

TRANS VERSO

03 Avanços sustentáveis na indústria de injeção de polímeros: tecnologias e materiais verdes

recebido em 07/09/2025
aprovado em 03/10/2025

Avanços sustentáveis na indústria de injeção de polímeros: tecnologias e materiais verdes

Ana Clara Souto de Souza
anaclara.souto@estudante.ufjf.br
Universidade Federal de Juiz de Fora

Maria Julia Ribeiro Gomes
mariajulia.gomes@estudante.ufjf.br
Universidade Federal de Juiz de Fora

Lia Paletta Benatti
lia.paletta@ufjf.br
Universidade Federal de Juiz de Fora

Artur Caron Mottin
artur.mottin@cefetmg.br
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

André Carvalho Mol Silva
andremol@gmail.com
Universidade Federal de Juiz de Fora

RESUMO (PT): O artigo aborda estratégias sustentáveis na injeção de polímeros, destacando seu uso essencial na sociedade e os impactos ambientais associados, como emissões de gases de efeito estufa e geração de resíduos persistentes. Alternativas como polímeros biodegradáveis, biopolímeros e polímeros verdes reduzem a dependência de recursos fósseis, minimizam impactos ambientais e permitem integração aos ciclos naturais. A pesquisa enfatiza a importância do design sustentável, da seleção adequada de materiais, da otimização de processos e da implementação de sistemas de gestão ambiental, como a NBR ISO 14001. Destaca-se o desenvolvimento de moldes híbridos, combinando componentes metálicos e módulos impressos em 3D, exemplificado pelo *Shift-In Mold*, que permite modularidade, personalização, reaproveitamento de componentes e redução de desperdício. A integração de tecnologias avançadas, materiais renováveis e gestão ambiental fortalece a circularidade dos polímeros, alinhando eficiência industrial, inovação e responsabilidade socioambiental.

Palavras-chave: polímeros, sustentabilidade, injeção de polímeros, moldes híbridos, inovação tecnológica.

ABSTRACT (ENG): The article addresses sustainable strategies in polymer injection, emphasizing its essential role in society and the environmental impacts, such as greenhouse gas emissions and persistent waste. Biodegradable polymers, biopolymers, and green polymers are presented as alternatives that reduce dependence on fossil resources, minimize environmental impacts, and integrate into natural cycles. The study highlights the importance of sustainable design, careful material selection, process optimization, and implementation of environmental management systems, such as NBR ISO 14001. The development of hybrid molds, combining metallic components and 3D-printed modules, is exemplified by the *Shift-In Mold*, enabling modularity, customization, component reuse, and waste reduction. Integrating advanced technologies, renewable materials, and environmental management strengthens polymer circularity, aligning industrial efficiency, innovation, and socio-environmental responsibility. These approaches demonstrate how the polymer industry can balance productivity with sustainability and support the transition to a more circular economy.

Keywords: polymers, sustainability, polymer injection, hybrid molds, technological innovation.

1. Introdução

Os polímeros são definidos como substâncias formadas por macromoléculas, ou seja, moléculas de elevada massa molar compostas essencialmente pela repetição de unidades estruturais derivadas, de forma real ou conceitual, de moléculas de baixa massa molar. Essas macromoléculas podem ter origem natural ou sintética e se distinguem por características como dimensão, composição química e pelas interações intra e intermoleculares que determinam suas propriedades físico-químicas.

“Muitas propriedades físicas são dependentes do comprimento da molécula, isto é, sua massa molar. Como polímeros normalmente envolvem uma larga faixa de valores de massa molar, é de se esperar grande variação em suas propriedades”. (Canevarolo, 2002, p. 21). Conforme Canevarolo (2002, p. 53), os polímeros podem ser classificados de acordo com seu comportamento mecânico em três grandes grupos: plásticos, elastômeros e fibras. Os plásticos, por sua vez, subdividem-se em termoplásticos, termorrígidos e baroplásticos (Figura 1).



Figura 1 – Classificação dos polímeros de acordo com seu comportamento mecânico.

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Em razão de sua versatilidade, os polímeros têm sido amplamente empregados no contexto contemporâneo, desempenhando papel fundamental em diferentes setores, como saúde, alimentação, transporte e tecnologia. Propriedades como leveza, durabilidade e maleabilidade em distintas formas conferem a esses materiais um caráter indispensável para uma vasta gama de aplicações cotidianas. “Desde o advento dos plásticos, há mais de um século, eles se tornaram parte da composição de uma infinidade de produtos fabricados para uso do ser humano” (Bortolatto, 2021, p. 16). O plástico desempenha um papel de onipresença na sociedade, desde embalagens até componentes essenciais em dispositivos médicos e eletrônicos. Na indústria alimentícia, é um material que ajuda a reduzir o desperdício ao prolongar a vida útil dos produtos e facilita o transporte em larga escala. Na indústria automobilística, o plástico é amplamente utilizado em componentes de veículos devido à sua leveza, durabilidade e flexibilidade de design. Em 2020, estimava-se que os polímeros representavam até 50% do volume total de novos automóveis. Projeções de mercado indicam que, até 2026, o setor de plásticos automotivos poderá atingir um valor de até

US\$ 68,6 bilhões (Knauf Industries, 2022), evidenciando sua relevância para o desenvolvimento econômico e tecnológico.

Segundo Andrady e Neal (2009), os polímeros termoplásticos oferecem uma versatilidade de uso incomparável em uma ampla faixa de temperaturas operacionais. Eles têm uma alta relação resistência-peso, rigidez e tenacidade, ductilidade, resistência à corrosão, bioinércia, alto isolamento térmico/elétrico, não toxicidade e excelente durabilidade a um custo de vida útil relativamente baixo em comparação com materiais concorrentes; portanto, os plásticos são muito eficientes em termos de recursos. Com o crescimento da indústria de injeção de polímeros, a sustentabilidade vem se tornando cada vez mais necessária devido ao impacto do material e de seus resíduos no meio ambiente e para a sociedade.

[...] o plástico, na sua grande maioria fóssil, é não só responsável pela emissão de dióxido de carbono, que promove o aquecimento global e por sua vez as alterações climáticas, mas também inúmeros efeitos nocivos para os diversos ecossistemas do nosso planeta e para a saúde humana (Teles, 2020, p. 14).

Outro ponto de notória preocupação mundial é a existência do microplástico na corrente sanguínea de seres humanos e animais. O material inicia sua degradação se partindo em micropartículas, oriundas de atividades cotidianas, como lavagem de roupas, por exemplo. Descobriu-se que facilmente essas partículas entram na cadeia alimentar de animais e acabam por representar danos severos à saúde humana e ao ecossistema (Costa *et al.*, 2023).

Até que surjam outros materiais que possam competir com os polímeros em critérios econômicos e industriais, e que os substituam de forma benéfica para o meio ambiente, as indústrias de injeção de polímeros devem seguir critérios de sustentabilidade para amenizar os impactos causados pelo plástico e seus detritos. Diante disso, a reflexão sobre estratégias sustentáveis na injeção de polímeros termoplásticos evidencia a importância de práticas que reduzam os impactos ambientais e promovam a circularidade dos materiais, alinhando a produção industrial às demandas por maior responsabilidade socioambiental.

2. Metodologia

O levantamento de informações para o presente trabalho foi construído em uma revisão bibliográfica narrativa que envolve a integração dos conceitos de sustentabilidade com as tecnologias aplicadas à produção de produtos poliméricos, com destaque para o processo de injeção. A abordagem adotada centraliza três eixos temáticos: (i) a análise do processo de injeção de polímeros; (ii) os princípios de sustentabilidade no design de produtos; e (iii) os desafios ambientais e regulatórios associados ao uso de polímeros.

Com base nesses fundamentos, foi desenvolvido um estudo de caso, que é um estudo aprofundado (Gil, 2002) que relata, de forma detalhada, a concepção de um molde modular híbrido, denominado *Shift-In Mold*, que combina componentes metálicos convencionais dos moldes de injeção tradicionais e módulos de cavidade produzidos por impressão 3D. O estudo de caso, conforme delineado por Gil (2002, p. 137), seguiu as seguintes etapas:

- Formulação do problema: como o processo de injeção pode ser mais sustentável?
- Definição da unidade-caso: desenvolvimento moldes híbridos como alternativa para o aproveitamento de parte do molde, para injeção de peças/produtos diferentes;
- Determinação do número de casos: desenvolvimento do protótipo *Shift-in Mold*, resultado de pesquisa de iniciação científica;
- Elaboração do protocolo: envolve a revisão das etapas do projeto, descrição das etapas e análise do resultado;
- Coleta de dados: considera os textos referentes ao relatório de pesquisa e ao pedido de patente do protótipo;
- Avaliação e análise dos dados;
- Preparação do relatório.

Paralelamente ao estudo de caso, foram também analisados materiais alternativos, como biopolímeros e polímeros verdes, considerando sua aplicabilidade industrial e benefícios ambientais.

3. Injeção de polímeros termoplásticos

A injeção de polímeros é uma das tecnologias de fabricação mais avançadas e amplamente utilizadas para processos de produção de baixo custo e alta confiabilidade. Apesar de a produção de moldes ser considerada uma etapa dispendiosa, esse processo tem o foco na repetição, ou seja, a produção em larga escala. O que acaba por diluir o valor do molde em lote com grande quantidade de unidades do produto injetado.

Segundo Chanda (2018), o processo de injeção se baseia na capacidade dos materiais termoplásticos serem amolecidos pelo calor, passando por um cilindro aquecido, injetados sob pressão na cavidade do molde e endurecidos quando resfriados. Cada etapa do processo é realizada em uma área específica do mesmo equipamento (Figura 2), em uma operação cíclica conhecida como ciclo de injeção.

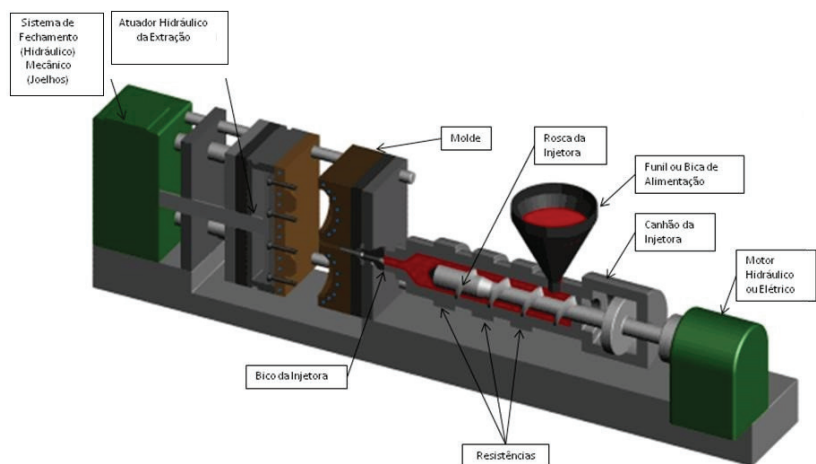


Figura 2 – Partes de uma injetora. Fonte: Lopes (2020).

No funil da injetora, a resina plástica em grânulos é depositada enquanto o êmbolo (também chamado de rosca ou parafuso) é retraído. Em seguida, o êmbolo ou rosca empurra o material para a zona de aquecimento, onde ele é aquecido e amolecido, processo conhecido como plastificação. O polímero já fundido, deslocado pelo novo material inserido, é então impulsionado para frente através da abertura de injeção no molde, desce pelo canal de distribuição, passa pelo ponto de injeção e, finalmente, preenche a cavidade do molde. O molde é mantido firmemente fechado pela ação de fechamento da placa da prensa, garantindo que o polímero fundido seja forçado a preencher todas as partes das cavidades do molde, resultando em uma reprodução precisa e detalhada do molde. A qualidade do produto injetado depende de diversos fatores, como as propriedades do polímero utilizado, a geometria do produto, o design do molde e as especificações do processo. De acordo com Arifin e Pranoto (2024), a moldagem por injeção pode ser uma alternativa superior aos métodos tradicionais de processamento de polímeros, oferecendo maior eficiência, precisão e versatilidade na produção de peças complexas. Além disso, o controle rigoroso dos parâmetros do processo, como temperatura, pressão e tempo de resfriamento, é essencial para minimizar defeitos e garantir a qualidade final do produto.

3.1 Sustentabilidade e design

O design, aliado à sustentabilidade, surge como uma abordagem essencial para conciliar as demandas da produção industrial com as necessidades ambientais e sociais. Essa integração é especialmente relevante na indústria de injeção de polímeros, onde os desafios ambientais e a busca por soluções sustentáveis têm se tornado cada vez mais importantes. Para Fischer *et al.* (2023), no contexto do desenvolvimento sustentável, destacam-se três abordagens principais: eficiência, consistência e suficiência. Essas estratégias buscam reduzir o consumo de recursos e, embora não eliminem totalmente os impactos ambientais, sua aplicação integrada pode gerar avanços significativos na sustentabilidade de sistemas baseados em recursos.

Na indústria de injeção de polímeros, segundo Yusoff, Turan e Adanan (2024), os pilares principais para promover práticas mais responsáveis e eficientes abrangem a seleção de materiais, a otimização de processos, a redução de resíduos, a avaliação do ciclo de vida, o design voltado para a sustentabilidade, a conformidade com regulamentações, a melhoria contínua e a comunicação eficaz. Esses elementos são essenciais para alinhar a produção de produtos poliméricos às demandas sociais e ambientais atuais. A seleção de materiais, em particular, desempenha um papel central no quesito sustentabilidade na indústria, uma vez que, como destacam Vassallo, Rochman e Refalo (2020, p. 504), “alguns materiais consomem mais energia para produzir do que outros. Além disso, o que acontece com o material no final de sua vida útil é algo muito importante a ser considerado.”

Outro ponto importante é que a literatura mostra que, áreas como o design, a química, a biologia e a engenharia de materiais têm se dedicado à criação, caracterização e aplicação de polímeros desenvolvidos de fontes renováveis.

Para que ocorra essa integração entre design e sustentabilidade, o designer se torna um agente fundamental no processo. É imprescindível que, ao projetar um produto que tem como matéria-prima o plástico, considere-se o ciclo de vida do material do início ao fim, com o objetivo de minimizar os impactos em todas as fases, desde a produção até o descarte, e, principalmente, como recuperar a matéria após o fim de sua vida útil.

A visão de economia circular, que considerado a reinserção no ciclo, do material descartado, em oposição ao sistema linear amplamente difundido no mercado, é uma área de atenção para designers que atuam no desenvolvimento de produtos poliméricos. As propriedades do plástico permitem sua ampla difusão no mercado e, se bem planejado, pode ter seu uso em quantidade reduzida, sua estrutura reutilizada ou seu material reciclado, como formas de manter a matéria-prima circulando e não apenas descartada após um único uso.

De acordo com Mauro e Borba (2008), o design contribui com a sustentabilidade ao trazer sua originalidade e suas metodologias na busca de uma estabilidade entre os aspectos industriais, econômicos e ambientais. Essa abordagem não apenas reduz os impactos negativos, mas também promove a inovação e a criação de produtos que atendam às necessidades da sociedade sem comprometer o meio ambiente.

3.2 Desafios ambientais e normativos no uso de polímeros

O uso de polímeros na indústria apresenta diversos desafios, especialmente no que diz respeito aos resíduos gerados durante os processos produtivos. Segundo Forlin e Faria (2002), os principais descartes da produção industrial de plásticos incluem resinas, sobras de acabamento e produtos que não atendem aos padrões de qualidade ou de projeto. A forma como esses materiais são descartados é de extrema importância pois, quando realizada de maneira inadequada, pode resultar em problemas ambientais consideráveis.

Além disso, o descarte inadequado de materiais poliméricos contribui para o surgimento de microplásticos na natureza. Conforme destacam Martins, Rodrigues e Tavares (2023, p. 371), “já os microplásticos secundários são aqueles advindos da degradação de materiais poliméricos, descartados inadequadamente, quer seja pelo uso doméstico ou industrial”. Esses microplásticos, quando presentes no meio ambiente, podem ser ingeridos por animais terrestres e marinhos, entrando na cadeia alimentar e afetando a saúde tanto dos animais quanto dos seres humanos. Esse fenômeno representa um dos maiores desafios ambientais associados ao uso de polímeros, uma vez que os impactos são de longo prazo e de difícil mitigação.

Outro aspecto crítico do uso de polímeros é sua contribuição para o efeito estufa, decorrente da liberação de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases gerados no processamento de matérias-primas fósseis. Segundo Viana (2023), as emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo de todo o ciclo de vida do material podem mais que dobrar, intensificando o aquecimento global e agravando as mudanças climáticas. Além disso, o descarte inadequado desses materiais representa desperdício de recursos não renováveis, como o petróleo, principal insumo na produção de polímeros. Tal desperdício não apenas compromete as reservas naturais do planeta, mas também aumenta a pressão sobre os ecossistemas, uma vez que a extração e o processamento desses recursos provocam impactos ambientais adicionais. Supõe-se que a maior parte desses resíduos, quando mal gerenciados, contribua para a poluição de ecossistemas terrestres, sendo estimado que cerca de 80% do plástico presente nos oceanos tenha origem na poluição proveniente do solo (Li *et al.*, 2016).

Diante desses desafios, as legislações e normas internacionais desempenham um papel crucial na promoção da sustentabilidade no setor de polímeros, estabelecendo diretrizes e padrões que visam reduzir os impactos ambientais e promover práticas mais responsáveis. Segundo a EMBRAPA (2001), as

normas ISO 14000 — Gestão Ambiental promovem a prevenção de processos de contaminação ambiental, ao orientar as organizações sobre sua estrutura, operação, coleta, armazenamento, recuperação e disponibilização de dados e resultados. Essas diretrizes consideram tanto as necessidades imediatas quanto as futuras do mercado, visando à satisfação do cliente, entre outras recomendações. Dessa forma, integram a organização ao contexto ambiental, incentivando práticas sustentáveis e responsáveis.

3.3 Moldes híbridos

A manufatura de moldes por impressão 3D tem se mostrado uma alternativa inovadora e eficiente aos métodos tradicionais, como os moldes de aço. Diversos estudos, como os de Ferreira e Mateus (2003), propuseram o uso de prototipagem rápida com materiais avançados, destacando a redução de custos e tempo na fabricação de moldes de polímeros. Foggiatto *et al.* (2004) indicaram a viabilidade da utilização de moldes de ABS produzidos por impressão 3D, demonstrando que, embora com algumas limitações, esses moldes são adequados para lotes iniciais de produção. Além disso, a utilização de materiais termoplásticos recicláveis na impressão 3D contribui para a redução do impacto ambiental e para a adoção de práticas mais sustentáveis na indústria de manufatura.

No contexto da indústria de injeção de polímeros, a busca por tecnologias que aprimorem a fabricação de moldes é constante. A produção de moldes de aço é demorada, consome grande quantidade de energia e requer alto investimento econômico, representando uma limitação para a otimização do processo de injeção. A impressão 3D, por sua vez, surge como uma solução mais econômica, rápida e ambientalmente responsável, especialmente para indústrias que necessitam de moldes para pequenos lotes de produção. A tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling), utilizada na impressão 3D, tem se destacado devido à sua capacidade de produzir moldes mais acessíveis e ágeis, sendo adequada para materiais como ABS e polipropileno. Essa tecnologia, ao contrário dos métodos tradicionais, permite a criação de moldes de formas complexas e a inclusão de circuitos de refrigeração conformados, o que melhora a eficiência do processo de injeção (Lopes *et al.*, 2022).

Processos de impressão 3D por luz, seja DLP (Digital Light Processing) ou SLA (Stereolithography) também são adequados à produção de moldes de injeção, tendo inclusive disponíveis no mercado, resinas específicas para esse fim.

A redução de custos e o tempo de fabricação são fatores cruciais para o setor, especialmente diante da pressão para lançamento rápido de novos produtos no mercado (Magalhães; Muniz; Azevedo, 2022). A impressão 3D de moldes oferece uma alternativa competitiva para empresas que buscam agilidade no desenvolvimento e produção de moldes de injeção, especialmente em relação à fabricação de moldes para peças complexas. A flexibilidade proporcionada pela impressão 3D também facilita a adaptação do molde para diferentes geometria e texturas, sem a necessidade de produzir moldes inteiros para cada ajuste. Além disso, a possibilidade de utilizar materiais recicláveis ou bioplásticos na impressão 3D contribui para a sustentabilidade da produção, reduzindo desperdícios e promovendo práticas industriais mais conscientes. Isso torna a tecnologia especialmente útil para indústrias de pequeno porte especializadas na fabricação de moldes e empresas que utilizam o processo de injeção para a fabricação de seus produtos.

4. Resultados

O plástico, material amplamente utilizado na sociedade moderna, tem passado por transformações profundas impulsionadas pela crescente demanda por práticas sustentáveis. A necessidade de reduzir o impacto ambiental e promover um ciclo de vida mais eficiente para os materiais tem incentivado a adoção de soluções inovadoras. Nesse cenário, destacam-se iniciativas como o uso de resinas recicladas e alternativas biodegradáveis, que minimizam a dependência de recursos não renováveis, além da automação e digitalização de processos para reduzir desperdícios e otimizar o uso de recursos. Esses avanços reforçam o papel estratégico do plástico em setores essenciais, ao mesmo tempo em que buscam alinhar progresso tecnológico com responsabilidade ambiental.

4.1 Materiais biodegradáveis, biopolímeros e polímeros verdes

Diante dos desafios ambientais relacionados ao uso intensivo de polímeros derivados de fontes fósseis, têm ganhado destaque alternativas mais sustentáveis, como os materiais biodegradáveis, os biopolímeros e os polímeros verdes. Essas categorias, embora distintas em suas características e aplicações, convergem no objetivo de reduzir os impactos ambientais associados à produção, uso e descarte de materiais poliméricos. A compreensão dessas abordagens é fundamental para avaliar seu potencial na transição para modelos produtivos mais circulares e sustentáveis.

4.1.1 Desafios ambientais e normativos no uso de polímeros

Segundo Costa (2013, p. 35), “materiais biodegradáveis são todos aqueles que, quando entram em contato com o meio ambiente, se degradam, transformando-se nos elementos naturais de sua composição, fechando o ciclo biológico da cadeia”. Essa característica torna os plásticos biodegradáveis uma opção viável para minimizar os resíduos plásticos que persistem no meio ambiente por longos períodos. Os polímeros biodegradáveis podem ser obtidos a partir de diferentes origens. Entre as fontes naturais renováveis, destacam-se o milho, a celulose, a batata e a cana-de-açúcar. Também podem ser produzidos por microrganismos, como bactérias, que sintetizam polímeros a partir de pequenas moléculas, como é o caso da celulose bacteriana produzida por processo de fermentação para a criação da bebida kombucha. Outra possibilidade é a utilização de fontes animais, como a quitina, a quitosana e determinadas proteínas. Além disso, polímeros biodegradáveis podem ainda ser desenvolvidos a partir de recursos fósseis, como o petróleo, ou de misturas que combinam biomassa e derivados petroquímicos (Araújo *et al.*, 2021).

Os polímeros biodegradáveis apresentam vantagens ambientais relevantes em comparação aos plásticos convencionais. Entre os principais benefícios, destacam-se a degradação acelerada, que reduz o acúmulo de resíduos no meio ambiente, e o menor impacto ecotoxicológico, uma vez que sua decomposição não libera substâncias nocivas. Além disso, sua produção pode reduzir em até 68% as emissões de gases de efeito estufa em relação aos polímeros derivados de petróleo, contribuindo significativamente para mitigar as mudanças climáticas. Outro aspecto relevante é a possibilidade de utilização de fontes renováveis em sua fabricação, o que fortalece a transição para modelos produtivos mais sustentáveis. Por fim, sua característica de compostabilidade permite que retornem nutrientes ao solo, reforçando a integração desses materiais aos ciclos naturais (ECO BIO POLÍMEROS, 2024).

4.1.2 Biopolímeros

Os biopolímeros são macromoléculas de origem natural ou produzidas por processos biológicos, caracterizadas principalmente por sua biodegradabilidade e, em muitos casos, por sua biocompatibilidade. Aqueles derivados de plantas e microrganismos destacam-se como alternativas sustentáveis, justamente por aliar essas duas propriedades. Quando obtidos de resíduos agrícolas, por exemplo, os biopolímeros contribuem para uma economia de desperdício zero e apresentam menor impacto ambiental. Sua aplicação vem se expandindo em mercados estratégicos, como a indústria alimentícia, onde são valorizados pela segurança e pelas propriedades funcionais, e nos setores médico e farmacêutico, em que se destacam como materiais biocompatíveis para a liberação controlada de fármacos e para a engenharia de tecidos (Kaur; Pathak; Vyas, 2024).

4.1.3 Polímeros verdes

Os polímeros verdes, também chamados de bioplásticos ou biobased, são materiais poliméricos cuja estrutura química é semelhante à dos plásticos convencionais derivados do petróleo, porém obtidos parcial ou totalmente a partir de fontes renováveis, como biomassa de resíduos agroindustriais. Embora mantenham desempenho técnico equivalente aos plásticos petroquímicos, incluindo compatibilidade com os métodos de processamento existentes e reciclabilidade, nem todos os polímeros verdes são biodegradáveis, o que pode limitar seus benefícios ambientais ao longo do ciclo de vida.

Os polímeros verdes representam uma alternativa sustentável aos plásticos tradicionais, possibilitando a redução parcial do impacto ambiental sem comprometer a funcionalidade e a aplicabilidade industrial dos materiais (PROFISSÃO BIOTEC, 2024).

4.2 Aspectos sustentáveis da injeção de polímeros

A injeção de polímeros, quando associada a práticas sustentáveis, apresenta um potencial significativo para reduzir impactos ambientais e promover a eficiência no uso de recursos. Dois aspectos que se destacam nesse contexto são a utilização de moldes híbridos, também conhecido como ferramentaria leve ou soft tooling, e a adoção de Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) nas indústrias. Essas práticas não apenas contribuem para a redução do impacto ambiental, mas também fortalecem a competitividade das empresas, alinhando-se às demandas globais por sustentabilidade.

A utilização de moldes híbridos tem ganhado destaque como uma solução inovadora e sustentável. Esses moldes são fabricados por meio de tecnologias avançadas, como a impressão 3D, que permite a produção de peças com menor consumo de materiais e energia. Como destaca Fernandes *et al.* (2014, p. 38), “a fabricação aditiva, utilizando a impressão 3D, resulta em zero sucata. A não existência de sucata também tem benefícios ambientais significativos que podem ajudar uma empresa a melhorar a sustentabilidade de suas operações de fabricação.” Além disso, os moldes híbridos são ideais para a produção de lotes iniciais de peças, reduzindo o tempo e os custos associados ao desenvolvimento de moldes tradicionais. Essa abordagem não apenas otimiza o processo produtivo, mas também minimiza o desperdício de materiais, contribuindo para uma produção mais limpa e eficiente.

Outro aspecto fundamental é a adoção de sistemas de gestão ambiental nas indústrias de injeção de polímeros. Um SGA pode ser definido como “parte do sistema de gestão organizacional utilizado para projetar, implementar e gerenciar a política ambiental” (Oliveira; Serra, 2010). A implementação de um SGA, como o proposto pela norma NBR ISO 14001, permite que as empresas atuem de maneira estruturada para assegurar a proteção do meio ambiente, reduzindo impactos negativos e promovendo práticas mais sustentáveis. Conforme Oliveira e Serra (2010) destacam, “um sistema de gestão ambiental pode ser descrito como uma metodologia pela qual as organizações atuam de maneira estruturada sobre suas operações para assegurar a proteção do meio ambiente”. Essa abordagem é essencial em um cenário onde as questões ambientais têm se tornado cada vez mais relevantes, impulsionadas pela conscientização dos consumidores, pela escassez de recursos naturais e pela cobrança de parceiros por práticas mais limpas.

A integração de moldes híbridos e sistemas de gestão ambiental representa um avanço significativo na busca por processos mais sustentáveis na indústria de injeção de polímeros. Empresas como a Stratasys e a Arburg têm liderado iniciativas nesse sentido, desenvolvendo soluções industriais verdes que promovem a eficiência energética e a sustentabilidade (Fernandes *et al.*, 2014).

As empresas trabalham em parceria, em que moldes produzidos pelas impressoras 3D da Stratasys podem ser utilizados nas injetoras Arburg. Iniciativa da subsidiária brasileira da Arburg alemã, apresenta uma expressiva redução de custos e melhoria do processo produtivo.

[...] as indústrias podem usar os moldes de plástico para verificar o molde de aço que será usado para injetar as peças em larga escala. Geralmente as indústrias imprimem de 10 a 20 moldes em material da Stratasys antes de obter o molde perfeito, que será usado como base para a criação do molde final em aço (Fernandes *et al.*, 2014).

Essas práticas não apenas reduzem o impacto ambiental, mas também fortalecem a competitividade das empresas, demonstrando que é possível aliar desenvolvimento tecnológico e responsabilidade ambiental.

4.3 Estudo de caso: desenvolvimento de um molde modular híbrido para injeção de polímeros

No contexto da indústria de injeção de polímeros, a presente pesquisa concentrou-se no desenvolvimento de uma tecnologia inovadora voltada para a fabricação de moldes, componentes essenciais para garantir a geometria e a qualidade final dos produtos. Os moldes de injeção, assim como as máquinas injetoras, são compostos por diversas peças metálicas, destacando-se, neste estudo, as placas de cavidade inferior e superior (Figura 3).

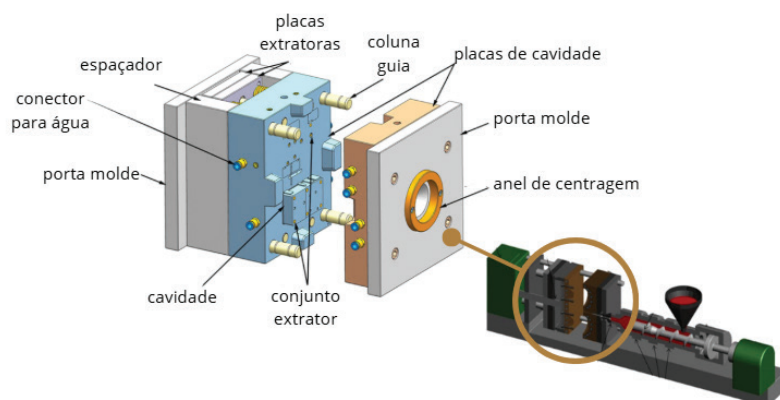


Figura 3 – Função do molde de injeção. Fonte: elaborado pelos autores com base nas ilustrações de Lopes (2020) e Fow Mold (2023).

As placas de cavidade contêm a forma do produto a ser injetado e funcionam de maneira análoga às formas de gelo, moldando o plástico fundido. Tradicionalmente, essas placas são produzidas em aço ou alumínio por processos de subtração de material, como usinagem e eletroerosão, caracterizados por longa duração e elevado custo. Alternativamente, os moldes híbridos adotam processos de adição de material para a produção das placas de cavidade, mantendo o corpo principal em metal e utilizando a impressão 3D com filamentos plásticos para as placas. Nestes casos, uma peça intermediária em aço atua como porta molde, servindo de interface entre a carcaça metálica e o molde impresso em 3D, garantindo a fixação e o alinhamento adequados durante o processo de injeção. Este procedimento não apenas agiliza a fabricação, mas também contribui para a redução de desperdícios de material e energia, alinhando-se a práticas de sustentabilidade industrial.

Em resposta a essa necessidade da indústria em relação às novas soluções que promovam maior acessibilidade e eficiência na fabricação de moldes, ampliando a flexibilidade na produção e reduzindo o consumo de recursos naturais, foi desenvolvido o conceito do *Shift-In Mold*, um molde modular híbrido (figura 4). O nome *Shift-In Mold* refere-se à possibilidade de movimentação das partes do molde. Se na indústria convencional qualquer deslocamento gera um defeito, na proposta desenvolvida é o principal atributo, permitindo prologar o uso de diferentes partes do molde.

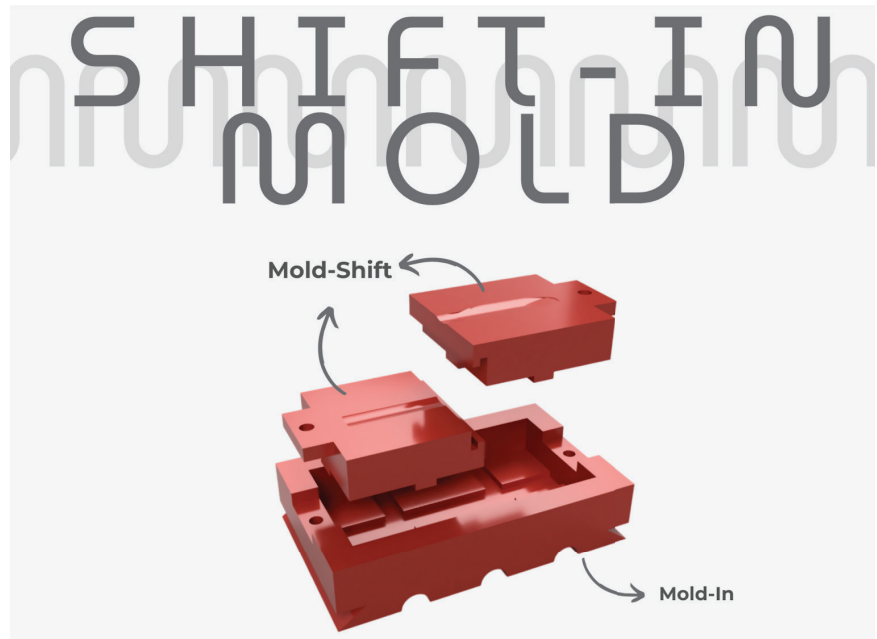


Figura 4 – Componentes do Molde Modular Híbrido desenvolvido. Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Este sistema inovador possibilita maior liberdade de customização e texturização dos produtos injetados. A modularidade do sistema permite não apenas a adaptação rápida a diferentes geometrias, mas também a utilização eficiente de materiais, favorecendo práticas sustentáveis, como a impressão sob demanda e o reaproveitamento de componentes metálicos.

O *Shift-in Mold* é constituído por dois elementos principais: (i) o *Mold-In*; e (ii) o *Mold-Shift*. O *Mold-Shift* pode ser subdividido em múltiplos módulos, sendo, neste estudo, bipartido em *Mold-Shift A* e *Mold-Shift B* para exemplificação. O *Mold-In* (figura 5) desempenha a função de base estrutural, podendo ser fixado, por um porta molde genérico, às cavidades de injeção, acomodando os módulos do *Mold-Shift*.



Figura 5 – *Mold-in*. Fonte: elaborado pelos autores (2025).

O *Mold-Shift* (figura 6) é a região responsável pela impressão da cavidade do produto a ser injetado. Cada módulo *Mold-Shift* pode ser impresso separadamente, permitindo ajustes precisos e a produção de diferentes variantes do produto sem a necessidade de recriar o molde completo.

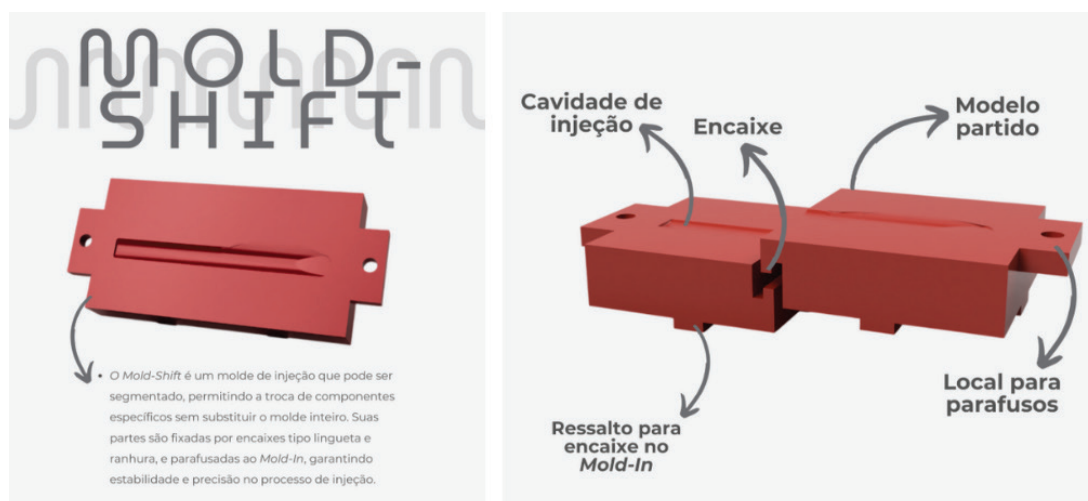


Figura 6 – *Mold-shift*. Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Na Figura 7, cada módulo do molde é apresentado individualmente, sendo o conjunto destacado em vermelho o que compõe o *Shift-In Mold*. Em cinza, o porta molde em posição para receber o dispositivo que foi idealizado, em especial, para situações de partes que podem ser trocadas. Um exemplo é a possibilidade de injeção de talheres plásticos. Considerando uma faca, o Mold-Shift A pode ter a cavidade para injeção da parte da lâmina e o Mold-shift B, podem conter o cabo. O molde híbrido bipartido é uma forma de viabilizar a produção de diferentes cabos, mantendo-se a forma da lâmina, sem a necessidade de um novo molde (completo) para cada variação do produto.

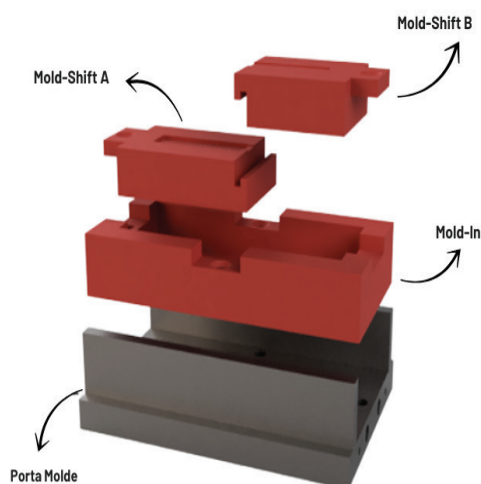


Figura 7 – *Shift-in Mold em porta molde*. Fonte: elaborado pelos autores (2025).

A abordagem modular demonstrou potencial para aumentar a flexibilidade da injeção de polímeros, viabilizando a personalização de produtos e a rápida adaptação a novas demandas industriais. A modularidade facilita ajustes rápidos, correções de falhas e modificações no molde, reduzindo custos operacionais e o tempo de produção. Além disso, a possibilidade de reaproveitar componentes metálicos e imprimir apenas módulos específicos contribui para a redução de desperdício de materiais e energia, evidenciando o caráter sustentável da tecnologia.

5. Conclusão

Este artigo explorou estratégias sustentáveis no processo de injeção de polímeros, evidenciando práticas capazes de minimizar impactos ambientais e promover a circularidade dos materiais. A análise teórica demonstrou que, embora os polímeros sejam essenciais à sociedade, seu uso excessivo e o descarte inadequado geram poluição, emissões de gases de efeito estufa e resíduos persistentes no meio ambiente. Nesse contexto, a substituição de polímeros fósseis por alternativas biodegradáveis e provenientes de fontes renováveis é crucial, destacando-se biopolímeros e polímeros verdes como materiais capazes de reduzir a dependência de recursos não renováveis e diminuir o acúmulo de resíduos plásticos.

A utilização de moldes híbridos, combinando componentes metálicos convencionais e partes produzidas por impressão 3D, surge como uma solução eficiente para otimizar a produção e reduzir desperdícios. O estudo de caso do *Shift-In Mold* exemplifica a aplicação prática dessa tecnologia, demonstrando como a modularidade e a fabricação aditiva permitem adaptação a diferentes geometrias e texturas, sem a necessidade de recriar moldes completos, contribuindo para processos industriais mais sustentáveis.

Além disso, a implementação de sistemas de gestão ambiental, como a norma NBR ISO 14001, possibilita que as empresas atuem de forma estruturada para reduzir impactos, melhorar continuamente suas operações e atender às exigências regulatórias. A integração de práticas sustentáveis, que envolvem materiais renováveis, tecnologias avançadas e gestão ambiental, fortalece o papel estratégico dos polímeros em setores como saúde, transporte e tecnologia, enquanto impulsiona a transição para uma economia circular. Contudo, desafios como custos elevados e limitações técnicas reforçam a necessidade de investimentos em pesquisa e desenvolvimento, bem como a colaboração entre indústria, governo e sociedade para promover a sustentabilidade de forma efetiva.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de iniciação científica.

Referências

5 VANTAGENS surpreendentes dos polímeros biodegradáveis. **Eco Biopolímeros**, 2025. Disponível em: <https://www.ecobiopolimeros.com.br/2024/02/5-vantagens-surpreendentes-dos-polimeros-biodegradaveis-para-o-meio-ambiente>. Acesso em: 3 set. 2025.

ANDRADY, A. L.; NEAL, M. A. Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p. 1977–1984, 27 jul. 2009. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2873019/>. Acesso em 12 fev. 2025.

ARAÚJO, B. A. *et al.* A aplicação de polímeros biodegradáveis como uma alternativa sustentável. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e49010918248—e49010918248, 31 jul. 2021.

ARIFIN, M. A.; PRANOTO, H. Determination of process parameter for injection molding : a review. **Jurnal Rekayasa Mesin**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 1513–1523, 2024. Disponível em: <https://rekayasamesin.ub.ac.id/index.php/rm/article/view/1758>. Acesso em: 8 fev. 2025.

BORTOLATTO, R. **Desenvolvimento de materiais biodegradáveis contendo amido e casca de soja (Glycine max (L.)) produzidos por injeção termoplástica**. 2021. 109 f. Tese (Doutorado em Ciências de Alimentos) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UEL_3322f188a1dbc99dbcf634141b897f0a. Acesso em: 12 fev. 2025.

BIOPOLÍMETROS, polímeros biodegradáveis, bioplástico e polímeros verdes. 2024. **Profissão Biotec**, 2025. Disponível em: <https://profissaobiotec.com.br/biopolimeros-polimeros-biodegradaveis-bioplastico-e-polimeros-verde>. Acesso em: 3 set. 2025.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros — Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª ed. São Paulo: Artliber, 2002.

CHANDA, M. **Plastics technology handbook**. 5. ed. Boca Raton: CRC, 2018.

COSTA, A. C. P. **Análise da substituição de polímeros convencionais por polímeros biodegradáveis: um estudo de caso**. 2013. 63 f. Dissertação (Graduação em Engenharia de Produção) — Centro Universitário Eurípides de Marília, Marília, 2013. Disponível em: <https://aberto.univem.edu.br/bitstream/handle/11077/1035/Ana%20Carolina%20Perini%20Costa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 fev. 2025.

COSTA, R.; PAIXÃO, S.; FIGUEIREDO, J. P.; FERREIRA, A. **Microplásticos e os danos para a saúde humana**. In: DESOUZART, Gustavo; RIBEIRO, Ana. In: 3RD INTERNATIONAL CONGRESS OF HEALTH AND WELL-BEING INTERVENTION — HEALTH, WELL-BEING AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT (ICHWBI 2023), 2023. Resumos [...]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/380466528_Book_of_Abstracts_of_the_3rd_International_Congress_of_Health_and_Well-Being_Intervention_-_Health_Well-being_and_Sustainable_Development_ICHWBI_2023. Acesso em: 29 set. 2025.

EMBRAPA — Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **ISO 14000: gestão ambiental**. 2001. Disponível em: https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod_int/iso_14000.html. Acesso em: 12 fev. 2025.

FERNANDES, A. de F. *et al.* **Supply chain e o impacto da impressora 3D**. 2014, 82 f. Trabalho final de disciplina (MBA em Engenharia e Gestão de Manufatura e Manutenção) — Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2014. Disponível em: https://brasscom.org.br/wp-content/uploads/2017/08/estudos-associados_imprensa_usp.pdf. Acesso em: 2 fev. 2025.

FERREIRA, J.; MATEUS, A. Studies of rapid soft tooling with conformal cooling channels for plastic injection moulding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 142, n. 2, p. 508—516, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00650-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00650-2).

FISCHER, M. *et al.* The Concept of Sustainable Development. **Sustainable Business**, p. 17—27, jan. 2023.

FOGGIATTO, J. A.; AHRENS, C. H.; SALMORIA, G. V.; PIRES, A. T. N. Moldes de ABS construídos pelo processo de modelagem por fusão e deposição para injeção de PP e PEBD. **Polímeros**, v. 14, n. 5, p. 349—353, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000500013>.

FORLIN, F. J.; FARIA, J. de A. F. Considerações sobre a reciclagem de embalagens plásticas. **Polímeros**, v. 12, n. 1, p. 1—10, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/YNNvN9nLDV8rS5ffJp9rF4Q/>. Acesso em: 21 fev. 2025.

FOR, Mold. **Partes de un molde de inyección de plástico**. 25 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://imolde.com/partes-de-moldes-de-inyeccion-de-plastico/>. Acesso em: 01 out 2025.

GIL, Antônio Carlos Gil. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

KAUR, R.; PATHAK, L.; VYAS, P. Biobased polymers of plant and microbial origin and their applications - a review. **Biotechnol Sustain Mater**, v. 1, n. 1, 10 out. 2024.

LI, W.C.; TSE, H.F.; FOK L. Plastic waste in the marine environment: a review of sources, occurrence and effects. **Science of The Total Environment**, v. 566—567, p. 333-349, 2016.

LOPES, J. Como funciona uma máquina injetora de plástico?. **Automata do Brasil**, 2020. Disponível em: <https://www.automataweb.com.br/como-funciona-uma-maquina-injetora-de-plastico/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

LOPES, M.; TAMANINI, C.; WILTGEN, F.; CRUZ, F. A importância das simulações na manufatura aditiva de moldes mecânicos. **Revista Mundi Engenharia - Tecnologia e Gestão**, v. 7, n. 1, p. 396-01—396-24, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21575/25254782rmetg2022vol7n11782>.

MAGALHÃES, L. C. dos S.; MUNIZ, F. R.; AZEVEDO, A. A. de. Análise sobre as causas que impactam na disponibilidade do molde de injeção plástica: um estudo de caso. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 8, n. 6, p. 44—57, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.47456/bjpe.v8i6.38876>.

MARTINS, G. R.; RODRIGUES, E. J. da R.; TAVARES, M. I. B. Revisão da literatura sobre os eventos de degradação e adsorção em microplásticos primários e secundários. **Conjecturas**, v. 23, n. 1, p. 368-390, 2023. DOI: 10.53660/CONJ-1923-2Q10A. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/368843600_Revisao_da_literatura_sobre_os_eventos_de_degracao_e_adsorcao_em_microplasticos_primarios_e_secundarios_Literature_review_on_degradation_and_adsorption_events_in_primary_and_secondary_microplastics. Acesso em: 22 jan. 2025.

MAURO, C.; BORBA, C. A influência da sustentabilidade no processo de design de produto. **Anais do Ensus 2008**, Florianópolis, 2008. DOI: <https://doi.org/10.29183/2596-237x>. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/221945>. Acesso em: 17 jan. 2025.

OLIVEIRA, O. J. de; SERRA, J. R. Benefícios e dificuldades da gestão ambiental com base na ISO 14001 em empresas industriais de São Paulo. **Production**, v. 20, n. 3, p. 429—438, mar. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/ysMnqSGcRTQFdkPHcLr7byL>. Acesso em: 30 jan. 2025.

QUAIS perspectivas para o mercado do plástico no segmento automotivo?. **Knauf Industries**, 2025. Disponível em: <https://knaufautomotive.com/pt-br/quais-sao-as-perspectivas-para-o-mercado-do-plastico>. Acesso em: 01 set. 2025.

TELES, J. J. da S. **Sustentabilidade e economia circular: o desafio do plástico**. 2020, 123 f. Dissertação (Mestrado em Administração Público-Privada) — Universidade de Coimbra, Coimbra, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10316/92729>. Acesso em: 9 jan. 2025.

VASSALLO, C.; ROCHMAN, A.; REFALO, P. The impact of polymer selection and recycling on the sustainability of injection moulded parts. **Proceedings of 27th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference**, v. 90, n. 4, p. 504-509, 2020. DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.118. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343488524_The_impact_of_polymer_selection_and_recycling_on_the_sustainability_of_injection_moulded_parts. Acesso em: 8 jan. 2025.

VIANA, F. L. E. Indústria: Indústria de Produtos Plásticos. **Caderno Setorial Etene**, Fortaleza, n. 296, 2023. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1843>. Acesso em: 3 set. 2025.

YUSOFF, A. I. M.; TURAN, F. M.; ADANAN, N. Q. A. Optimising plastic injection moulding: integrating sustainability and process parameters. **Research Square**, ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4820100/v1>. Disponível em: <https://www.researchsquare.com/article/rs-4820100/v1>. Acesso em: 10 fev. 2025.