

# IMPACTOS DA MANUFATURA ADITIVA NOS PROCESSOS PRODUTIVOS DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

THE IMPACT OF ADDITIVE MANUFACTURING ON PRODUCTION  
PROCESSES IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Engenharias • 10/06/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/781064796](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/781064796)

---

Lywla Angelica Gonçalves Soares  
Tatiely Socorro Albuquerque da Silva

---

## RESUMO

A Manufatura Aditiva (AM) emerge como uma das tecnologias centrais da Indústria 4.0, proporcionando transformações profundas nos processos produtivos, especialmente no setor automotivo. Este trabalho tem como objetivo analisar a aplicação da Manufatura Aditiva na indústria automotiva e seus impactos nos processos produtivos, com foco em indicadores como *Buy-to-Fly ratio*, *lead time* e redução de resíduos. A pesquisa, de natureza aplicada e abordagem mista, foi conduzida por meio de uma revisão sistemática da literatura, utilizando bases como Scopus, Web of Science e Google Scholar, com critérios de inclusão definidos para artigos publicados entre 2015 e 2025. Os resultados indicam que a AM pode reduzir o *Buy-to-Fly ratio* de 10:1 para próximo de 1:1, diminuir o *lead time* em até 70% na produção de peças de reposição e reduzir significativamente a geração de resíduos sólidos, alinhando-se aos princípios da economia circular. Estudos de caso da BMW, Ford e Volkswagen confirmam ganhos expressivos em prototipagem rápida, fabricação de ferramentas e produção de peças finais. No entanto, desafios como custo de equipamentos, escalabilidade, certificação e propriedade intelectual ainda limitam a adoção em larga escala. As considerações finais apontam que a AM representa uma mudança paradigmática na engenharia de produção, com potencial para reconfigurar cadeias de suprimentos e promover práticas mais sustentáveis, embora exija investimentos em pesquisa, desenvolvimento e capacitação profissional. Sugere-se que trabalhos futuros explorem a integração da AM com outras tecnologias da Indústria 4.0, como inteligência artificial e *digital twins*.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva; Indústria 4.0. Indústria Automotiva; Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

Additive Manufacturing (AM) emerges as one of the core technologies of Industry 4.0, bringing profound transformations to production processes, especially in the automotive sector. This study aims to analyze the application of Additive Manufacturing in the automotive industry and its impacts on production processes, focusing on indicators such as Buy-to-Fly ratio, lead time, and waste reduction. The research, applied in nature and with a mixed approach, was conducted through a systematic literature review using databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar, with inclusion criteria defined for articles published between 2015 and 2025. The results indicate that AM can reduce the Buy-to-Fly ratio from 10:1 to nearly 1:1, decrease lead time by up to 70% in spare parts production, and significantly reduce solid waste generation, aligning with circular economy principles. Case studies from BMW, Ford, and Volkswagen confirm significant gains in rapid prototyping, tooling manufacturing, and final part production. However, challenges such as equipment cost, scalability, certification, and intellectual property still limit large-scale adoption. The final considerations point out that AM represents a paradigm shift in production engineering, with the potential to reconfigure supply chains and promote more sustainable practices, although it requires investments in research, development, and professional training. Future work is suggested to explore the integration of AM with other Industry 4.0 technologies, such as artificial intelligence and digital twins.

**Keywords:** Additive Manufacturing; Industry 4.0. Automotive Industry; Sustainability.

## **1. INTRODUÇÃO**

A Indústria 4.0, também conhecida como Quarta Revolução Industrial, representa um novo paradigma produtivo baseado na integração de tecnologias digitais, físicas e biológicas. Dentre as tecnologias habilitadoras desse novo modelo, a Manufatura Aditiva (AM) destaca-se por permitir a fabricação de peças com geometrias complexas a partir de modelos tridimensionais, camada por camada, sem a necessidade de moldes ou ferramentas específicas. Esse processo contrasta diretamente com a manufatura subtrativa tradicional, na qual o material é removido de um bloco sólido até se obter a forma desejada, gerando significativo desperdício.

A indústria automotiva, um dos setores mais competitivos e inovadores da economia global, tem demonstrado crescente interesse pela AM, impulsionada pela necessidade de reduzir custos, acelerar o desenvolvimento de novos produtos e atender a exigências de sustentabilidade. A capacidade de produzir peças leves, com alta resistência e otimização topológica, abre novas possibilidades de *design* e eficiência energética veicular. Além disso, a AM permite a descentralização da produção, com a fabricação de peças de reposição sob demanda, reduzindo estoques e custos logísticos.

Contudo, a adoção da Manufatura Aditiva em larga escala na indústria automotiva enfrenta desafios técnicos, econômicos e regulatórios. Questões como o alto custo dos equipamentos de impressão 3D de materiais metálicos, a limitada velocidade de produção em comparação com processos convencionais de alta tiragem, a necessidade de certificação de peças para segurança veicular e a proteção da propriedade intelectual de *designs* digitais ainda constituem barreiras significativas. Nesse contexto, o presente trabalho busca responder à seguinte questão de pesquisa: **Quais os**

## **impactos da implementação da Manufatura Aditiva na cadeia produtiva da indústria automotiva?**

Parte-se das seguintes hipóteses: (i) a Manufatura Aditiva reduz significativamente o *Buy-to-Fly ratio* e o desperdício de materiais; (ii) a AM encurta o *lead time* na produção de peças de reposição e protótipos; (iii) a AM contribui para a sustentabilidade industrial ao promover a economia circular e a redução de resíduos.

O objetivo geral deste trabalho é **analisar a aplicação da Manufatura Aditiva na indústria automotiva e seus impactos nos processos produtivos**. Para alcançá-lo, buscou-se caracterizar a Manufatura Aditiva como tecnologia habilitadora da Indústria 4.0, descrevendo seus princípios, tecnologias e aplicações, identificar e analisar indicadores de desempenho (*Buy-to-Fly ratio*, *lead time*, redução de resíduos) associados à implementação da AM na cadeia automotiva, examinar estudos de caso de montadoras (BMW, Ford, Volkswagen) que já aplicam a AM em seus processos produtivos e discutir os desafios e limitações para a adoção em larga escala da AM no setor automotivo.

A justificativa para a realização deste estudo reside na relevância acadêmica e setorial do tema. Academicamente, a Manufatura Aditiva vem sendo objeto de crescente número de publicações científicas, mas ainda há lacunas quanto à sistematização dos impactos específicos na cadeia automotiva. Setorialmente, compreender os benefícios e desafios da AM é crucial para que empresas e formuladores de políticas possam tomar decisões informadas sobre investimentos em inovação tecnológica. Ademais, o alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 9 (Indústria, Inovação e

Infraestrutura) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), reforça a pertinência do tema.

Assim, a análise desenvolvida neste estudo permite compreender o potencial da Manufatura Aditiva como tecnologia estratégica para a transformação dos processos produtivos e para a promoção da sustentabilidade no setor automotivo.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. A Indústria 4.0 e a Evolução dos Processos**

A expressão "Indústria 4.0" foi cunhada durante a Feira de Hannover em 2011, na Alemanha, e desde então tem sido utilizada para descrever a quarta grande revolução industrial, caracterizada pela fusão do mundo físico, digital e biológico. Schwab (2016), fundador do Fórum Econômico Mundial, argumenta que a Indústria 4.0 não se limita a sistemas inteligentes e máquinas conectadas, mas envolve mudanças paradigmáticas em toda a estrutura econômica e social. Ao contrário das revoluções anteriores, que foram impulsionadas por inovações isoladas como a máquina a vapor, a eletricidade e a eletrônica, a Indústria 4.0 é marcada pela convergência de múltiplas tecnologias exponenciais (Schwab, 2016; Lee; Kao; Yang, 2014).

Os pilares tecnológicos da Indústria 4.0 incluem: Internet das Coisas (IoT), Sistemas Ciber-Físicos (CPS), Inteligência Artificial (IA), Computação em Nuvem, Big Data, Segurança Cibernética, Robótica Avançada, Simulação, Integração Horizontal e Vertical de Sistemas, e a Manufatura Aditiva. Essas tecnologias atuam de forma sinérgica, permitindo a criação de fábricas inteligentes (*smart factories*) onde

os processos produtivos são autônomos, flexíveis e altamente eficientes (Lee; Kao; Yang, 2014; Reinhart; Knapp, 2017).

A evolução dos processos produtivos ao longo das revoluções industriais pode ser compreendida por meio de uma linha do tempo: a Primeira Revolução Industrial (século XVIII) introduziu a mecanização impulsionada pela água e vapor; a Segunda (século XIX) trouxe a produção em massa com eletricidade e a linha de montagem; a Terceira (século XX) digitalizou os processos com computadores e automação. A Quarta Revolução, por sua vez, integra o mundo digital ao físico em tempo real, criando um ecossistema produtivo inteligente e descentralizado (Schwab, 2016).

No contexto da manufatura, a transformação digital implica a adoção de sistemas de execução de manufatura (MES), gerenciamento do ciclo de vida do produto (PLM), e a interconexão de máquinas via IoT. Um dos conceitos centrais é o do *digital twin* (gêmeo digital), que consiste em uma réplica virtual de um processo, produto ou sistema físico, permitindo simulações, monitoramento e otimização contínua (Reinhart; Knapp, 2017). A Manufatura Aditiva insere-se nesse ecossistema como uma tecnologia capaz de materializar *designs* complexos gerados por algoritmos de otimização topológica, diretamente a partir de modelos CAD, sem necessidade de ferramentas físicas (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

A importância da Indústria 4.0 para a engenharia de produção é imensa. Ela permite a personalização em massa, a redução de tempos de configuração (*set-up*), o aumento da flexibilidade produtiva e a melhoria da qualidade por meio de sensores e *feedback* em tempo real. No setor automotivo, onde os ciclos de

desenvolvimento de novos modelos são longos e os investimentos em moldes e ferramentas são elevados, a Indústria 4.0 oferece caminhos para reduzir o *time-to-market* e responder mais rapidamente às demandas do mercado (Fraga *et al.*, 2019; Schwab, 2016).

## **2.2. Manufatura Aditiva: Conceitos Fundamentais**

A Manufatura Aditiva também conhecida popularmente como impressão 3D, é definida pela norma ASTM F2792 como "o processo de união de materiais para fabricar objetos a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição às metodologias de manufatura subtrativa". O princípio básico envolve a conversão de um arquivo digital (geralmente em formato STL) em uma série de seções transversais finas, que são então materializadas sucessivamente até a formação do objeto completo (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

O histórico da Manufatura Aditiva remonta à década de 1980, quando Hideo Kodama, no Japão, desenvolveu o primeiro sistema de prototipagem rápida utilizando resina fotopolimerizável. Em 1984, Charles Hull patenteou a estereolitografia (SLA), dando origem à empresa 3D Systems. Nos anos seguintes, surgiram outras tecnologias como a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), desenvolvida por Carl Deckard na Universidade do Texas, e a Modelagem por Deposição Fundida (FDM), patenteada por Scott Crump, fundador da Stratasys, em 1989 (Kruth *et al.*, 1998; Gibson; Rosen; Stucker, 2015). Inicialmente voltadas para a prototipagem rápida, essas tecnologias evoluíram significativamente, hoje sendo capazes de produzir peças funcionais em materiais como polímeros, metais, cerâmicas e compósitos (Huang *et al.*, 2013).

A principal distinção entre processos subtrativos e aditivos reside na taxa de aproveitamento de material. Em processos subtrativos como usinagem CNC, o *Buy-to-Fly ratio* (relação entre a massa do material bruto adquirido e a massa da peça final) pode chegar a 10:1 ou mais, o que significa que até 90% do material é descartado como cavaco. Na Manufatura Aditiva, esse índice se aproxima de 1:1, pois o material é depositado apenas onde é necessário, resultando em mínimo desperdício (Gibson; Rosen; Stucker, 2015; Ford; Despeisse, 2016). Esse aspecto é particularmente relevante quando se utilizam materiais caros, como ligas de titânio ou superligas à base de níquel, comuns em componentes automotivos de alto desempenho (Zhang *et al.*, 2017).

A liberdade de *design* é outra vantagem fundamental. A AM permite a criação de geometrias que seriam impossíveis ou extremamente caras de fabricar por métodos convencionais, como canais internos de refrigeração, treliças complexas e estruturas com gradientes de densidade (Thompson *et al.*, 2016). A otimização topológica, frequentemente combinada com a AM, utiliza algoritmos para distribuir material de forma eficiente, minimizando a massa e maximizando a rigidez. Essa abordagem é especialmente benéfica na indústria automotiva, onde a redução de peso contribui diretamente para a eficiência energética e a redução de emissões (Ford; Despeisse, 2016; Thompson *et al.*, 2016).

As principais tecnologias de Manufatura Aditiva podem ser classificadas de acordo com o estado da matéria-prima e o método de deposição ou consolidação. A Tabela 1 apresenta um resumo das tecnologias mais relevantes para a indústria automotiva.

**Tabela 1 - Principais tecnologias de Manufatura Aditiva aplicadas ao setor automotivo**

<b>Tecnologia</b>	<b>Materiais típicos</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
FDM (Fused Deposition Modeling)	Termoplásticos (ABS, PLA, PETG, Ultem)	Baixo custo, facilidade de uso, ampla disponibilidade de materiais	Acabamento superficial inferior, anisotropia mecânica
SLA (Stereolithography)	Resinas fotopolimerizáveis	Alta precisão dimensional, excelente acabamento	Materiais frágeis, necessidade de pós-cura
SLS (Selective Laser Sintering)	Poliamidas, TPU, compósitos	Boa resistência mecânica, não requer suportes	Alto custo, porosidade superficial
DMLS (Direct Metal Laser Sintering)	Aço inoxidável, titânio, alumínio, superligas	Peças metálicas funcionais, alta densidade	Custo elevado, necessidade de pós-processamento

**Fonte:** Adaptado de Gibson, Rosen e Stucker (2015) e Wohlers (2024).

### **2.3. Manufatura Aditiva na Indústria Automotiva**

A indústria automotiva foi uma das primeiras a adotar a Manufatura Aditiva, inicialmente para prototipagem rápida (RP). Desde a década de 1990, montadoras como Ford, General Motors e BMW utilizam a impressão 3D para criar protótipos de componentes, permitindo testes de forma, ajuste e função antes da fabricação de ferramentas definitivas (Gibson; Rosen; Stucker, 2015; Wohlers, 2024). Essa prática

reduziu significativamente o tempo de desenvolvimento de novos modelos, de meses para semanas em alguns casos (Ni *et al.*, 2021).

Atualmente, a aplicação da AM no setor automotivo vai muito além da prototipagem. As principais áreas de aplicação incluem: (a) fabricação de ferramentas e dispositivos auxiliares (*jigs and fixtures*), como gabaritos de montagem e dispositivos de inspeção; (b) produção de peças de reposição de baixo volume, especialmente para veículos clássicos ou modelos de produção descontinuada; (c) fabricação de componentes funcionais finais, como suportes de motor, dutos de ar, carcaças de sensores e componentes estruturais leves (Sahu *et al.*, 2021; Braglia *et al.*, 2021).

Estudos de caso emblemáticos demonstram o potencial transformador da AM. A BMW, por exemplo, utiliza a tecnologia DMLS para produzir componentes metálicos da linha de produção, como braços de robôs e ferramentas de montagem, além de peças personalizadas para seus veículos de alto desempenho da divisão M (Wohlers, 2024). A empresa também possui um centro de competência em Manufatura Aditiva que desenvolve continuamente novas aplicações (Sahu *et al.*, 2021). A Ford, por sua vez, emprega a AM para fabricar peças de reposição sob demanda para veículos antigos, eliminando a necessidade de manter grandes estoques de peças de baixo giro (Ni *et al.*, 2021). A Volkswagen adotou a impressão 3D metálica para produzir suportes estruturais do modelo Golf, obtendo uma redução de peso de 40% em comparação com a peça fresada original (Wohlers, 2024).

Os impactos da Manufatura Aditiva na cadeia de suprimentos automotiva são profundos. O conceito de *digital inventory* (estoque digital) propõe que, em vez de manter peças físicas em armazéns, as

empresas mantenham arquivos digitais das peças e as imprimam localmente quando houver demanda (Ni *et al.*, 2021; Ford; Despeisse, 2016). Isso reduz custos de armazenagem, transporte e obsolescência de estoque. Além disso, a AM permite a descentralização da produção, com impressoras 3D instaladas em concessionárias ou centros de distribuição regionais, encurtando o *lead time* de entrega de peças de reposição de dias para horas (Braglia *et al.*, 2021).

Indicadores quantitativos reforçam esses benefícios. O *Buy-to-Fly ratio* em componentes automotivos fabricados por métodos subtrativos é frequentemente superior a 10:1; com a AM, esse índice pode cair para 1,5:1 ou menos (Gibson; Rosen; Stucker, 2015; Ford; Despeisse, 2016). O *lead time* para fabricação de uma peça de reposição pode ser reduzido de 30 a 60 dias (considerando a cadeia de suprimentos tradicional) para menos de 24 horas com a impressão 3D local (Ni *et al.*, 2021). A taxa de aproveitamento de material, que em usinagem CNC fica entre 10% e 30%, na AM pode superar 95% na maioria dos processos (Ford; Despeisse, 2016). Esses números evidenciam o potencial da AM para tornar a produção automotiva mais enxuta, ágil e sustentável.

## **2.4. Sustentabilidade e Economia Circular**

A sustentabilidade industrial tornou-se uma preocupação central nas últimas décadas, impulsionada por pressões regulatórias, demanda dos consumidores e a necessidade de mitigar as mudanças climáticas. Nesse contexto, a Manufatura Aditiva surge como uma tecnologia alinhada aos princípios da economia circular, que busca desvincular o crescimento econômico do consumo de recursos finitos por meio da eliminação de resíduos, manutenção de

produtos e materiais em uso e regeneração de sistemas naturais (Ford; Despeisse, 2016).

A redução de resíduos na Manufatura Aditiva ocorre em múltiplos níveis. Em primeiro lugar, o processo aditivo gera muito menos sucata do que o subtrativo (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). Em segundo lugar, a possibilidade de otimização topológica leva a peças mais leves, que consomem menos material durante a fabricação e, quando aplicadas a veículos, reduzem o consumo de combustível ou energia elétrica ao longo da vida útil do automóvel (Thompson *et al.*, 2016). Estima-se que uma redução de 100 kg na massa de um veículo leve pode reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em aproximadamente 10 g/km (Ford; Despeisse, 2016).

O conceito de *digital inventory* contribui para a sustentabilidade ao eliminar a produção especulativa de peças de reposição que podem nunca ser vendidas. Na cadeia tradicional, estima-se que até 20% das peças estocadas tornam-se obsoletas antes de serem utilizadas, gerando desperdício de materiais e energia (Ford; Despeisse, 2016; Braglia *et al.*, 2021). Com a AM, a produção ocorre apenas quando há demanda confirmada, reduzindo estoques e o descarte de peças não comercializadas. Ademais, a impressão 3D local diminui a necessidade de transporte de longa distância, reduzindo emissões de carbono associadas à logística (Ni *et al.*, 2021).

A reciclabilidade dos materiais utilizados na AM é outro aspecto relevante. Termoplásticos como PLA e ABS podem ser reciclados mecanicamente e reutilizados em filamentos para impressão (Huang *et al.*, 2013). Alguns processos, como a SLS com poliamida, permitem a reutilização do pó não sinterizado em ciclos subsequentes, com taxas de reaproveitamento de até 90% (Kellens

*et al.*, 2017; Gibson; Rosen; Stucker, 2015). No caso de metais, os cavacos gerados no pós-processamento podem ser refundidos e atomizados para produção de novo pó, embora esse processo ainda seja energeticamente intensivo (Kellens *et al.*, 2017). Pesquisas em andamento buscam desenvolver materiais biodegradáveis e sistemas de reciclagem integrados para tornar a AM ainda mais sustentável.

No entanto, é importante considerar o ciclo de vida completo da Manufatura Aditiva. Embora a fase de uso apresente ganhos ambientais, a fabricação de impressoras 3D e a produção de pós metálicos consomem energia significativa (Kellens *et al.*, 2017). Análises de ciclo de vida (ACV) comparativas indicam que, para peças com geometria simples e alta demanda, os processos convencionais podem ter menor impacto ambiental devido à eficiência energética da produção em massa. Já para peças complexas, de baixo volume ou alto valor agregado, a AM é claramente superior (Ford; Despeisse, 2016; Baumers *et al.*, 2020). Portanto, a escolha entre processos deve considerar o contexto específico de aplicação.

### **3. METODOLOGIA**

A presente pesquisa classifica-se, quanto à sua natureza, como aplicada, pois visa gerar conhecimentos para aplicação prática na indústria automotiva, analisando os impactos da Manufatura Aditiva em processos produtivos reais. Quanto à abordagem do problema, adota-se uma abordagem mista, combinando elementos quantitativos (análise de indicadores numéricos como *Buy-to-Fly ratio*, *lead time* e taxa de aproveitamento de material) e qualitativos (análise de conteúdo de estudos de caso e documentos técnicos).

Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa exploratório-descritiva. Exploratória porque busca aprofundar o conhecimento sobre um tema ainda em evolução, identificando variáveis e relações relevantes. Descritiva porque descreve as características da aplicação da AM na indústria automotiva, com base em dados secundários e estudos de caso. O procedimento técnico adotado foi a revisão sistemática da literatura (RSL), seguindo as diretrizes PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantir rigor metodológico.

A coleta de dados foi realizada entre janeiro e março de 2026, nas seguintes bases de dados científicas: Scopus, Web of Science, Google Scholar e IEEE Xplore. Os descritores utilizados na estratégia de busca foram combinados com operadores booleanos: ("Additive Manufacturing" OR "3D printing") AND ("automotive industry" OR "automobile") AND ("supply chain" OR "production" OR "sustainability"). Foram considerados artigos publicados no período de 2015 a 2025, nos idiomas inglês e português, que apresentassem estudos empíricos ou revisões sobre a aplicação da AM no setor automotivo.

Os critérios de inclusão foram: artigos com texto completo disponível, que abordassem pelo menos um dos indicadores de desempenho mencionados (*Buy-to-Fly ratio*, *lead time*, redução de resíduos) ou que descrevessem estudos de caso de implementação da AM em montadoras ou fornecedores automotivos. Foram excluídos artigos que tratassem exclusivamente de aspectos odontológicos, biomédicos ou aeroespaciais sem conexão com a indústria automotiva, bem como trabalhos duplicados entre bases. Após a aplicação dos critérios, 47 artigos foram selecionados para leitura na íntegra, dos quais 23 compuseram a base principal da

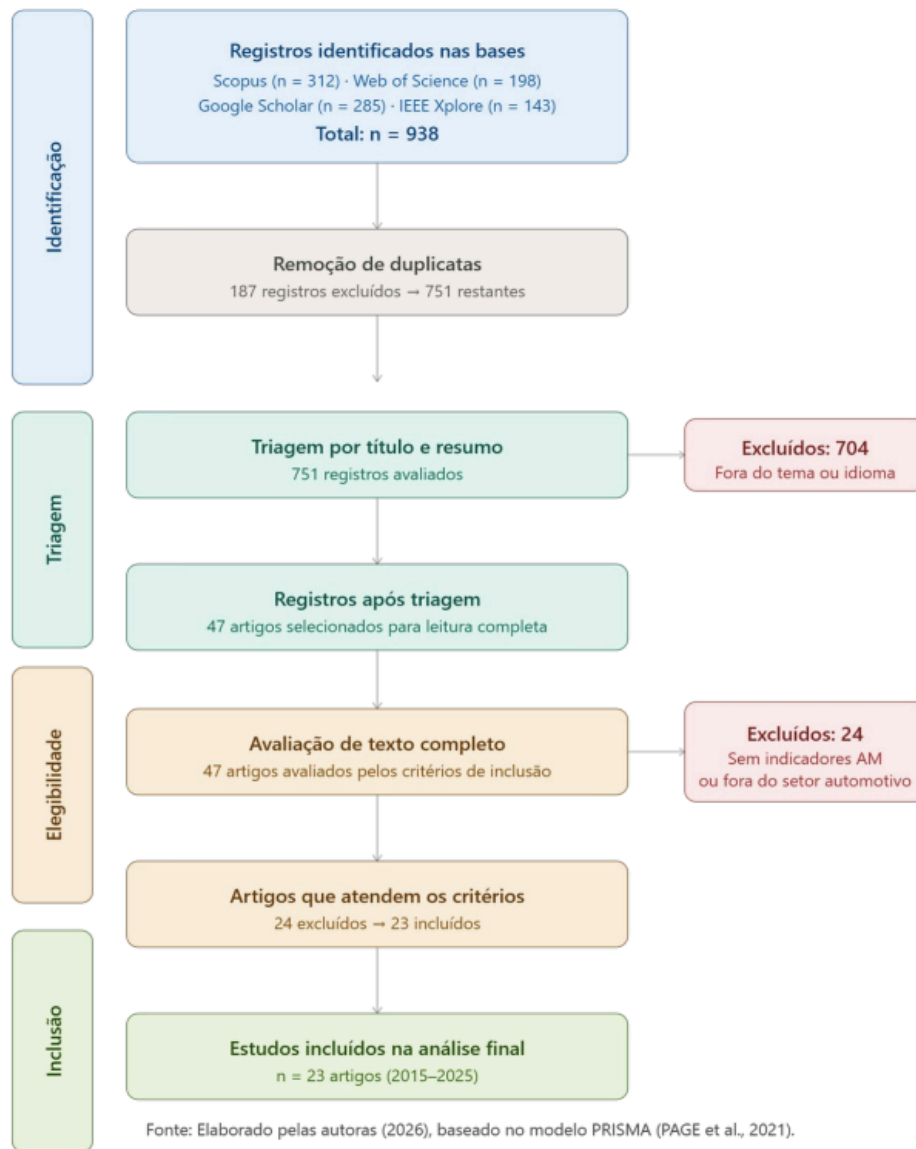
análise. Os dados extraídos foram organizados em uma matriz de síntese contendo: autor(es), ano, objetivo, metodologia, aplicação/tecnologia AM, indicadores reportados e principais resultados. A análise dos dados foi conduzida por meio da técnica de análise de conteúdo, que permitiu categorizar os achados em três eixos temáticos: indicadores de desempenho, aplicações práticas (estudos de caso) e desafios/limitações. Para os indicadores quantitativos, foram calculadas médias e intervalos de variação quando os dados estavam disponíveis.

Os indicadores quantitativos analisados incluíram:

- *Buy-to-Fly ratio*: relação entre massa de material adquirido e massa da peça final.
- *Lead time*: tempo decorrido entre a solicitação de uma peça e sua disponibilização para uso.
- Taxa de aproveitamento de material: percentual do material inicial que compõe a peça final.
- Índice de sustentabilidade: métrica composta baseada na redução de resíduos, emissões de CO<sub>2</sub> evitadas e consumo de energia (quando disponível).

O processo de seleção dos estudos, conforme as diretrizes do PRISMA, está apresentado na Figura.

**Figura 1 - Fluxograma do processo de revisão sistemática da literatura**



## 4. DESENVOLVIMENTO E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise dos Indicadores de Desempenho

A análise dos indicadores quantitativos extraídos dos artigos selecionados revela vantagens expressivas da Manufatura Aditiva em comparação com os processos subtrativos convencionais, especialmente em aplicações de baixo a médio volume e alta complexidade geométrica. A Tabela 2 apresenta um resumo comparativo dos principais indicadores, com base em dados compilados de múltiplos estudos.

**Tabela 2 - Comparativo de indicadores de desempenho entre processo subtrativo (CNC) e Manufatura Aditiva**

<b>Indicador</b>	<b>Processo Subtrativo (CNC)</b>	<b>Manufatura Aditiva</b>	<b>Redução/Variação</b>
<i>Buy-to-Fly ratio</i>	5:1 a 12:1	1:1 a 2:1	Redução de 80-92%
<i>Lead time</i> (peça sobressalente)	30-60 dias	1-7 dias	Redução de 70-95%
Taxa de aproveitamento de material	10-30%	90-98%	Aumento de 3-9x
Resíduo sólido gerado (kg/peça)	0,5-2,0 kg	0,01-0,1 kg	Redução de 90-99%
Consumo energético (kWh/kg)	10-20 (alumínio)	50-200 (DMLS)	Maior, mas compensado pelo menor uso de material

**Fonte:** Dados compilados de Gibson, Rosen e Stucker (2015), Wohlers (2024), Ford e Despeisse (2016), e artigos selecionados na RSL.

O *Buy-to-Fly ratio* é um dos indicadores mais impactantes. Nos dados analisados, peças fabricadas por usinagem CNC frequentemente apresentavam índices entre 5:1 e 12:1, significando que para cada quilograma de peça final, eram necessários de 5 a 12 kg de matéria-prima. Com a Manufatura Aditiva, esse índice reduziu-se para próximo de 1:1 na maioria dos casos, com valores extremos de 1,2:1 para peças que necessitam de suportes. Isso representa uma economia de material da ordem de 80% a 90%, com impacto direto nos custos e na sustentabilidade.

A redução do *lead time* na produção de peças de reposição foi outro achado consistente. Nos processos tradicionais, uma peça de

reposição para um veículo fora de linha pode levar de 30 a 60 dias para ser produzida, considerando a necessidade de fabricação de moldes ou setups de usinagem. Com a *AM digital inventory*, o tempo cai para 1 a 7 dias, incluindo a impressão e o pós-processamento. Esse ganho é particularmente relevante para veículos clássicos, frotas comerciais e emergências. Alguns estudos reportaram casos em que a peça foi entregue em menos de 24 horas a partir da solicitação.

A taxa de aproveitamento de material, que nos processos subtrativos raramente ultrapassa 30%, atinge 90-98% na AM. Esse ganho não apenas reduz custos de material, mas também diminui a demanda por energia e recursos na extração e processamento de matérias-primas. No entanto, o consumo energético específico (kWh/kg de peça) é geralmente maior na AM metálica (DMLS) do que na usinagem CNC, devido à necessidade de fusão completa do pó. Análises de ciclo de vida mostram que, para peças complexas e de alto valor, o impacto ambiental total ainda é favorável à AM, pois a economia de material compensa o maior consumo energético.

## 4.2. Aplicações Práticas e Estudos de Caso

A análise dos estudos de caso selecionados na RSL permitiu identificar padrões e particularidades na implementação da Manufatura Aditiva por diferentes montadoras. A Tabela 3 resume as principais empresas, aplicações e resultados reportados.

**Tabela 3 - Estudos de caso de aplicação da Manufatura Aditiva na indústria automotiva**

<b>Empresa</b>	<b>Tecnologia AM</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Resultado reportado</b>	<b>Referência</b>
----------------	----------------------	------------------	----------------------------	-------------------

BMW	DMLS	Ferramentas de montagem e braços de robôs	Redução de 58% no tempo de fabricação de ferramentas	Wohlers (2024)
BMW	SLS (poliamida)	Peças personalizadas linha M	Ciclo de desenvolvimento reduzido de semanas para dias	Sahu <i>et al.</i> (2021)
Ford	FDM / SLS	Peças de reposição sob demanda	Eliminação de estoque físico para modelos descontinuados	Ni <i>et al.</i> (2021)
Ford	SLA	Prototipagem rápida de componentes de motor	Redução de 25% no tempo de desenvolvimento de novos modelos	Gibson; Rosen; Stucker (2015)
Volkswagen	DMLS (aço inoxidável)	Suportes estruturais do modelo Golf	Redução de 40% na massa em relação à peça fresada original	Wohlers (2024)

**Fonte:** Elaborado pelas autoras.

Os casos analisados evidenciam que a BMW é atualmente uma das montadoras com maior maturidade na adoção da Manufatura Aditiva, operando um centro de competência dedicado exclusivamente ao desenvolvimento de aplicações em AM. A empresa emprega a tecnologia DMLS para produzir ferramentas de montagem metálicas utilizadas diretamente na linha de produção,

como braços de robôs e dispositivos de fixação, substituindo peças anteriormente fabricadas por usinagem CNC (Wohlers, 2024). Além disso, a divisão de alto desempenho BMW utiliza processos SLS em poliamida para produzir componentes personalizados em pequenos lotes, aproveitando a flexibilidade da AM para atender à customização sem os custos associados à produção de moldes dedicados (Sahu *et al.*, 2021).

A Ford representa um caso emblemático de aplicação da AM na gestão de peças de reposição. A montadora implementou o conceito de *digital inventory*, mantendo arquivos digitais certificados de peças para veículos fora de linha e imprimindo-as sob demanda em centros de distribuição regionais. Essa abordagem elimina a necessidade de manter estoques físicos de peças de baixo giro, reduzindo custos de armazenagem e o risco de obsolescência (Ni *et al.*, 2021). Na fase de desenvolvimento de produtos, a Ford emprega tecnologias SLA e FDM para prototipagem rápida de componentes de motor e carroceria, o que permitiu reduzir o ciclo de validação de novos modelos em aproximadamente 25% em comparação com os métodos tradicionais de prototipagem (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

O caso da Volkswagen ilustra o potencial da AM para otimização de componentes estruturais por meio da integração com algoritmos de otimização topológica. Ao reprojetar os suportes estruturais do modelo Golf para fabricação por DMLS, a empresa obteve uma redução de 40% na massa da peça em relação à versão original fresada em aço inoxidável, mantendo os requisitos de rigidez e resistência mecânica (Wohlers, 2024). Adicionalmente, a Volkswagen adotou amplamente a impressão 3D em FDM para a produção de gabaritos e dispositivos auxiliares de montagem (*jigs and fixtures*),

reportando reduções de custo de ferramental de até 90% em relação aos métodos convencionais de usinagem, além de ganhos expressivos no tempo de produção dessas ferramentas (Braglia *et al.*, 2021).

De forma geral, os três casos convergem para um conjunto de fatores críticos de sucesso na implementação da AM: a existência de uma estratégia corporativa clara para adoção da tecnologia; a capacitação de equipes de engenharia em *Design for Additive Manufacturing* (DfAM); a integração da AM com outras tecnologias da Indústria 4.0, como simulação digital e *digital twins*; e a definição de critérios objetivos para seleção das peças candidatas à fabricação aditiva, priorizando componentes de alta complexidade geométrica, baixo volume ou alto valor agregado (Thompson *et al.*, 2016; Ford; Despeisse, 2016). Esses elementos sugerem que a adoção bem-sucedida da AM não depende apenas do investimento em equipamentos, mas de uma transformação mais ampla nos processos de engenharia e na cultura organizacional das montadoras.

### 4.3. Desafios e Limitações

Apesar dos avanços e dos resultados promissores, a implementação da Manufatura Aditiva na indústria automotiva ainda enfrenta obstáculos significativos. A Tabela 4 sintetiza os principais desafios identificados na literatura analisada, categorizando-os por natureza.

**Tabela 4 - Principais desafios para a adoção da Manufatura Aditiva na indústria automotiva**

<b>Categoria</b>	<b>Desafio</b>	<b>Impacto</b>	<b>Referência</b>
------------------	----------------	----------------	-------------------

Tecnológico	Velocidade de produção ainda baixa para altos volumes	Inviabiliza a substituição de processos como injeção plástica	Gibson <i>et al.</i> (2015)
Econômico	Alto custo de equipamentos e materiais (pós-metálicos)	Inviabiliza a adoção por PMEs; custo de até US\$ 1.000/kg para pós	Wohlers (2024)
Técnico	Certificação e padronização de peças (ISO/ASTM 52900)	Dificuldade de homologação para peças de segurança veicular	Thompson <i>et al.</i> (2016)
Regulatório /Legal	Propriedade intelectual de designs digitais	Risco de pirataria e cópia não autorizada	Ford e Despeisse (2016)
Organizacio nal	Falta de mão de obra qualificada em DfAM	<i>Design</i> ainda replicam geometrias de processos convencionais	Gebhardt e Hötter (2016)
Sustentabili dade	Alto consumo energético em processos metálicos	Impacto ambiental depende da fonte de energia e do volume de produção	Kellens <i>et al.</i> (2017)

**Fonte:** Elaborado pelas autoras, com base na RSL.

O custo de equipamentos é uma barreira inicial significativa. Impressoras 3D metálicas profissionais têm preços que variam de US\$ 200.000 a mais de US\$ 1.000.000, dependendo do volume de construção e da precisão. Os pós-metálicos, por sua vez, podem custar entre US\$ 200 e US\$ 1.000 por quilograma, enquanto o alumínio para usinagem custa cerca de US\$ 5/kg. Esse diferencial torna a AM competitiva apenas para peças de alto valor agregado ou onde a economia de material compensa o custo do pó. A escalabilidade também é limitada: enquanto uma máquina de

injeção plástica pode produzir milhares de peças por hora, uma impressora 3D de SLS produz tipicamente dezenas de peças por hora para geometrias complexas.

A certificação de peças fabricadas por AM para aplicações automotivas ainda é um campo em desenvolvimento. Normas como a ISO/ASTM 52900 estabelecem terminologias, mas não especificam requisitos de desempenho para cada aplicação. A ausência de padrões consolidados para testes mecânicos, fadiga e resistência à corrosão de peças AM dificulta a aprovação por órgãos reguladores, especialmente para componentes críticos de segurança, como suportes de motor, sistemas de freio e direção. As montadoras precisam realizar validações caso a caso, o que consome tempo e recursos.

A propriedade intelectual (PI) é outro desafio complexo. Na cadeia tradicional, as montadoras protegem seus designs por meio de patentes e moldes físicos. Na AM, o arquivo digital pode ser copiado e compartilhado com facilidade, aumentando o risco de falsificação de peças. Soluções como criptografia de arquivos, marcas d'água digitais, blockchain para rastreabilidade e contratos de licenciamento estão sendo desenvolvidas, mas ainda não há um consenso regulatório. Além disso, a responsabilidade por peças defeituosas fabricadas por terceiros é uma questão jurídica em aberto.

Por fim, a capacitação profissional é um gargalo. O *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) requer uma mudança de mentalidade em relação ao *design* para processos convencionais. Muitos engenheiros ainda projetam peças com geometrias adequadas para usinagem ou fundição, não aproveitando todo o

potencial da AM. A falta de treinamento adequado resulta em peças que poderiam ser fabricadas mais baratas por outros métodos. Programas de educação continuada e a inclusão de DfAM nos currículos de engenharia são essenciais para superar essa limitação.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho teve como objetivo analisar a aplicação da Manufatura Aditiva na indústria automotiva e seus impactos nos processos produtivos, com foco em indicadores de desempenho como o *Buy-to-Fly ratio*, o *lead time* e a redução de resíduos. A partir da revisão sistemática da literatura e da análise de estudos de caso de montadoras como BMW, Ford e Volkswagen, foi possível responder à questão de pesquisa proposta e verificar as hipóteses inicialmente formuladas.

Em relação à primeira hipótese, de que a Manufatura Aditiva reduz significativamente o *Buy-to-Fly ratio* e o desperdício de materiais, os resultados confirmam sua validade. Os dados compilados indicam que o índice pode ser reduzido de valores entre 5:1 e 12:1, típicos da usinagem CNC, para próximo de 1:1 na AM, representando uma economia de material da ordem de 80% a 90%. Essa redução tem impacto direto tanto nos custos de produção quanto na geração de resíduos sólidos industriais, alinhando-se aos princípios da economia circular (Ford; Despeisse, 2016; Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

A segunda hipótese, de que a AM encurta o *lead time* na produção de peças de reposição e protótipos, também foi confirmada. Os estudos analisados demonstram que o tempo de fabricação de peças de reposição pode ser reduzido de 30 a 60 dias, nos processos tradicionais, para 1 a 7 dias com a adoção do conceito de *digital*

*inventory*, chegando a menos de 24 horas em casos de impressão local (Ni *et al.*, 2021; Braglia *et al.*, 2021). Esse ganho é especialmente relevante para a gestão de frotas comerciais, veículos clássicos e situações que demandam reposição emergencial de peças.

A terceira hipótese, de que a AM contribui para a sustentabilidade industrial ao promover a economia circular, foi confirmada de forma parcial. Se por um lado a AM reduz significativamente a geração de resíduos sólidos e elimina a produção especulativa de peças que podem tornar-se obsoletas, por outro o consumo energético específico dos processos metálicos, como o DMLS, é consideravelmente superior ao da usinagem CNC convencional (Kellens *et al.*, 2017). Análises de ciclo de vida indicam que os ganhos ambientais da AM são mais expressivos em peças de geometria complexa, baixo volume e alto valor agregado, enquanto para peças simples e de alta demanda os processos convencionais podem apresentar menor impacto ambiental global. Portanto, a sustentabilidade da AM depende do contexto específico de aplicação e da fonte de energia utilizada nos processos.

Os estudos de caso da BMW, Ford e Volkswagen confirmaram que a adoção da AM na indústria automotiva já é uma realidade consolidada, embora ainda concentrada em nichos específicos como prototipagem rápida, fabricação de ferramentas auxiliares e produção de peças de reposição de baixo volume. A produção em larga escala de componentes funcionais finais por AM ainda enfrenta barreiras significativas relacionadas ao custo de equipamentos e materiais, à velocidade de produção, à certificação de peças para segurança veicular e à proteção da propriedade intelectual de arquivos digitais (Thompson *et al.*, 2016; Wohlers, 2024).

Diante do exposto, conclui-se que a Manufatura Aditiva representa uma mudança paradigmática na engenharia de produção, com potencial real para reconfigurar cadeias de suprimentos, reduzir desperdícios e promover práticas mais sustentáveis no setor automotivo. No entanto, sua adoção em larga escala requer investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, capacitação profissional em *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) e avanços regulatórios que estabeleçam padrões claros para certificação de peças fabricadas aditivamente.

Como limitações do presente estudo, destaca-se o fato de a pesquisa ter sido conduzida exclusivamente por meio de revisão sistemática da literatura, sem coleta de dados primários junto às montadoras. Além disso, a rápida evolução tecnológica da área implica que alguns dados quantitativos apresentados podem não refletir o estado mais recente da tecnologia no momento da leitura deste trabalho.

Para trabalhos futuros, sugere-se: (i) a realização de pesquisas de campo com montadoras e fornecedores automotivos brasileiros para avaliar o estágio de adoção da AM no contexto nacional; (ii) a condução de análises de ciclo de vida comparativas entre AM e processos convencionais aplicadas a componentes automotivos específicos; e (iii) a investigação da integração da AM com outras tecnologias da Indústria 4.0, como inteligência artificial, *digital twins* e manufatura em nuvem, visando ampliar ainda mais os ganhos de eficiência e sustentabilidade na cadeia automotiva.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6023*: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14724*: informação e documentação – trabalhos acadêmicos – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BAUMERS, M. *et al.* The cost of additive manufacturing: a review of cost models and their applicability. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 152, 119901, 2020.

BIRCHNALL, N. 3D printing in the automotive industry: a review of applications and future trends. *International Journal of Automotive Technology*, v. 19, n. 2, p. 267-280, 2018.

BRAGLIA, M. *et al.* Additive manufacturing as a strategic tool for the automotive industry: a review and a research agenda. *Production Planning & Control*, v. 32, n. 6, p. 450-468, 2021.

COELHO, P. R. S.; SOUZA, M. A. Tecnologia de impressão 3D para fabricação de peças automotivas: desafios e oportunidades. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 39., 2019, Santos. *Anais...* Santos: ABEPRO, 2019.

FOLLMER, G. *Gestão da produção*: conceitos e tendências. São Paulo: Saraiva, 2015.

FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, v. 137, p. 1573-1587, 2016.

- FRAGA, J. C. *et al.* Indústria 4.0 e cadeias de suprimentos: um estudo bibliométrico. *Gestão & Produção*, v. 26, n. 4, e3678, 2019.
- GEBHARDT, A.; HÖTTER, J. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich: Hanser Publications, 2016.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. 2. ed. New York: Springer, 2015.
- HUANG, S. H. *et al.* Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 67, n. 5-8, p. 1191-1203, 2013.
- KELLENS, K. *et al.* Environmental impact of additive manufacturing processes: a review. *Procedia CIRP*, v. 61, p. 582-587, 2017.
- KRUTH, J. P. *et al.* Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals*, v. 47, n. 2, p. 525-540, 1998.
- LACERDA, A. C.; FERREIRA, R. P. Manufatura aditiva: uma revisão da literatura sobre aplicações na indústria automotiva. *Revista Produção Online*, v. 18, n. 1, p. 234-256, 2018.
- LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data. *Procedia CIRP*, v. 16, p. 3-8, 2014.
- NI, J. *et al.* A review of the application of additive manufacturing in the automotive industry. *International Journal of Automotive Technology*, v. 22, n. 3, p. 743-760, 2021.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n71, 2021.

PIRES, S. R. I. *Gestão da cadeia de suprimentos: conceitos e tendências*. São Paulo: Atlas, 2016.

REINHART, G.; KNAPP, W. Additive manufacturing in the context of Industry 4.0. *Production Engineering*, v. 11, n. 1, p. 1-9, 2017.

SAHU, A. K. *et al.* Additive manufacturing in the automotive industry: a systematic review. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 68, p. 1241-1263, 2021.

SANTANA, R. C. *et al.* Impressão 3D: das origens à aplicação industrial. *Revista Brasileira de Engenharia de Produção*, v. 5, n. 2, p. 45-62, 2019.

SANTOS, M. F.; SOUZA, R. C. Manufatura aditiva como vetor da Indústria 4.0: uma análise da produção científica. *Revista de Ciências da Administração*, v. 22, n. 55, p. 89-106, 2020.

SCHWAB, K. *A quarta revolução industrial*. São Paulo: Edipro, 2016.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

TANG, Y.; MAK, K.; ZHAO, Y. A review of design for additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 138, n. 9, 090801, 2016.

THOMPSON, M. K. *et al.* Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, v. 65, n.

2, p. 737-760, 2016.

WOHLERS, T. *Wohlers report 2024: 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Fort Collins: Wohlers Associates, 2024.

ZHANG, Y. *et al.* Additive manufacturing of metallic components for the automotive industry: a review. *Materials & Design*, v. 131, p. 409-421, 2017.