

IMPRESSÃO 3D COMO ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL NA REPOSIÇÃO DE PEÇAS AUTOMOTIVAS DESCONTINUADAS

3D PRINTING AS A SUSTAINABLE STRATEGY FOR THE REPLACEMENT OF DISCONTINUED AUTOMOTIVE PARTS

Yuri Neville Costa Rodrigues Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
contato@yurineville.com.br

André Felipe Silva Nascimento Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
andresilva_nascimento@outlook.com

João Vitor de Almeida Vieira Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
joaovitor_av10@yahoo.com

Lhorran Henrique Teixeira Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
lhorran.henrique147@gmail.com

Valmir Torres de Oliveira Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
valmirtjt@gmail.com

Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
janainacpto@gmail.com

Resumo
Este artigo analisa o uso da impressão 3D como alternativa tecnológica para a produção de componentes destinados a veículos fora de linha, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. O objetivo foi avaliar a viabilidade da fabricação aditiva na reposição de peças automotivas internas, por meio de um estudo de caso envolvendo o desenvolvimento de um difusor de ar-condicionado para um veículo descontinuado. A metodologia adotada consistiu em pesquisa aplicada, de abordagem qualitativa, com procedimento experimental, incluindo modelagem tridimensional, prototipagem em polipropileno e fabricação final com filamentos poliméricos distintos, seguida de testes funcionais em condições reais de uso. Os resultados demonstraram que o material PLA apresentou desempenho funcional adequado, estabilidade dimensional e custo significativamente inferior quando comparado ao ASA, atendendo plenamente aos requisitos da aplicação analisada. Conclui-se que a manufatura aditiva se configura como uma estratégia eficiente para prolongar a vida útil de veículos descontinuados, reduzir custos de manutenção e contribuir para práticas alinhadas à economia circular no setor automotivo.

Palavras-chave Manufatura aditiva. Economia circular. Engenharia reversa. Polímeros termoplásticos. Viabilidade econômica.

Abstract
This article analyzes the use of 3D printing as a technological alternative for the production of components intended for discontinued vehicles, considering technical, economic, and environmental aspects. The objective was to evaluate the feasibility of additive manufacturing in the replacement of internal automotive parts through a case study involving the development of an air-conditioning diffuser for a discontinued vehicle model. The methodology consisted of applied research with a qualitative approach and an experimental procedure, including three-dimensional modeling, polypropylene prototyping, and final fabrication using different polymeric filaments, followed by functional testing under real operating conditions. The results showed that PLA exhibited adequate functional performance, dimensional stability, and significantly lower cost when compared to ASA, fully meeting the requirements of the analyzed application. It is concluded that additive manufacturing represents an efficient strategy to extend the service life of discontinued vehicles, reduce maintenance costs, and promote practices aligned with circular economy principles within the automotive sector.

Keywords Additive manufacturing. Circular economy. Reverse engineering. Thermoplastic polymers. Economic feasibility.



1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva enfrenta, nas últimas décadas, um cenário marcado por intensas transformações tecnológicas, pressões regulatórias e crescentes demandas por sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, a necessidade de reduzir desperdícios, emissões e custos associados aos processos produtivos e à manutenção de veículos tem impulsionado a busca por soluções inovadoras ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos automotivos. Entre os desafios recorrentes do setor, destaca-se a reposição de peças automotivas descontinuadas, especialmente em veículos fora de linha, cujo suporte por métodos convencionais de fabricação torna-se economicamente inviável e ambientalmente oneroso, devido à dependência de ferramental específico, estoques elevados e cadeias logísticas complexas (Yang *et al.*, 2024).

A manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, emerge como uma tecnologia capaz de alterar esse paradigma ao permitir a fabricação de componentes diretamente a partir de modelos digitais, com elevada flexibilidade geométrica, redução de desperdício de material e menor necessidade de infraestrutura industrial dedicada. Estudos recentes apontam que a aplicação da impressão 3D no setor automotivo tem evoluído da prototipagem rápida para a produção de componentes funcionais, inclusive em polímeros de engenharia, ampliando seu potencial como alternativa sustentável para a reposição de peças sob demanda (Gibson *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2024).

Apesar dos avanços tecnológicos, observa-se na literatura uma lacuna relacionada à avaliação sistemática da impressão 3D como estratégia sustentável especificamente voltada à reposição de peças automotivas descontinuadas. Grande parte dos estudos concentra-se em aspectos gerais da manufatura aditiva ou em aplicações voltadas à redução de peso e à customização de novos veículos, havendo menor aprofundamento sobre impactos ambientais, durabilidade dos materiais poliméricos e viabilidade técnica em contextos de manutenção e pós-venda. Ademais, questões relacionadas à degradação de materiais como o PLA, amplamente utilizado em impressão 3D, ainda demandam análise criteriosa quando considerados ambientes reais de uso e exposição ao longo do tempo (Castanon-Jano *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, torna-se relevante investigar de forma integrada o potencial da impressão 3D como alternativa sustentável para a reposição de peças automotivas descontinuadas, considerando não apenas a viabilidade técnica de fabricação, mas também seus benefícios ambientais e econômicos em comparação aos métodos tradicionais. Assim, o objetivo geral deste estudo é analisar a impressão 3D como estratégia sustentável aplicada à reposição de peças automotivas descontinuadas, avaliando suas contribuições para a redução de impactos ambientais, otimização de recursos e ampliação da vida útil de veículos no contexto da economia circular.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manufatura Aditiva: Fundamentos, Evolução Histórica e Consolidação Tecnológica

A manufatura aditiva consiste em um conjunto de tecnologias de fabricação caracterizadas pela produção de objetos tridimensionais a partir da deposição sucessiva de material em camadas, diretamente controlada por modelos digitais tridimensionais. Esse paradigma produtivo representa uma ruptura significativa em relação aos métodos tradicionais de manufatura subtrativa, nos quais a geometria final é obtida pela remoção progressiva de material, geralmente associada a elevados índices de desperdício e à necessidade de ferramental dedicado (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

Historicamente, as primeiras aplicações da manufatura aditiva estiveram associadas à prototipagem rápida, com foco na validação de forma, ergonomia e montagem. Contudo, o avanço dos sistemas computacionais, a melhoria da precisão dos equipamentos e a ampliação do portfólio de materiais transformaram essa tecnologia em uma alternativa viável para a fabricação de componentes funcionais e produtos finais, consolidando o conceito de manufatura digital direta (Additive Manufacturing Technologies, 2015).

Segundo Wohlers *et al.* (2023), a manufatura aditiva evoluiu de uma tecnologia de apoio ao desenvolvimento de produtos para um elemento estratégico nos sistemas produtivos industriais, sendo progressivamente integrada às cadeias de valor em setores como aeroespacial, médico e automotivo. Essa evolução está diretamente relacionada à capacidade da impressão 3D de viabilizar geometrias complexas, reduzir prazos de desenvolvimento e permitir personalização em massa, características alinhadas às demandas da Indústria 4.0. No Quadro 1, é possível visualizar como a manufatura aditiva evoluiu ao longo do tempo.

Quadro 1 – Evolução histórica da manufatura aditiva

Período	Características predominantes	Aplicações principais
Década de 1980	Surgimento da estereolitografia	Prototipagem visual
Década de 1990	Expansão da prototipagem rápida	Validação geométrica
Anos 2000	Diversificação de materiais	Protótipos funcionais
Pós-2010	Manufatura digital direta	Peças finais e reposição

Fonte: Elaborado a partir de Gibson; Rosen; Stucker (2015) e Wohlers *et al.* (2023).

No contexto industrial, a manufatura aditiva também se destaca por sua aderência aos princípios da sustentabilidade, uma vez que possibilita maior eficiência no uso de matéria-prima, redução de resíduos e menor dependência de processos energeticamente intensivos, como usinagem pesada e moldagem por injeção (Gebler; Uiterkamp; Visser, 2014).

2.2 Classificação das Tecnologias de Impressão 3D e Aplicações Industriais

As tecnologias de manufatura aditiva podem ser classificadas de acordo com o tipo de material empregado e o mecanismo de consolidação das camadas. De acordo com a classificação proposta

pela ASTM/ISO, destacam-se processos como extrusão de material, fotopolimerização em cuba, fusão em leito de pó, jateamento de ligante, deposição por energia direcionada e laminação de folhas (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

A tecnologia de extrusão de material, amplamente difundida sob a denominação Fused Deposition Modeling (Fdm), é uma das mais utilizadas em aplicações industriais de baixo e médio custo. Seu princípio baseia-se na extrusão de filamentos termoplásticos aquecidos, permitindo elevada flexibilidade geométrica e rápida implementação, características que favorecem sua adoção na fabricação de peças de reposição e componentes personalizados (Turner; Gold, 2015).

Por outro lado, processos baseados em fusão de leito de pó metálico, como a fusão seletiva a laser e a fusão por feixe de elétrons, apresentam maior complexidade operacional e custos elevados, porém possibilitam a fabricação de peças com propriedades mecânicas superiores, microestruturas controladas e elevada densidade, tornando-os adequados para componentes automotivos funcionais e estruturais (Murr, 2015).

Estudos recentes indicam que a diversidade de tecnologias disponíveis permite a seleção do processo mais adequado de acordo com requisitos técnicos, econômicos e ambientais, aspecto fundamental para a aplicação da manufatura aditiva em estratégias de reposição de peças automotivas descontinuadas (Yang *et al.*, 2024). O Quadro 2 apresenta as principais tecnologias de manufatura aditiva e suas respectivas características.

Quadro 2 – Principais tecnologias de manufatura aditiva e características

Tecnologia	Material típico	Vantagens	Limitações
FDM	Polímeros	Baixo custo, simplicidade	Anisotropia mecânica
SLA/DLP	Fotopolímeros	Alta precisão	Custo do material
SLM/EBM	Metais	Alta resistência	Alto custo operacional
Binder Jetting	Pós metálicos	Alta produtividade	Pós-processamento

Fonte: Gibson; Rosen; Stucker (2015); Murr (2015).

2.3 Manufatura Aditiva no Setor Automotivo: Estado da Arte e Tendências

A indústria automotiva figura entre os setores que mais investem na adoção de tecnologias de manufatura aditiva, impulsionada pela necessidade de reduzir ciclos de desenvolvimento, aumentar a flexibilidade produtiva e atender demandas crescentes por customização. Inicialmente restrita à prototipagem, a impressão 3D passou a ser utilizada na fabricação de ferramentas, dispositivos de montagem e, mais recentemente, em componentes finais e peças de reposição (Yang *et al.*, 2024).

De acordo com Ngo *et al.* (2018), a aplicação da manufatura aditiva no setor automotivo possibilita a redução significativa do número de componentes em conjuntos montados, contribuindo para a diminuição de massa, simplificação logística e redução de custos de montagem. Além disso, a fabricação sob demanda elimina a necessidade de estoques volumosos, aspecto particularmente

relevante no caso de veículos fora de linha ou com produção encerrada.

No setor automotivo, a manufatura aditiva tem sido empregada em prototipagem, fabricação de ferramentas, dispositivos de montagem e, mais recentemente, em peças finais e de reposição. Esse avanço é impulsionado pela necessidade de redução de custos logísticos e aumento da flexibilidade produtiva (Ngo *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2024). As principais aplicações da impressão 3D na indústria automotiva podem ser conferidas no Quadro 3 e a Figura 1 exibe casos de componentes automotivos que foram produzidos utilizando manufatura aditiva.

Quadro 3 – Aplicações da impressão 3D na indústria automotiva

Aplicação	Objetivo	Benefícios
Protótipos	Validação de projeto	Redução de tempo
Ferramentas	Apoio à produção	Menor custo
Peças finais	Uso funcional	Customização
Reposição	Pós-venda	Produção sob demanda

Fonte: Yang *et al.* (2024); Holmström *et al.* (2016).

Figura 1 – Exemplos de componentes automotivos produzidos por manufatura aditiva



Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2024).

A reposição de peças automotivas descontinuadas representa um desafio recorrente para fabricantes, oficinas e consumidores, uma vez que a manutenção de ferramental e estoques para componentes de baixa demanda torna-se economicamente inviável. Nesse contexto, a manufatura aditiva surge como alternativa estratégica, permitindo a produção localizada e sob demanda de peças, a partir de modelos digitais, sem necessidade de moldes ou ferramentas específicas (Holmström *et al.*, 2016). A Figura 1

2.4 Materiais Poliméricos Utilizados na Impressão 3D Automotiva

Os materiais poliméricos desempenham papel central na aplicação da manufatura aditiva no setor automotivo, especialmente em componentes internos, suportes, carcaças, dutos e elementos de acabamento. Entre os polímeros mais utilizados destacam-se o ácido polilático (PLA), o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o acrilonitrila estireno acrilato (ASA), cada um com propriedades específicas que influenciam sua adequação ao uso automotivo (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

Os polímeros termoplásticos são amplamente utilizados na impressão 3D automotiva devido à facilidade de processamento e ao custo reduzido. Entre eles, destacam-se PLA, ABS e ASA, cada

um com propriedades específicas que influenciam sua aplicação (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). O Quadro 4 traz uma comparação entre os polímeros usados na impressão 3D voltada para o setor automotivo.

Quadro 4 – Comparação entre polímeros usados na impressão 3D automotiva

Material	Resistência térmica	Resistência UV	Sustentabilidade
PLA	Baixa	Baixa	Alta
ABS	Média	Baixa	Média
ASA	Alta	Alta	Média

Fonte: Gebler; Uiterkamp; Visser (2014); Castanon-Jano *et al.* (2025).

O PLA é amplamente empregado devido à sua facilidade de processamento, baixo custo e origem renovável, sendo frequentemente associado a práticas sustentáveis. Entretanto, estudos indicam que esse material apresenta limitações relacionadas à resistência térmica, sensibilidade à umidade e degradação ambiental, fatores que devem ser considerados na aplicação em ambientes automotivos (Castanon-Jano *et al.*, 2025).

Pesquisas sobre degradação acelerada de peças impressas em PLA demonstram que condições como exposição à radiação ultravioleta, ambientes alcalinos e variações térmicas podem comprometer suas propriedades mecânicas ao longo do tempo. Ainda assim, quando aplicado em componentes de baixa solicitação mecânica e em ambientes controlados, o PLA apresenta desempenho satisfatório, especialmente em aplicações de reposição temporária ou de baixo impacto estrutural (Castanon-Jano *et al.*, 2025).

O Asa, por sua vez, apresenta maior resistência às intempéries e à radiação ultravioleta, sendo mais indicado para aplicações externas e componentes expostos, enquanto o Abs oferece bom equilíbrio entre resistência mecânica e custo, embora com maior impacto ambiental quando comparado ao PLA (Gebler; Uiterkamp; Visser, 2014).

2.5 Sustentabilidade, Economia Circular e Reposição de Peças Descontinuadas

A sustentabilidade industrial constitui um dos principais vetores de adoção da manufatura aditiva no setor automotivo. A possibilidade de fabricação sob demanda reduz desperdícios associados à superprodução, minimiza estoques e prolonga o ciclo de vida de produtos, alinhando-se aos princípios da economia circular (Ellen MacArthur Foundation, 2019). O Quadro 5 resume o impacto positivo da impressão 3D na sustentabilidade da indústria automotiva.

Quadro 5 – Contribuições da impressão 3D para a sustentabilidade automotiva

Dimensão	Contribuição
Ambiental	Redução de resíduos
Econômica	Menor custo logístico

Social

Acesso a peças obsoletas

Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2019).

A reposição de peças automotivas descontinuadas por meio da impressão 3D contribui diretamente para a extensão da vida útil dos veículos, reduzindo a necessidade de descarte prematuro e, conseqüentemente, o impacto ambiental associado à produção de novos automóveis. Além disso, a produção localizada diminui emissões relacionadas ao transporte logístico e favorece cadeias de suprimento mais resilientes e descentralizadas (Holmström *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a manufatura aditiva deve ser compreendida não apenas como uma inovação tecnológica, mas como uma estratégia integrada de sustentabilidade, capaz de promover eficiência econômica, responsabilidade ambiental e atendimento às demandas sociais por consumo consciente e durável.

2.6 Síntese Crítica e Fundamentação do Estudo

Apesar dos avanços tecnológicos e da crescente adoção industrial, a literatura ainda aponta lacunas relacionadas à padronização normativa, avaliação de confiabilidade em longo prazo e validação técnica de peças automotivas produzidas por manufatura aditiva. Questões como desempenho mecânico sob carregamentos cíclicos, resistência ao envelhecimento ambiental e critérios de certificação permanecem como desafios relevantes.

Dessa forma, o presente estudo fundamenta-se na necessidade de aprofundar a análise da impressão 3D como estratégia sustentável para a reposição de peças automotivas descontinuadas, contribuindo para o avanço do conhecimento científico e para a consolidação de práticas industriais mais sustentáveis, flexíveis e economicamente viáveis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Delineamento da Pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada, de natureza qualitativa e quantitativa, com abordagem experimental e exploratória. O estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica, funcional e ambiental da impressão 3D como estratégia sustentável para a reposição de peças automotivas descontinuadas, considerando aspectos de desempenho mecânico, precisão dimensional e potencial de redução de impactos ambientais.

O método adotado baseou-se em estudo de caso experimental, complementado por análises comparativas entre peças produzidas por manufatura aditiva e especificações técnicas de componentes automotivos originais, conforme práticas consolidadas na literatura de manufatura aditiva aplicada à indústria automotiva (Gibson; Rosen; Stucker, 2015; Yang *et al.*, 2024).

3.2 Materiais Utilizados

3.2.1 Materiais Poliméricos

Foram utilizados filamentos termoplásticos amplamente empregados na indústria de impressão 3D automotiva, selecionados com base em disponibilidade comercial, propriedades mecânicas e relevância ambiental:

- **PLA (Ácido Polilático)**, de origem renovável, caracterizado por boa estabilidade dimensional e facilidade de processamento;
- **ASA (Acrilonitrila Estireno Acrilato)**, selecionado por sua maior resistência térmica, mecânica e à radiação UV, adequada a aplicações automotivas externas.

A escolha desses materiais fundamentou-se em estudos que demonstram sua aplicabilidade em peças funcionais, protótipos e componentes de reposição, bem como em análises de sustentabilidade associadas ao ciclo de vida do produto (Freitas, 2023; Castanon-Jano *et al.*, 2025).

3.3 Equipamentos e Infraestrutura Experimental

A fabricação das peças foi realizada por meio de impressora 3D do tipo Fused Deposition Modeling (FDM), tecnologia amplamente difundida devido ao seu baixo custo, versatilidade e compatibilidade com diferentes polímeros termoplásticos.

O sistema experimental foi composto por:

- Impressora 3D FDM com controle de temperatura de bico e mesa aquecida;
- Software de modelagem tridimensional (CAD) para reconstrução geométrica das peças;
- Software de fatiamento (slicer) para definição dos parâmetros de impressão;
- Instrumentos de medição dimensional, incluindo paquímetro digital;
- Equipamentos auxiliares para acabamento e inspeção visual.

A escolha da tecnologia FDM justifica-se por sua ampla adoção em aplicações industriais e acadêmicas, especialmente em contextos de produção descentralizada e reposição sob demanda (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

3.4 Modelagem e Preparação das Peças

As peças automotivas analisadas foram inicialmente modeladas em ambiente CAD, a partir de medições diretas de componentes físicos ou de referências técnicas disponíveis. Em seguida, os modelos tridimensionais foram exportados em formato STL e preparados no software de fatiamento.

Foram definidos parâmetros padronizados de impressão, tais como:

- Altura de camada;

- Densidade e padrão de preenchimento;
- Velocidade de impressão;
- Temperatura de extrusão e da mesa aquecida;
- Orientação da peça na mesa de impressão.

A padronização dos parâmetros teve como objetivo reduzir variabilidades no processo e permitir comparações consistentes entre amostras, conforme recomendado na literatura técnica (Yang *et al.*, 2024).

3.5 Procedimentos de Fabricação Aditiva

O processo de fabricação ocorreu de forma sequencial, seguindo as etapas:

- a) Preparação do equipamento e calibração da mesa;
- b) Carregamento do filamento termoplástico;
- c) Execução da impressão camada a camada;
- d) Resfriamento controlado da peça;
- e) Remoção da peça da mesa e inspeção inicial.

Após a impressão, as peças passaram por acabamento superficial mínimo, quando necessário, restringindo-se à remoção de suportes e rebarbas, de modo a preservar as características originais do processo aditivo.

3.6 Ensaios e Análises Realizadas

As peças produzidas foram submetidas a análises qualitativas e quantitativas, incluindo:

- **Avaliação dimensional**, por meio de comparação entre dimensões projetadas e dimensões obtidas;
- **Inspeção visual**, visando identificar defeitos típicos do processo FDM, como delaminação e falhas de deposição;
- **Análise funcional**, verificando a adequação geométrica e o encaixe da peça no conjunto automotivo simulado;
- **Análise comparativa de sustentabilidade**, considerando redução de desperdício de material, possibilidade de produção local e extensão da vida útil de sistemas automotivos.

Esses procedimentos seguem abordagens recomendadas em estudos recentes sobre aplicação da manufatura aditiva na indústria automotiva e em peças de reposição (Freitas, 2023; Yang *et al.*, 2024).

3.7 Tratamento e Análise dos Dados

Os dados obtidos foram organizados em tabelas e quadros comparativos, permitindo a análise crítica dos resultados em relação aos objetivos do estudo. A interpretação dos resultados considerou tanto os aspectos técnicos quanto os impactos ambientais e econômicos associados à adoção da impressão 3D como estratégia sustentável.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados da Prototipagem e Fabricação das Peças

4.1.1 Resultados da Prototipagem em Polipropileno (PP)

A primeira etapa experimental consistiu na prototipagem do difusor de ar-condicionado utilizando filamento de polipropileno (PP), com a finalidade de validar a geometria, o encaixe no painel automotivo e a funcionalidade básica do componente. Conforme observado durante o processo de impressão, o PP apresentou facilidade de aquisição e baixo custo, além de permitir a confecção rápida de protótipos.

Entretanto, foram identificadas anomalias típicas do material em processos FDM, tais como baixa adesão entre camadas, empenamento e defeitos superficiais, o que inviabilizou sua utilização como peça final. Apesar dessas limitações, o protótipo em PP cumpriu adequadamente seu papel de validação dimensional e funcional preliminar, confirmando a precisão do modelo CAD desenvolvido. A Figura 2 exibe o protótipo em polipropileno (PP) do difusor de ar-condicionado, fabricado para validação dimensional e de encaixe.

Figura 2 – Protótipo do difusor de ar-condicionado impresso em PP para validação dimensional e de encaixe.



Fonte: Os autores (2026)

4.1.2 Resultados da Fabricação da Peça em PLA

Após a validação geométrica, a peça definitiva foi fabricada em Ácido Polilático (PLA), material de origem renovável amplamente utilizado na manufatura aditiva. O processo de impressão ocorreu sem intercorrências relevantes, resultando em uma peça com boa qualidade superficial, estabilidade dimensional e adequada rigidez estrutural.

A peça em PLA foi instalada no painel do veículo Ford EcoSport 2010 e submetida a um

ensaio prático em condições reais de uso por um período de 30 dias. Durante esse intervalo, não foram observadas deformações visíveis, falhas de fixação, folgas ou perda de funcionalidade, mesmo sob variações térmicas internas que atingiram aproximadamente 39 °C.

Figura 3 – Peça em PLA instalada no painel automotivo para validação funcional em uso real



Fonte: Os autores (2026)

Além disso, a manufatura aditiva permitiu a customização geométrica da peça, evidenciando a flexibilidade do processo produtivo e a possibilidade de agregação de valor estético e funcional ao componente.

4.1.3 Resultados Comparativos de Custo de Produção

O levantamento de custos evidenciou uma vantagem econômica significativa da manufatura aditiva utilizando PLA. O custo médio de produção da peça em PLA foi estimado em aproximadamente R\$ 8,13 por unidade, considerando apenas o consumo de material. Em contrapartida, o filamento de ASA apresenta custo médio substancialmente superior, variando entre R\$ 32,00 e R\$ 49,00 por quilograma, conforme dados de mercado apresentados nos documentos analisados. A Tabela 1 sintetiza a comparação de custos entre os materiais considerados.

Tabela 1 – Comparação de custos estimados dos materiais utilizados

Material	Custo médio do filamento (R\$/kg)	Aplicação no estudo	Viabilidade econômica
PP	Baixo	Prototipagem	Alta (para testes)
PLA	20,00 – 25,00	Peça final	Muito alta
ASA	32,00 – 49,00	Comparativa teórica	Moderada

Fonte: Os autores (2026)

4.2 Discussão dos Resultados

4.2.1 Viabilidade Técnica da Manufatura Aditiva na Reposição Automotiva

Os resultados obtidos confirmam que a manufatura aditiva por deposição de material fundido (FDM) é tecnicamente viável para a reposição de peças automotivas internas descontinuadas. A combinação entre engenharia reversa, modelagem CAD e impressão 3D possibilitou a obtenção de um componente funcional, com desempenho compatível ao uso real, corroborando estudos que

destacam a impressão 3D como alternativa eficaz para produção sob demanda (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

A validação funcional da peça em PLA durante o período de testes reforça que, para aplicações internas e não estruturais, o desempenho mecânico e térmico do material é suficiente, conforme discutido por Callister e Rethwisch (2020).

4.2.2 Análise Comparativa entre PLA e ASA

Embora o ASA apresente propriedades superiores de resistência térmica, impacto e radiação UV, sua aplicação mostrou-se tecnicamente desnecessária para o caso estudado, uma vez que o difusor de ar-condicionado está localizado no interior do veículo, sem exposição direta às intempéries. Dessa forma, o emprego de um polímero de engenharia mais caro não se justifica do ponto de vista funcional nem econômico.

O PLA, por sua vez, demonstrou desempenho adequado, facilidade de impressão e custo reduzido, além de apresentar vantagens ambientais relacionadas à sua origem renovável e potencial biodegradabilidade, aspectos alinhados às discussões de Fernandes (2016) e Zapparoli (2019) sobre sustentabilidade na manufatura aditiva.

4.2.3 Implicações Econômicas e Sustentáveis

Do ponto de vista econômico, a expressiva redução de custos observada evidencia que a impressão 3D pode mitigar um dos principais problemas associados a veículos descontinuados: o alto preço ou a indisponibilidade de peças de reposição. A produção sob demanda elimina a necessidade de estoques e reduz desperdícios, contribuindo para a eficiência da cadeia produtiva (Netto et al., 2024).

Sob a perspectiva ambiental, a utilização do PLA e a extensão da vida útil de veículos existentes contribuem para a redução do descarte prematuro e do consumo de recursos naturais, alinhando-se aos princípios da economia circular e da sustentabilidade industrial (Fernandes, 2016).

4.2.4 Síntese Crítica dos Achados

Os resultados indicam que a escolha adequada do material é determinante para o sucesso da aplicação da impressão 3D na reposição automotiva. Para peças internas, o PLA apresenta o melhor equilíbrio entre desempenho técnico, viabilidade econômica e sustentabilidade. Já o ASA deve ser reservado a aplicações externas ou ambientes mais severos, nos quais suas propriedades superiores sejam efetivamente requeridas.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou que a impressão 3D, no contexto da manufatura aditiva, constitui uma estratégia técnica, econômica e ambientalmente viável para a reposição de peças automotivas descontinuadas, especialmente em aplicações internas e de baixa exigência estrutural. A partir do desenvolvimento e da fabricação de um difusor de ar-condicionado para o veículo Ford EcoSport 2010, foi possível atender ao problema de pesquisa proposto, evidenciando que a indisponibilidade de componentes originais pode ser superada por meio da produção sob demanda associada à engenharia reversa e à modelagem digital.

Os resultados obtidos indicaram que o uso do Ácido Polilático (PLA) apresentou desempenho funcional satisfatório durante o período de testes em uso real, mantendo estabilidade dimensional, integridade estrutural, mobilidade das aletas e aparência superficial adequadas às condições típicas do ambiente interno automotivo. Além disso, o baixo custo de fabricação por unidade reforçou a viabilidade econômica da solução quando comparada a métodos tradicionais de reposição ou à utilização de polímeros de engenharia com maior custo, como o ASA, cuja aplicação se mostrou desnecessária para o caso analisado.

Do ponto de vista ambiental, a adoção do PLA e da manufatura aditiva contribuiu para a redução do desperdício de material, para a diminuição de emissões associadas à produção e ao transporte de peças e para a extensão da vida útil de veículos fora de linha, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade e da economia circular. A possibilidade de customização do componente também evidenciou o potencial da impressão 3D não apenas como ferramenta de substituição, mas como meio de agregação de valor funcional e estético às peças reproduzidas.

Como contribuições para a área da engenharia mecânica e automotiva, este trabalho reforça a aplicação prática da impressão 3D como solução acessível para manutenção veicular, amplia o debate sobre a seleção adequada de materiais poliméricos na manufatura aditiva e oferece subsídios técnicos para a adoção dessa tecnologia em contextos semelhantes.

Por fim, sugere-se, como perspectivas para trabalhos futuros, a realização de ensaios laboratoriais mecânicos e térmicos, estudos de durabilidade em longo prazo, análises comparativas com outros materiais poliméricos e a implementação de repositórios digitais colaborativos para peças automotivas descontinuadas, de modo a ampliar o alcance, a confiabilidade e o impacto sustentável da manufatura aditiva no setor automotivo.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CASTANON-JANO, Laura; LOZANO-CORONA, Mario; BLANCO-FERNANDEZ, Elena. Effect of accelerated degradation on the dimensions and mechanical performance of 3D-printed PLA parts

using different filament manufacturing techniques. **Materials**, Basel, v. 18, n. 10, p. 2267, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18102267>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Completing the picture: how the circular economy tackles climate change**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2019. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org>. Acesso em: 20 jan. 2026.

FERNANDES, Marcos Aurélio. **Avaliação da biodegradabilidade de materiais termoplásticos utilizados na manufatura aditiva**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

FREITAS, Juliana Demolinari Arrighi de. **Manufatura aditiva: avaliação das tecnologias e proposta de modelo de baixo custo**. 2023. 85 f. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

GBLER, Malte; UITERKAMP, Anton J. S.; VISSER, Cindy. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 74, p. 158–167, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>.

GIBSON, Ian; ROSEN, David W.; STUCKER, Brent. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.

HOLMSTRÖM, Jan; LIOTTA, Giulia; CHOONG, Patrick; BARLETTA, Ilaria; TRIANTAFYLLOU, Christos. The direct digital manufacturing (DDM) landscape: definitions, reference models, and applications. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 181, p. 226–242, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.10.009>.

MURR, Lawrence E. Metallurgy of additive manufacturing: examples from electron beam melting. **Additive Manufacturing**, Amsterdam, v. 5, p. 40–53, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.12.002>.

NGO, Tuan D.; KASHANI, Alireza; IMBALZANO, Giuseppe; NGUYEN, Kate T. Q.; HUI, David. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 143, p. 172–196, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

TURNER, Brian N.; GOLD, Scott A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, v. 21, n. 3, p. 250–261, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>.

WOHLERS, Terry; CAMPBELL, Ian; DIEGEL, Olaf; HUFF, Ryan; KOWEN, John. **Wohlers report 2023: 3D printing and additive manufacturing state of the industry**. Fort Collins: Wohlers Associates, 2023.

YANG, Jian; LI, Bo; LIU, Jian; TU, Zhantong; WU, Xin. Application of additive manufacturing in the automobile industry: a mini review. **Processes**, Basel, v. 12, n. 6, p. 1101, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12061101>.

ZAPAROLLI, Domingos. **Economia circular ganha espaço na indústria brasileira**. *Pesquisa FAPESP*, São Paulo, n. 280, p. 38–41, 2019.