: challenges and opportunities.** *Philosophical Transactions B*, 2009. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org>. Acesso em: 16 nov. 2025.

LEE, C.; HUANG, Y.; CHENG, F.; TSAI, W.; LIAO, C. **Life Cycle Assessment of Recycling PET: A Comparative Case Study in Taiwan.** *Sustainability*, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>. Acesso em: 16 nov. 2025.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luiz Carlos. **Introdução a polímeros.** 2. ed. São Paulo: Blücher, 1999. Disponível em: <https://www.blucher.com.br>. Acesso em: 16 nov. 2025.

MARCELINO, C. S.; GOMES, V. E. S.; MARANGONI JÚNIOR, L. **Post-Consumer Recycled PET...** *Polymers*, v. 17, n. 5, p. 594, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com>. Acesso em: 31 out. 2025.

MARQUES, Luísa. **O que são polímeros e porque são interessantes?** Universidade de Évora, [s. d.]. Disponível em: <https://www.uevora.pt>. Acesso em: 25 out. 2025.

NESTLÉ. **Criação de Valor Compartilhado 2024/2025**. 2025. Disponível em: <https://www.nestle.com>. Acesso em: 31 out. 2025.

NESTLÉ. **Negative List of Packaging Materials**. 2019. Disponível em: Acesso em: 31 out. 2025.

NESTLÉ. **Nestlé increases recycled plastics in Europe**. 2024 Disponível em: <https://www.nestle.com>. Acesso em: 31 out. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **What is plastic pollution?** New York: United Nations, 2023 Disponível em: <https://www.onu.org>. Acesso em: 29 out. 2025.

PARK, G. S.; SMITH, D. G. *Vinyl chloride studies. Part 1.—Kinetics of polymerization of vinyl chloride in chlorobenzene solution*. Transactions of the Faraday Society, 1969. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/1969/ft/ft9696501854> Acesso em: 27 nov. 2025.

POK, Špela; KRALJ CIGIĆ, Irena; STRLIČ, Matija; et al. **Poly(vinyl chloride) degradation...** *npj Heritage Science*, v. 13, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com>. Acesso em: 16 nov. 2025.

RAJ, B.; RAHUL, J.; SINGH, P. K.; ... **Advancements in PET Packaging...** *Sustainability*, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/16/12269> Acesso em: 31 out. 2025.

RL HIGIENE. ACV – **Veja como funciona a Análise do Ciclo de Vida de um produto**. [s. d.]. Disponível em: <https://rl.com.br/analise-do-ciclo-de-vida-produto/> Acesso em: 16 nov. 2025.

RODRIGUES, Taynara Tatiane. **Polímeros nas indústrias de embalagens**. 2018. TCC — UFU. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24082>. Acesso em: 27 out. 2025.

SANTIAGO, Gabriel G. R. **Mapeamento comparativo...** CEFET-MG, 2020. Disponível em: https://www.eng-materiais.bh.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/189/2021/08/2020-2_TCC_GabrielGRSantiago.pdf. Acesso em: 27 out. 2025.

SANTOS, Amélia S.; AGNELLI, J. A. M.; MANRICH, S. **Sacolas plásticas...** *Polímeros*, 2012. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/470/47024663016.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

SILVA, F. S.; ALVES, M. P.; FREITAS, R. C.; et al. **Métodos de produção de biopolímeros...** UFERSA, 2022. Disponível em: [Métodos de produção de biopolímeros de matérias-primas vegetais: uma revisão da literatura](https://www.ufersa.edu.br/revista/ver-publicacao/123456789). Acesso em: 16 nov. 2025.

SILVA, J. R. M. B.; SANTOS, B. F. F.; LEITE, I. F. **Efeito do teor de silicato...** *Revista Iberoamericana*, 2017. Disponível em: <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/06/2017-18-3-da-silva-rodrigues-y-col.pdf>. Acesso em: 27 out. 2025.

SPERLING, L. H. **Introduction to Physical Polymer Science**. 4. ed. Wiley, 2006. Disponível em: <https://www.wiley-vch.de/en/areas-interest/natural-sciences/physical-polymer-science-4th-edition-with-principles-polymerization-4th-edition-set-978-0-470-04045-4> Acesso em: 16 nov. 2025.

SPINACÉ, Márcia A. S.; DE PAOLI, Marco A. **A tecnologia da reciclagem de polímeros**. *Química Nova*, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/bTLkNHWGnpsj4SWWjgLB49L/?format=pdf&lang=pt> . Acesso em: 16 nov. 2025.

TANG, X.; ALI, M.; VAN DUIN, A. C. T.; MOSCHOU, E. **Environmental impacts of terephthalic acid production...** *ES&T*, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/journal/esthag>. Acesso em: 16 nov. 2025.

UNITED NATIONS. **Sweden commits to reduction of plastic pollution...** 2023. Disponível em: <https://sdgs.un.org/partnerships/sweden-commits-reduction-plastic-pollution-adopting-national-plastic-action-plan-goals>. Acesso em: 31 out. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Design for the Environment – Life-Cycle Assessments**. EPA, 2006. Disponível em: <https://www.epa.gov/envirodesign/design-environment-life-cycle-assessments> .Acesso em: 16 nov. 2025.

UNEP. **Global Plastics Treaty: Draft Zero**. Nairobi: UNEP, 2024. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_plastic_pollution_treaty Acesso em: 31 out. 2025.

VALT, Renata Bachmann Guimarães. **Regeneração eletrocinética...** UFPR. Acesso em: 26 out. 2025.

VIANA, Fernando Luiz E. **Indústria de Produtos Plásticos**. Fortaleza: BNB, 2023. Acesso em: 25 out. 2025.

VINHAS, G. M.; SOUTO-MAIOR, R. M.; DE ALMEIDA, Y. M. B. **Estudo de propriedades de PVC modificado...** *Polímeros*, 2005. Disponível em:Acesso em: 29 out. 2025.

VINYLPLUS. **The Sustainability of PVC Systems**. Brussels, 2016. Disponível em: [VINYPLUS 2016 EXE.indd](#) Acesso em: 16 nov. 2025.

WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. **Plásticos de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005. Disponível em:Acesso em: 27 out. 2025.

WILLERS, C. D.; et al. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil...** *Produção*, 2013. Disponível em:Acesso em: 26 out. 2025.

WRAP. **Eliminating Problem Plastics**. 2025a. Disponível em: <https://www.wrap.ngo/resources/report/eliminating-problem-plastics> Acesso em: 16 nov. 2025.

WRAP. **UK Plastics Pact Annual Report 2023–24**. 2024. Disponível em: <https://www.wrap.ngo/resources/report/uk-plastics-pact-annual-report-2023-24> [wrap.ngo](https://www.wrap.ngo) Acesso em: 16 nov. 2025.

WRAP. **UK Plastics Pact: Progress Report 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.wrap.ngo/resources/report/uk-plastics-pact-progress-report-2024-25>. Acesso em: 31 out. 2025.

WRAP. **UK Plastics Pact Refreshed Roadmap to 2025**. 2025b. Disponível em: <https://www.wrap.ngo/system/files/2024-07/UK%20Plastics%20Pact%20Refreshed%20Roadmap%20to%202025%200.pdf> Acesso em: 16 nov. 2025.

WYPYCH, George. **PVC – Formulation and Characterization**. Toronto: ChemTec, 2015. Acesso em: 16 nov. 2025.

Zhu, M.; Jiang, X. **Valorization of harmful substances in PVC recycling**. *Green Chemistry*, 2025. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/gc/d4gc05075d> .Acesso em: 16 nov. 2025.

Zimmermann da Fonseca, R. C. **O PVC e a sustentabilidade ambiental...** UFSC, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/87452> Acesso em: 27 out. 2025.