



# Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E  
BIOLÓGICA

## Processo de Prototipagem 3D e Desenvolvimento de Peças de Substituição no Sector Automóvel

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e  
Gestão Industrial

Autor

**João Felipe Carvalho Daflon**

Orientador

**Jorge Alexandre Caldeira Gonçalves de Almeida**



INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA  
DE COIMBRA

Coimbra, Outubro 2023



## RESUMO

A prototipagem 3D é uma técnica avançada de fabrico que permite criar protótipos físicos de produtos de forma rápida e precisa usando impressoras 3D. É amplamente adotada em várias áreas, como a de *design* de produtos, engenharia, medicina e arquitetura, devido às suas vantagens significativas.

Uma das principais vantagens da prototipagem 3D é a rapidez e eficiência na produção de protótipos funcionais, o que reduz o tempo necessário para criar um protótipo em comparação aos métodos tradicionais de fabrico. Além disso, oferece maior flexibilidade e personalização ao permitir a criação de protótipos altamente complexos e personalizados que seriam difíceis de serem produzidos por outros meios. Outra vantagem é a possibilidade de verificar a forma, os ajustes e a funcionalidade de um projeto antes de investir em ferramentas de produção em larga escala. Com protótipos físicos em mãos, os *designers* e engenheiros podem realizar testes práticos, identificar melhorias e fazer ajustes necessários, garantindo a qualidade do produto final.

Apesar disso, a prototipagem 3D enfrenta desafios, como a falta de padronização, a qualidade limitada dos materiais em comparação com os convencionais e o custo inicial das impressoras 3D e dos materiais, o que pode dificultar a adoção em larga escala.

No entanto, a prototipagem 3D continua a evoluir, tornando-se cada vez mais acessível e sofisticada. Com avanços contínuos na pesquisa de materiais, tecnologia de impressão e processos pós-impressão, espera-se que a prototipagem 3D desempenhe um papel ainda mais importante na inovação e desenvolvimento de produtos em diversos sectores, incluindo o sector automóvel. Superar esses desafios exigirá avanços contínuos em investigações, desenvolvimentos de materiais e colaborações entre fabricantes de automóveis e empresas de impressão 3D.

**Palavras-chave:** Prototipagem 3D, automóvel, impressão 3D, manufatura aditiva, peças de substituição, ABS, 3D *scanning*, engenharia reversa.



## **ABSTRACT**

3D prototyping is an advanced manufacturing technique that enables the rapid and precise creation of physical product prototypes using 3D printers. It is widely adopted in various sectors, such as product design, engineering, medicine, and architecture, due to its significant advantages.

One of the main advantages of 3D prototyping is the speed and efficiency in producing functional prototypes, reducing the time required compared to traditional methods like machining or molding. Additionally, it offers greater flexibility and customization by allowing the creation of highly complex and personalized prototypes that would be challenging to produce through other means. Another advantage is the ability to verify the shape, fit, and functionality of a design before investing in large-scale production tools. With physical prototypes in hand, designers and engineers can conduct practical tests, identify improvements, and make necessary adjustments, ensuring the quality of the final product.

Despite these benefits, 3D prototyping faces challenges such as lack of standardization, limited material quality compared to conventional methods, and the initial cost of 3D printers and materials, which can hinder widespread adoption.

However, 3D prototyping continues to evolve, becoming increasingly accessible and sophisticated. Ongoing advancements in materials research, printing technology, and post-printing processes are expected to play a crucial role in innovation and product development across various sectors, including the automotive industry. Overcoming these challenges will require continuous advances in research, material development, and collaboration between automobile manufacturers and 3D printing companies.

**Keywords:** 3D prototyping, automotive, 3D printing, additive manufacturing, spare parts, ABS, 3D scanning, reverse engineering.



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, sem ele e sua bênção nada disso seria possível. Agradeço por tudo que faz por mim nos altos e nos baixos.

Aos meus familiares e parentes queridos quero agradecer pela preocupação e amor explícitos mesmo com toda a distância de todo um continente. Agradeço pelo amor e estímulo incondicional.

À minha ex namorada com seus estímulos e apoio para que eu não desanimasse nunca nos momentos de baixa. E também a seus pais que incentivaram e ajudaram-nos a manter nosso relacionamento à distancia enquanto foi possível.

Também devo dizer obrigado ao Instituto e aos seus funcionários pela bom tratamento. Desde os faxineiros, passando por cozinheiros, ajudantes, docentes, coordenadores, até diretores. Contudo, nesse grupo, fica um agradecimento especial ao professor Engenheiro Jorge Alexandre Almeida, que orientou-me com muita atenção, ótimas sugestões e grande disponibilidade nesta dissertação.

Por fim, mas jamais com menor importância, devo dizer obrigado aos colegas e amigos que fiz durante a trajetória cá por Coimbra e por Vilnius (Erasmus). Espero que um dia eu possa revê-los.



## ÍNDICE

Resumo . . . . .	ii
Abstract . . . . .	iv
Agradecimentos . . . . .	1
Índice . . . . .	3
Índice de tabelas . . . . .	5
Índice de figuras . . . . .	7
Lista de siglas e acrónimos . . . . .	9
1 Introdução . . . . .	11
1.1 Objetivos Gerais . . . . .	11
1.2 Objetivos Específicos . . . . .	12
1.3 Metodologia de Investigação Utilizada . . . . .	13
1.4 Estrutura da Dissertação . . . . .	14
1.5 As Três Primeiras Revoluções Industriais . . . . .	14
1.6 A Indústria 4.0 . . . . .	16
1.7 A Indústria 5.0 . . . . .	17
2 Estado da Arte . . . . .	21
2.1 Revisão da literatura . . . . .	22
2.2 Metodologia utilizada na revisão da literatura . . . . .	24
2.3 Estrutura de consulta semântica e mapa mental . . . . .	25
2.4 Breve <i>workflow</i> da engenharia inversa . . . . .	34
2.5 Tecnologias da digitalização 3D . . . . .	36
2.6 Fabricantes e modelos de <i>scanners</i> 3D . . . . .	45
2.7 <i>Softwares</i> utilizados no processo de digitalização 3D . . . . .	47
2.8 Formatos de ficheiros presentes na digitalização 3D . . . . .	48
2.9 Breve <i>workflow</i> de uma impressão 3D . . . . .	49
2.10 G-code e os problemas estruturais no fabrico aditivo . . . . .	51
2.11 Desenvolvimentos recentes de aplicação do ChatGPT ao G-code . . . . .	59

2.12	Tecnologias de manufatura aditiva existentes . . . . .	62
2.13	Os diferentes tipos de impressão 3D . . . . .	62
2.14	Tecnologias dentro do sector automóvel . . . . .	65
2.15	Materiais mais utilizados . . . . .	72
2.16	Fabricantes e modelos de impressoras 3D . . . . .	85
2.17	Ficheiros em impressão 3D mais comuns . . . . .	86
2.18	<i>Softwares</i> de Modelagem 3D . . . . .	92
2.19	Softwares de impressão 3D . . . . .	94
2.20	Sustentabilidade na Manufatura 3D . . . . .	94
2.21	Barreiras . . . . .	97
3	Casos de Estudo . . . . .	99
3.1	Caso de estudo: Porsche 959 e sua alavanca de embraiagem . . . . .	99
3.2	Caso de estudo: Assentos personalizados da Porsche . . . . .	101
3.3	Caso de estudo: O grupo BMW . . . . .	102
3.4	Caso de estudo: Alfa Romeo Sauber F1 <i>Team</i> . . . . .	103
3.5	Caso de estudo: Coletor de admissão do Ford Hoonitruck . . . . .	104
4	Conclusão . . . . .	107
	Bibliografia . . . . .	109

## ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Níveis de consulta para prototipagem 3D . . . . .	26
2.2	Níveis de consulta para <i>scanning</i> 3D . . . . .	26
2.3	Números de <i>papers</i> por fonte e de acordo com a estrutura de consulta para prototipagem 3D . . . . .	27
2.4	Números de <i>papers</i> por fonte e de acordo com toda a estrutura de consulta para prototipagem 3D para intervalos de anos . . . . .	28
2.5	Números de <i>papers</i> por fonte e de acordo com a estrutura de consulta para <i>scanning</i> 3D . . . . .	28
2.6	Números de <i>papers</i> por fonte e de acordo com toda a estrutura de consulta para <i>scanning</i> 3D para intervalos de anos . . . . .	29
2.7	Sumário dos <i>papers</i> mais citados em prototipagem 3D - Parte 1 . . . . .	30
2.8	Sumário dos <i>papers</i> mais citados em prototipagem 3D - Parte 2 . . . . .	31
2.9	Sumário dos <i>papers</i> mais citados em <i>scanning</i> 3D - Parte 1 . . . . .	32
2.10	Sumário dos <i>papers</i> mais citados em <i>scanning</i> 3D - Parte 2 . . . . .	33
2.11	Vantagens e desvantagens dos <i>scanners</i> de contacto . . . . .	39
2.12	Vantagens e desvantagens dos <i>scanners</i> sem contacto ativos . . . . .	42
2.13	Vantagens e desvantagens dos <i>scanners</i> sem contacto passivos . . . . .	44
2.14	Tecnologias de impressão 3D comuns no sector automóvel - 1 . . . . .	73
2.15	Tecnologias de impressão 3D comuns no sector automóvel - 2 . . . . .	74
2.16	Algumas partes e seus respetivos materiais e tecnologias utilizados. . . . .	82
2.17	Ficheiros de impressão 3D e suas vantagens e desvantagens. . . . .	93



## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	A evolução da Indústria . . . . .	17
2.1	Processo da revisão da literatura . . . . .	25
2.2	Mapa mental conceitual . . . . .	34
2.3	Etapas da digitalização 3D . . . . .	36
2.4	Tecnologias de digitalização 3D . . . . .	37
2.5	Tecnologia de digitalização CMM . . . . .	38
2.6	Tecnologia de digitalização de braço articulado . . . . .	39
2.7	Tecnologia de digitalização de triangulação a laser . . . . .	40
2.8	Tecnologia de digitalização de luz estruturada . . . . .	41
2.9	Tecnologia de digitalização TOF . . . . .	42
2.10	Tecnologia de digitalização de sistemas estereoscópicos . . . . .	43
2.11	Tecnologia de digitalização de sistemas fotométricos . . . . .	44
2.12	Faro Gage Plus . . . . .	45
2.13	Artec Leo . . . . .	46
2.14	Zeiss T-Scan Hawk . . . . .	47
2.15	Makerbot digitizer . . . . .	47
2.16	Etapas da impressão 3D . . . . .	51
2.17	Modelo 1 impresso em 3D . . . . .	57
2.18	Modelo 1 em OpenGL . . . . .	58
2.19	Modelo 2 impresso em 3D . . . . .	58
2.20	Modelo 2 em OpenGL . . . . .	58
2.21	Exemplo do uso do ChatGPT . . . . .	61
2.22	Tecnologias de fabrico aditivo . . . . .	62
2.23	Esquema SLA . . . . .	66
2.24	Esquema DLP . . . . .	67
2.25	Esquema FDM . . . . .	67
2.26	Esquema SLS . . . . .	68
2.27	Esquema DMLS . . . . .	69
2.28	Esquema EBM . . . . .	70
2.29	Esquema MJF . . . . .	71
2.30	Esquema Polyjet . . . . .	71
2.31	Esquema BJ . . . . .	72

2.32	Filamento ABS . . . . .	75
2.33	Filamento PLA . . . . .	75
2.34	Filamento PETG . . . . .	76
2.35	Filamento TPU . . . . .	76
2.36	Filamento PP . . . . .	77
2.37	Filamento PVA . . . . .	77
2.38	Filamento PC . . . . .	78
2.39	Filamento Nylon . . . . .	78
2.40	Filamento PEEK . . . . .	79
2.41	Aplicações da impressão 3D no sector automóvel . . . . .	82
2.42	Impressora 3D Sintratec S2 . . . . .	86
2.43	Impressora 3D HP Multi Jet Fusion 5200 . . . . .	86
2.44	Forma de curvas livre em uma superfície de modelo 3D . . . . .	88
2.45	Modelo STL (esquerda) e modelo STEP (direita) . . . . .	89
2.46	STL e 3MF . . . . .	91
2.47	Sustentabilidade na AM . . . . .	96
2.48	Barreiras na AM . . . . .	97
3.1	Porsche 959 . . . . .	100
3.2	Assento Porsche feito em 3D . . . . .	101
3.3	Funcionários do grupo BMW a discutir sobre a produção das peças 3D . . . . .	103
3.4	Parte <i>rollhoop</i> para modelo de testes em túnel de vento . . . . .	105
3.5	Vista superior do novo motor . . . . .	105

## LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AMF	<i>Additive Manufacturing File</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
C	<i>Celsius</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CCD	<i>Charge-coupled Device</i>
CDLP	<i>Continuous Digital Light Processing</i>
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
CO <sub>2</sub>	<i>Carbon Dioxide</i>
DAE	<i>Collada</i>
DED	<i>Directed Energy deposition</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
DOD	<i>Drop on Demand</i>
EBAM	<i>Electron Beam Additive Manufacturing</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LENS	<i>Laser Engineering Net Shape</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
ME	<i>Material Extrusion</i>
MJ	<i>Material Jetting</i>
MJF	<i>Multi Jet Fusion</i>
MPa	<i>Mega Pascal</i>
NPJ	<i>Nano Particle Jetting</i>
NURBS	<i>Non-Uniform Rational B-Spline</i>
OBJ	<i>Object File</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
PC	<i>Polycarbonate</i>
PEEK	<i>Polyetheretherketone</i>
PDF	<i>Portable Document Format</i>

PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i>
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i>
PLA	<i>Polyalactic Acid</i>
PLY	<i>Polygon File Format</i>
PP	<i>Polypropylene</i>
PU	<i>Polyurethane</i>
PVA	<i>Polyvinyl alcohol</i>
PVA	<i>Reverse Engineering</i>
SL	<i>Sheet Lamination</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STEP	<i>Standard for the Exchange of Product Data</i>
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
TOF	<i>Time-Of-Flight</i>
TPE	<i>Thermoplastic Elastomer</i>
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i>
UC	<i>Ultrasound Consolidation</i>
UV	<i>Ultravioleta</i>
VP	<i>VAT Polymerization</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
3D	<i>Três Dimensões</i>
3DS	<i>3D Studio</i>
3MF	<i>3D Manufacturing Format</i>
3 F's	<i>Form, Fit, Function</i>

# 1

## Introdução

“A inovação é um ingrediente vital para o sucesso dos negócios. A economia de livre mercado depende de empresas competindo entre si, para superar os resultados alcançados por outras empresas. As empresas precisam introduzir continuamente novos produtos, para impedir que os competidores mais agressivos acabem a adquirir parte de seu mercado” (Baxter, 2011).

Nos dias atuais, temos um grande desejo e necessidade de inovar. Isso acontece, principalmente, pelo aumento da pressão competitiva vinda do exterior. E todas as empresas estão sujeitas a isso; incluindo as grandes multinacionais. E essa mesma pressão, faz com que o ciclo de vida de um produto, ou de um ativo, venha a ser reduzido.

Junto a essa redução do ciclo de vida, vemos tecnologias de fabrico a avançar. As tecnologias, em sua maioria, de fabrico aditivo, reduzem o tempo de desenvolvimento e lançamentos de produtos, além é claro de fornecer produtos obsoletos ou de difícil acesso.

Pode-se destacar como o Solidworks, AutoCad, 3D Maya, e Blender, além das impressoras 3D. Elas permitem que grandes empresas do sector automóvel como a Porsche possam melhorar a sua produção. Criar e testar projetos de forma rápida e eficiente já é e vem a se tornar cada vez mais fácil com o uso de tais tecnologias.

### 1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral desta dissertação abrange a avaliação dos benefícios que a prototipagem, através da impressão 3D, agrega ao desenvolvimento de produtos com maior foco em peças de substituições no sector automóvel. A criação de um projeto existe muito graças à inovação; esclarecer os riscos e benefícios, que englobam um processo de desenvolvimento do produto.

Por trás de um projeto bem-sucedido, está o segredo em saber gerir os riscos que

envolvem o seu lançamento como um todo. Um projeto é uma atividade que promove as definições/características de algum serviço ou um produto. Porém, de acordo com as estatísticas, o fracasso de novos produtos é um indicador presente. Os números variam, já que existem diferentes entendimentos em relação ao que se pode considerar um novo produto e o que se constitui em um produto que obtém sucesso. De modo geral, temos que em cada dez ideias sobre novos produtos, três serão desenvolvidas, e que um será lançado no mercado obtendo sucesso.

“Deve-se escolher bem o destino, percorrer uma boa estrada, mudar de curso quando for necessário, driblar os obstáculos, e evitar os acidentes - e manter uma boa velocidade média para não ser ultrapassado pelos concorrentes. Isso é o significado de processo do projeto de produto no moderno mundo dos negócios” (Baxter, 2011).

O desenvolvimento de novos produtos é uma atividade complexa, que envolve diversos interesses e conhecimentos. Destacam se:

- Consumidores: desejam novidades, melhores produtos, a preços razoáveis;
- Vendedores: desejam diferenciações e vantagens competitivas;
- Engenheiros industriais e mecânicos: desejam simplicidade no fabrico e facilidade de montagem (praticabilidade);
- Designers: tendem a experimentar novas tendências, materiais, processos e soluções formais;
- Empresários: desejam poucos investimentos e rápido retorno do capital.

## 1.2 Objetivos Específicos

Para o desenvolvimento desta dissertação final, dispõem-se dos seguintes objetivos específicos:

- Analisar a redução de tempo e de custos do fabrico de um objeto;
- Introdução histórica à revolução industrial para compreensão do estado contemporâneo;
- Indicar as perspectivas futuras desta tecnologia;
- Exemplificar como uma impressora e um *scanner* 3D podem ser úteis no sector automóvel;
- Explicitar os tipos de tecnologias, fabricantes e materiais mais utilizados atualmente no sector automóvel mencionando os pontos positivos e negativos;
- Mencionar estudos de caso em que produtos feitos a partir da engenharia inversa e/ou da prototipagem 3D obtiveram sucesso no ramo dos automóveis para criar protótipos e reproduzir peças já obsoletas;

### 1.3 Metodologia de Investigação Utilizada

A Metodologia abordada nesta investigação segue os padrões de pesquisa qualitativa e quantitativa, ou seja, é uma metodologia com abordagem mista. Uma vez que a pesquisa qualitativa se baseia em analisar acontecimentos descritos não numericamente dentro de um contexto histórico, como descrições, observações e narrativas (Roberts & Hyatt, 2018).

E, por outro lado, a pesquisa quantitativa se baseia em fenómenos comprovados através de recolhas e análise de dados numéricos (Roberts & Hyatt, 2018).

Portanto, já que a esta investigação incorpora tais análises é possível a considerar uma metodologia mista. Quanto à natureza de pesquisa, ela pode ser caracterizada como pura por gerar conhecimentos teóricos e compreender fenómenos históricos, e de carácter aplicável (pesquisa aplicada) por fornecer *insights* práticos de como resolver problemas específicos gerando resultados que possam ser aplicados no mundo real, especialmente no plano industrial.

Abaixo tem-se de forma resumida os procedimentos utilizados na escrita deste documento:

- **Revisão Bibliográfica:** As revisões da literatura apresentam-se como uma atividade importante para identificar, conhecer e desenvolver pesquisa em determinada área do conhecimento (Aparecida, Marinês, Valéria, & Carvalho, 2006). Consulta a livros, dissertações, teses, *websites* e artigos já existentes sobre processamento e desenvolvimento de novos produtos, juntamente com a implementação da impressão 3D para que haja uma construção teórica na validação dos resultados.
- **Casos de estudo:** “O caso de estudo é uma inquirição empírica que investiga um fenómeno contemporâneo dentro de um contexto da vida real, quando a fronteira entre o fenómeno e o contexto não é claramente evidente e onde múltiplas fontes de evidência são utilizadas”(Yin, 2001).

Uma pesquisa exploratória para averiguar fatos dentro de um contexto real, fazer uma análise aprofundada de um objeto ou caso para que se tenha um amplo e detalhado conhecimento sobre o tópico. A análise neste documento de casos onde o sucesso envolvendo a impressão 3D no desenvolvimento é visível e algumas aplicações que surgiram a partir do uso da técnica de impressão 3D por fabricantes de automóveis.

- **Estudo e visita técnica em laboratório de mecânica:** Estudo em laboratório com uma impressora 3D com tecnologia FDM no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra do Instituto Politécnico de Coimbra. A impressão foi feita para recolha de informações relacionadas ao limite de sua capacidade envolvendo tempo e

diferentes materiais.

A dinâmica trabalhada no laboratório é baseada no conceito de autossuficiência, onde o aluno recolhe uma modelagem para seus projetos com a disponibilidade de recursos que são oferecidos, como impressora 3D, *softwares* avançados, entre outros.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em quatro capítulos, onde o primeiro é o introdutório contando com uma breve contextualização histórica de como a indústria evoluiu com o passar da história desde a primeira até a terceira revolução industrial até chegar nos dias atuais com as Indústrias 4.0 e 5.0. Vale mencionar que uma ênfase maior é dada a estas duas fases, enquanto para as três primeiras são bem mais breves.

O segundo capítulo identifica todo o estado da arte do tema proposto. As informações englobam uma revisão literária, uma pequena introdução à manufatura aditiva até chegar aos dias de hoje, passando pelos mais comuns tipos e tecnologias de escaneamento e prototipagem 3D existentes, os materiais utilizados, os *softwares* e formatos computacionais envolvidos nos processos de *scanning*, modelagem, e impressão de uma peça x ou y com destaque ao sector automóvel.

Além disso, alguns fabricantes dos maquinários são apontados. Por último, mas não menos importante, temos os aspetos sustentáveis que passam pelo lado ambiental, social e económico e as barreiras que podem vir a limitar o fabrico por meio destas tecnologias.

No capítulo três, alguns casos de estudos bem interessantes são mencionados. Neles são mostrados como a prototipagem 3D tem ajudado as fabricantes de automóveis e os clientes a obter partes obsoletas, partes personalizadas, e partes semelhantes as originais, porém, com melhores características, e também parte que são perfeitas para agilizar a produção e melhorar a eficácia de testes.

O quarto e último capítulo desta dissertação inclui a conclusão. Ela filtra os principais temas discutidos durante toda a investigação sem deixar de apontar uma pequena mostra do que pode vir a estar a acontecer com a manufatura aditiva dentro do sector automóvel nos próximos anos.

## 1.5 As Três Primeiras Revoluções Industriais

A primeira revolução industrial se iniciou na Inglaterra, no fim do século XVIII e início do século XIX. Logo em seguida, outros países como França, Bélgica, Holanda, Rússia, Alemanha e Estados Unidos ingressaram nesse novo modelo de produção industrial.

Duas importantes invenções caracterizaram tal revolução. As mesmas indicavam uma reviravolta no setor produtivo e de transportes; com a descoberta da utilidade do carvão como meio de fonte de energia, foi desenvolvida concomitantemente a máquina a vapor e a locomotiva. Ambos foram fundamentais para dar dinâmica ao transporte de matéria-prima, de pessoas e distribuição de mercadorias, trazendo assim um novo panorama aos meios de locomoção e produção.

A produção têxtil foi um dos primeiros ramos da indústria a usufruir da nova tecnologia de motor a vapor, que antes da revolução industrial era desenvolvida de forma artesanal.

A partir da utilização de máquinas nas indústrias, que desempenhavam grande força e agilidade movida à energia do carvão, proporcionou-se uma produtividade extremamente dinâmica. Sendo assim, a indústria tornou-se uma nova alternativa de trabalho, foi aí então, que milhares de pessoas passaram a deixar o campo em direção às cidades de forma maciça.

A forma que o acelerado êxodo rural acontece, provoca um expressivo crescimento dos centros urbanos em grande parte das nações europeias que integravam a revolução. Algumas cidades da Europa subiram em até três vezes o número populacional em meio século.

Como era de se esperar, as grandes cidades ficaram saturadas com o rápido crescimento populacional, transformando de maneira drástica a configuração da paisagem urbana. As cidades não estavam preparadas para tamanho fluxo de pessoas de forma não planeada, e com isso, surgiram bairros marginalizados compostos por muitos trabalhadores pobres. Esse foi um ponto negativo da revolução.

A segunda revolução industrial ocorreu no período que vai entre 1860 e 1900. Alemanha, Rússia, Itália e França se industrializaram diferentemente da primeira revolução. A utilização do aço, da energia elétrica e dos combustíveis derivados do petróleo, do motor a combustão, da locomotiva a vapor e o desenvolvimento de produtos químicos foram as principais inovações nesse período (VTI, 2014).

A terceira revolução industrial, também conhecida como revolução técnico-científica, foi capaz de realizar o desenvolvimento de atividades na indústria, aplicando tecnologias de ponta em todas as etapas produtivas. Um ramo apresentado como um dos mais promissores no âmbito global é a produção de tecnologias. A terceira revolução não se limita a produtos de “pouco” valor agregado, como visto nas revoluções anteriores. Foram investidos anos de pesquisas e estudos para agregar valor ao produto final, mesmo que tenha sido gasto pouca matéria-prima.

Indo por essa mesma linha, as atividades que mais se destacam no mercado estão vinculadas à produção de computadores, *softwares*, microeletrónica, *chips*, transístores, circuitos eletrónicos, além da robótica, telecomunicações e informática de um modo

geral. Vale destacar da mesma maneira a expansão do rádio e televisão, telefonia fixa e móvel, internet, indústria aeroespacial, biotecnologia e muitas outras inovações (VTI, 2014).

Atualmente, a inclusão numerosa da utilização de novas tecnologias e o constante avanço da mesma promovem uma dinamização da produção, intensificando o trabalho e criando produtos e mercadorias de melhor qualidade. Para um mercado cada vez mais disputado, a competitividade é obtida através da acção incessante para diminuir os custos. Desta maneira, o aumento do capital desencadeado pelos mesmos donos dos meios de produção deverá ser reinvestido para a geração de inéditas tecnologias de ponta, com o objetivo de avançarem no mercado.

A realização maciça de investimentos no desdobramento de novos produtos será um ciclo, à medida que preste sempre um serviço no avanço de toda a indústria.

## 1.6 A Indústria 4.0

O termo "Indústria 4.0" é por causa de um projeto estratégico de alta tecnologia do Governo alemão, que promove a troca de informações da indústria. Esse termo foi usado pela primeira vez na Hannover Messe. Em abril de 2013, o Grupo de Trabalho na Indústria 4.0, tendo como presidentes Siegfried Dais (Robert Bosch GmbH) e Henning Kagermann (German Academy of Science and Engineering), apresentaram um conjunto de recomendações para a implementação da Indústria 4.0 ao Governo Federal Alemão.

Diversas mudanças ocorrem na medida em que os produtos são manufaturados com as fábricas inteligentes, impactando diversos setores do mercado e gerando um novo período no contexto das grandes revoluções industriais.

As mudanças são adotadas de forma mais rápida pelos países mais desenvolvidos, mas as economias emergentes são as que mais tiram benefícios disso, segundo estudiosos e especialistas.

Segundo (Schwab, 2019), a Indústria 4.0, tem o potencial de elevar os níveis globais de rendimento e melhorar a qualidade de vida de população inteiras. São as mesmas populações que se beneficiaram com a chegada do mundo digital e a possibilidade de fazer pagamentos bancários, pedir um táxi à partir de um telemóvel, por exemplo.

A Indústria 4.0 permite que o cliente se conecte a linha de produção, facilitando a encomenda de produtos individualizados, mesmo numa linha de produção de massa. As principais tecnologias por trás dessa revolução incluem:

- Internet das Coisas - Exatamente como o nome sugere, a internet está em quase todas as coisas. Todos os dias surgem novos produtos com acesso à Internet.
- *Big data* - Grande quantidade de dados analisados em tempo real por computa-

dores possibilitando a entrega rápida da informação necessária para as tomadas de decisões.

- Computação em nuvem - Possibilita o uso de sistemas como serviço. Dessa forma, gastos com infraestrutura e desenvolvimento são drasticamente reduzidos.
- Robótica avançada - Precisão manométrica e automação de processos através do uso de robôs avançados.
- Inteligência artificial - Sistemas projetados especialmente para entender os processos de produção e tomar decisões próprias, sem depender de ações humanas.
- Manufatura aditiva/híbrida - O produto vai ser modelado ao se acrescentar material, camada por camada, de forma que o desperdício é evitado e a matéria-prima é utilizada de maneira mais eficaz possível.

## 1.7 A Indústria 5.0



Figura 1.1: A evolução da Indústria - Fonte: (Matias, 2023)

Com toda a evolução que transformou o ser humano em um criador de processos, máquinas e inovações virtuais, ainda há algo que falta às indústrias e às vidas das pessoas (S. Matias, 2023).

A Indústria 5.0 foca numa sociedade futura. Ela caracteriza-se pela integração humana e IA, muito pela criação de *softwares*, robôs, dentre outros sistemas inteligentes que conseguem garantir a diminuição das falhas humanas e facilitar o dia a dia através da inteligência artificial. Pode-se afirmar que as invenções passam agora a trabalhar

em favor do bem-estar corporativo e pessoal. Cria-se assim uma união de pessoas de diferentes áreas compartilhando o mesmo espaço de trabalho (S. Matias, 2023).

A seguir destacam-se áreas onde podemos verificar o uso de tal indústria:

- Relações Humanas e Profissionais - As revoluções apresentadas pela Meta, empresa criadora do Facebook e outras redes sociais. A Meta tem divulgado suas aspirações tecnológicas que visam alterar a forma com que as pessoas e as tecnologias se relacionam, a partir de um mundo paralelo virtual que cria para cada utilizador uma “versão avatar” para relacionamento dentro da ferramenta.

Vemos também uma crescente utilização de reuniões remotas, possíveis graças a tais evoluções tecnológicas, nos dias atuais. Evoluções como esta conduzem o conceito de *coworking* a um novo nível, digitalizando mais ainda o nosso dia a dia, e facilitando ainda mais a nossa comunicação com pessoas e *bots* (robôs de interação virtual).

- Segurança - O uso da tecnologia para monitorar tarefas simples como câmaras de monitorização de ruas e avenidas para definirem se há ou não congestionamento no trânsito é um ótimo exemplo de tecnologia relacionada ao bem-estar das pessoas. Essas interações já acontecem, e já temos um sistema público adaptado para demandas de segurança virtual.
- Saúde - A criação de dispositivos que possuem uma característica preditiva em relação à saúde tem marcado um grande passo para o bem-estar humano, uma vez que isso possibilita investigar com antecedência o aparecimento de doenças, levando as pessoas a buscarem tratamento antes mesmo do problema se manifestar. Além claro, da maior implementação de consultas remotas (visto muito na altura do COVID-19)
- Logística - Imagine poder realizar um pedido de algum produto via internet, e recebê-lo horas depois por meio drones que entregam o produto em sua porta, janela ou sacada? Essa realidade já está em teste em algumas cidades pelo mundo, e mostra a tecnologia em prol da facilidade logística que altera processos de empresas e facilita o dia a dia das pessoas.
- Igualdade Social - Tradutores para diversas línguas e necessidades especiais se caracteriza como uma grande marca da relação entre tecnologia e bem-estar humano. A exemplo disso, temos a tradução de conteúdo para língua de sinais, assim como a transformação do conteúdo em áudio para pessoas com problemas auditivos. Para além, temos também os tradutores de idiomas que proporcionam interpretação de línguas em tempo real, capaz de diminuir falhas na comunicação de quem não fala a mesma língua.

Enquanto a Indústria 4.0 tem o foco em criar soluções que melhorem os processos,

a qualidade e a precisão da produção dos bens de consumo, a Indústria 5.0, cria soluções que simplificam processos diários das pessoas, proporcionando acessibilidade e mais mobilidade aos utilizadores. Ou seja, facilitar as suas vidas é o maior objetivo da mesma. Na figura 1.1, foi apresentada a evolução da Indústria.



## 2

### Estado da Arte

Neste capítulo será mostrado o atual estado das tecnologias de prototipagem 3D com foco no sector automóvel. Ou seja, as diferentes tecnologias e em que tipos de partes são mais utilizadas. Assim como algumas das principais fabricantes com comparações entre as mais comuns.

A prototipagem 3D, também conhecida como impressão 3D ou fabrico aditivo, é uma tecnologia que permite criar objetos físicos em três dimensões a partir de um modelo digital. Nos últimos anos, houve avanços significativos na prototipagem 3D, tanto em termos de materiais disponíveis, técnicas de impressão e aplicações, incluindo o sector automóvel.

É possível citar dois meios de fabrico aditivo existentes: direto e indireto. Em resumo, o fabrico aditivo direto (foco nesta dissertação) é usado para produzir peças finais diretamente, enquanto o fabrico aditivo indireto é utilizado para criar moldes, modelos ou ferramentas que serão usados em processos de fabrico convencionais. Ambos os métodos têm suas aplicações e vantagens específicas, dependendo dos requisitos de produção e do objetivo final.

O fabrico aditivo indireto pode envolver a criação de modelos mestres impressos em 3D, que são posteriormente utilizados para criar moldes em silicone ou metal, ou a produção de núcleos de moldes complexos que são difíceis de fabricar por outros meios. No fabrico aditivo direto, as peças finais são fabricadas diretamente, camada por camada, utilizando tecnologias como a impressão 3D. O processo envolve a deposição sucessiva de material para construir a peça desejada, seguindo um modelo CAD. O material é adicionado e solidificado em camadas sucessivas até a forma final da peça ser alcançada. Esse método é frequentemente utilizado para criar protótipos, peças personalizadas e componentes finais funcionais.

A prototipagem 3D permite que os engenheiros automotivos testem e otimizem designs de peças e componentes. Eles podem criar iterações de projeto rapidamente, modificando geometrias e testando diferentes materiais para melhorar a eficiência, a

aerodinâmica, a resistência e o desempenho geral dos veículos.

Esses engenheiros conseguem criar protótipos de peças de automóveis, permitindo que os fabricantes avaliem o *design*, a funcionalidade e o encaixe antes de investir em ferramentas de fabrico tradicionais. Isso acelera o processo de desenvolvimento de novos veículos e reduz os custos de produção de protótipos e peças de reposição. A produção de peças de substituição tradicionalmente envolve altos custos e longos prazos de espera, especialmente para peças raras ou antigas.

É de suma importância explicitar também que ela já permite a produção de peças de substituição personalizadas e sob encomenda. Isso significa que as peças podem ser adaptadas às necessidades específicas de cada veículo ou cliente, sem a necessidade de estoques volumosos e custos com estocagem de certas peças.

A impressão 3D possibilita a criação de estruturas leves e complexas que não seriam viáveis com técnicas tradicionais de fabrico. Isso permite a redução de peso dos veículos, resultando em melhor eficiência de combustível e desempenho. O fabrico aditivo de plásticos de engenharia, materiais compósitos e metais, em particular, tem sido utilizada para produzir componentes estruturais mais leves, como suportes de motor, componentes de suspensão e peças do chassi. Isso permite a produção de peças de substituição duráveis e de alta qualidade, capazes de suportar as demandas do setor automotivo.

A impressão 3D também está sendo usada para integrar eletrônica e sensores diretamente nas peças de automóveis. Isso permite a criação de componentes mais compactos, leves e integrados, a contribuir para a automação, a segurança e a conectividade dos veículos.

Outra tendência importante na prototipagem 3D é a automação e a integração com outros processos de fabrico. Além disso, os sistemas de impressão 3D estão se tornando mais automatizados, com recursos avançados de detecção de falhas, calibração automática e monitorização em tempo real.

Em resumo, o estado da arte da prototipagem 3D apresenta uma extensa gama de materiais disponíveis, técnicas de impressão avançadas, maior resolução e precisão, além de aplicações cada vez mais diversificadas. Esses avanços continuam impulsionando a inovação e têm o potencial de transformar a maneira como projetamos, fabricamos e usamos objetos físicos em várias indústrias.

## 2.1 Revisão da literatura

Segundo (Gibson, Rosen, & Stucker, 2021), as tecnologias de manufatura aditiva não são tão inovadoras, uma vez que as primeiras patentes relacionadas ao fabrico camada por camada foram criadas no início da década de 1980. A partir do final dos anos 1980,

as tecnologias de AM começaram a se espalhar, dando origem a aplicações conhecidas como prototipagem rápida (primeiros anos 1990), ferramental rápido (final dos anos 1990) e fabrico rápido (início dos anos 2000).

O caminho desde a prototipagem rápida até o cenário previsto de fabrico digital direto está intimamente ligado às melhorias tecnológicas e, portanto, é baseado em processos digitais. A evolução das máquinas e dos materiais, desde conceitos de produtos até protótipos estéticos, possibilitou a construção de peças que podem se encaixar em montagens devido às melhorias na precisão e desempenhar uma função devido às melhores propriedades mecânicas. Esse processo é a realização da chamada regra dos "3 Fs": forma, encaixe e função em português.

Atualmente, as tecnologias de AM podem ser usadas para transformar quase todos os materiais, como polímeros, metais, cerâmicas e compósitos, complementam (Ngo, Kashani, Imbalzano, Nguyen, & Hui, 2018). Elas podem representar tanto componentes finais fabricados de forma aditiva quanto ferramentas para suportar as tecnologias de fabrico mais comuns (por exemplo, modelos, insertos, núcleos e moldes para moldagem por injeção, fundição e laminação de compósitos).

Atualmente, a inovação é o caminho para a extensão dessas tecnologias para um sistema de fabrico real de produtos finais, o que leva a muitas vantagens potenciais (Gao et al., 2015).

“A conexão direta entre um modelo CAD e uma peça funcional proporciona uma redução no custo de investimento e uma melhoria no prazo de desenvolvimento do produto. A construção camada por camada oferece maior liberdade de design e "complexidade gratuita", que estão intimamente ligadas à alta diferenciação, alta flexibilidade, alta especificidade e alta customização” (Thompson, Moroni, Vaneker, Fadel, & et al, 2016; Mehrpouya et al., 2019; Barbieri, Calzone, & Muzzupappa, 2022). É por isso que essas tecnologias estão no centro da terceira revolução industrial de "customização em massa" e, mais recentemente, da Indústria 4.0 (Dilberoglu, Gharehpapagh, Yaman, & Dolen, 2017).

A manufatura aditiva pode minimizar o armazenamento de peças de reposição e ferramentas (por exemplo, moldes, matrizes, etc.). Portanto, ela pode levar a modelos de negócios aprimorados devido à redução da cadeia de suprimentos e do tempo total de produção. As aplicações em prototipagem, ferramental, fabrico direto de peças, manutenção e reparo irão se expandir nos próximos 10 anos (Lim, Le, & Wong, 2016; Delic & eyers, 2020).

A Universidade de Deloitte por meio de (C.A. Giffi and B. Gangula and P. Illinda, 2014), identificou aplicações futuras para peças, como componentes de fabricantes originais, interiores, assentos, rodas, pneus, suspensões, eletrônicos, chassis, carrocerias, portas, partes motoras e sistemas de transmissão.

O registo de 2019 da Associação Wohlers confirma que 28,4% da produção de manufatura aditiva resulta em componentes funcionais de uso final (Dalpadulo, Petruccioli, Gherardini, & Leali, 2022). Uma revisão de Tuazon (Tuazon, V., Basuel, Reyes, & Dizon, 2022) destacou as tendências atuais no uso da AM no setor automotivo moderno, bem como suas vantagens e desvantagens relativas.

Um estudo da (Deloitte Insights, 2020) incluiu a produção de componentes de fabricantes originais, mas uma aplicação que não foi mencionada é a replicação de componentes. “A AM também possui aplicações na reprodução de peças “difíceis de encontrar”(Koller, Häfner, & Döpfer, 2022).

Peças de reposição fora de produção e componentes ou ferramentas perdidas podem ser reproduzidos em aplicações únicas ou em pequenos lotes com investimentos limitados. Por exemplo, a demanda por réplicas de componentes para a restauração de carros clássicos está crescendo de forma interessante.

Segundo (R. Hawken, 2018), é facto que esse setor oferece o maior retorno sobre o investimento em até 10 anos, “os carros com potencial clássico estão aumentando continuamente e o interesse em carros clássicos nunca foi tão grande quanto agora” (Johnson, 2021).

## 2.2 Metodologia utilizada na revisão da literatura

Na consulta de artigos, revistas científicas e dados relacionados, foi seguida uma revisão do estado da arte como guia para conduzir a recolha de dados. Uma revisão do estado da arte é um tipo de revisão da literatura que aborda questões atuais e/ou desafios recentes em uma determinada área. Esse tipo de revisão oferece novas perspectivas e identifica áreas que necessitam de pesquisas adicionais (Grant & Booth, 2009).

Nesta revisão, foram recolhidas informações atuais e relevantes relacionadas à impressão 3D de peças de reposição dentro do sector automóvel. Foi realizada um exercício de mapeamento mental (explicado na próxima secção) e uma consulta por palavras-chave em várias fontes online, principalmente em bases de dados de artigos científicos. Algumas das palavras-chave utilizadas foram: “3D printing”, “automotive”, “technologies”, “spare parts”, “materials”, “polímeros” e “metals”; 3D scanning” e “reverse engineering”.

Todos os artigos relacionados e recolhidos a partir da consulta por palavras-chave foram inicialmente examinados através da revisão dos dados, e apenas os textos relevantes relacionados ao tema desta dissertação foram incluídos. Os artigos selecionados foram então analisados e sintetizados antes de serem concluídos como referências finais. Além disso, foi realizada a consulta por literatura adicional relacionada a partir das referências dos textos já recolhidos.

O fluxograma a seguir (figura2.1) representa os passos realizados durante a revisão.

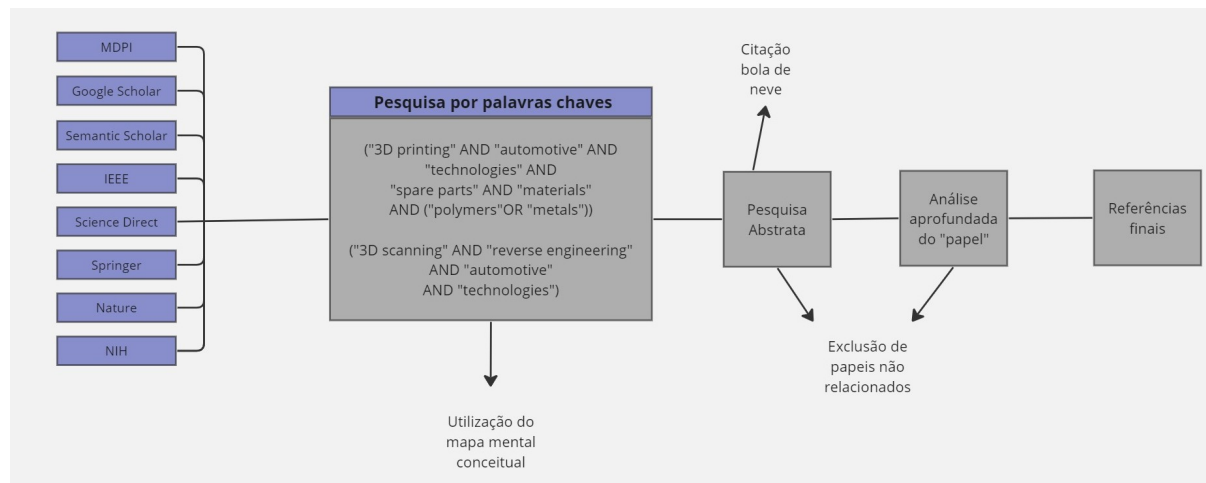


Figura 2.1: Processo da revisão da literatura - Fonte: adaptado de (Gache et al., 2022)

## 2.3 Estrutura de consulta semântica e mapa mental

A consulta semântica é um método de pesquisa que visa entender o significado e contexto das palavras-chave, em vez de apenas corresponder a termos exatos. Utilizando processamento de linguagem natural e aprendizado de máquina, ela identifica relações entre palavras e oferece resultados mais relevantes e personalizados, proporcionando uma experiência de consulta mais significativa e precisa para o utilizador.

Para consultas relacionadas com a impressão 3D o primeiro nível foi obtido diretamente do mapa mental conceitual; o segundo foi orientado para consultar estudos relacionados ao sector automóvel; o terceiro foi obtido com consultas às tecnologias; o quarto foi destinado à consulta de trabalhos relacionados à peças de substituição; o quinto foi direcionado à consulta pelos materiais utilizados; e finalmente, o sexto foi voltado para pesquisas mais específicas sobre materiais em polímeros ou em metais.

Já em relação ao *scanning* 3D, o nível 1 também foi obtido através do mapa mental conceitual; o segundo nível já teve consultas sobre engenharia inversa; o terceiro foi relacionado com o sector automóvel e o quarto foi obtido através de estudos sobre as tecnologias.

A seguir, apresentam-se as tabelas (2.1 - 2.10) com a referida estrutura.

Tabela 2.1: Níveis de consulta para prototipagem 3D

Nível	Palavra	Estrutura de consulta
Nível 1	3D printing	("3D printing")
Nível 2	+ Automotive	("3D printing"AND "automotive"
Nível 3	+ Technologies	("3D printing"AND "automotive"AND "technologies")
Nível 4	+ Spare parts	("3D printing"AND "automotive"AND "technologies"AND"spare parts")
Nível 5	+ Materials	("3D printing"AND "automotive"AND "technologies"AND "spare parts"AND "materials"
Nível 6	+ Polymers or Metals	("3D printing"AND "automotive"AND "technologies"AND "spare parts"AND "materials"AND ("polymers"OR "metals"))

Tabela 2.2: Níveis de consulta para *scanning* 3D

Nível	Palavra	Estrutura de consulta
Nível 1	+ 3D scanning	("3D scanning")
Nível 2	+ Reverse engineering	("3D scanning"AND "reverse engineering")
Nível 3	+ Automotive	("3D scanning"AND "reverse engineering"AND "automotive"
Nível 4	+ Technologies	("3D scanning"AND "reverse engineering"AND "automotive"AND "technologies")

Tabela 2.3: Números de *papers* por fonte e de acordo com a estrutura de consulta para prototipagem 3D

Fonte	3D printing +automotive	+technologies	+spare parts	+materials	+polymers +metals
MDPI	6841	12	4	0	0 0
Google Scholar	2550000	137000	90100	25400	24800 18900 19800
Semantic Scholar	1460000	64100	24000	3710	2260 656 642
IEEE	258000000	37200000	5	1	1 0 0
Science Direct	92288	7764	7032	511	492 321 421
Springer	151123	14343	13224	2725	2697 1233 2094
Nature	868	33	23	0	0 0
NIH	46	6	6	1	1 0 0

Tabela 2.4: Números de *papers* por fonte e de acordo com toda a estrutura de consulta para prototipagem 3D para intervalos de anos

Fonte	+polymers +metal	+>2013 +>2013	+>2018 +>2018	+>2023 +>2023
MDPI	0 0	0 0	0 0	0 0
Google Scholar	18900 19800	7600 12500	5820 7560	446 724
Semantic Scholar	656 642	620 599	466 413	152 111
IEEE	0 0	0 0	0 0	0 0
ScienceDirect	321 421	246 301	205 245	34 40
Springer	1233 2094	1143 1957	1077 1839	314 518
Nature	0 0	0 0	0 0	0 0
NIH	0 0	0 0	0 0	0 0

Tabela 2.5: Números de *papers* por fonte e de acordo com a estrutura de consulta para *scanning* 3D

Fonte	3D scanning	+reverse engineering	+automotive	+technologies
MDPI	1	0	0	0
Google Scholar	4360000	417000	36400	31100
Semantic Scholar	3000000	9670	1300	3910
IEEE	205000000	1	0	0
Science Direct	536290	46861	2880	2520
Springer	344509	40356	5962	5798
Nature	47885	4937	41	20
NIH	346	86	9	5

Tabela 2.6: Números de *papers* por fonte e de acordo com toda a estrutura de consulta para *scanning* 3D para intervalos de anos

Fonte	+>2013	+>2018	+>2023
MDPI	0	0	0
Google Scholar	17100	16700	10200
Semantic Scholar	2460	1300	236
IEEE	0	0	0
Science Direct	2009	1583	315
Springer	5218	4702	1373
Nature	19	16	2
NIH	0	0	0

Um mapa mental é um diagrama cognitivo hierárquico usado para organizar e preservar o conhecimento, onde ideias fundamentais são representadas e ideias secundárias são descartadas. Para esse fim, um mapa mental conceitual desempenha duas funções: organiza as proposições e preserva os conceitos, armazenando-os em um diagrama simples (Zubiría, 1997).

De acordo com (Carrión, Gonzáles, Aciar, & Morales, 2018), um mapa mental conceitual é necessário para garantir uma leitura e aprendizagem detalhadas. Além disso, a ferramenta de mapa mental conceitual é utilizada na pedagogia para representar conceitos. Além disso, de acordo com (Zubiría, 1997), o mapa mental é um ideograma ou um esboço gráfico que representa algo, ou seja, ele assume uma ideia complexa e a conceitua, sendo estruturado por classes. Estas classes são as seguintes (Correa, Martínez, Artigao, & Lázaro, 2020):

- **Supraordenado:** refere-se a um tipo de proposição que engloba totalmente outras proposições. Serve para identificar e descobrir as qualidades mais importantes do conceito;
- **Isoordenado:** estabelece uma correspondência não total, destaca relacionamentos e vínculos entre proposições adjacentes e conecta ideias umas às outras; as propostas antecedem os conceitos e permitem que sejam estruturados;
- **Infraordenado:** contém várias subclasses ou derivações e é dividido por ilustração e a ordem em que as proposições, noções, conceitos e categorias aparecem de forma evolutiva;

Tabela 2.7: Sumário dos *papers* mais citados em prototipagem 3D - Parte 1

Paper	Insights	Resumo	Conclusões	Métodos utilizados	Implicações práticas
Macdonald, 2016	As tecnologias de impressão 3D podem ser usadas no sector automóvel para criar peças de reposição usando materiais como polímeros e metais	A impressão 3D de múltiplos processos é uma área emergente de pesquisa em que a impressão 3D básica é aprimorada para fabricar estruturas com multifuncionalidade, o que permitirá a fabrico local com controle tridimensional personalizado de material, geometria e posicionamento de subcomponentes	Possibilita o fabrico de estruturas complexas com multifuncionalidade e permite o fabrico local e sob demanda de produtos personalizados	VP, PBF, ME, DED, MJ e BJ; Impressão 3D multiprocesso ou híbrida	Fabrico local com controle espacial 3D personalizado; fabrico direto e distribuída de produtos específicos para o cliente
Macdonald, 2018	O artigo discute o uso de impressão 3D de materiais múltiplos em várias indústrias, incluindo a automotiva, e destaca as vantagens e desafios do uso de polímeros e metais no fabrico aditivo	Neste artigo, os autores destacam a variedade de aplicações com base em polímeros impressos em 3D, bem como aplicações envolvendo combinações de metais e metal-cerâmica, ao mesmo tempo que discutem as vantagens e desafios relacionados com estruturas multi-materiais fabricadas por meio da manufatura aditiva	A manufatura aditiva de materiais múltiplos permite aumentar a funcionalidade e melhorar o desempenho em locais definidos pelo utilizador; Ainda está em seus estágios iniciais, mas está a avançar em direção a aplicações no mundo real	Processos de manufatura aditiva híbrida; Incorporação de fibras de carbono em filamentos de polímero	A manufatura aditiva de materiais múltiplos permite aumentar a funcionalidade; Ela pode combinar métodos aditivos e subtrativos
Duda, 2016	A tecnologia de impressão 3D de metal está sendo utilizada na sector automóvel para criar peças de reposição com alta precisão e complexidade	Uma visão geral das tecnologias de impressão 3D, materiais, aplicações, vantagens, desvantagens, desafios e aspetos económicos podem ser encontrados neste artigo, onde o PBF é promissor para o fabrico de peças metálicas pequenas, de baixo volume e complexas	A PBF é o processo de manufatura aditiva mais promissor para peças metálicas pequenas, de baixo volume e complexas	Fusão em leito de pó (PBF); Fusão seletiva usando uma fonte de energia, como o laser	Método de fabrico sem uso de ferramentas para produzir peças metálicas totalmente densas; Aplicações nos sectores aeroespacial, petróleo e gás, marítimo e automóvel
Fafenrot, 2018	O estudo constatou que as misturas de metal e polímero utilizadas na impressão 3D têm propriedades mecânicas reduzidas e não são adequadas para fabricar objetos que exijam alta resistência mecânica	As investigações mostram que, embora a impressão FDM permita a produção de objetos com propriedades mecânicas semelhantes aos materiais originais, as misturas de metal e polímero não podem ser usadas para o fabrico rápido de objetos que exijam resistência mecânica	A impressão FDM pode produzir objetos com propriedades mecânicas similares aos materiais originais; As misturas de metal e polímero não são adequadas para a fabrico rápido de objetos que necessitem de resistência mecânica	Tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida (FDM); Testes de tração e flexão pode produzir objetos com propriedades mecânicas similares	As misturas de metal e polímero não são adequadas para o fabrico aditivo; A impressão FDM
Farahani, 2018	O artigo discute o uso da impressão 3D no sector automóvel e aeroespacial para fabricar peças personalizadas em material compósito com propriedades mecânicas sob medida	Os autores apresentam uma breve visão geral, principalmente, sobre os últimos avanços na impressão 3D de nanocompósitos poliméricos multifuncionais e compósitos reforçados com microfibras, incluindo os benefícios, limitações e aplicações potenciais	Visão geral da impressão 3D de nanocompósitos poliméricos e compósitos; Introdução à impressão 3D de compósitos termoplásticos com microfibras contínuas	Cabeça de dispensação de tinta; Dispositivo de entrega de laser	A impressão 3D possibilita o fabrico de características personalizadas e complexas; Os nanocompósitos e compósitos poliméricos podem oferecer várias funcionalidades
Savastano, 2016	O artigo explora o impacto potencial da impressão 3D na gestão de peças de reposição no sector automóvel	Neste artigo, os autores consideraram diferentes cenários e configurações de cadeia de suprimentos relacionados ao sector automóvel aplicando a AM na produção de peças de carros descontinuados e avaliando seus principais benefícios, com foco no impacto potencial na estratégia das empresas para a gestão de peças de reposição	A impressão 3D tem o potencial de impactar a estratégia de gestão de peças de reposição das empresas; O estudo se concentra no sector automóvel e avalia os benefícios do uso da manufatura aditiva para peças de carros descontinuados	Tecnologia de impressão 3D; Manufatura aditiva	A impressão 3D permite que as empresas reconsiderem sua posição estratégica, organização, processos de produção e distribuição; Reduz o tempo e os custos de produção e logística

Tabela 2.8: Sumário dos *papers* mais citados em prototipagem 3D - Parte 2

Paper	Insights	Resumo	Conclusões	Métodos utilizados	Implicações práticas
Kumar, 2021	Este artigo apresenta uma revisão da literatura sobre a impressão 3D no sector automóvel	Neste artigo, os desafios na impressão 3D de materiais emergentes são abordados com soluções práticas para atender às necessidades da Indústria 4.0, proporcionando uma compreensão básica dessa tendência emergente no campo de materiais, tecnologias e aplicações para a impressão 3D	A impressão 3D é uma tecnologia emergente na Indústria 4.0; A manufatura aditiva possui potencial na Indústria 4.0	Manufatura aditiva (impressão 3D)	Apresenta os desenvolvimentos e avanços atuais na manufatura aditiva; Aborda os desafios na manufatura aditiva de materiais emergentes
Wiese, 2020	Este artigo faz uma revisão sobre a compatibilidade dos materiais poliméricos e processos na manufatura aditiva para a produção de peças em série no sector automóvel	Os autores avaliam a compatibilidade dos processos e materiais de manufatura aditiva de polímeros e fornecem um método para verificar sua aplicabilidade formal na produção de peças em série para o sector automóvel com base em um estudo de caso de uma peça interna	Avaliar a compatibilidade dos processos e materiais de manufatura aditiva de polímeros; Fornecer um método para verificar a aplicabilidade formal na produção de peças em série para o sector automóvel	Gráficos de seleção de materiais; Índice de compatibilidade de processos	Ajuda a relacionar os requisitos automóveis com os materiais e processos de manufatura aditiva; Reduz as barreiras para a adoção da manufatura aditiva na produção em série de peças de automóveis
Singh, 2020	A impressão 3D pode utilizar materiais como polímeros e metais para produzir peças de reposição para o sector automóvel	Uma revisão dos princípios das diferentes técnicas de impressão 3D, normalmente utilizadas para fabricar um produto 3D, pode ser encontrada neste artigo, onde os benefícios dessa técnica são discutidos	A impressão 3D é uma tecnologia de fabrico em rápido desenvolvimento; Inúmeros materiais podem ser utilizados para a impressão 3D	Sete diferentes técnicas de impressão 3D	A impressão 3D pode ser utilizada em várias indústrias; Pesquisas adicionais são necessárias para superar as limitações
Yuelin, 2018	A invenção revela um material de impressão 3D de alta resistência e resistente ao calor, para o sector automóvel	Neste artigo, é apresentado um material de impressão 3D de alta resistência e resistente ao calor para impressão 3D automotiva. O material possui um reforçador e um modificador resistente ao calor	Indisponível	Indisponível	Peças automóveis de alta resistência podem ser impressas em 3D; Melhoria da resistência ao calor em aplicações automóveis
Madheswaran, 2019	O artigo discute a otimização dos parâmetros de impressão para melhorar as propriedades mecânicas de peças impressas em 3D	É apresentado um estudo teórico detalhado sobre várias tecnologias de impressão 3D que utilizam compósitos poliméricos como material bruto. Isso é útil n o fabrico de diversos compósitos com alta qualidade, alta precisão e modelos customizados	As tecnologias de impressão 3D desempenham um papel importante em várias indústrias; Os compósitos poliméricos são utilizados para melhorar as propriedades mecânicas	SLS, SLA, FDM	As tecnologias de impressão 3D têm aplicações práticas em diversas indústrias; Os compósitos poliméricos podem ser usados para melhorar as propriedades mecânicas das peças impressas
Duda, 2018	O artigo discute o uso da tecnologia de impressão 3D em vários sectores, a incluir a automóvel, com foco em materiais metálicos	Esta revisão apresenta uma visão geral das tecnologias de impressão 3D, materiais, aplicações, vantagens, desvantagens, desafios, aspetos económicos e aplicações da tecnologia de impressão 3D de metal, com foco detalhado no processo DMLS	A AM é vista como uma maneira de repensar o design e personalizar produtos; Uma ampla gama de materiais está disponível para o fabrico aditivo em metais	PBF	Repensar o design e digitalizar o fabrico; Personalizar produtos e produzir conforme a demanda
Yang, 2018	O material polimérico de impressão 3D descrito no artigo utiliza matérias-primas de fácil obtenção, baixo custo, pouca poluição, e melhora a capacidade de termoformação e resistência mecânica do material	Neste artigo, o material polimérico de impressão 3D é composto, em massa, por 0-5% de fosfato de cálcio básico, 0,5%-2,8% de carbonato de cálcio, 1,5-6,5% de fibras proteicas, 1,5-3% de extensor de cadeia cristalina combinado com diisocianato e 0,1-0,3% de outro componente não especificado	Material de impressão 3D de baixo custo e baixa poluição; Melhoria na resistência mecânica e resistência a choques	Indisponível	Baixo custo e baixa poluição na impressão 3D; Melhoria na resistência mecânica e resistência a choques

Tabela 2.9: Sumário dos *papers* mais citados em *scanning* 3D - Parte 1

Paper	Insights	Resumo	Conclusões	Métodos utilizados	Implicações práticas
Kuş, 2009	A tecnologia de digitalização ótica 3D é utilizada na indústria automotiva para aplicações de engenharia inversa, como a criação de modelos CAD a partir dos dados de digitalização 3D de peças físicas	São ilustrados dois testes de digitalização para aplicações automóveis. O primeiro descreve o toda a engenharia inversa de um molde de corte de chapa metálica danificado, usando uma técnica de digitalização 3D. O segundo estudo compara os dados de nuvem de pontos digitalizados com os dados de CAD 3D para fins de inspeção	A tecnologia de digitalização ótica 3D oferece precisão para peças de automóveis; Múltiplas tecnologias fornecem dados utilizáveis para aplicações sensíveis	Máquinas CMM de contacto para digitalização; Tecnologia de digitalização ótica 3D	A tecnologia de digitalização ótica 3D proporciona precisão para peças automóveis; Também pode reproduzir moldes de corte e estampagem
Ameen, 2018	Comparou-se <i>scanners</i> portáteis a laser e de luz branca para aplicações de engenharia inversa automóvel, sendo que <i>scanners</i> a laser apresentaram melhor precisão, enquanto o scanner de luz branca teve melhor desempenho em velocidade e no número de triângulos capturados	Este trabalho comparou dois sistemas portáteis baseados em digitalização a laser e digitalização ótica com luz branca para aplicações automóveis e revelou que o <i>scanner</i> a laser apresentou melhor desempenho em termos de precisão, enquanto os <i>scanners</i> de luz branca apresentaram melhor desempenho em velocidade de aquisição e número de triângulos capturados	O <i>scanner</i> a laser apresentou melhor desempenho em termos de precisão; O <i>scanner</i> de luz branca apresentou melhor desempenho em termos de velocidade de aquisição e número de triângulos capturados	Digitalização a laser; Digitalização ótica com luz branca	Comparação de <i>scanners</i> portáteis a laser e de luz branca; Otimização de parâmetros de digitalização para aplicações automóveis
Voicu, 2013	A digitalização 3D é comumente utilizada na indústria automotiva para engenharia inversa, prototipagem rápida e inspeção de produtos	A digitalização 3D está disponível há mais de 15 anos, no entanto, poucas pessoas ouviram falar dela e ainda menos conhecem as aplicações dessa tecnologia. Uma área comum onde os sistemas de digitalização são utilizados é os sector automóvel e adaptabilidade	Os sistemas 3D devem ser capazes de medir todos os parâmetros necessários em um único passo, sem erros; A digitalização a laser 3D oferece vantagens, como precisão, não destrutividade	Digitalização 3D usando sistemas a laser ou ópticos Técnica de engenharia inversa para validação  para o controlo de máquinas e gestão de processos	Os sistemas de de medição 3D devem ser capazes de medir os parâmetros necessários num único passo, sem erros; Os resultados são apresentados em formatos úteis
Liang, 2015	O artigo discute o desenvolvimento de um sistema de digitalização 3D usando visão monocular para aplicações industriais, como modelagem 3D de motores e automóveis	Os resultados experimentais demonstram que o sistema de digitalização 3D desenvolvido alcança a aquisição rápida das dimensões 3D do objeto digitalizado e possui uma estrutura simples, baixo custo, fácil de expandir e rápida reconstrução 3D	O sistema desenvolvido alcança rápida aquisição das dimensões 3D; O sistema possui uma estrutura simples, baixo custo e é facilmente expansível	Métodos de extração e correspondência de características Calibração da câmara usando o método Zhang Zheng-You	Aquisição rápida das dimensões 3D dos objetos digitalizados; Estrutura simples, baixo custo e fácil de expandir
Javaid, 2021	A digitalização 3D é útil para engenharia inversa no sector automóvel garantindo que o produto produzido se ajuste às exigências do fabricante e seja utilizado para controlo de qualidade	A digitalização 3D é útil para engenharia inversa, análise, design e medição de superfícies curvas complexas e prototipagem. Essa tecnologia utiliza software para medição, armazenamento e análise aumenta a flexibilidade e confiabilidade	É uma ferramenta essencial para inspeção dimensional precisa, análise e fabrico de protótipos no âmbito industrial; possui diversas aplicações no sector automóvel, engenharia inversa e prototipagem	Tecnologia de digitalização 3D; Diversos softwares de digitalização	Discute o potencial da digitalização 3D para o âmbito industrial; Identifica e discute as principais aplicações da digitalização 3D sob uma perspectiva industria
Kladovasilakis, 2021	Este artigo demonstra o uso de tecnologias de digitalização 3D e engenharia inversa para a restauração e fabrico rápido de um rotor automóvel danificado	Neste artigo, um rotor centrífugo danificado de um motor automotivo foi recriado através de engenharia inversa utilizando um scanner a laser 3D, por meio do qual o modelo 3D do objeto investigado foi digitalmente capturado	Método abrangente para restauração digital e fabrico rápida; Técnica de fabrico aditivo de metal utilizada para o rotor funcional de metal	Digitalização a laser 3D para engenharia inversa; SLM para fabrico aditiva de metal	Método abrangente para restauração digital e fabrico rápida; Utilização da tecnologia de fabrico aditivo de metal
Voicu, 2013	A maioria dos fabricantes automóveis utiliza a digitalização 3D para validar a qualidade das peças automóveis	Os autores apresentam uma metrologia de digitalização 3D baseada em sistemas ópticos ou a laser para validar a qualidade dos produtos usando um <i>software</i> especializado, que pode intervir rapidamente no processo de fabrico para remover a causa de defeitos (engenharia inversa)	A digitalização a laser 3D oferece medição rápida e fácil; Os sistemas de medição 3D devem ser capazes de medir todos os parâmetros necessários em um único passo, sem erros	Modelagem paramétrica; Modelagem sólida em 3D	A digitalização a laser 3D oferece medições rápidas e fáceis; Os resultados podem ser comparados com os projetos iniciais

Tabela 2.10: Sumário dos *papers* mais citados em *scanning* 3D - Parte 2

Paper	Insights	Resumo	Conclusões	Métodos utilizados	Implicações práticas
Chaudharay, 2021	A digitalização 3D é usada na engenharia inversa para tecnologias automóveis a fim de criar modelos precisos e aprimorar os processos de Fabrico	Foi constatado que o uso de <i>scanners</i> 3D em combinação com máquinas CMM auxiliam na medição das características com boa qualidade e precisão em um curto espaço de tempo	Economizam tempo e dinheiro no fabrico de componentes mecânicos complexos; O uso de <i>scanners</i> 3D em combinação com CMM pode fornecer medições precisas em um curto espaço de tempo	Manufatura inversa com digitalização 3D e CMM; Comparação da manufatura inversa com métodos tradicionais	A manufatura inversa economiza tempo e dinheiro; A digitalização 3D melhora a precisão e eficiência
karczewski,2019	O artigo discute a influência dos parâmetros do scanner 3D na precisão da reconstrução da geometria de um elemento veicular na engenharia inversa	Os autores avaliaram a influência dos parâmetros do scanner 3D na precisão da reconstrução da geometria do elemento veicular do Skoda Octavia em duas variantes, não deformada e deformada	Os parâmetros do <i>scanner</i> 3D afetam significativamente a precisão da reconstrução da geometria de um elemento veicular; A técnica fotogramétrica é necessária para objetos grandes para aumentar a precisão	Digitalização 3D usando luz estrutural; Técnica fotogramétrica para gerar um modelo de pontos	Os parâmetros do <i>scanner</i> 3D afetam a precisão dos resultados; A técnica fotogramétrica pode aumentar a precisão para objetos grandes
Dongxia, 2020	A invenção descreve uma tecnologia de digitalização 3D que pode ser utilizada para digitalizar peças automóveis	A peça a ser monitorada é colocada em um mecanismo de fixação; um mecanismo de acionamento é iniciado para fixar a peça; em seguida, uma porta de vedação móvel é fechada, e o mecanismo de acionamento é iniciado para transportar a peça detectada para dentro de um cilindro de digitalização; e finalmente, o cilindro de digitalização é, acionado pelo mecanismo de acionamento para girar	A tecnologia de digitalização 3D melhora a detecção de peças automóveis; O cilindro de digitalização realiza uma detecção abrangente na peça	Tecnologia de digitalização 3D; Mecanismo de fixação e rotação do cilindro de digitalização	Melhorada detecção tridimensional de peças automóveis; Detecção abrangente de peças através da tecnologia de digitalização
Cioana, 2012	O artigo discute as vantagens e desvantagens do uso de dispositivos de digitalização para engenharia inversa em diversos sectores, incluindo o automóvel	Os autores apresentam um experimento, no qual eles determinaram os fatores que influenciam a qualidade da superfície dos modelos virtuais obtidos após a digitalização	Fatores que influenciam a qualidade da superfície dos modelos virtuais; Métodos de Projeto de Superfície de Resposta utilizados para otimização	Métodos de Projeto de superfície de resposta; Planejamento de experimentos	Fatores que influenciam a qualidade da superfície dos modelos virtuais Otimização do processo de digitalização usando métodos de Projeto de Superfície de Resposta
Clark, 1997	O artigo discute o uso de sistemas de digitalização 3D para prototipagem rápida no sector automóvel	É discutido o uso de dois sensores de triangulação a laser sem contacto disponíveis comercialmente, e um sensor padrão de visão dupla chamado inversa é utilizado na produção de ferramentas para utensílios planos	Os sistemas de digitalização sem contacto podem adquirir conjuntos de dados densos rapidamente e descrever superfícies complexas, permitindo a engenharia inversa de modelos conceituais	CMM; Triangulação óptica a laser	Sistemas de digitalização sem contacto para prototipagem rápida; Capacidade de adquirir conjuntos de dados densos rapidamente para engenharia inversa
Ho, 2017	O <i>scanner</i> 3D descrito no texto pode ser utilizado para a engenharia inversa no sector automotivo	Neste artigo, é apresentado um <i>scanner</i> 3D capaz de obter dados de digitalização omnidirecionais, minimizando o número de nós do sensor 3D. Um rotador de quadro é montado na extremidade superior de um quadro de caixa que envolve a periferia de um alvo de digitalização	<i>Scanner</i> 3D capaz de obter dados de digitalização omnidirecionais; Minimiza o número de sensores do <i>scanner</i> 3D	Suporte do rotador de quadro e rotador de quadro; Quadro de rotação e sensores do <i>scanner</i> 3D	Obtenção de dados de digitalização omnidirecionais com sensores mínimos; Geração de informações estereoscópicas sobre o alvo de digitalização
Yen, 2014	O sistema de digitalização 3D descrito no artigo pode ser usado para a engenharia inversa no sector automóvel	É descrito um sistema de digitalização 3D composto por um disco rotativo, um sensor de digitalização, software de processamento de imagem 3D e um computador, capaz de digitalizar uma área que não é facilmente digitalizada, como objeto volumoso	O sistema de digitalização 3D pode digitalizar facilmente objetos volumosos; O sistema é de baixo custo na disposição do equipamento	Indisponível	Disposição de equipamentos barata para a digitalização 3D; Capacidade de digitalizar objetos volumosos facilmente

- Exclusões: essas são classes que são mutuamente opostas ou mutuamente exclusivas e estão associadas à operação passível de exclusão ou negação de uma conexão entre duas classes adjacentes.

A figura 2.2 a seguir, apresenta o mapa mental conceitual que ajudou a direcionar as tarefas de consulta da bibliografia em direção à pesquisa.

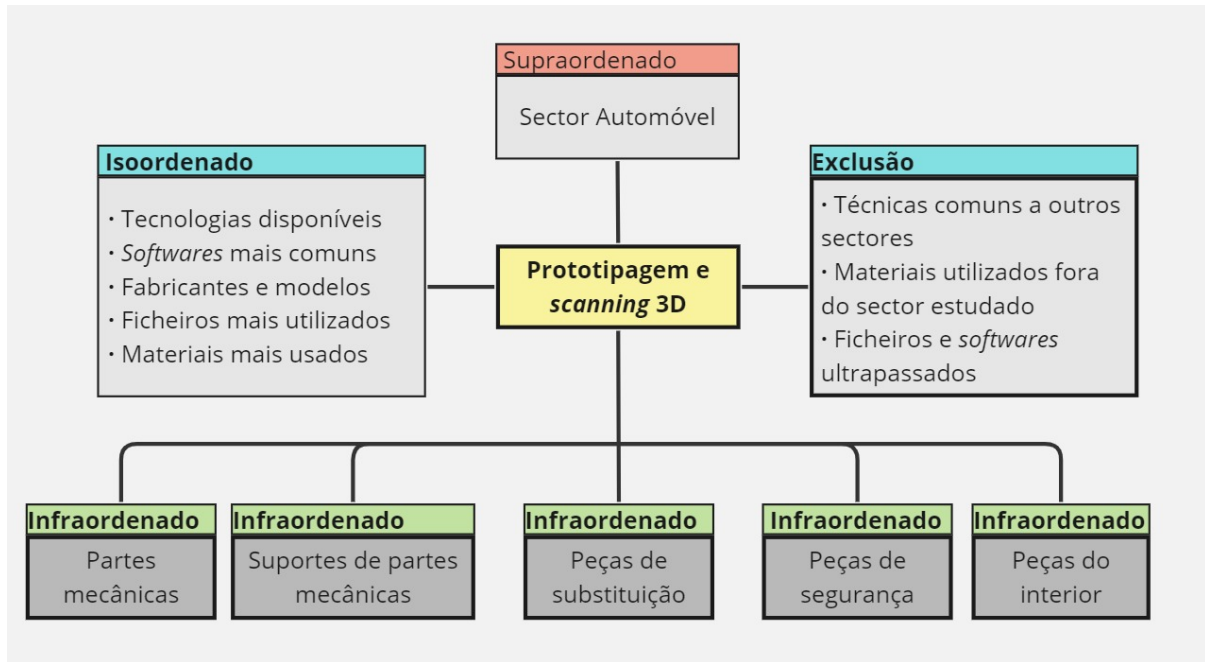


Figura 2.2: Mapa mental conceitual - Fonte: Adaptado de (Correa et al., 2020)

No topo aparece o supraordenado "sector automóvel", o que permite que o conceito central "prototipagem e *scanning* 3D" seja mais especificado ao ler de cima para baixo. No lado direito, as exclusões são definidas; são conceitos considerados relacionados ao conceito central, mas que diferem do ponto de vista objetivo do tema. No lado esquerdo, encontram-se os isoordenados, que são os conceitos que ajudaram a pesquisa bibliográfica a determinar as características do conceito central. As infraordenações são definidas na parte inferior, essas contêm os principais componentes onde a prototipagem e o *scanning* 3D são aplicadas no sector automóvel.

## 2.4 Breve *workflow* da engenharia inversa

A engenharia inversa é um processo utilizado para quando é necessária a troca, modificação ou construir uma nova peça com as mesmas características de um modelo existente, mas essas estão obsoletas ou não possui informações suficientes para criar a mesma sem esse processo.

“A engenharia inversa é o processo de levantar dimensões, com rapidez e exatidão, determinar padrões geométricos tais como áreas e volumes além de definir as

tolerâncias de um modelo existente” (Lima, 2003). A engenharia inversa subdivide-se basicamente nos seguintes passos: digitalização 3D (Captura de dados); tratamento dos dados recolhidos; criação de modelo CAD e, quando necessário, prototipagem rápida.

O primeiro passo é a digitalização, que é feita através de elementos em sistemas auxiliados por computador. “A digitalização é o processo de captura de coordenadas de pontos das superfícies da peça. O resultado do processo de digitalização é uma nuvem de pontos 2D ou 3D, armazenados como uma imagem” (Lima, 2003).

Para realizar a digitalização 3D, existem vários equipamentos capazes de trabalhar capturando imagens desde peças pequenas até de maiores dimensões. E podem também trabalhar com operações diferentes como luz, fotossensores, braços digitais etc. Independente do modo de trabalho, a ideia de funcionamento é a mesma.

A utilização do *scanner* é muito mais viável em comparação ao braço e fotossensores, pois possui todo um mecanismo de funcionamento que além de recolher os dados da superfície da peça de forma bem definida, já possui uma interface mais apurada com o software de modelamento. Enquanto com o braço e fotossensores, tem-se o dobro do trabalho para juntar os dados e montar o modelamento.

A tecnologia de digitalização é totalmente avançada, auxiliada por computadores, equipamentos e *softwares*, sendo que a composição de tal tecnologia, faz com que o trabalho seja concluído mais rapidamente e com resultados muito superiores ao processo manual, melhorando a qualidade e a realização do processo.

Para realizar a medição sempre deve existir um ponto de referência entre a peça e o equipamento. Assim, pode-se passar ponto a ponto toda superfície da peça, dando origem à medição. Sendo que o processo pode ser feito em qualquer tipo de material.

No caso de *scanner* à laser, as peças que permitam a passagem de luz devem ser pulverizadas com tinta branca, para evitar a passagem de luz. Durante a digitalização 3D, “varrem-se” diferentes vistas do objeto para obterem-se os seus dados completos. Porém, para que se tenha viabilidade da medição a geometria deve ser calculada à fim de não se perder mais tempo com a medição do que com o próprio fabrico total da peça.

Após a obtenção de uma “nuvem de pontos” começa um processo de montagem com o uso de várias ferramentas de *software*. Logo após a captura da nuvem de pontos, o software faz um realinhamento dos pontos da imagem, tendo assim, uma margem de erro muito próxima do zero. Então, é aplicado um filtro para reduzir “cantos vivos” e fazer um ajuste fino na peça. Em seguida, um módulo do ou um outro *software* faz a análise de superfícies, controlando o reflexo da luz e de tangência em vários níveis. Por último, são feitas comparações entre a peça física e a versão digitalizada através de coordenadas (C. Ponticelli and C. A. Suski, 2010).

Este é o passo crucial no processo de engenharia inversa, pois os dados são apresentados como um conjunto de pontos no espaço. A geometria deve ser organizada sobre estes pontos, sendo uma etapa manual, cuja interação e descrição são determinadas pelo utilizador. Após a captura dos dados e o tratamento, temos uma malha triangular que é utilizada como referência para a reconstrução das superfícies 3D.

A etapa de reconstrução consiste em gerar superfícies com as informações da digitalização e comparar com a malha triangular para checar se o modelo está conforme os dados capturados. Tem-se então o modelo 3D normalmente em formato CAD que poderá ser usado para a impressão 3D.

A figura 2.3 mostra um fluxograma com as etapas da digitalização 3D.

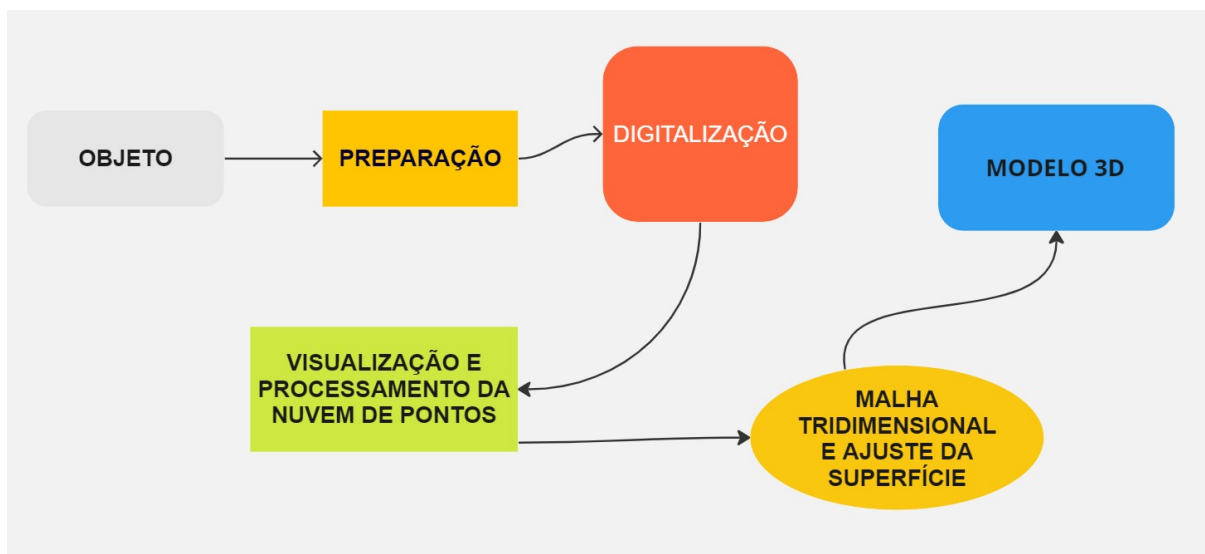


Figura 2.3: Etapas da digitalização 3D

## 2.5 Tecnologias da digitalização 3D

Existe uma série de tecnologias capazes de recolher a informação 3D de objetos. Estas tecnologias são divididas em dois tipos: contacto e não contacto.

Os *scanners* 3D por contacto, como já se pressupõe, precisam de contacto físico para adquirir a informação 3D. Eles geralmente têm alta precisão, mas necessitam de um longo tempo para fazerem uma digitalização completa e podem danificar o objeto durante o processo.

Os *scanners* sem contacto geralmente utilizam um laser ou luz estruturada para irradiar um objeto e obter a sua reflexão para calcular a informação 3D. Comparando com os *scanners* por contacto, a digitalização é rápida, o seu funcionamento é simples e não danificam o objeto digitalizado. Contudo, a desvantagem é que estes sistemas não são tão precisos (Sousa, 2015)).

Eles são considerados sistemas ativos se emitirem algum tipo de radiação, tais como, laser. Caso contrário, se não emitirem nenhum tipo de radiação, mas se detectarem as radiações ambiente refletidas são considerados sistemas passivos (Sousa, 2015).

No esquema a seguir é possível perceber as mais utilizadas técnicas e como são agrupadas nas respectivas tecnologias de digitalização 3D no sector automóvel (figura 2.4).

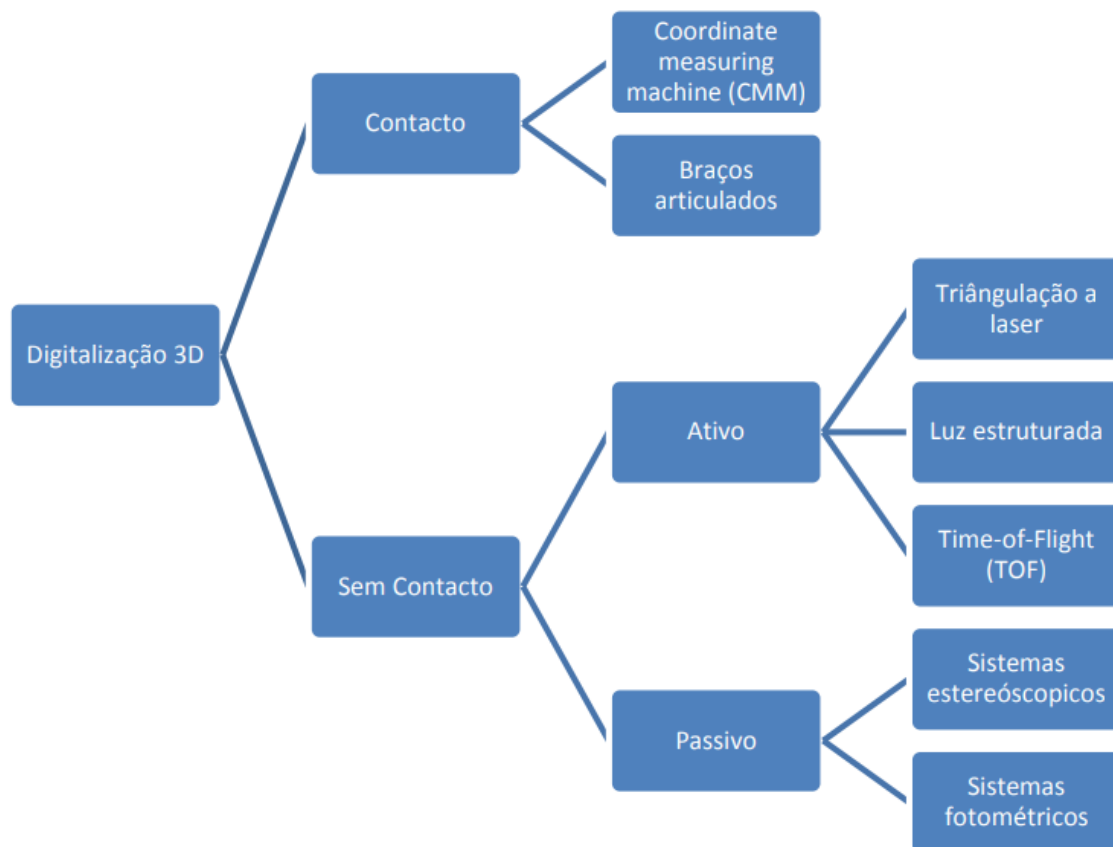


Figura 2.4: Tecnologias de digitalização 3D – Fonte: (Sousa, 2015)

Embora exista uma grande variedade de métodos que podem ser usados para realizar a digitalização 3D de objetos, nenhum deles é 100%, assim sendo cada método tem as suas limitações, vantagens e custo diferentes. A seguir, as diversas técnicas são examinadas, sendo mostrado e discutido os lados fortes e fracos de cada uma delas.

1. Por contacto: Basicamente, o maior problema dos *scanners* 3D por contacto é a necessidade de contacto durante o processo de digitalização, que às vezes pode danificar o objeto que se pretende digitalizar. Um outro problema é a baixa velocidade de digitalização, no entanto esta tecnologia garante um resultado muito preciso e exato, possivelmente a tecnologia que garante a informação tridimensional mais valiosa, sendo esta a chave do sucesso destes sistemas (Sousa, 2015).

- CMM: Este equipamento é constituído por um braço ou outro tipo de trans-

porte mecânico móvel com uma sonda na extremidade que se desloca ao longo da superfície do objeto calculando as coordenadas dos pontos. Os pontos obtidos são enviados para um computador, onde são posteriormente analisados usando um *software* de modelagem (como o CAD). É uma máquina utilizada essencialmente na indústria para o controlo de qualidade das peças, sendo uma tecnologia bastante precisa (figura 2.5) (Yu, Luo, & Wang, 2010), (Sousa, 2015).

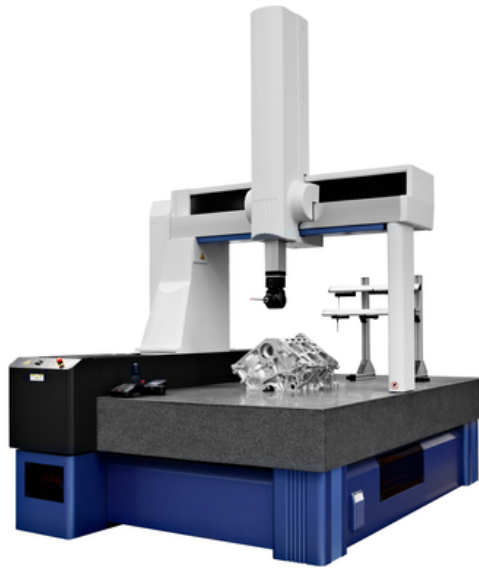


Figura 2.5: Tecnologia de digitalização CMM – Fonte: (Sousa, 2015)

- Braços articulados: é formado por um braço robótico articulado, com braços rígidos e diversos sensores angulares que facilitam o seu movimento. A digitalização é realizada através do toque da sonda, colocada na extremidade do braço robótico, nos diversos pontos da superfície do objeto (Figura 2.6). O braço mecânico que se move sobre o objeto a ser digitalizado, possibilita ao utilizador capturar os dados de forma rápida e com muita resolução (Yu et al., 2010; Sousa, 2015).

Na Tabela 2.11 é feita uma comparação detalhada entre os dois métodos, mostrando as vantagens e desvantagens de cada um.

2. Sem contacto: A grande vantagem dos *scanners* 3D sem contacto é a possibilidade de obtenção de milhões de pontos ao longo de uma área ou região de um objeto de forma bastante rápida. Devido ao constante avanço da tecnologia de sensores e projetores, os *scanners* sem contacto estão a atingir precisões semelhantes aos seus rivais, os *scanners* por contacto. Vale lembrar que são subdivididos em ativos e passivos (Sousa, 2015).
  - Ativos: As técnicas sem contacto ativas de digitalização tridimensional são o método mais eficaz para aquisição da forma 3D de um objeto, permitindo



Figura 2.6: Tecnologia de digitalização de braço articulado – Fonte: (Sousa, 2015)

Tabela 2.11: Vantagens e desvantagens dos *scanners* de contacto

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
CMM	Alta precisão, grande parte opera automaticamente	Processo lento, risco de danificar o objeto, alto custo, falta portabilidade
Braços articulados	Maior portabilidade, preço menor que a CMM	Processo lento, Operação pode ser manual, menor precisão que a CMM

alta taxa de amostragem e medições rápidas. No entanto, todos os métodos óticos de digitalização 3D têm uma desvantagem que se baseia na reconstrução de uma superfície que contém oclusões independentes ou componentes desconetados devido a diferentes ângulos de incidência de sensores (câmaras) e/ou projetores, onde partes da superfície em questão permanece oculta (Sousa, 2015).

- Triangulação a laser: O *National Research Council of Canada* foi um dos pioneiros no uso desta tecnologia em 1978 (Mayer, 1999). Esta técnica consiste na projeção de uma luz laser, possivelmente um padrão sob a forma de um ponto ou linha, sobre a superfície do objeto que se pretende digitalizar. Na maior parte dos casos, é utilizado uma linha como padrão para acelerar o processo de recolha dos dados. Um sensor, frequentemente uma câmara CCD, deteta em cada leitura a luz refletida pelo objeto e grava a sua posição exata (Bernardini & Rushmeier, 2002).

Esta técnica é designada por triangulação a laser porque o padrão do laser, a câmara CCD e o emissor laser formam um triângulo entre si. O comprimento de um dos lados do triângulo é conhecido, ou seja,

a distância entre a câmara e o emissor laser, frequentemente denominada base. O ângulo (beta) entre o emissor laser e a base também é conhecido. Pela observação da posição do padrão do laser no campo de visão da câmara, o ângulo (alfa) entre a câmara e a base pode ser determinado. Através destas três informações é possível determinar a forma e o tamanho do triângulo. A posição da luz refletida na superfície do objeto (p1) pode ser encontrada a partir do triângulo resultante (Figura 2.7) (Sousa, 2015; E. Rakitin and I. Rakitin and V. Staleva and F. Arnaoutoglou and A. Koutsoudis and G. Pavlidis, 2008).

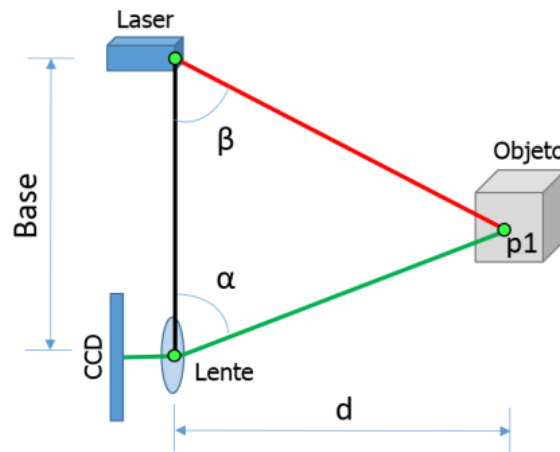


Figura 2.7: Tecnologia de digitalização de triangulação a laser – Fonte: (Sousa, 2015)

Os *scanners* por triangulação a laser são um meio cada vez mais comuns para a aquisição da geometria tridimensional de objetos. A popularidade deste método é derivada em grande parte pela relativa robustez e precisão que é atingível. Conceitualmente, o *design* do *scanner* é muito simples, empregando geometria simples e usando as peças disponíveis normalmente (Davis & Chen, 2001).

- Luz estruturada: Este método consiste na projeção de um padrão de luz específico (ou um conjunto de padrões) na superfície do objeto e na extração da informação dessa geometria através da deformação desse padrão (figura 2.8). Em muitos casos, este método é confundido com as técnicas de digitalização por triangulação a laser, no entanto embora também se baseie em triangulação, não necessita de utilizar emissores de luz laser (Pavlidis, Koutsoudis, Arnaoutoglou, Tsioukas, & Chamzas, 2007; Geng, 2011).

Como os padrões só podem ser projetados a partir de um ponto de vista de cada vez, vários escaneamentos 3D têm de ser combinados para formar uma malha completa de 360°. Alguns fabricantes contor-

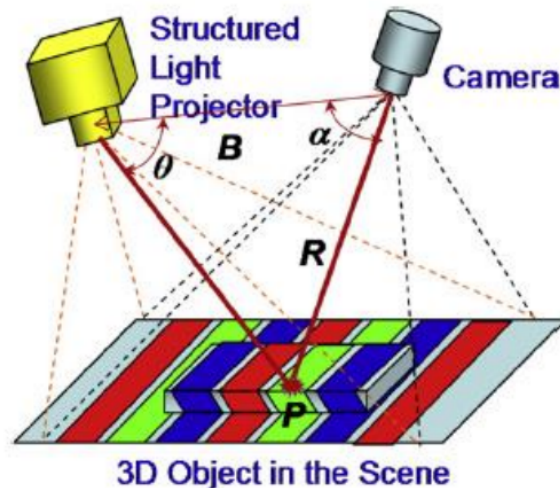


Figura 2.8: Tecnologia de digitalização de luz estruturada – Fonte: (Sousa, 2015)

nam esta restrição ao posicionar o objeto em uma mesa giratória motorizada e unindo automaticamente os diferentes escaneamentos 3D realizados (All3DP, 2022).

- TOF: Este *scanner* de sensor Lidar utiliza uma luz laser ou infravermelha para digitalizar um objeto ou um ambiente. Este dispositivo emite um pulso de luz para o objeto que se deseja digitalizar e, após atingir a superfície do objeto parte do pulso é refletido na direção do sensor.

Para se descobrir a distância entre o sensor e o objeto é necessário que o sistema seja capaz de medir o tempo necessário para a luz percorrer uma viagem de ida e volta, ou seja, o tempo que o sinal leva para ir do transmissor ao objeto e retornar ao sistema.

Como a luz viaja a velocidades extremamente elevadas, é requerido um circuito muito sofisticado para medir o tempo de retorno do feixe de luz. Portanto, para se obter uma digitalização completa de um objeto é necessário recorrer a espelhos rotativos para medir com precisão as diversas coordenadas 3D de uma superfície (Sousa, 2015), (Böhler & Marbs, 2002). Sua configuração é apresentada na Figura 2.9.

Na Tabela 2.12 é feita uma comparação detalhada entre os três destacando as vantagens e desvantagens de cada um.

- Passivos: O ponto forte dos scanners 3D sem contacto passivos é facto de não necessitarem de emitir qualquer tipo de radiação, em vez disso utilizam apenas *hardware* simples e barato para capturarem a imagem, frequentemente uma câmara digital. Esta tecnologia é adequada para projetos com orçamento reduzido (Sousa, 2015).

Contudo, assim como nos *scanners* 3D sem contacto ativos, são indis-

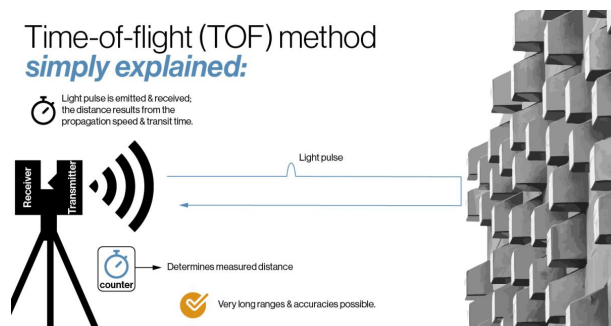


Figura 2.9: Tecnologia de digitalização TOF – Fonte: (LaserScanningEurope, 2023)

Tabela 2.12: Vantagens e desvantagens dos *scanners* sem contacto ativos

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Triangulação a laser	Alta precisão, boa resolução a curtas distâncias, digitalização veloz, maior portabilidade	Dependência dos níveis de luminosidade, problema com a textura dos materiais, pode ser prejudicial à saúde
Braços articulados	Maior portabilidade, preço menor que a CMM	Processo lento, Operação pode ser manual, menor precisão que a CMM
TOF	Distâncias longas, adequado para grandes objetos	baixa precisão maior ruído associado

pensáveis condições de luminosidade bastante controladas, caso contrário pode resultar na ausência de informação em algumas partes da superfície do objeto. Outro problema é a textura e características dos objetos. Muitas vezes, pode ocorrer uma falha ao identificar as correspondências das características das imagens, o que pode resultar em buracos na superfície, devido à ausência de informação (Sousa, 2015).

- Sistemas estereoscópicos: são sistemas passivos que adquirem a forma tridimensional de um objeto utilizando apenas câmaras. Estes podem usar uma ou várias câmaras para aquisição do mesmo objeto, mas devem adquirir sempre pelo menos duas imagens do objeto a partir de diferentes pontos de vista. Este método baseia-se na visão estereoscópica humana.

A posição e a informação de profundidade são obtidas através da correspondência dos pixels de ambas as imagens, e posteriormente a sua forma 3D reconstruída por triangulação. Em alguns métodos, objetos de

pouca textura tornam-se difíceis de analisar, porque poucos pontos característicos aparecem na superfície do objeto (Mansouri, Lathuilière, Marzani, Voisin, & Gouton, 2007). A Figura 2.10 apresenta um esquema simplificado.

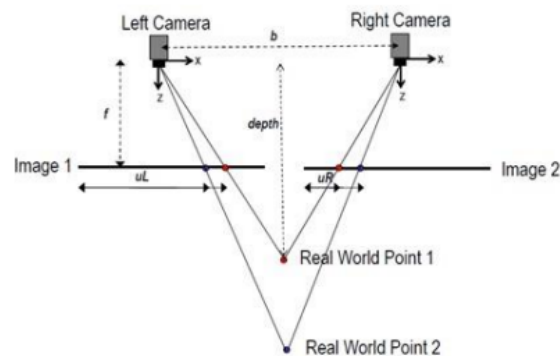


Figura 2.10: Tecnologia de digitalização de sistemas estereoscópicos – Fonte: (Sousa, 2015)

Ambas as câmaras estão montadas perfeitamente paralelas uma à outra, e possuem exatamente a mesma distância focal ( $f$ ). A distância ( $b$ ) corresponde à linha de base, ou seja, a distância entre as duas câmaras. O ponto P1 representa um ponto no mundo real definido pela sua respetiva coordenada ( $x, y, z$ ). UL e UR são as projeções do ponto P1 numa imagem adquirida pela câmara esquerda e direita, respetivamente. A distância entre estes dois pontos projetados é conhecida como disparidade. A partir da subtração das diferenças das duas imagens é possível produzir um mapa de disparidade. O valor de disparidade é usado para calcular as informações de profundidade, que é distância entre o ponto P1 e o sistema (Sousa, 2015).

São semelhantes aos *scanners* de luz estruturada, onde o projetor é substituído por uma câmara. Os sistemas estereoscópicos são mais apropriados para aplicações nas quais a instalação e localização das câmaras é fixa. As aplicações mais comuns para estes sistemas incluem navegação de veículos autônomos, robótica industrial e inspeção automatizada de peças (Sousa, 2015).

- Sistemas fotométricos: Os sistemas fotométricos utilizam uma única câmara para obterem diversas imagens a partir de um ponto de vista fixo com diferentes condições de luminosidade. Em cada imagem, a cena é iluminada a partir de diferentes ângulos (figura 2.11).

Os sistemas fotométricos são muito benéficos porque através de diferentes direções de luminosidade, a superfície do objeto pode ser capturada com grandes detalhes, como resultado disso, um perfeito e preciso

Tabela 2.13: Vantagens e desvantagens dos *scanners* sem contacto passivos

Tecnologia	Vantagens	desvantagens
Sistemas estereoscópicos	Sem radiação, sistema simples, custo reduzido	Possui problemas com a textura dos materiais, falhas de correspondência, amostras dispersas e com ruído
Sistemas fotométricos	Grande detalhamento, sistema simples, sem radiação	Limitados pela intensidade iluminosa, existência de sombras prejudiciais

objeto tridimensional pode estar presente.

Este método é altamente eficaz para separar a forma 3D de um objeto a partir da sua textura em 2D. Esta técnica é especialmente útil para a deteção de pequenos defeitos na superfície (MultipixImaging, 2023; Hernandez, Vogiatzis, & Cipolla, 2008).

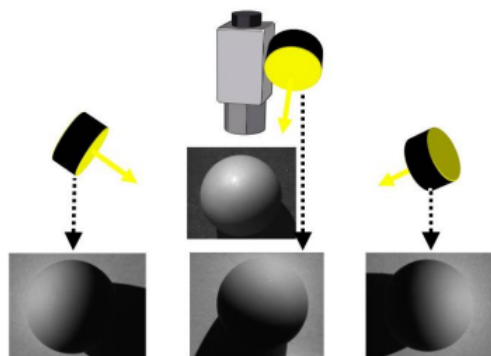


Figura 2.11: Tecnologia de digitalização de sistemas fotométricos – Fonte: (Sousa, 2015)

Na Tabela 2.13 é feita uma comparação detalhada entre os dois destacando as vantagens e desvantagens de cada um.

Em resumo, cada tecnologia tem as suas vantagens e limitações. A escolha da tecnologia mais adequada vai depender essencialmente do projeto para o qual é direcionado. Esta tem de ser capaz de esclarecer em sua maioria aos requisitos dele, como o que se pretende digitalizar, o ambiente de digitalização, a precisão, a resolução, a rapidez do processo, e ainda a aplicação a que a informação tridimensional se destina. Um fator preponderante para essa escolha é o custo do equipamento. Vale ressaltar que a razão entre o custo dos componentes e a qualidade do equipamento está sempre em causa.

## 2.6 Fabricantes e modelos de *scanners* 3D

A maioria dos dispositivos que realizam medições tridimensionais têm um custo considerável, variando de centenas a até milhares de euros. Alguns exemplos desses instrumentos incluem lasers, câmaras de profundidade, projetores, entre outros. (Sousa, 2015).

A lista de fabricantes é bem extensa, porém alguns mais conhecidos como a Faro, Artec 3D, Zeiss e Makerbot são apresentados a seguir.

- Faro Gage Plus: É uma solução portátil de digitalização 3D ao uso das CMM's que são fixas e de alto custo (Figura 2.12). Devido à sua portabilidade este sistema pode ser utilizado em qualquer lugar, sendo configurado em segundos, permitindo a medição de peças de forma fácil, rápida e precisa. Este equipamento garante uma precisão até 0,005 mm numa área de trabalho não superior a 1,2 m e possibilita ainda a utilização de diversas sondas (Sousa, 2015).



Figura 2.12: Faro Gage Plus – Fonte: (Sousa, 2015)

Pode ser utilizado nas mais diversas áreas, tais como a indústria metalúrgica, automóvel, aeroespacial, essencialmente para a análise dimensional, a inspeção e o alinhamento de peças (Sousa, 2015).

- Artec Leo: representa uma mudança radical no mercado dos *scanners* 3D. Isso porque apresenta uma funcionalidade completamente sem fios e incorpora um processamento de bordo. Este dispositivo (figura 2.13) é de luz estruturada e com características que o tornam adequado para utilizações em engenharia inversa, *design* industrial, automação, realidade virtual e aumentada, e investigação científica (All3DP, 2022).

Uma nova versão foi lançada em fevereiro de 2022, trazendo um novo *chip* NVIDIA Jetson TX2, rodando com uma potência mais de duas vezes maior que seu antecessor utilizando menos de 7,5 watts e oferece melhor precisão, segundo a empresa. Na verdade, o Leo 2022 apresenta um processamento gráfico 30%

mais rápido, o dobro do armazenamento integrado e o dobro de memória (All3DP, 2022).

Com processamento automático integrado e conectividade *wireless*, o Artec Leo captura facilmente uma grande variedade de tamanhos já que você se move ao redor do objeto enquanto uma réplica em 3D é construída em tempo real na tela HD do dispositivo. O Artec Leo efetivamente remove o *laptop* ou o computador de mesa da equação, permitindo um *scanning* completamente livre, sem fios que prendam o utilizador a uma estação de trabalho (All3DP, 2022).

O Leo (figura 2.13) é um *scanner* 3D adequado para aplicações que vão desde a engenharia inversa, *design* industrial e automação, até a realidade virtual e aumentada, conservação do património e investigação científica (All3DP, 2022).



Figura 2.13: Artec Leo – Fonte: (All3DP, 2022)

- Zeiss T-Scan Hawk: Com a tecnologia de triangulação a laser ele possui três diferentes fontes de laser e modos de *scanning*, incluindo lasers vermelho e azul. Lasers vermelhos são ideais para digitalização rápida de objetos grandes. Um único laser vermelho é utilizado para escanear os bolsões e aberturas internas. Por outro lado, lasers azuis são utilizados para objetos mais próximos e para digitalização de detalhes pequenos em alta resolução. Ele (figura 2.14) é capaz de digitalizar detalhes minúsculos e superfícies escuras/refletivas, assim como objetos de grande porte (All3DP, 2022).
- Makerbot digitizer: É uma excelente tecnologia, tendo sido elogiada como um dos principais produtos inovadores da última década (Makerbot, 2023). Este equipamento foi projetado para uma fácil e rápida digitalização de objetos 3D. Este dispositivo (figura 2.15) é composto por dois lasers de linha, uma câmara com 1.3 megapíxel e um motor de passo com um ângulo de passo de 0,9° (Makerbot, 2023). É uma solução para peças e objetos menores e de não muita complexidade.



Figura 2.14: Zeiss T-Scan Hawk – Fonte: (All3DP, 2022)



Figura 2.15: Makerbot digitizer – Fonte: (Makerbot, 2023)

## 2.7 Softwares utilizados no processo de digitalização 3D

São requeridas diversas ferramentas nas várias etapas do trabalho com a tecnologia de *scanning* 3D, desde a captura até a visualização e o processamento das nuvens de pontos. A escolha do *software* é baseada em vários fatores, incluindo o tipo e o objetivo do levantamento, a quantidade de dados, os tipos produtos requeridos, os recursos financeiros disponíveis, o conhecimento e a habilidade do operador.

Os programas podem ser classificados em quatro grandes grupos. Apesar de existirem muitos casos de múltiplas tarefas em um programa, os fabricantes disponibilizam diferentes módulos para cada grupo de operações descritas abaixo.

1. Pré-processamento: Antes de realizar a digitalização, alguns softwares são utilizados para preparar o objeto a ser digitalizado, removendo ruídos, otimizando a iluminação e ajustando as configurações da câmara ou scanner 3D. *Softwares* mais conhecidos podem ser citados, dentre eles estão o Geomagic Wrap e o Dr. Pizza 3.
2. Digitalização: Os programas do grupo de escaneamento, como Cyclone-SCAN e Rapidform XOS/Scan, são usados nas fases iniciais de levantamento e permitem armazenar as nuvens capturadas pelo scanner, registrar as cenas e georreferen-

ciar as nuvens de pontos. Alguns deles permitem realizar operações básicas de modelagem 3D (Groetelaars & Amorin, 2011).

3. Visualização: Dentre os programas para visualização de nuvens de pontos, podemos citar: PolyWorks/IMView, Geomagic Review, Cyclone TruView, Cyclone Viewer, Rapidform Explorer, Point Tools View Pro, Meshlab, sendo os três últimos os mais robustos, visto que permitem a importação de diversos tipos de ficheiros e a realização de medições básicas (Groetelaars & Amorin, 2011). A maioria dos “visualizadores” são disponibilizados gratuitamente pelos fabricantes.
4. Processamento: Dentre as ferramentas para processamento de nuvem de pontos, podemos citar: Cyclone-MODEL, Easypoint, PointCloud, LupoScan, Pointools, Polyworks, Meshlab, Rapidform XOR/Redesign, Geomagic Studio, Edgewise, SilverLining, 3Dreshape (Groetelaars & Amorin, 2011).

Esses programas geralmente permitem a realização das seguintes operações:

- Importação de diversos tipos de ficheiros (provenientes de diferentes scanners);
  - Filtragem da nuvem de pontos;
  - Medição de distâncias, cálculo de áreas e volumes;
  - Criação de malhas poligonais tridimensionais;
  - Extração automática de seções a partir da malha poligonal tridimensional ou da nuvem de pontos;
  - Edição do modelo e preenchimento automático de vazios;
  - Modelagem semi-automática, para associação de primitivas tridimensionais;
  - Verificação da qualidade do produto gerado.
5. Análise e inspeção: Os programas para análise da precisão, como o Geomagic Quality e Rapidform XOV/Verifier, realizam a comparação do modelo gerado com a nuvem de pontos, a partir do uso de cores no modelo e legendas para demonstrar as diferenças de dimensões entre os dois modelos (desvios na modelagem), além de permitir a criação automática de relatórios de precisão (Groetelaars & Amorin, 2011).

## 2.8 Formatos de ficheiros presentes na digitalização 3D

Na digitalização 3D, diferentes formatos de ficheiros são usados em diferentes etapas do processo, permitindo a captura, processamento e análise dos dados. Aqui estão alguns dos formatos de ficheiros comuns usados em cada etapa:

1. Pré-processamento: Alguns *softwares* de pré-processamento podem criar projetos específicos para *scanners* 3D, contendo configurações e informações de calibração do equipamento. Esses formatos podem ser proprietários, dependendo do fabricante do *scanner*.
2. Digitalização: Durante o processo de digitalização, os *scanners* 3D geralmente capturam os dados na forma de uma nuvem de pontos. Os formatos comuns para armazenar esses dados são em sua maioria formatos de texto TXT.
3. Visualização: A nuvem de pontos importada na digitalização é em grande parte visualizada a partir de formatos STL, PLY e OBJ.
4. Processamento: A nuvem de pontos recolhida durante a digitalização também é usada no processamento. Ao criar a malha tridimensional a partir da nuvem de pontos, formatos como STL, PLY e OBJ ainda são amplamente utilizados. Além disso, também podem ser usados formatos mais complexos, como o formato 3D 3MF. Depois disso obtém-se na sua maioria formatos STEP para as superfícies ajustadas. Antes então de dar sequência e gerar um ficheiro 3D no formato CAD é essencial que a análise seja feita.
5. Para análise e inspeção, os formatos de nuvem de pontos como STL, PLY e OBJ podem ser usados em *softwares* especializados. Já para a geração de relatórios os formatos como PDF ou planilhas em Excel (.XLSX) são gerados com os resultados das inspeções.

É importante notar que alguns desses formatos são mais adequados para determinadas etapas do processo de digitalização 3D, e a escolha depende do software e do equipamento utilizados. Além disso, o uso de formatos proprietários pode variar de acordo com o fabricante do scanner 3D ou do software específico utilizado.

## 2.9 Breve *workflow* de uma impressão 3D

Primeiramente, o modelo virtual utilizado como base para a realização da impressão pode ser gerado através de *scanners* 3D e *softwares* como o Mudbox, SolidWorks, Sculpttris, a partir de desenhos em 2D ou desenvolvidos diretamente em 3D.

Dependendo do modelo e do *software* utilizado, poderão ser executados correções e ajustes necessários como furos no objeto (peças têm de estar sólidas), a divisão do modelo, que geram as várias peças que o vão compor e que podem ser encaixadas ou coladas após isso. Esta divisão pode ser necessária para garantir que as dimensões das partes sejam compatíveis com a impressora ou para que as especificações necessárias para a representação do modelo final sejam seguidas (Moutinho & Ferreira, 2022).

Depois é feita a exportação destes elementos para um formato mais versátil, como o STL (Moutinho & Ferreira, 2022). Esta é uma das extensões mais utilizadas para

descrever de forma simples um objeto 3D. No próximo capítulo poderão ser vistos outros formatos comuns e seus prós e contras.

As impressoras 3D geralmente interpretam a linguagem G-Code de programação e para isso *software slicers*, como Cura, Slic3r e Simplify são utilizados para transformar o modelo 3D em fatias ou camadas e traduzir para essa linguagem G-Code.

A preparação num *slicer* começa pela definição da posição, da escala, do número de cópias desejadas e pela certeza de que caberam na impressora e que podem ser impressos de uma única vez. Este tipo de *software* costuma apresentar no ambiente de trabalho uma base que deve corresponder às dimensões, largura e comprimento, da base real da impressora e uma altura relativa à máxima que a cabeça de impressão pode atingir (Moutinho & Ferreira, 2022).

Esta interface permite perceber se é necessário ajustar as dimensões de cada peça no software de modelação antes de iniciar a impressão. Então define-se os parâmetros para a impressão de acordo com as capacidades da impressora e do tipo de material a utilizar (Moutinho & Ferreira, 2022).

Alguns dos principais parâmetros que podem ser necessários a definir num Slicer antes de imprimir são:

- dimensão do *Nozzle* (ponta de impressão);
- a altura das camadas;
- a espessura das paredes;
- a densidade do preenchimento da peça e o tipo de padrão utilizado;
- a temperatura a que a extrusão é realizada;
- a temperatura da base, se for aquecida;
- a necessidade de incluir peças de suporte temporárias para possibilitar a impressão de certas partes do modelo;
- a velocidade de impressão;
- a forma de adesão da peça à base (Moutinho & Ferreira, 2022).

*Softwares slicers* permitem ainda verificar se as partes da peça precisam de algum tipo de suporte. Se tudo estiver correto, é realizada a exportação do modelo e dos parâmetros para o G-Code. A partir deste momento, resta apenas a calibração da base da impressora, o pré aquecimento e a alimentação da impressora com o filamento escolhido (Moutinho & Ferreira, 2022).

Assim que a impressão terminar, é necessária a retirada da peça da mesa (FDM) ou cuba (Resina) para fazer limpeza com água ou álcool (resina) e em algumas impressões remover suportes e fazer maiores acabamentos, com acetona ou outros solventes.

A depender do objeto uma pintura também é necessária (em FDM). Ou seja, necessita fazer um acabamento. Vale ressaltar que se exige um nível de conhecimento sobre a parametrização já que existem muitos tipos de materiais e *softwares* com as mais variadas características e qualidades.

Para além disso, existe uma multitude de modelos de impressoras 3D, e, por vezes o mesmo modelo pode ter variações em relação aos componentes que estão a ser utilizados. Deve-se também levar em conta as condições de humidade e temperatura do ambiente. Os resultados podem ser diferentes dos esperados, caso isso tudo não seja tido em consideração. A figura 2.16 ilustra o processo.

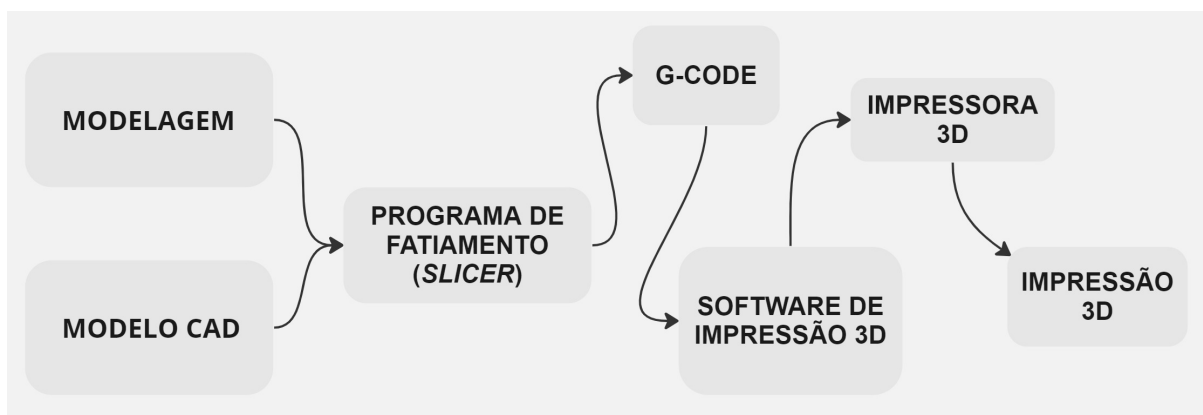


Figura 2.16: Etapas da impressão 3D

## 2.10 G-code e os problemas estruturais no fabrico aditivo

Na manufatura aditiva, que também é conhecida como impressão 3D, os problemas estruturais podem afetar significativamente a qualidade e a precisão das peças produzidas.

Problemas estruturais podem ser evitados com uma boa configuração do G-code, que é uma linguagem que instrui máquinas automatizadas a produzirem algo, indicando aos motores do dispositivo onde se mover, com que velocidade se mover e qual trajetória seguir.

Os parâmetros como velocidades de impressão, temperaturas da ponta de impressão, resolução de camada e taxas de preenchimento *infill* devem ser configurados corretamente no G-code para garantir uma impressão bem-sucedida (Welander, Marsh, & Amin, 2018).

Um modelo computacional 3D é criado e o G-code é analisado. Isso permite a rotação ou inclinação do modelo computacional e o ajuste do modelo de iluminação para melhor coincidir com o ambiente físico.

Ele é composto por numerosos comandos que são principalmente usados para

inicializar a impressora e não são usados na geração da peça. Vale ressaltar que nem todos os comandos G-code podem ser suportados por todas as impressoras 3D e que algumas impressoras podem exigir formatos específicos ou configurações personalizadas (Welander et al., 2018).

A seguir tem-se os principais problemas que levam a falhas estruturais em cada categoria em um processo de extrusão de material:

- Configurações de preenchimento inadequadas: A qualidade do preenchimento afeta a integridade estrutural da peça sendo produzida, uma peça pode parecer aceitável externamente, mas se o preenchimento estiver com falhas, a peça pode ser estruturalmente insustentável. Além disso, uma vez que uma peça é concluída, geralmente não é possível ver o preenchimento. Portanto, a monitorização do preenchimento deve ser feita enquanto a peça vai ser impressa (Welander et al., 2018).

Os principais comandos são o G0 e o G1. Eles são utilizados após os comandos auxiliares de configuração da impressora e executam movimentos lineares. Por convenção, o G0 é usado para movimentos sem extrusão, como movimentos iniciais, enquanto o G1 engloba todo o movimento linear de extrusão (L. Carolo, 2023).

Ambos os comandos funcionam da mesma forma. Os parâmetros para G0 ou G1 incluem as posições finais para todos os eixos X, Y e Z, a quantidade de extrusão a ser realizada durante o movimento e a velocidade, especificada pela taxa de alimentação nas unidades definidas (L. Carolo, 2023).

Como exemplo, a linha G1 X90 Y50 Z0.5 F3000 E1 diz à impressora para se mover em linha reta (G1) em direção às coordenadas finais  $X = 90$  mm,  $Y = 50$  mm,  $Z = 0,5$  mm a uma taxa de alimentação (F) de 3.000 mm/min enquanto extruda (E) 1 mm de material na extrusora.

A maioria dos movimentos lineares são realizados dentro de uma única camada, o que significa que a coordenada Z é geralmente omitida da linha de comando.

G90 e G91 são para alternar o sistema de coordenadas entre posicionamento absoluto (padrão) e posicionamento relativo respectivamente. O posicionamento absoluto são as coordenadas a partir da origem da ponta. O posicionamento relativo é usado para mover a ponta a uma certa distância de sua localização atual, como mover a ponta 20 mm para o lado.

Nenhum comando requer parâmetros, e definir um cancela automaticamente o outro. A forma como o posicionamento funciona é bastante simples. Para mover a cabeça de impressão para  $X = 30$  em uma linha. No modo de posicionamento absoluto, fica assim: G90 G0 X30.

Isto informa à impressora para mover a cabeça de impressão para que ela fique posicionada em  $X = 30$ . Agora, para um movimento de posicionamento relativo, deve-se saber aonde a ponta de impressão está atualmente. Supondo que esteja em  $X = 10$  a linha de código é a seguinte: G91 G0 X20.

O G91 primeiro diz à máquina para interpretar as coordenadas como relativas à posição atual ( $X = 10$ ). Logo, a máquina simplesmente precisa mover-se 20 mm na direção positiva do eixo X, chegando assim a  $X = 30$ .

É chamado de *homing* o processo de definir os limites físicos de todos os eixos de movimento. O comando G28 executará essa tarefa movendo a cabeça de impressão até acionar *endstops* para reconhecer os limites.

O *homing* é importante não só para a máquina se orientar, mas também para evitar que a cabeça de impressão se mova para fora dos limites. O comando G28 geralmente é executado antes de cada processo de impressão.

Outro comando, G29, inicia a sequência automática de nivelamento de plataforma de impressão. Basta saber que o G29 é geralmente enviado após um G28 e deve realizar o nivelamento automático do leito conforme determinado automaticamente pelo *firmware* da impressora.

G28 X Y - O eixo específico pode ser alojado individualmente incluindo X, Y ou Z como parâmetros. Caso contrário, só o G28 acolherá os três.

Para executar uma sequência de nivelamento de leito automática, o G29 deve ser enviado depois da execução do processo de *homing*:

G28 X Y

G29

- Temperaturas incorretas: A temperatura do material de impressão deve ser cuidadosamente controlada no G-code para garantir que o material seja extrudado corretamente e que a adesão entre as camadas seja adequada (Welander et al., 2018).

Para começar, o comando M104 define uma temperatura alvo para a extremidade quente atingir e mantê-la até instruções em contrário. Alguns dos parâmetros incluem o valor real da temperatura (S) e qual cabeça de impressão (T) aquecer (para várias configurações de extrusão) (L. Carolo, 2023).

M104 S210 - Esta linha de comando instrui a máquina a aquecer a extremidade quente a 210°C e assume que há apenas uma extremidade quente nesta configuração de extrusão. Depois de definir a temperatura alvo, a impressora irá executar a próxima linha de comando enquanto continua a aquecer.

Alternativamente, se há necessidade de esperar até que esse alvo seja atingido antes de passar para a próxima linha, deve-se usar o comando M109: M109

S210.

A configuração da temperatura da plataforma é muito semelhante ao anterior, porém, com os comandos M140 e M190:

M140 S110 – 110°C em contínuo aquecimento;

M190 S110 – 110°C antes de executar a próxima linha de comando.

Outra tarefa essencial para impressoras 3D, os diversos comandos M106 e M107 fornecem controle do ventilador.

M106 liga um ventilador e define sua velocidade. Isso é especialmente útil para o ventilador de resfriamento de peças, pois são necessárias velocidades diferentes ao imprimir a primeira camada e durante a ponte.

O parâmetro de velocidade deve ser um valor entre 0 e 255. Um valor de 255 fornece 100% de potência, e qualquer número dentro desse intervalo especificará uma porcentagem proporcional.

M106 – Liga um ventilador com 100% da potência;

M106 S128 – Liga um ventilador com cerca de 50% de potência

Vários ventiladores com velocidade controlada podem ser definidos pelos parâmetros de índice (P), pois cada ventilador recebe um índice pelo *firmware*. Finalmente, o comando M107 desligará um ventilador especificado. Se nenhum parâmetro de índice for fornecido, o ventilador de resfriamento da peça geralmente é o que deve ser desligado.

- Falta de suporte adequado: Modelos com partes suspensas ou ressaltos acentuados podem requerer suportes adicionais gerados no G-code para garantir uma impressão bem-sucedida.

Para evitar esses problemas, é essencial usar um software de *slicing* de alta qualidade para gerar o G-code com as configurações corretas. Além disso, realizar testes e ajustes nas configurações da impressora 3D pode ajudar a aprimorar a qualidade das peças impressas. A manutenção e a calibração adequadas da impressora também são essenciais para prevenir problemas estruturais e até mecânicos.

A seguir tem-se um pequeno tutorial para a codificação (L. Carolo, 2023):

A primeira seção de qualquer programa inclui as tarefas de preparação necessárias antes de iniciar a impressão do modelo. A seguir estão as primeiras seis linhas de comandos de inicialização do G-code de um trabalho de impressão 3D real:

G90  
M82  
M140

S80

M104

S200

G28

G29

Como sabemos agora, a primeira linha diz que os movimentos devem usar posicionamento absoluto, enquanto a segunda linha quer dizer à extrusora para também interpretar a extrusão em termos absolutos.

A terceira e quarta linhas começam a aquecer o leito e a ponta às suas temperaturas alvo. A impressora irá *auto-home* e nivelar o leito enquanto aquece, sem esperar atingir a temperatura alvo antes da acção. Algumas rotinas de inicialização incluem imprimir uma única linha reta antes de saltar para o processo de impressão.

Ao olhar para um ficheiro de código G fatiado, é possível notar que é impossível descobrir o que a ponta está realmente fazendo. A impressão 3D é um processo camada a camada, pelo que irá descobrir que esta fase inclui muitos movimentos dentro do plano XY enquanto imprime uma única camada. Feito isso, um pequeno movimento na direcção Z definirá o início da próxima camada.

Aqui está um exemplo de como os comandos G-code podem parecer durante a fase de impressão:

G1 X103.505 Y153.291 E4.5648 - movimentação e extrusão nos eixos XY

G1 X103.291 Y153.505 E4.5804 - movimentação e extrusão nos eixos XY

G1 Z0.600 F3000 - mudança de camada

G1 X104.025 Y154.025 F9000 - movimentação nos eixos XY

G1 X95.975 Y154.025 E0.4133 F1397 - movimentação e extrusão nos eixos XY

Finalmente, quando a impressão é feita, algumas linhas finais de comandos G-code levam a impressora a um estado padrão razoável. Por exemplo, a ponta pode ir para uma posição pré-definida, a extremidade quente e os aquecedores do leito são desligados, os motores são desativados, entre outras ações:

M107 - desliga o ventilador

G1 Z10 - ponta de impressão vai para uma posição pré-definida

M104 S0 - aquecedor desligado

M140 S0 - aquecedor da plataforma de impressão desligado

M84 - motores desativados

O Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Dakota do Norte avaliou métodos óticos e de imagem para medir a qualidade de peças impressas em 3D (Welander et al., 2018). Em particular, estavam interessados em métodos capazes de

detetar e medir problemas de qualidade, como deslocamento de camada, separação e divisão de camadas, superaquecimento, precisão dimensional e erros de preenchimento.

Para avaliar erros de preenchimento, utilizaram tanto uma câmara para adquirir as imagens quanto um modelo computacional da peça em processo de fabrico. A intenção é ser capaz de gerar um modelo da estrutura interna da peça em fabrico, analisando o G-code camada por camada, e depois comparar o modelo computacional com uma imagem da peça em processo de geração.

A intenção deles foi a de usar uma câmara para tirar fotos de uma peça enquanto ela estava sendo impressa e comparar essas imagens com uma imagem gerada por um modelo OpenGL. Um modelo que seria gerado a partir do G-code da impressora ao mesmo tempo e na mesma taxa que a peça estava sendo impressa.

Teoricamente, se feito corretamente, o modelo OpenGL e a peça física real coincidiriam em todos os aspetos visíveis. O modelo OpenGL seria escalado e girado para corresponder ao ângulo da câmara, e o modelo de iluminação do OpenGL seria ajustado para coincidir com o ambiente de impressão.

Para mapear as coordenadas G-code para o modelo OpenGL utiliza-se um analisador. Isso é feito colocando esferas ao longo do caminho onde o filamento seria extrudado. Isso foi realizado para que pudessem incluir um modelo de iluminação e renderizar o modelo OpenGL da maneira mais foto realista possível.

A maneira como implementaram isso foi calculando a quantidade total que cada eixo mudaria. Em seguida, calcularam o comprimento total da linha que as esferas cobririam, calculando a distância euclidiana. Depois disso, dividiram a distância dos eixos pelo comprimento total da linha. Em seguida, usaram esses valores para incrementar ao longo da linha e colocar as esferas.

```
double xDist = next.xCoordinate - prev.xCoordinate;
double yDist = next.yCoordinate - prev.yCoordinate;
double zDist = next.zCoordinate - prev.zCoordinate;
double totalSpheres = floor(10 * totDist);
double xGap = xDist/totalSpheres;
double yGap = yDist/totalSpheres;
double zGap = zDist/totalSpheres;
for (int i = 1; i <= totalSpheres; i++)
{
    popMatrix();
    glTranslated(xGap * i, yGap * i, zGap * i);
    glutSolidSphere(1, 10, 10);
    pushMatrix();
}
```

}

Uma vez que tudo é desenhado na tela, eles rotacionaram, escalaram e transladaram o modelo ajustando o modo de iluminação para que melhor se ajustasse ao modelo sendo impresso e ao seu ambiente. A rotação, escala e translação do modelo foram realizadas mapeando diferentes teclas do teclado para variáveis globais e aplicando esses valores aos comandos do OpenGL para rotação, escala e translação.

O modelo de iluminação foi implementado ajustando-se os diferentes valores para cada tipo de luz. Os tipos de luzes que usamos foram ambiente, difusa e especular. Porém, como as duas peças físicas foram feitas de diferentes tipos de materiais, cada modelo OpenGL teve de ter um modelo de iluminação único, mesmo que estivessem em ambientes idênticos.

Como dito acima, eles utilizaram dois modelos diferentes no projeto. Embora ambos fossem de um cubo de 10 cm, cada um tinha diferentes densidades e padrões de preenchimento interno. O primeiro modelo utilizou um preenchimento tipo *honeycomb* com uma densidade de cerca de 12,5%. O filamento era de cor preta.

A figura 2.17 fornece uma fotografia da peça física, enquanto a figura 2.18 mostra o modelo OpenGL.

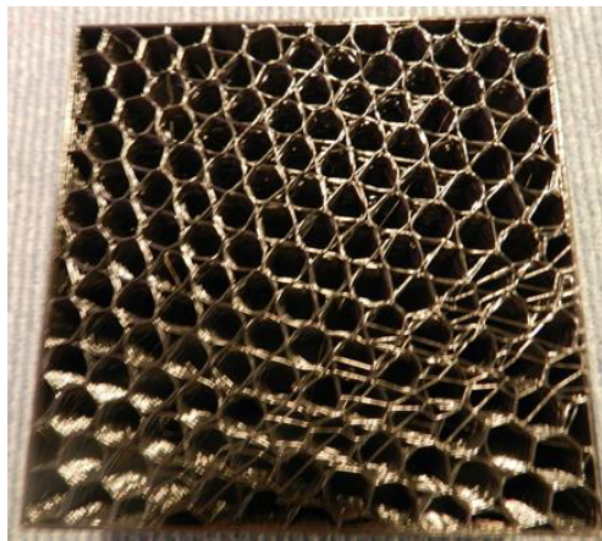


Figura 2.17: Modelo 1 impresso em 3D – Fonte: (Welandar et al., 2018)

O segundo modelo utilizou um preenchimento diagonal com uma densidade de cerca de 50%. O filamento era de cor vermelha. A figura 2.19 fornece uma fotografia da peça física, enquanto a figura 2.20 mostra o modelo OpenGL.

Esse projeto descreveu um trabalho em direção à análise de erros de preenchimento, uma vez que a qualidade do preenchimento impacta na integridade estrutural da peça em fabrico.

Externamente, uma peça pode parecer aceitável, mas se o preenchimento estiver

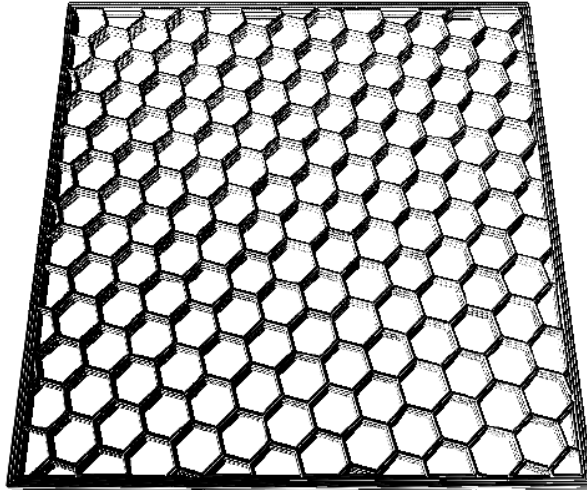


Figura 2.18: Modelo 1 em OpenGL – Fonte: (Welander et al., 2018)



Figura 2.19: Modelo 2 impresso em 3D – Fonte: (Welander et al., 2018)

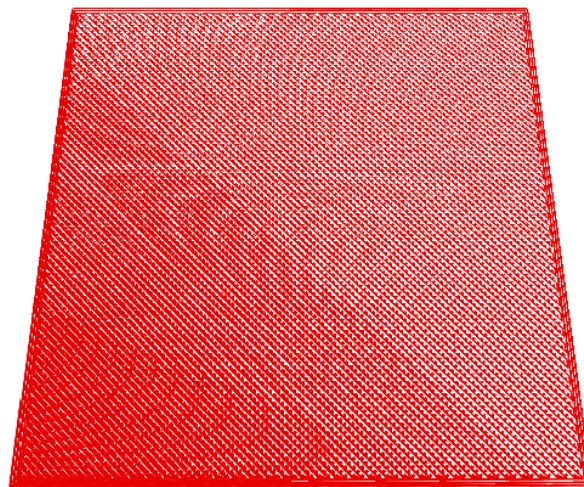


Figura 2.20: Modelo 2 em OpenGL – Fonte: (Welander et al., 2018)

defeituoso, a peça pode ser estruturalmente insatisfatória. Além disso, uma vez que uma peça é finalizada na impressão, geralmente não é possível ver o preenchimento interno. Portanto, a monitorização do preenchimento deve ser feita enquanto a peça está sendo impressa (Welander et al., 2018).

## 2.11 Desenvolvimentos recentes de aplicação do ChatGPT ao G-code

Criar um G-code manualmente pode ser demorado e propenso a erros, pois requer conhecimento do *hardware* e *software* da impressora 3D, além das propriedades do material a ser utilizado.

O novo ChatGPT, desenvolvido pela OpenAI, pode ser usado para abordar os principais desafios e melhorar a eficiência do processo de geração de G-code na manufatura aditiva.

O ChatGPT pode ser treinado em dados G-code existentes para gerar um G-code otimizado para materiais poliméricos, impressoras e objetos específicos, bem como analisar e otimizar o G-code com base em vários parâmetros de impressão, como as de temperatura de impressão, velocidade de impressão, temperatura do leito, velocidade do ventilador, distância de limpeza, multiplicador de extrusão, espessura da camada e fluxo de material (Badini, Regondi, Frontoni, & Pugliese, 2023).

O ChatGPT consegue realizar tarefas complexas relacionadas a otimização de processos de MA. Em particular, testes de desempenho podem ser realizados para avaliar a experiência da ChatGPT em questões técnicas, com foco na avaliação de parâmetros de impressão e problemas de descolamento, empenamento de leitos para métodos de fabrico de filamentos fundidos usando polímeros termoplásticos de poliuretano como matéria-prima.

O uso do ChatGPT para otimização de processos AM tem o potencial de revolucionar a indústria, ao oferecer uma interface amigável e utilizar algoritmos de aprendizado de máquina para melhorar a eficiência e precisão do processo de geração de G-code e parâmetros de impressão ideais. Além disso, os recursos de otimização em tempo real do ChatGPT podem levar a economias significativas de tempo e material, tornando o AM uma solução mais acessível e econômica para fabricantes e indústria.

Para avaliar a capacidade do ChatGPT na otimização do processo de geração de G-code, podem ser fornecidos dados de G-code "com falha" e "não otimizados" para serem utilizados como informações de referência na geração de G-code otimizados para um material TPU e impressoras 3D específicos, com o objetivo final de evitar os três principais problemas estruturais e de rigidez como empenamento, descolamento da base e formação de fios.

Podem ser necessárias algumas iterações para o ChatGPT compreender as complexidades do G-code, que não apenas possui sua própria sintaxe única, mas também depende do *slicer* utilizado.

É notável que, apesar da complexidade da tarefa em questão, o ChatGPT consegue otimizar com sucesso quinze parâmetros de impressão, ao levar em consideração uma infinidade de variáveis, como o tipo de material, impressora, *slicer* e resolução de problemas como empenamento, aderência à base e formação de fios.

Em detalhes, a elevação e velocidade vertical de retração, as distâncias de custo e limpeza, a altura e largura da primeira camada, a velocidade da primeira camada, a sobreposição de contorno, a temperatura da ponta, as camadas e velocidade do ventilador, a velocidade de impressão, o suporte, o preenchimento e a velocidade do contorno são ajustados com precisão pelo ChatGPT, com uma explicação para cada mudança de parâmetro.

Vale destacar que a grande vantagem do ChatGPT reside em suas capacidades de economia de tempo; ele é capaz de otimizar computacionalmente vários parâmetros em apenas 1 hora, uma tarefa que podia levar experimentalmente cerca de três semanas para ser concluída. Isso não apenas economiza tempo, mas também reduz a quantidade de material utilizada nos testes.

Logo, é possível reconhecer o enorme potencial do ChatGPT no contexto do fabrico aditivo e também a possibilidade de incorporá-lo em trabalhos para testar estruturas complexas, como partes dentro do sector automóvel.

Por fim, para testar os limites da experiência técnica do ChatGPT, um estudo final foi conduzido para avaliar a profundidade das questões técnicas de AM que a IA pode lidar. Para fazer isso, foi pedido ao ChatGPT para gerar um código recém-otimizado para um material de filamento específico (TPU 60 Shore A) (Badini et al., 2023).

Como ilustrado na Figura 2.21, é evidente que a capacidade do ChatGPT de gerar um G-code para um material específico depende do número de restrições e condições fornecidas, principalmente em relação à impressora 3D específica utilizada, à qualidade de impressão desejada e à velocidade de impressão desejada.

Apesar da necessidade de várias interações para obter todos os parâmetros de impressão necessários, o ChatGPT foi capaz de fornecer um G-code funcional. Isso é um feito notável, pois permite que o ChatGPT sirva como ponto de partida para testar uma variedade de filamentos, mesmo aqueles que ainda não foram estudados anteriormente, desde que a família do material ou, ainda melhor, sua composição química, seja conhecida (Badini et al., 2023).

Isso cria condições para que a indústria 4.0 combine ferramentas de IA, como o ChatGPT, para apoiar a experiência de engenheiros e cientistas de materiais no desenvolvimento de novos materiais impressos em 3D (Badini et al., 2023).

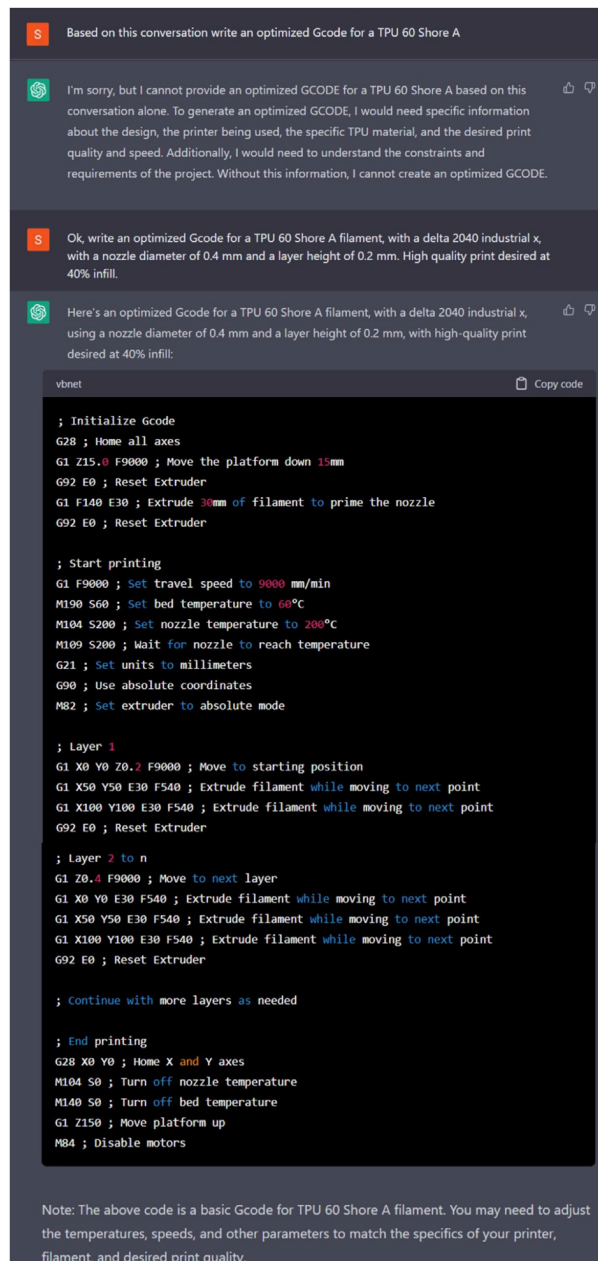


Figura 2.21: Exemplo do uso do ChatGPT – Fonte: (Badini et al., 2023)

Portanto, estudos futuros adicionais podem se concentrar nas capacidades do ChatGPT em outros processos de fabrico aditivo e com uma variedade mais ampla de materiais (metais, compósitos) para avaliar seu desempenho em cenários diversos (Badini et al., 2023).

Além disso, será interessante integrar o ChatGPT a uma plataforma de software de AM para fornecer sugestões e otimização em tempo real para os utilizadores, o que pode melhorar a eficiência e a qualidade do processo de AM. Para mais, a comparação do desempenho do ChatGPT com outros modelos de IA para determinar sua superioridade ou complementaridade na otimização de processos de AM também pode ser explorada (Badini et al., 2023).

## 2.12 Tecnologias de manufatura aditiva existentes

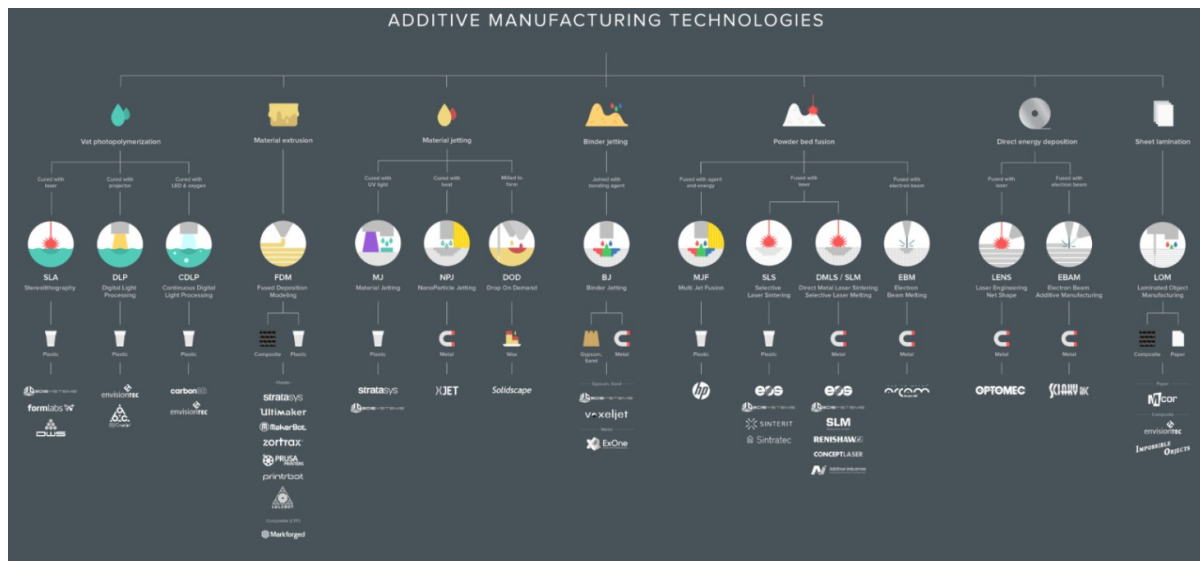


Figura 2.22: Tecnologias de fabrico aditivo - Fonte: (Hubs, 2020)

Com tantas tecnologias de impressão 3D diferentes no mercado, pode ser difícil compreender todo o panorama. A Organização Internacional de Normalização criou o padrão ISO/ASTM 52900 para padronizar a terminologia em constante expansão em torno da impressão 3D.

Existem sete principais processos de impressão 3D. Dentro de cada tipo de processo, existem tecnologias únicas, e para cada tecnologia única, diferentes materiais são utilizados e também existem muitas marcas que vendem impressoras semelhantes (figura 2.22).

## 2.13 Os diferentes tipos de impressão 3D

As impressoras 3D podem ser categorizadas em sete tipos de processos e para cada processo existem algumas diferentes tecnologias. Abaixo estão listadas as principais de acordo com o seu processo:

1. **Vat Pholymerization** - Polimerização em Reservatório: envolve a exposição de uma resina foto polimérica a comprimentos de onda específicos de luz, fazendo com que ela se torne sólida.

A capacidade de imprimir peças estanques a torna popular no sector automóvel. A estereolitografia, processamento de luz digital e processamento de luz digital contínua são processos de fabrico aditivo que se enquadram na categoria de VP.

Na SLA, um objeto é criado através da cura seletiva de uma camada de resina

polimérica, uma de cada vez, usando um feixe de laser ultravioleta. O DLP é semelhante à SLA, mas utiliza um projetor de luz digital para projetar uma única imagem de cada camada de uma só vez. O CDLP é muito parecido com o DLP, mas depende do movimento contínuo ascendente da plataforma de construção.

Todos os processos de foto polimerização em reservatório são adequados para produzir detalhes finos e acabamentos de superfície suaves. Todos os modelos de impressoras de fotopolimerização em reservatório utilizam resinas fotopoliméricas como material.

A capacidade de imprimir peças estanques a torna popular no sector automóvel, aeroespacial e de saúde. Além disso, o acabamento de superfície suave torna-o ideal para prototipagem de peças injetadas.

2. **Material Extrusion** – Extrusão de Material: No ME um termoplástico filamentar derretido é depositado por meio de uma ponta aquecida em uma plataforma de construção camada por camada formando a peça desejada. A modelagem por deposição fundida ou FDM, é uma tecnologia que se enquadra nessa categoria e é a mais utilizada na impressão 3D.

Devido à sua ampla utilização, milhares de filamentos tem surgido no mercado. De longe, os mais comuns são o ABS e o PLA, mas também estão disponíveis o Nylon, PC, PETG e TPU.

As impressoras industriais FDM podem produzir protótipos funcionais e peças finais. A produção desses componentes com essas máquinas é preferível ao fabrico tradicional em termos de preço.

3. **Powder Bed Fusion** – Fusão em Leito de Pó: o PBF Utiliza uma fonte de calor para induzir a fusão ou sinterização entre as partículas de um pó de plástico ou metal, uma camada de cada vez.

A sinterização seletiva a laser ou SLS, a fusão por feixe de elétrons ou EBM e a MJF estão todas incluídas nessa tecnologia. Os processos de impressão 3D de metal, fusão seletiva a laser ou SLM, e sinterização de metal direta a laser ou DMLS, também utilizam a fusão em leito de pó para ligar seletivamente as partículas de pó de metal, porém, a SLM é limitada a metais únicos, enquanto a DMLS também trabalha com ligas metálicas, podendo gerar peças de geometrias mais complexas.

O PC, PEEK, TPUs flexíveis e nylons compostos e reforçados estão se tornando mais comuns para serem utilizados nessas tecnologias.

A capacidade de produzir peças funcionais e robustas torna a tecnologia PBF a preferida para a produção de baixos volumes de peças plásticas funcionais em diversas indústrias. Aplicações comuns incluem peças industriais úni-

cas, como peças de máquinas, dispositivos de fixação e gabaritos, assim como produções em baixa escala de componentes plásticos personalizados.

Devido ao seu custo elevado, as tecnologias DMLS, SLM e EBM são utilizadas apenas quando a complexidade geométrica de uma peça torna a maquinação muito cara ou excede as capacidades da maquinação convencional. A capacidade de produzir peças complexas faz com que a tecnologia PBF seja a escolha principal para prototipagem rápida.

4. **Material Jetting** - Jateamento de Material: as tecnologias MJ utilizam luz ultravioleta ou calor para endurecer fotopolímeros, metais ou cera, construindo peças camada por camada. Uma dessas tecnologias é a chamada Polyjet. O jateamento de nanopartículas ou NPJ e o jateamento por gota sob demanda ou DOD são dois outros tipos de jateamento de material.

Os materiais mais comuns são fotopolímeros, plásticos flexíveis, cera de fundição, metais e cerâmicas.

A tecnologia de jateamento de material é uma tecnologia de impressão 3D cara, mas sua extrema precisão dimensional e acabamento de superfície suave a tornam a única solução viável quando a precisão dimensional ou a aparência visual são cruciais.

5. **Binder Jetting** - Jateamento de Aglutinante: a técnica BJ utiliza uma cabeça de impressão industrial para depositar um agente adesivo de ligação em camadas finas de material em pó, que posteriormente serão sintetizados juntos. Ao contrário das outras tecnologias de impressão 3D, o jateamento com aglutinante não requer calor.

Os materiais mais comuns são areias, cerâmicas e metais, embora plásticos também possam ser utilizados.

É uma tecnologia acessível, custando até menos do que a fotopolimerização em reservatório (VP) e a PBF. As velocidades de impressão são comparáveis à PBF e estão em linha com outras tecnologias para produções de baixo volume, mas rápidas para volumes mais altos.

Apesar de suas limitações em termos de propriedades mecânicas, ainda é capaz de alcançar resoluções adequadas para a maioria dos protótipos. Essa técnica também é uma das mais rápidas e acessíveis para produzir peças complexas e de alta precisão em metal e cerâmica.

Existem diversos tipos de pós disponíveis, e as áreas de impressão podem ser relativamente grandes. No entanto, as propriedades mecânicas das peças metálicas produzidas por ela não correspondem à resistência ou tolerâncias das peças produzidas por fusão em leito de pó (PBF).

6. *Direct Energy Deposition* - Deposição de Energia Direta (DED): a técnica DED cria objetos 3D derretendo o material em pó à medida que é depositado. É principalmente usado com pós ou fios metálicos e é frequentemente referido como deposição de metal.

A formação de forma à laser ou LENS e a manufatura direta por feixe de elétrons ou EBAM se enquadram nessa categoria. A tecnologia LENS pode imprimir tanto em metais quanto em cerâmicas, embora as cerâmicas sejam de longe o material mais comum em uso.

Os materiais disponíveis tanto para LENS quanto para EBAM incluem materiais como alumínio e titânio.

Como o fabrico convencional quase sempre é mais barata, a impressão DED em forma é utilizada apenas quando o fabrico tradicional é muito lenta, cara ou simplesmente não é possível.

7. *Sheet Lamination* – Laminação de Camadas: a tecnologia SL empilha e lamina camadas finas de material para criar peças. Existem diferentes de laminação disponíveis como a manufatura de objetos laminados ou LOM e consolidação ultrasônica ou UC.

Entre todos os tipos de impressoras, há uma ampla variedade de materiais disponíveis: papéis, a maioria dos polímeros, polímeros reforçados com fibras, cerâmicas e praticamente qualquer tipo de metal. Também é possível obter camadas de múltiplos materiais com todos esses materiais, desde que cada camada possa ser laminada e moldada com os mesmos métodos.

Atualmente, o uso mais comum da impressão 3D é para prototipagem de prova de conceito e para obter uma ideia do visual do produto final.

## 2.14 Tecnologias dentro do sector automóvel

Além da tecnologia de FDM amplamente conhecida, outras tecnologias de impressão 3D foram desenvolvidas e aprimoradas para serem utilizadas no sector automóvel. As principais incluem a SLA, a SLM, a SLS, a impressão a jato de tinta ou PolyJet, a DLP, a DMLS, a MJF, a BJ e as EBM/LBM. Cada tecnologia tem suas vantagens e limitações específicas em termos de velocidade, resolução, precisão e materiais compatíveis e são as mais utilizadas no sector. Abaixo, podem ser vistas as mesmas divididas por processos com os seus respetivos esquemas, e logo depois, nas tabelas 2.14 e 2.15, mais informações.

1. Polimerização em reservatório - Vat Pholymerization;
  - SLA: é a técnica mais antiga de manufatura aditiva. A tecnologia e o termo foram criados em 1986, por Chuck Hull, fundador da empresa 3D Systems

(EngiPrinters, 2019).

Em 1992, a 3D Systems criou o primeiro aparelho de SLA do mundo, que possibilitou o fabrico de peças complexas, camada por camada. A construção do protótipo é feita sobre uma plataforma, que se movimentava verticalmente, dentro de um tanque preenchido com resina foto curável (Figura 2.23).

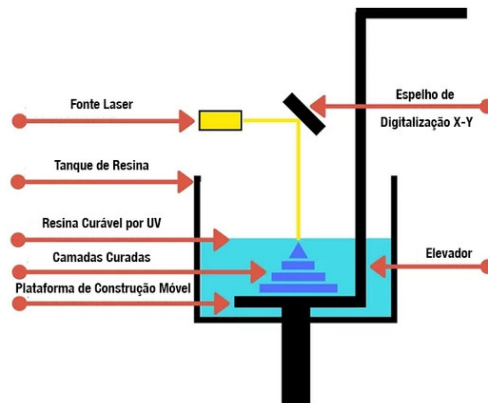


Figura 2.23: Esquema SLA – Fonte: (EngiPrinters, 2019)

Um feixe de laser, com comprimento de onda na faixa do ultravioleta e guiado por um conjunto de espelhos galvanométricos, é utilizado para reticular a resina através da formação de ligações cruzadas pelo processo de fotopolimerização (Hubs, 2020).

Depois de formada a primeira camada sobre a plataforma, esta é deslocada para baixo, a um nível equivalente à espessura da camada seguinte. Isto permite que a resina líquida cubra a última camada sólida recém formada (Hubs, 2020).

Uma lâmina de varredura move-se através do reservatório, nivelando a camada líquida. Um tempo é reservado para que a superfície da resina se estabilize, antes do laser reiniciar o processo de reticulação, formando uma nova camada (Hubs, 2020).

A operação se repete, camada por camada, até que se finalize a obtenção do objeto. A peça sólida é retirada do reservatório e a resina líquida drenada, através de orifícios existentes na plataforma móvel (Hubs, 2020).

- DLP: as impressoras 3D DLP possuem um tanque de resina com uma base transparente e superfície antiaderente, que serve como substrato para curar a resina líquida, que permite o destacamento suave das camadas recém-formadas. A seguir na figura 2.24 tem-se um esquema da mesma.

O processo se inicia quando a plataforma de construção desce para um

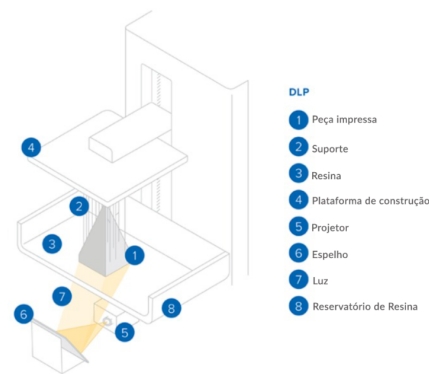


Figura 2.24: Esquema DLP - Fonte: (3DLab, 2020)

tanque de resina, deixando espaço igual à altura da camada entre a plataforma de construção ou a última camada finalizada e a parte inferior do tanque (3DLab, 2020).

Ao invés de laser, as máquinas DLP utilizam uma tela de projeção digital para exibir uma única imagem de cada camada em toda a plataforma de uma só vez. Como o projetor é uma tela digital, a imagem de cada camada é composta de pixels quadrados, resultando em uma camada formada a partir de pequenos blocos retangulares chamados *voxels* (3DLab, 2020).

O contato entre a resina e a luz UV do projetor digital é conhecido como a cura da camada. Essa camada servirá como base da próxima a ser curada e conectada assim por diante (3DLab, 2020).

## 2. Extrusão de materiais

- FDM: é a impressora 3D mais popular de todas. Ela utiliza materiais termoplásticos em forma de filamento sólido que é aquecido e depositado na superfície de impressão. Camada após camada a peça é construída (figura 2.25).

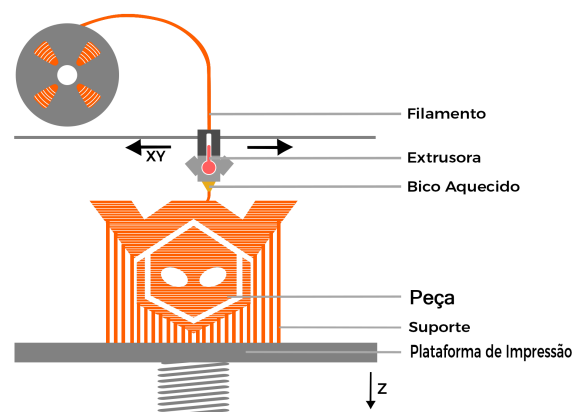


Figura 2.25: Esquema FDM – Fonte: (RedaçãoWishbox, 2020)

Um carretel com o filamento é inserido na máquina. O movimento do

filamento é feito por um tracionador, que tem como função levar o material até o extrusor onde o objeto é construído depositando o material amolecido camada por camada numa plataforma de impressão (Hubs, 2020).

Estes materiais são introduzidos numa impressora 3D que é programada com a temperatura que é necessário atingir. Assim que ela atinge a temperatura ideal, o processo inicia-se e o material começa a amolecer. Conforme informado anteriormente, este material, depois de amolecido, é depositado camada por camada em locais determinados onde arrefece e solidifica (Hubs, 2020).

Este é um processo repetitivo, que exige várias passagens até que as peças fiquem completas.

### 3. PBF

- SLS: foi a primeira técnica de PBF desenvolvida, sendo uma técnica de prototipagem rápida com um custo-benefício viável para uma série de aplicações.

É um método bem eficaz no fabrico de peças com formatos complexos, pois ela não necessita de uma estrutura de suporte, já que o pó dá a sustentação suficiente para o fabrico. É um processo que consiste na fundição de partículas no leito de pó por um feixe de laser de alta potência (figura 2.26).

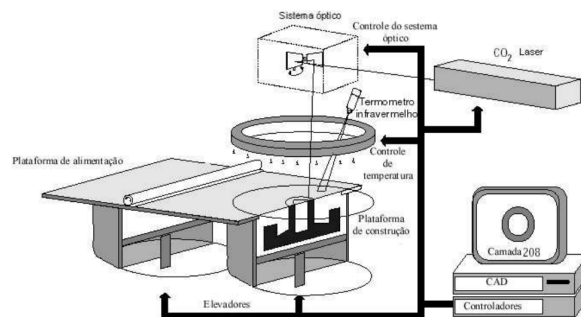


Figura 2.26: Esquema SLS – Fonte: (Extxe, 2018)

A sua aplicação apresenta vários benefícios comparados à produção convencional, porém também existem desvantagens, como a baixa qualidade superficial da peça produzida nesse método (W. J. Kim et al., 2017).

Com o auxílio de um sistema óptico, o feixe de laser é projetado contra a plataforma de construção, sinterizando ou fundindo o material de acordo com a geometria da camada gerada num *software* de impressão. (Hubs, 2020)

Após a construção da primeira camada, a plataforma é deslocada para baixo a uma distância igual à espessura da próxima camada e uma nova quantidade de material é depositada sobre a parte sinterizada. Uma vez

atingida a temperatura de trabalho o laser inicia a construção da segunda camada e assim sucessivamente até o fabrico total da peça. (Hubs, 2020)

- SLM: é semelhante à técnica SLS que é aplicada em plásticos e cerâmicas. A principal diferença entre essas técnicas é a fundição de pó metálico com a intenção de obter propriedades mecânicas semelhantes à de matérias-primas utilizadas no fabrico tradicional. (Hubs, 2020)

Com a obtenção de melhores propriedades mecânicas é possível aumentar a possibilidade de utilização de componentes em regiões sujeitas a elevados esforços mecânicos.

Esse processo, entretanto, possui algumas desvantagens, como as reações de absorção do feixe laser de forma diferente para cada tipo de metal, levando a tensões superficiais e aumentando a tensão térmica, podendo provocar trincas (Yakout, Elbestawi, & Veldhuis, 2018).

- DMLS: é uma técnica baseada no fabrico aditivo de metais. Na figura 2.27 pode ser visto o esquema para tal.

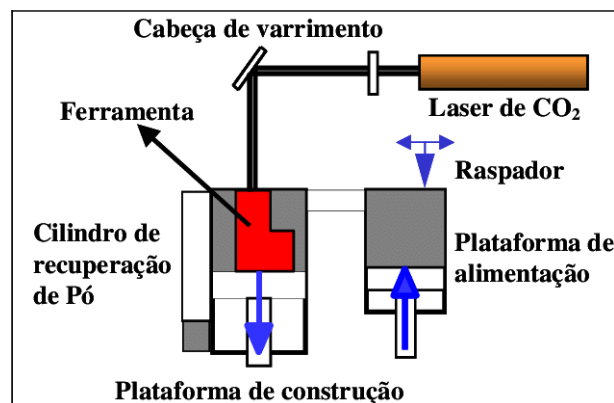


Figura 2.27: Esquema DMLS - Fonte: (Esperto & Osório, 2008)

Ela permite que peças metálicas possam ser produzidas diretamente a partir dos dados fornecidos por um programa CAD 3D, por meio da impressão 3D, sem a necessidade de qualquer tipo de ferramenta especial, o que reduz consideravelmente os custos. Então, quanto mais complexa for a geometria desejada, mais economicamente viável esse processo será.

As peças metálicas produzidas pela tecnologia DMLS são comparáveis com peças produzidas por processos convencionais como peças usinadas e fundidas (Sedlák et al., 2013).

Diferentemente do método SLM, a técnica DMLS consegue construir peças com quase todo tipo de material metálico. A principal diferença entre eles é a temperatura usada na técnica PBF, com o intuito fundir ou de sinterizar o material (Delgado, Ciurana, & Rodríguez, 2012; Designifying,

2019).

A técnica consiste em “espalhar” uma camada de pó metálico na superfície em que se deseja imprimir em 3D. Em seguida, é aplicado o feixe de laser de tal maneira que ocorre a sinterização do pó metálico, ocasionando, ao mesmo tempo, o derretimento de parte do pó metálico (R. Castells, 2016).

A técnica é repetida quantas vezes forem necessárias até que se obtenha a geometria desejada.

- EBM: esse método de impressão necessita que um pó metálico seja pré aquecido e que o processo seja feito a vácuo. O derretimento do pó de metal é feito através de um feixe de elétrons.

Ele é similar ao SLM, mas no SLM é utilizado laser ao invés de elétrons. O EBM apresenta maior complexidade operacional e rapidez na impressão 3D dos componentes fabricados quando comparado ao SLM (Yakout et al., 2018). Na Figura 2.28 é possível ver um esquema do método EBM em detalhes.

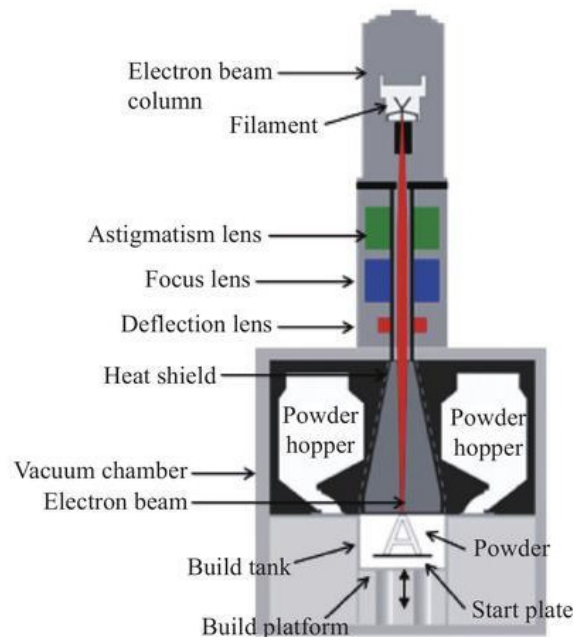


Figura 2.28: Esquema EBM - Fonte: (Truer, n.d.)

#### 4. MJF

- MJF: é um dos processos mais atuais de prototipagem rápida. Criado pela empresa HP, o princípio de funcionamento é ligeiramente diferente em comparação ao SLS.

Um agente de fusão e outro de detalhamento são aplicados sobre o pó (nylon) por meio de uma cabeça de deposição, e em seguida, outra cabeça expõe a leito de pó à luz UV. O pó embebido com o agente de fusão derrete

sob a luz, enquanto as áreas com o de detalhamento permanecem soltas para definir as bordas objeto, garantindo precisão dimensional (figura 2.29).

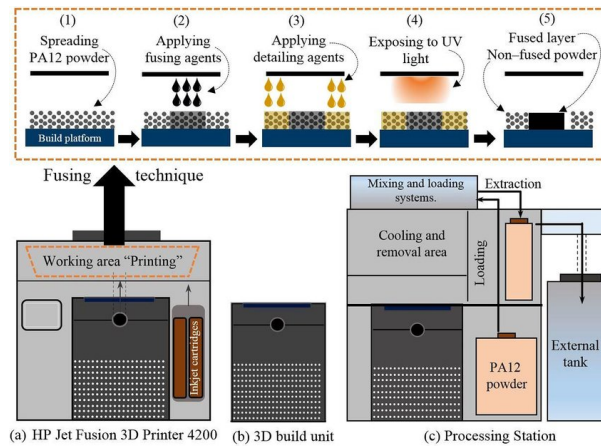


Figura 2.29: Esquema MJF – Fonte: (Alomarah et al., 2019)

## 5. MJ

- Polyjet: também utiliza resina polimérica, assim como as impressoras SLA e DLP, porém, o material é depositado (jateado) diretamente na plataforma de impressão por meio de uma matriz de pequenas pontas e é curado imediatamente por lâmpadas UV que estão incorporadas na cabeça de deposição. (Hubs, 2020)

Essa técnica é certamente mais rápida que a SLA, é mais fácil gerenciar a impressão com várias cores e materiais, requer menos pós-processamento e elimina a necessidade de gerenciar um tanque cheio de resina potencialmente tóxica.

No entanto, o Polyjet é significativamente mais caro do que a SLA, por exemplo. O esquema desta pode ser visto na figura 2.30.

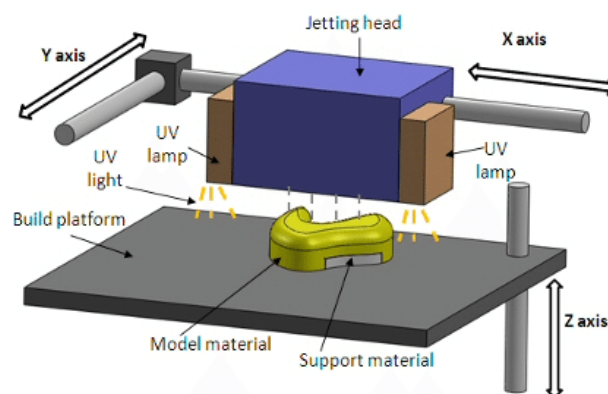


Figura 2.30: Esquema Polyjet – Fonte: (Gualdo, 2019)

- BJ: similar ao processo PBF - neste método a matéria-prima é depositada em uma plataforma(leito) de criação e então dispersada mecanicamente para

homogeneização. Pontas na impressora derramam gotículas do agente ligante e das camadas impressas entre elas mesmas. Efetuado o gotejamento, dispersa-se outra camada de pó e o processo se reinicia até que a conformação do produto esteja completa (Bai, Wagner, & Williams, 2017).

Normalmente, a parte impressa é deixada no leito de pó por um tempo para que haja a ação total do agente ligante e para elevar as suas propriedades mecânicas.

O processamento final consiste na remoção da peça, do sopro de pó residual com ar comprimido, e no caso dos materiais metálicos, aquece-se a peça em forno ou se faz a infiltração com metal de menor ponto de fusão para remover o agente polimérico (Gibson et al., 2021).

O esquema pode ser visto na figura 2.31

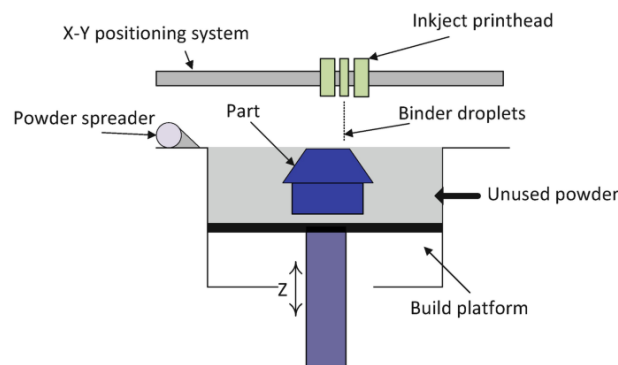


Figura 2.31: Esquema BJ - Fonte: (Gibson et al., 2020)

## 2.15 Materiais mais utilizados

Originalmente, a prototipagem 3D era limitada a plásticos simples, como o PLA e o ABS. No entanto, atualmente, há uma ampla variedade de materiais disponíveis, incluindo polímeros avançados, cerâmicas, compósitos, biocompatíveis e até mesmo materiais que mudam de forma ou têm propriedades elétricas.

Essa diversidade de materiais permite a impressão de objetos com propriedades físicas e químicas específicas, abrindo caminho para aplicações em diversas indústrias.

A reconstrução de componentes automotivos através de manufatura aditiva engloba várias áreas de um veículo, geralmente classificadas em quatro categorias principais:

1. Interior: painel de instrumentos, consoles, saídas de ar, espelhos, alavancas de controle, maçanetas, interruptores, acabamentos, etc;
2. Carroceria: painéis da carroceria, para-lamas, para-choques, espelhos, faróis ou indicadores, grades, maçanetas, acabamentos, etc;

Tabela 2.14: Tecnologias de impressão 3D comuns no sector automóvel - 1

Tecnologia	Processo	Materiais utilizados	Vantagens	Desvantagens
FDM	ME	PLA, ABS, PET, TPE, compósitos de matriz polimérica	Baixo custo inicial de investimento e de materiais, bom acabamento "fácil" utilização	Estruturas de suporte necessárias, longos tempos de impressão, baixa produtividade
SLS DMLS SLM	PBF	PLA, PA, PET, PVA, e seus compósitos ligas metálicas	Boa precisão e resistência química, boa produtividade, estruturas de suporte desnecessárias	Alto investimento inicial, necessita acabamento de superfícies porosas
EBM	PBF	Ligas metálicas e cerâmica	Estruturas de suporte desnecessárias, usados para reparos de objetos peças mais densas que DMLS	Alto investimento inicial, requer acabamento, baixa resolução superficial e menor produtividade que o SLS
MJF	PBF	Nylon e outros polímeros	Melhor precisão, qualidade, produtividade e processamento que SLS/DMLS/SLM, produz objetos complexos	Alto investimento inicial, difícil manuseio de agentes adicionais e material em pó, objetos mais fracos que os feitos por PBF
BJ	BJ	Polímeros, ligas metálicas como de titânio e alumínio cerâmica e areia	Melhor precisão e qualidade que o SLS, ótima produtividade	Idêntico ao MJF

Tabela 2.15: Tecnologias de impressão 3D comuns no sector automóvel - 2

Tecnologia	Processo	Materiais utilizados	Vantagens	Desvantagens
SLA	VP	Resinas poliméricas fotossensíveis, compósitos de matriz resinosa	Baixo investimento inicial, alta precisão com ótimo acabamento, alta durabilidade térmica das peças impressas	Necessita de estruturas de suporte, manuseio de resinas tóxicas e ventilação, baixa produtividade difícil pós processamento, complexo para impressão multicolorida
DLP	VP	Idêntico ao SLA	Idem ao SLA	Idem ao SLA, porém, menos escalável
Polyjet	MJ	Idêntico ao SLA	Alta precisão com ótimo acabamento superficial, alta durabilidade das peças, alta produtividade, imprime a cores	Estruturas de apoio necessárias, manuseio de resinas tóxicas e necessidade de ventilação, pouca variedade de materiais disponíveis, investimento maior que SLA e DPL

3. Peças estruturais: suspensões, rodas, componentes da subestrutura, suportes, etc;

4. Trem de força: caixa de câmbio, motor, diferencial, carburadores, bombas, etc.

Especificamente em relação às peças de automóveis, as aplicações existentes podem ser classificadas em peças em polímero, peças em metal e peças em compósito que são criadas por meio de materiais normalmente classificados pelos seguintes conjuntos:

1. Filamentos e pós comuns: um filamento é um plástico de impressora 3D usado para fazer impressões tridimensionais. Os materiais filamentosos também são encontrados em formas de pó e estes normalmente são usados para criação de partes maiores.

Na impressão 3D, os filamentos são usados usualmente para imprimir partes mais simples e os mais populares são o ABS e o PLA. No entanto, existem mais filamentos além desses dois.

- ABS: É um polímero à base de petróleo (figura 2.32). É um filamento de impressão 3D comumente usado. Geralmente opaco, com cor de dente, não tóxico conhecido por sua ductilidade e resistência a altas temperaturas e impactos (Guey, 2022).

Também possui boa estabilidade dimensional, propriedades elétricas e pode ser pós-processado com acetona para proporcionar um acabamento



Figura 2.32: Filamento ABS - Fonte: (EngiPrinters, 2017)

superficial suave e brilhante (EngiPrinters, 2017).

Por aguentar altas temperaturas é comum ser utilizado para a produção de peças finais. Muito utilizado para produção de peças finais, uma vez que é resistente a altas temperaturas.

Uma das desvantagens mais reclamadas pelos utilizadores é o fato de emitir um odor muito forte de plástico queimado ao se imprimir.

- PLA: é um novo tipo de material biodegradável, feito a partir de material de amido proposto por recursos vegetais renováveis (como beterraba, milho, mandioca e batata) (Guey, 2022). O seu filamento pode ser visto na figura 2.33.

O PLA tem boa gama de cores, compatibilidade, degradabilidade, propriedades mecânicas e físicas. É adequado para moldar termoplástico e outros métodos de processamento.

É fácil de processar e amplamente utilizado. Ao mesmo tempo, tem também um bom brilho e transparência com uma boa força e ductilidade de tração. Por não resistir a temperaturas muito altas, é utilizado usualmente para a criação de protótipos (Guey, 2022).



Figura 2.33: Filamento PLA - Fonte: (EngiPrinters, 2017)

- PETG: é um filamento de impressão 3D (figura 2.34) que está ganhando popularidade no mercado mundial, combina a facilidade de uso e gama de cores do PLA com a resistência e a durabilidade do ABS sem falar que não tem aquele odor de plástico queimado durante o processo de impressão 3D (Guey, 2022).

É bastante utilizado na produção de dobradiças. Como desvantagem é comum existirem alguns problemas comuns de impressão e de qualidade nas peças (EngiPrinters, 2017; Guey, 2022).



Figura 2.34: Filamento PETG - Fonte: (EngiPrinters, 2017)

- TPE e TPU: TPE é uma borracha termoplástica, com propriedades termoplásticas e elastoméricas, basicamente ele é uma combinação de borracha e plástico (Beamler, 2020).

O TPU (figura 2.35) também é um elastômero termoplástico, porém, é pertencente à classe de plásticos poliuretano (PU). A dureza deles podem ser personalizadas, resultando em material que varia de macio (como borracha) a duro (plástico rígido) (Beamler, 2020).

Ele vem em cores diferentes e transparentes. A superfície pode ser lisa ou áspera para dar aderência à peça. É resistente à abrasão, a óleo e borracha e é elástico e flexível (EngiPrinters, 2017).

São bastante utilizados para criar painéis de instrumentos de automóveis e para correias de transmissão (EngiPrinters, 2017). A maior diferença entre o TPU e o TPE está no facto de que a peça feita com TPU será mais firme (Beamler, 2020).



Figura 2.35: Filamento TPU - Fonte: (EngiPrinters, 2017)

- PP: é um polímero termoplástico forte e dúctil. O filamento de polipropileno (figura 2.36) tem a capacidade de alongar sem quebrar quando comparado a outros materiais de impressão 3D. É bastante utilizado para criar dobradiças (EngiPrinters, 2017).

Outras vantagens estão no facto de ser de fácil coloração e moldagem, baixo custo e é atóxico.



Figura 2.36: Filamento PP - Fonte: (EngiPrinters, 2017)

O polipropileno tem poucas desvantagens, porém podemos destacar como um contra do material a baixa resistência à variação brusca do clima, o que pode por exemplo causar manchas e perdas de propriedades quando expostas ao sol. A solução mais usada para isso é a aditivação do polímero com antioxidante e estabilizante ultravioleta para atrasar o desgaste.

- PVA: é um material de impressão 3D solúvel em água que é perfeito para usar como suporte (maior uso). Isso o torna muito útil para projetos complexos em que a remoção de suporte pode ser prejudicial ou complicada (EngiPrinters, 2017).

Além de sua solubilidade em água, o filamento de PVA (figura 2.37) também absorve umidade. Isso significa que o armazenamento pode ser um pouco incômodo (EngiPrinters, 2017)



Figura 2.37: Filamento PVA - Fonte: (EngiPrinters, 2017)

- PC: é um termoplástico extremamente forte, duradouro e resistente ao impacto e curvatura. O PC (figura 2.38) também suporta consideravelmente o contacto com óleos e solventes, suporta altas temperaturas sem se deformar (Guey, 2022).

Além disso, considera-se um bom isolante elétrico e suporta bem-estar exposto ao ar livre e aos raios solares. Com isso tudo possível afirmar que o PC tem as propriedades materiais muito boas para a indústria e engenharia (Guey, 2022).



Figura 2.38: Filamento PC - Fonte: (EngiPrinters, 2017)

Porém, em ambientes húmidos o filamento PC pode absorver humidade e apresentar problemas na hora da impressão. Estes problemas podem gerar impressões de má qualidade. Por isso é aconselhável que o filamento de PC permaneça em um saco e em um local seco para evitar assim possível contacto com a humidade.

É um ótimo material para construção de para-choques de automóveis, uma vez que são ótimos para absorção de impactos.

- Nylon: o Nylon, ou Poliamida, (figura 2.39) possui resistência ao calor, baixo coeficiente de atrito e resistência ao desgaste. As partes podem ter força de tração elevada sem pós-tratamento especial (Guey, 2022).

Em termos de seleção de cores não é tão ampla como PLA e ABS, mas podem ser alteradas através de pintura por *spray*, corante de mergulho e outras formas de seleção de cores (Guey, 2022). É muito sensível à humidade, o que dificulta a impressão e o armazenamento (EngiPrinters, 2017).

Este material tem uma aderência entre camadas muito alta, o que o torna uma escolha perfeita para peças funcionais como conectores, dobradiças, eixos e alavancas (EngiPrinters, 2017).



Figura 2.39: Filamento Nylon - Fonte: (EngiPrinters, 2017)

- PEEK: o material (Figura 2.40) é de alta resistência, resistente quimicamente e a impactos e altas temperaturas que requerem uma temperatura de impressão muito alta.



Figura 2.40: Filamento PEEK - Fonte: (EngiPrinters, 2017)

É um material que pode até mesmo substituir certos metais em termos de durabilidade e resistência. Mas a sua resistência à altas temperaturas também tem um lado negativo, o material também deve ser tratado à altas temperaturas (Printit3D, 2021).

Devido ao seu peso leve, o sector automóvel está a substituir vários componentes ativos de metal utilizados em caixas de velocidades, engrenagens, sistemas de travagem e ar condicionado. Também incluem unidades de pistão, selos, arruelas ou rolamentos, reduzindo significativamente até mesmo os ruídos (Printit3D, 2021).

2. Resinas: os sectores industrial e de engenharia foram sempre os mais relutantes em implementar a impressão com resina 3D. Isto deve-se principalmente ao facto de, a nível mecânico e térmico, as resinas não poderem competir com os materiais de engenharia disponíveis para o FDM ou as poliamidas utilizadas no SLS (Filament2print, 2020).

Embora isto ainda hoje seja verdade, nos últimos anos, os avanços nos materiais e o surgimento de novas resinas de engenharia estão a fechar o fosso entre as diferentes tecnologias de impressão 3D (Filament2print, 2020).

As resinas são materiais desenvolvidos para solucionar os problemas mecânicos ou químicos específicos. São resinas fabricadas para apresentar um desempenho diferenciado, seja maior resistência mecânica, maior dureza, flexibilidade, temperatura, resistência a reagentes químicos e outros.

Nos últimos anos, os avanços das tecnologias, dos materiais, e o surgimento de novas resinas com propriedades técnicas avançadas, tem ajudado a reduzir custos e a aumentar a velocidade, deixando os resultados muito mais precisos.

Podemos separá-las em alguns grupos:

- Resina padrão: são as resinas mais utilizadas para criar protótipos que são impressos rapidamente em impressoras de resina 3D. São muito genéricas, já que normalmente são usadas por vários utilizadores para começar no mundo da impressão 3D de resinas (Impressoras3D.com, 2021).

É um dos tipos de resina onde é encontrada a maior variedade em marcas, tipos de tecnologia e variedade de cores. Tem um grande nível de detalhe, é suave ao toque e quanto ao pós-processado é fácil de pintar e lixar. Entretanto, é necessário ter cuidado, pois tem um nível baixo quanto a resistência mecânica. Elas são utilizadas para fabricar protótipos e pequena peças (Impressoras3D.com, 2021).

- Resinas calcináveis: resinas calcináveis são normalmente usadas por fabricantes industriais, devido à sua capacidade de fabricar peças que podem ser fundidas como metal (Impressoras3D.com, 2021).

Essas resinas são capazes de queimar sem cinzas ou resíduos, o que resultam em detalhes nítidos e superfícies lisas. São muito simples de usar diretamente a partir de um design 3D (Impressoras3D.com, 2021).

O segredo dessas resinas moldáveis é que elas possuem um alto grau de burnout, ou seja, de forma que quando o objeto é derretido de uma parte impressa em 3D, todo o polímero queima, e apenas o desenho perfeitamente formado com o metal que é fundido é deixado (Impressoras3D.com, 2021).

- Resinas com propriedades mecânicas melhoradas: estas são resinas desenvolvidas com o objetivo de proporcionar uma maior resistência à tração, menor fragilidade e maior módulo de flexão do que as resinas padrões. Também são resinas de engenharia com propriedades específicas, tais como alta resistência ao desgaste e resistência ao impacto. Isto torna-os ideais para a produção de componentes mecânicos e protótipos funcionais (Filament2print, 2020).
- Resinas com propriedades térmicas melhoradas: a resistência térmica sempre foi um dos pontos fracos das resinas de impressão 3D. Em geral, todas as resinas têm temperaturas de amolecimento entre 50°C e 80°C (Filament2print, 2020).

Dentro das resinas usadas no ramo industrial, existem também as com propriedades térmicas melhoradas, projetado para criar peças capazes de suportar altas temperaturas, ou seja, peças mecânicas com as quais podemos criar objetos que não sejam afetadas em altas temperaturas.

Portanto, ela pode ser usada para aplicações como a produção de ferramentas de moldagem por injeção, o teste de canais projetados para ar quente ou fluidos e a criação de ferramentas para termo formação e fundição.

Trata-se de uma resina capaz de suportar temperaturas até cerca de 140°C uma vez curada (sob uma carga de 0,45 MPa). A principal vantagem desta resina é que é possível aumentar a sua resistência térmica para cerca de 240°C, aplicando um tratamento térmico às peças que consistem num

aquecimento a 60°C durante uma hora e depois a 160°C durante uma hora e meia (Filament2print, 2020).

- Resinas flexíveis e elásticas: são um tipo de resina que imita as propriedades da borracha, são usadas para criar peças firmes mas ao mesmo tempo flexíveis, e que necessitam de ser facilmente dobradas ou comprimidas ao contacto dependendo da dureza (Impressoras3D.com, 2021).

A maioria apresenta um toque suave e agradável nas peças com propriedades semelhantes às da borracha, tendo acabamentos muito semelhantes às solas de sapatos ou de pneus (Impressoras3D.com, 2021).

Logo, é recomendado o uso quando pretende-se reduzir custos, fazer protótipos e obter peças finais de alta qualidade como amortecedores e peças flexíveis ou ergonômicas de forma mais rápida (Impressoras3D.com, 2021).

3. Metais: a prototipagem rápida com pó de metal é a tendência da prototipagem rápida a laser, desde o fabrico de protótipos até o fabrico direta rápida (Guey, 2022). Ela pode acelerar muito o desenvolvimento de novos produtos e tem grandes perspectivas de aplicação. Existem três tipos de pó metálico comumente utilizados em sinterização seletiva de pós metálicos:

- (a) a mistura de pó metálico e ligante orgânico é misturada uniformemente numa determinada proporção antes da sinterização a laser.
- (b) a mistura de dois pós de metal, um dos quais tem um ponto de fusão inferior, atua como aglutinante no processo de sinterização a laser.
- (c) o pó de metal único, especialmente para o metal com alto ponto de fusão, precisa atingir a temperatura de fusão em um curto período, o que requer um laser de alta potência. O maior problema de sinterização do metal direto é a baixa densidade e as pobres propriedades mecânicas causadas pela estrutura porosa.

Dentre todos esses pós, as ligas abaixo são as mais utilizadas:

- Liga de alumínio: a liga de alumínio (AlSi10Mg) atualmente é a liga mais utilizada na técnica DMLS, por exemplo, devido a sua alta fluidez e a sua facilidade de fabrico. Sua principal aplicação está no mercado automotivo, nos equipamentos onde ocorrem trocas de calor.

Além disso, por sua alta resistência mecânica e baixo peso possibilitam várias outras aplicações, como no setor aeroespacial e biomédico. Essa liga tem alta refletividade, condutividade térmica e uma boa relação resistência/peso (Ishfaq, Abdullah, & Mahmood, 2021).

- Ligas de titânio: O titânio e suas ligas são amplamente utilizados no processo de fabrico industrial para diversos produtos. Ele é mais leve e possui uma

alta resistência, o que o torna extremamente útil para aplicações automóveis.

A combinação de várias características, como alta resistência, alta tenacidade, resistência à corrosão, baixa densidade, facilidade de fabrico, baixo módulo de elasticidade e o baixo custo, faz que com que a liga Ti6Al4V seja uma excelente escolha para a aplicação da técnica DMLS, por exemplo (Ishfaq et al., 2021).

Tuazon faz uma revisão completa dos materiais mais utilizados em AM para a indústria automotiva (Tuazon et al., 2022). Na tabela 2.16 e na figura 2.41 podem ser vistos alguns exemplos:

Tabela 2.16: Algumas partes e seus respectivos materiais e tecnologias utilizados.

Peça	Material	Tecnologia
Botões de volume	Poliamida (Nylon)	SLS
Alça de liberação do capô	ABS	FDM
Braço de manivela	Polímero	SLS
Vedação da tampa de enchimento	Polímero	SLS
Rolos de teto solar	Poliamida 12 (Nylon)	SLS
Suporte de vela de ignição	Poliamida 12 (Nylon)	SLS
Tampa do cinto de segurança	ABS	FDM
Console central	Polímero	FDM
Grade dianteira	Polímero	FDM
Suporte	Aço	SLM
Base do espelho	Liga de alumínio (AlSi10Mg)	SLM
Tampa do termostato	AlSi10Mg	SLM

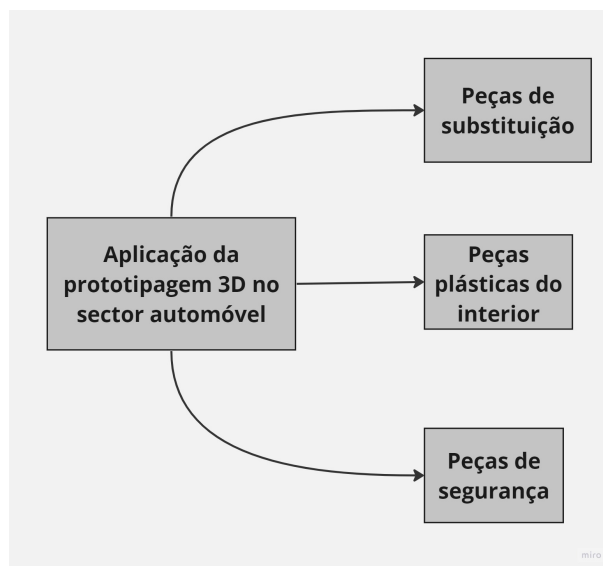


Figura 2.41: Aplicações da impressão 3D no sector automóvel - Fonte: Adaptado de (Rouf et al., 2022)

A seguir outros exemplos são explicitados:

- Peças em polímero: Como é enfatizado por Wiese (Wiese, Thhiede, & Herrmann, 2020), a reprodução de componentes automotivos, como maçanetas de portas, saídas de ar e interruptores internos feitos de polímeros, geralmente envolve processos de manufatura aditiva como ME (FDM), VP (SLA/DLP) e PBF (SLS).

Na maioria das vezes, o adotado são os os materiais ABS, mas dependendo das aplicações, vários polímeros industriais são considerados, assim como diferentes fases de pós-processamento.

Algumas empresas se baseiam na reprodução de peças sobressalentes para carros clássicos. A empresa francesa Gryp 3D se dedica à reprodução de peças para vários veículos vintage, como a maçaneta de liberação do capô da Ferrari 328 (GrypYoungtimersParts, 2023).

Após a aquisição do modelo usando um *scanner*, as digitalizações individuais são mescladas por meio de *softwares* de modelagem 3D e, em seguida, utilizadas como base para impressões 3D: ABS resistente a raios UV é adotado usando uma impressora FDM, seguido por tratamentos de acabamento.

Outros fabricantes de automóveis, como a Porsche Classic e a Mercedes-Benz, também estão utilizando a impressão 3D para produzir peças de reposição para modelos clássicos. A Porsche Classic fabrica peças plásticas utilizando o processo SLS para reproduzir vários componentes, como o braço de manivela do 946 e a vedação da tampa de abastecimento do 959 (Porsche-Newsroom, 2018).

A Mercedes-Benz utiliza o processo SLS para reproduzir peças poliméricas, incluindo os rolos do teto solar deslizante para as séries de modelos W 110, W 111, W 112 e W 123, feitos de poliamida 12 (Mercedes-Benz, 2018).

Além disso, a empresa imprime o suporte da vela de ignição da caixa de ferramentas do 300 SL Coupé e Roadster, também feito de PA12, com personalização adicional, incluindo um ímã para garantir compatibilidade com todos os tipos de velas de ignição e porcas terminais.

Há também exemplos de reprodução de peças únicas. Por exemplo, a empresa Blupointscan reproduziu a capa do cinto de segurança do Ferrari Dino, pois a peça original não estava mais disponível (Blupointscan, 2014). Eles utilizaram *scanning* a laser para obter os dados de superfície do componente que estava quebrado, e em seguida, imprimiram em 3D a capa em ABS utilizando o processo de Extrusão de Material FDM.

Por fim, aplicaram uma tinta texturizada para replicar o acabamento original da superfície.

- Peças em metal: A impressão 3D em metal também não é bem uma novidade, mas ainda não podemos dizer que é uma tecnologia acessível, principalmente em

países subdesenvolvidos. Por causa da complexidade, as impressoras capazes de trabalhar com a fundição do metal têm um custo muito alto.

Apesar disso, a expectativa para os próximos anos pode ser de mudança para esse tipo de máquina, chegando novas marcas e com preços mais baixos. Além disso, com aplicações cada vez mais interessantes, a própria demanda do mercado faz com que o desenvolvimento das máquinas e materiais acelere.

Os processos mais comuns são os baseados em laser, como a SLM e DMLS.

Existem vários exemplos de peças estruturais, interiores e de powertrain produzidas por meio de fabrico aditivo direto de metal. A Porsche Classic replicou peças raras de metal, como a alavanca de liberação da embraiagem do Porsche 959 e o suporte para os modelos 356B e 356C. As peças foram feitas de aço, processadas por meio de SLM. (Porsche-Newsroom, 2018)

A Mercedes Classic forneceu o exemplo de uma peça interna: a base do espelho do 300 SL Coupè. Nesse caso, a geometria foi obtida por meio de uma conversão de 2D para 3D, que recuperou os desenhos originais em 2D. O componente foi produzido usando uma liga de alumínio processada por SLM e, em seguida, finalizado com um revestimento de cromo de alta qualidade (Mercedes-Benz, 2018).

- Peças em compósito: O fabrico aditivo de compósitos de fibra/polímero é um avanço na tecnologia de impressão 3D. Esses compósitos combinam materiais plásticos reforçados com fibras, resultando em propriedades mecânicas aprimoradas.

Diversos processos de impressão 3D, como FDM, SLS e SLA são usados para criar peças de compósitos de fibra/polímero. No sector automóvel, esses compósitos são aplicados em painéis externos, acabamentos internos, assentos, sensores elétricos, componentes de suspensão e motores. Um exemplo interessante é a replicação em tamanho real do Shelby Cobra feita pelo Oak Ridge National Laboratory, onde os componentes foram impressos em 3D usando uma máquina especializada (Krassenstein, B, 2015).

Esses componentes foram feitos com um material compósito avançado, combinando plástico ABS e fibra de carbono, e foram posteriormente acabados e pintados para obter o resultado desejado.

A impressão 3D permite a criação rápida de protótipos de peças de automóveis, permitindo que os fabricantes avaliem o design, a funcionalidade e o encaixe antes de investir em ferramentas de fabrico tradicionais. Isso acelera o processo de desenvolvimento de novos veículos e reduz os custos de produção de protótipos e peças de reposição.

A produção de peças de substituição tradicionalmente envolve altos custos e longos prazos de espera, especialmente para peças raras ou antigas. A prototipagem 3D já permite a produção de peças de substituição personalizadas e sob demanda. Isso significa que as peças podem ser adaptadas às necessidades específicas de cada veículo ou cliente, sem a necessidade de *stocks* volumosos.

## 2.16 Fabricantes e modelos de impressoras 3D

Atualmente pode-se destacar algumas grandes fabricantes de impressoras industriais 3D utilizadas no sector vel. Nomes como HP, Sinterit, Stratasys, Prusa, Zortrax, Erpro Group, Sintratec, Camozzi, E-Plus-3D, BLT, H3D, 3D Sytems e Arcam EBM são as mais conhecidas no mercado. Dependendo do modelo podem produzir a partir de metais, compósitos ou polímeros.

Entretanto, duas grandes opções industriais atualmente no mercado são a HP Multi Jet Fusion 5200 (HP, 2023) e Sintratec S2 (Sintratec, 2023). A seguir podem-se ser vistas comparações entre os dois modelos:

Tanto a Sintratec S2 quanto a HP Multi Jet Fusion 5200 são sistemas avançados de fabrico aditivo. Elas utilizam tecnologias diferentes e oferecem recursos exclusivos. A impressora 3D HP Multi Jet Fusion 5200 utiliza sua tecnologia patenteada MJF, e a impressora 3D Sintratec S2 utiliza a tecnologia SLS, ambas são tecnologias PBF.

A Sintratec S2 (figura 2.42) é uma impressora de tecnologia SLS projetada para uso em ambientes industriais e de produção. Ela utiliza um laser de alta potência para fundir camadas de pó de material, permitindo a criação de peças complexas e duráveis.

A S2 oferece recursos avançados, como um grande volume de construção, alta precisão e a capacidade de processar uma variedade de materiais, incluindo nylon e outros materiais termoplásticos. Porém se comparada a outras impressoras 3D industriais ela já não possui uma alta velocidade e nem um grande volume de construção como a Multi Jet Fusion 5200. O seu valor médio é de €10.000.

A HP Multi Jet Fusion 5200 (figura 2.43) é maior e oferece alta velocidade de produção e eficiência. Ela é conhecida por sua capacidade de produzir peças de qualidade com bom acabamento superficial.

Além disso, a HP Multi Jet Fusion 5200 possui uma plataforma aberta, o que permite uma maior flexibilidade na escolha de materiais. Entretanto seu valor parte de cerca de €280.000.

No entanto, ambas as opções têm suas limitações. A Sintratec S2 possui tempos de impressão mais longos. Já a HP Multi Jet Fusion 5200 tem um custo inicial mais elevado e é mais adequada para volumes de produção maiores.

Em resumo, a escolha entre a Sintratec S2 e a HP Multi Jet Fusion 5200 dependerá

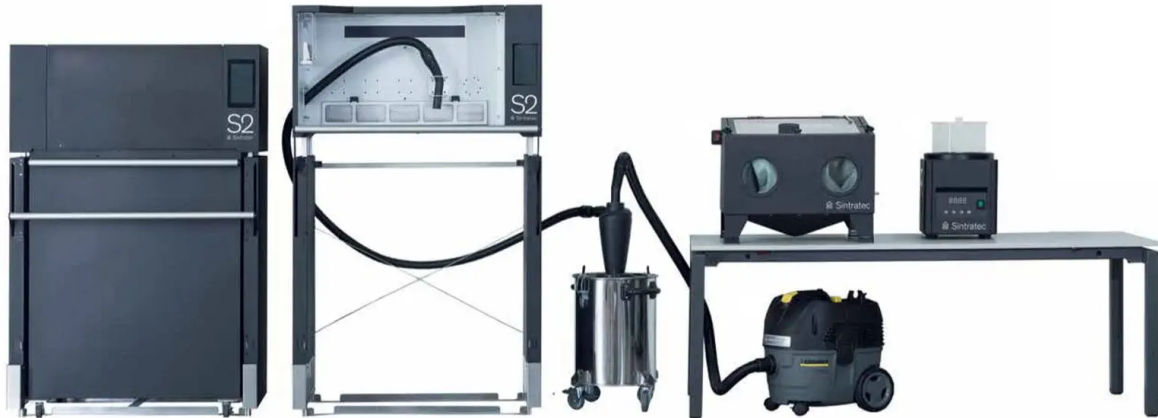


Figura 2.42: Impressora 3D Sintratec S2 - Fonte: (Sintratec, 2023)



Figura 2.43: Impressora 3D HP Multi Jet Fusion 5200 - Fonte: (HP, 2023)

das necessidades e preferências específicas de cada fabricante. É importante considerar fatores como precisão, velocidade, qualidade da superfície, variedade de materiais e custo para tomar a decisão adequada.

Essas são apenas algumas das maneiras pelas quais a prototipagem 3D está a avançar no sector automóvel. À medida que a tecnologia continua a evoluir, espera-se que haja mais inovações e integração da impressão 3D em processos de fabrico automóvel tradicionais e suas peças de substituição.

## 2.17 Ficheiros em impressão 3D mais comuns

Os formatos de ficheiros 3D utilizados durante o processo de fabrico são importantes para promover e aumentar o número de utilizadores da tecnologia, impulsionando a utilização de diversas formas. São os ficheiros criados para serem lidos pelos slicers para depois serem fatiados e traduzidos para uma linguagem que possa ser carregado pela impressora.

Dentre os formatos de ficheiros 3D mais comuns e vistos atualmente, podem-se destacar o STL, OBJ, 3DS e STEP, AMF, 3MF, PLY e DAE.

- STL: criado em 1987 por Chuck Hull, é o formato com a extensão “.STL”. É o mais utilizado na impressão 3D. Permite facilmente que um software *slicer* seja utilizado para se comunicar com o *hardware* da impressora 3D (All3DP, 2023).

Sempre foi um formato muito bem suportado por softwares de modelagem. Seu objetivo principal é de codificar a geometria superficial de um objeto 3D. Ele codifica essa informação usando um simples conceito chamado de “tesselação” (All3DP, 2023).

A tesselação é o processo de cobrir uma superfície com formas geométricas, de modo que não haja sobreposições ou lacunas. Uma parede com azulejos é um bom exemplo cotidiano (All3DP, 2023).

Foi descoberto que tesselações da superfície de um modelo 3D poderiam ser usadas para codificar informações do modelo 3D para a impressora 3D. A ideia então foi de tesselar a superfície externa dos modelos 3D utilizando pequenos triângulos e armazenar suas informações em um ficheiro (All3DP, 2023).

- OBJ: com a extensão “.OBJ” é um dos mais importantes formatos de impressão 3D. É o preferido para impressão em múltiplas cores e é bastante utilizado como um formato de troca neutro para modelos 3D não animados (Chakravorty, 2023).

Armazena informações sobre modelos 3D. Criado pela chamada Wavefront Technologies com o objetivo de armazenar objetos geométricos compostos por linhas, polígonos, curvas e superfícies livres. Assim sendo, ele codifica a geometria superficial de um modelo 3D e pode guardar dados relacionados a cor e textura, porém, não armazena informações de cena ou animações (Chakravorty, 2023).

Com código aberto e neutro, ele é frequentemente usado para compartilhar modelos 3D em aplicações gráficas, já que também possui amplo suporte de importação e exportação de muitos softwares CAD. Tem se tornado cada vez mais utilizado, por possuir suporte a cores e texturas, uma vez que o STL não (Chakravorty, 2023).

No que se diz respeito a codificação da geometria de superfície ele é bem versátil, permitindo codificar a geometria com tesselação com faces poligonais, curvas livres e superfícies livres (Chakravorty, 2023).

Por faces poligonais, podem ser utilizados formas simples como, triângulos, quadriláteros, pentágonos e outros mais complexos (Chakravorty, 2023).

Por curvas livres são utilizados duas funções matemáticas; *cardinal splines* e *bezier curves*. É uma forma mais complicada que a anterior, entretanto, requerem bem menos dados para descrever uma mesma superfície. A ideia básica é de que

o utilizador define uma coleção de curvas livres que percorreram a superfície do modelo 3D. A superfície é então aproximada a partir dessa coleção (figura 2.44) (Chakravorty, 2023).

Por formas livres de superfície a ideia é que seja usada em superfícies que não possuam uma dimensão radial rígida como a carroceria de um carro. A mais comum é chamada de NURBS, suportada pelo OBJ (Chakravorty, 2023).

Essas formas são as mais precisas e levam os menores tamanhos de ficheiros. Ao codificar a superfície exatamente, em vez de aproximá-la usando curvas, o resultado é o mais preciso (Chakravorty, 2023). Por isso são frequentemente usadas no sector automotivo e outros quando exigem uma maior precisão absoluta.

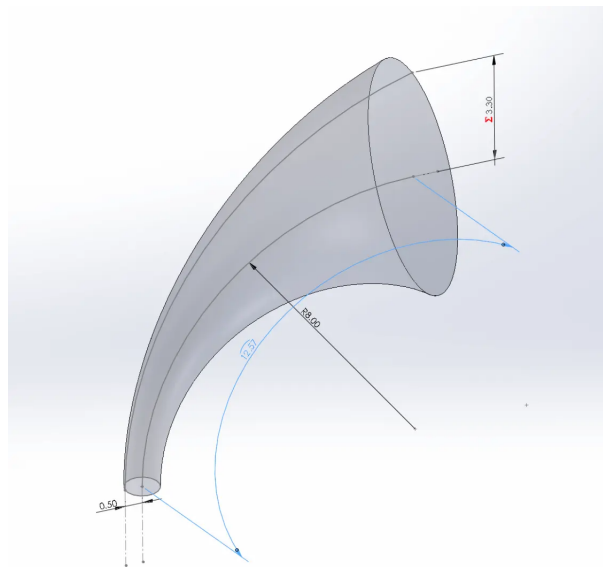


Figura 2.44: Forma de curvas livre em uma superfície de modelo 3D - Fonte: (Chakravorty, 2023)

- 3DS: sendo nativo da Autodesk, é um formato desenvolvido nos anos 90 para uso em seu *software* de modelagem 3D, o 3ds Max. Possui a extensão “.3DS” e juntamente com o STL, é um dos formatos mais antigos utilizados para ficheiros 3D que ainda está em utilização, sendo criado para pautar o intercâmbio de informações entre os diferentes *softwares* (3DFila, 2021).

Ele contém informações básicas do modelo 3D como geometria, aparência, textura e animação. Utiliza a malha triangular para codificar a superfície do modelo e possui um limite máximo do número de triângulos de 65536. Ele é suportado pela maioria dos equipamentos e não é o mais recomendado quando não se quer perder as informações mais básicas sobre o modelo 3D, quando convertido para outros formatos (3DFila, 2021).

- STEP: também conhecidos como ISO 10303, podem ser usadas duas extensões;

“.STP” e “.STEP”. Foi desenvolvido no meio dos anos 80 pelo comité técnico ISO sobre sistemas de automação e integração (TC 184). O formato foi criado para melhorar a compatibilidade de ficheiros entre software, para que projetos pudessem ser compartilhados e modificados com maior facilidade (O’Connel, 2022).

Além disso, ele mantém um alto nível de precisão; lê e salva todo o corpo de um modelo, em vez de apenas geometrias básicas, e permite que o ficheiro seja editado posteriormente noutros programas (O’Connel, 2022).

Ficheiros neste formato são uma boa escolha quando são necessários modelos 3D detalhados, como para a impressão 3D (O’Connel, 2022).

Primeiramente, diferente dos ficheiros STL, que descrevem apenas a geometria externa de um modelo como uma malha, um ficheiro STEP grava um modelo como um corpo inteiro (figura 2.45) (O’Connel, 2022). As malhas são uma compilação de pequenas figuras e geometrias que compõem o contorno de uma peça e podem ser difíceis de serem corrigidas, uma vez que cada pequena discrepância na mesma diminui a precisão do modelo baixado (O’Connel, 2022).



Figura 2.45: Modelo STL (esquerda) e modelo STEP (direita) - Fonte: (O’Connel, 2022)

Por outro lado, o ficheiro mantém a alta precisão dimensional por não simplificar características geométricas regulares. Isso torna ideal o uso desse formato para salvar peças em que o detalhe é importante (O’Connel, 2022).

Infelizmente os ficheiros STEP ocupam muito espaço e não podem salvar informações específicas sobre materiais, texturas ou iluminação, já que são ignorados ao salvar o modelo como “.STEP” ou “.STP” (O’Connel, 2022).

- AMF: o formato AMF (“.AMF”) é baseado em XML e foi desenvolvido nos anos 2000 com o objetivo de superar as limitações do formato STL, ao permitir uma representação mais avançada e completa de objetos 3D. Ele oferece suporte a recursos como geometrias complexas, cores, materiais, texturas, informações de escala, estruturas de suporte, propriedades de impressão, dentre outros. Além disso, ele é projetado para ser extensível, ou seja, pode evoluir para atender a

requisitos futuros da indústria de impressão 3D.

No entanto, a adoção tem sido lenta e seu futuro agora é incerto. Foi sugerido que o comitê responsável pelo AMF foi um pouco precipitado ao definir pontos importantes e não consultou o suficiente os principais fabricantes e prestadores de serviços na indústria de impressão 3D.

O uso do AMF não é necessariamente incentivado pelos fornecedores. Esse ponto talvez seja devido à presença de um concorrente que está a surgir rapidamente, o 3MF.

- 3MF: iniciado como um projeto interno, a Microsoft criou o Consórcio 3MF em 2015 e tornou seu software subjacente de código aberto. O objetivo era abordar o que eles consideravam deficiências (embora muito técnicas) com o AMF e, mais importante, impulsionar um padrão de código aberto em constante evolução com a participação total de todos os principais influenciadores e *players* no mundo da impressão 3D (Lawless & Pires, 2022).

Em poucas palavras, o principal objetivo do 3MF é fazer com que o software comunique melhor com o *hardware*, ou seja, ele deve melhorar a interoperabilidade entre o *software* de modelagem 3D, o *slicer* e a impressora 3D (Lawless & Pires, 2022).

Assim como o AMF, o 3MF (".3MF") é um padrão baseado em XML e, em termos gerais, são bastante semelhantes. No entanto, o 3MF possui padrões mais rigorosos para a precisão numérica e a redução de erros de arredondamento que muitas vezes causam problemas no modelo.

O 3MF também está mais voltado para reunir uma imagem completa do fluxo de trabalho de ponta a ponta. Por exemplo, além do modelo 3D subjacente, um arquivo 3MF pode armazenar informações sobre as configurações da impressora e do *slicer*, a incluir suportes personalizados (Lawless & Pires, 2022).

Em um período relativamente curto de tempo, o 3MF avançou muito além do AMF em termos de suporte tanto para ferramentas CAD quanto para *slicers*. Várias organizações até mesmo recomendam que seus utilizadores abandonem o AMF em favor do 3MF, mesmo que eles ofereçam suporte a ambos (Lawless & Pires, 2022).

O 3MF carrega mais informações, resultando em um processo mais eficaz e simplificado. Por exemplo, você pode salvar um conjunto de peças inteiro e todas as configurações de impressão relacionadas em um único arquivo 3MF compacto (Lawless & Pires, 2022).

Para efeitos de comparação com um formato STL, por exemplo, o 3MF pode transmitir informações para o *slicer*, que permitem reconhecer a presença de dois

materiais dentro de um cubo. O STL, que armazena apenas a forma do cubo, não reconhece os dois materiais (Lawless & Pires, 2022).

O 3MF pode, por exemplo, informar ao seu slicer que o material azul é PLA e o material laranja é TPU (figura 2.46). A partir do STL, por outro lado, o slicer apenas sabe que a camada é um quadrado (Lawless & Pires, 2022).

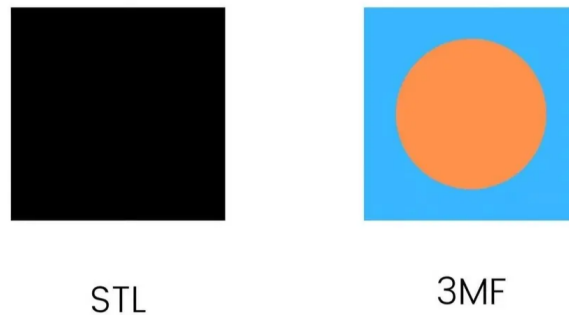


Figura 2.46: STL e 3MF – Fonte: (Lawless & Pires, 2022)

Para reproduzir o mesmo resultado usando o formato de ficheiro STL, seria necessário combinar dois ficheiros STL, um sendo um cubo com um furo e outro sendo um cilindro. O 3MF também garante que a peça esteja corretamente definida e que não haja trajetos resultando em movimentos indesejáveis para a ponta de impressão (Lawless & Pires, 2022).

- PLY: o formato PLY foi desenvolvido na década de 1990 por Greg Turk e outros no laboratório gráfico de Stanford e é por isso que também é conhecido como Stanford Triangle Format. O formato do ficheiro tem a versão 1.0 desde então e nenhuma outra modificação foi feita (FileFormat, 2022).

Um objeto PLY simples consiste em uma coleção de elementos para representação do objeto. Ele consiste em uma lista de  $(x,y,z)$  triplos de um vértice e uma lista de faces que são realmente índices na lista de vértices. Vértices e faces são dois exemplos de elementos e a maioria do ficheiro PLY consiste nesses dois elementos. representa o formato de ficheiro 3D que armazena objetos gráficos descritos como uma coleção de polígonos (FileFormat, 2022).

O objetivo desse formato de ficheiro era estabelecer um tipo de ficheiro simples e fácil que fosse geral o suficiente para ser útil para uma ampla variedade de modelos. O formato de ficheiro PLY vem como formato ASCII e binário para armazenamento compacto e para salvamento e carregamento rápidos. O formato do ficheiro é usado por diferentes aplicativos que oferecem suporte para leitura de ficheiros 3D (FileFormat, 2022).

Objetos em formato PLY são descritos por uma coleção de vértices, faces e outros elementos, juntamente com propriedades como cor e direção normal que podem ser anexadas a esses elementos (FileFormat, 2022).

- DAE: Com a extensão “.DAE”, agora pertencente e gerido pelo Khronos Group, um consórcio sem fins lucrativos de empresas de tecnologia. O formato foi originalmente criado pela Sony (O’Connel, 2021).

Após a sua criação, a Sony colaborou com empresas de software para garantir uma ampla compatibilidade com o formato de ficheiro. Os colaboradores incluíram empresas populares de software, como Autodesk, Alias Systems e Avid Technology e a compatibilidade só tem aumentado (O’Connel, 2021).

Semelhante ao formato STL, os ficheiros DAE armazenam formas 3D como geometrias de malha: uma malha de formas simples que definem a superfície de um modelo 3D. No entanto, as geometrias de malha podem ser problemáticas ao transferir o ficheiro para outra plataforma, pois a malha se torna mais difícil de editar (O’Connel, 2021). Como os modelos 3D não são corpos completos e singulares, erros podem acontecer.

O formato pode representar uma cena de modelagem completa, incluindo vários modelos 3D com um plano de fundo, iluminação e outros efeitos. Por outras palavras, em vez de ser capaz de exibir apenas um modelo 3D individual como um ficheiro STL, os ficheiros DAE podem conter vários designs com outros dados de cena (O’Connel, 2021).

O DAE foi projetado para ter compatibilidade geral total. Enquanto outros formatos são usados principalmente para compatibilidade entre programas da Autodesk, o DAE não está vinculado a nenhum programa específico. O formato de ficheiro é de código aberto e utiliza o XML, o que permite que as informações armazenadas no formato sejam facilmente compartilhadas entre diferentes programas (O’Connel, 2021).

Na tabela 2.17 a seguir está explícito as vantagens e desvantagens para cada formato:

## 2.18 Softwares de Modelagem 3D

Abaixo tem-se algumas informações dos *softwares* mais utilizados em modelagem 3D (3DFila, 2019):

- Mudbox: *software* da Autodesk que custa cerca de €80 por ano. No momento, a opção é a principal utilizada pela indústria 3D, especialmente, porque consegue trabalhar com alta modelagem poligonal e ser superacessível para a maioria dos utilizadores;
- ZBrush: bastante completo, o ZBrush é um *software* de impressão 3D que pode ser usado por diferentes profissionais – dos iniciantes e inexperientes, até os especializados no setor.

Tabela 2.17: Ficheiros de impressão 3D e suas vantagens e desvantagens.

Formato	Vantagens	Desvantagens
STL	Amplamente suportado por softwares simples, ideal para impressões 3D	Não suporta informações complexas como cores, texturas e nem animação
OBJ	Amplamente suportado por softwares, suporta cores e texturas, fácil importação e exportação	Não suporta animação
3DS	Amplamente suportado por softwares 3D, suporta cores, texturas e animação	Limitado em termos de recursos e funcionalidades, podendo perder informações mais básicas
STEP	Suporta geometria 3D complexa, inclui informações detalhadas sobre a construção	Alto tamanho de armazenamento, não suporta informações sobre textura, cores e animação
AMF	Suporta cores e texturas	Incompatibilidade com muitos softwares
3MF	Corrige muitos erros de geometria, pode incorporar criptografia, carrega informações de diferentes materiais	Incompatibilidade com muitos softwares
PLY	Muito simples, suporta informações detalhadas, suporta malhas poligonais complexas	Falta de suporte a muitos slicers, costumam ocupar muito espaço
COLLADA (DAE)	Muito bom para animações, amplamente suportado por softwares	Baixa velocidade de exportação, grande espaço de armazenamento

O seu preço está em torno de €800 por ano, o que pode parecer um valor um tanto elevado para muitas pessoas. Porém, é uma opção que consegue esculpir peças em 3D com perfeição, tornando a ferramenta uma das favoritas entre os utilizadores.

Vale ressaltar que os seus desenvolvedores têm o costume de ouvir atentamente o público e, por isso, estão sempre lançando melhorias e funcionalidades variadas;

- SolidWorks: mais conhecido e amplamente utilizado por grandes empresas. Possui interface intuitiva, diversas ferramentas e recursos avançados de simulação.

Apesar de possuir uma interface intuitiva, ele ainda requer bastante prá-

tica para a proficiência. Além disso, um outro ponto negativo está em seu preço (acima de €3000 por ano);

- Sculptris: consiste em um programa de modelagem computacional, com foco nos utilizadores iniciantes.

Ele ainda apresenta uma interface muito parecida com o “seu irmão” ZBrush, mas com características que facilitam o desenvolvimento de peças tridimensionais. A grande vantagem é que o *software* é gratuito e oferece todos os recursos básicos para a manipulação.

## 2.19 Softwares de impressão 3D

Abaixo algumas informações sobre os mais utilizados *softwares* para transformar o modelo 3D em fatias ou camadas e o traduzir para a linguagem G-Code(3DFila, 2019):

- Ultimaker Cura: *slicer* gratuito e em formato *open source* (permite que os utilizadores façam melhorias). É capaz de gerar ficheiros G-Code otimizados rapidamente;
- Slic3r: um dos primeiros disponibilizados no mercado e costuma receber muitas melhorias e atualizações. Gratuito;
- Simplify 3D: capaz de prever o tempo, quantidade de material gasto e ainda o custo de impressão por peça. É pago e possui plataforma fechada.

## 2.20 Sustentabilidade na Manufatura 3D

Desenvolvimento sustentável significa desenvolver economicamente e tecnologicamente criando um equilíbrio no meio ambiente e na sociedade. Quando um produto é desenvolvido, muitas fases como design, processo, uso, descarte e formas efetivas de reutilizá-lo precisam ser atravessadas.

Uma nova tecnologia precisa passar por uma avaliação de sustentabilidade em cada fase para atuar como precaução contra suas influências negativas. A tecnologia de impressão 3D ou manufatura aditiva, sugere que vária operação de pesquisa tem sido feitas para sua avaliação.

Algumas têm adotado a abordagem qualitativa vs. quantitativa (Liu, Jiang, Zhang, Li, & Zhang, 2016), enquanto algumas tem vinculado a AM com a sustentabilidade através do design (M.Ambrosio & Vezzoli, 2019). Ela pode ser tratada como nova em muitos aspetos, como pouco ou nenhum desperdício de material (Rouf et al., 2022), demandas reduzidas de energia cumulativa (Kreiger & Pearce, 2013) e inventário (Mani, Lyons, & Gupta, 2014).

No entanto, alguns de seus atuais efeitos negativos no meio ambiente como resíduos não recicláveis (Faludi, Bayley, Bhogal, & Iribarne, 2015) e emissões de pó perigoso (Y. Kim et al., 2015) ainda estão a colocar desafios para pesquisadores. Pode não ser razoável tirar conclusões sobre sustentabilidade desta tecnologia sobre os poucos pontos negativos. Os pesquisadores concluíram que AM é um caso específico na medida em que o impacto ambiental é considerado (Liu et al., 2016).

Segundo um relatório da Forbes (L. Columbus, 2019), as empresas se concentram, principalmente, sobre os poucos atributos antes de começarem uma nova linha de produção, que são a velocidade de processamento, o custo incorrido, a flexibilidade e a qualidade. Nessa mesma pesquisa, afirma-se que cerca de 80% das empresas estão a adotar a AM com o propósito de inovação.

Entretanto, países desenvolvidos e em desenvolvimento mostram diferentes atitudes em relação à adaptação às impressões 3D em nível industrial. Países como os Estados Unidos querem lucro a curto prazo e países como a Índia focam mais no longo prazo (Zhao, Yang, Shu, & Liu, 2020). Porém, mais e mais empresas estão adotando a AM para criatividade, inovação e customização, mas não visualizam seus impactos ambientais e sociais (Niaki, Torabi, & Nonino, 2019).

Por outro lado, este fato não pode ser ignorado, já que a AM pode ser sustentável não só para o meio ambiente, mas para a economia e sociedade também. Na figura 2.47 podem ser vistos tais benefícios que serão melhor explicados logo a seguir:

- Aspectos económicos: de acordo com as atuais crises financeiras do mundo, há uma exigência de novos sistemas de fabrico que irão sustentar e ajudar a promover a economia globalmente (E. Manzini, 2011).

A manufatura aditiva vai com toda a certeza atrair as empresas devido ao seu sistema de produção com algumas das características atraentes, como redução de custos (Niaki et al., 2019), ciclo de vida reduzido de produto (Gebler, Uiterkamp, & Visser, 2014) e alta satisfação e envolvimento do cliente (Rindfleisch, O'Hern, & Sachdev, 2017).

No que se refere ao sector automóvel as peças impressas costumam ser leves, exigindo menos combustível para conduzir. Os custos de *stock* também são minimizados devido à alta produção sob demanda. Também ajuda a contornar os custos intermediários, incluindo tarifas e custos de transporte com sua característica de ser portátil (Laplume, Petersen, & Pearce, 2016).

Um dos obstáculos para a adoção da AM é o alto investimento feito pelos proprietários nos sistemas convencionais de fabrico já existentes (Zhao et al., 2020). Mas no futuro será inevitável a substituição.

- Aspectos ambientais: a AM com menos etapas de processamento, pode sem dúvidas, ser considerada mais verde pelo fato de ajudar na redução de energia, des-

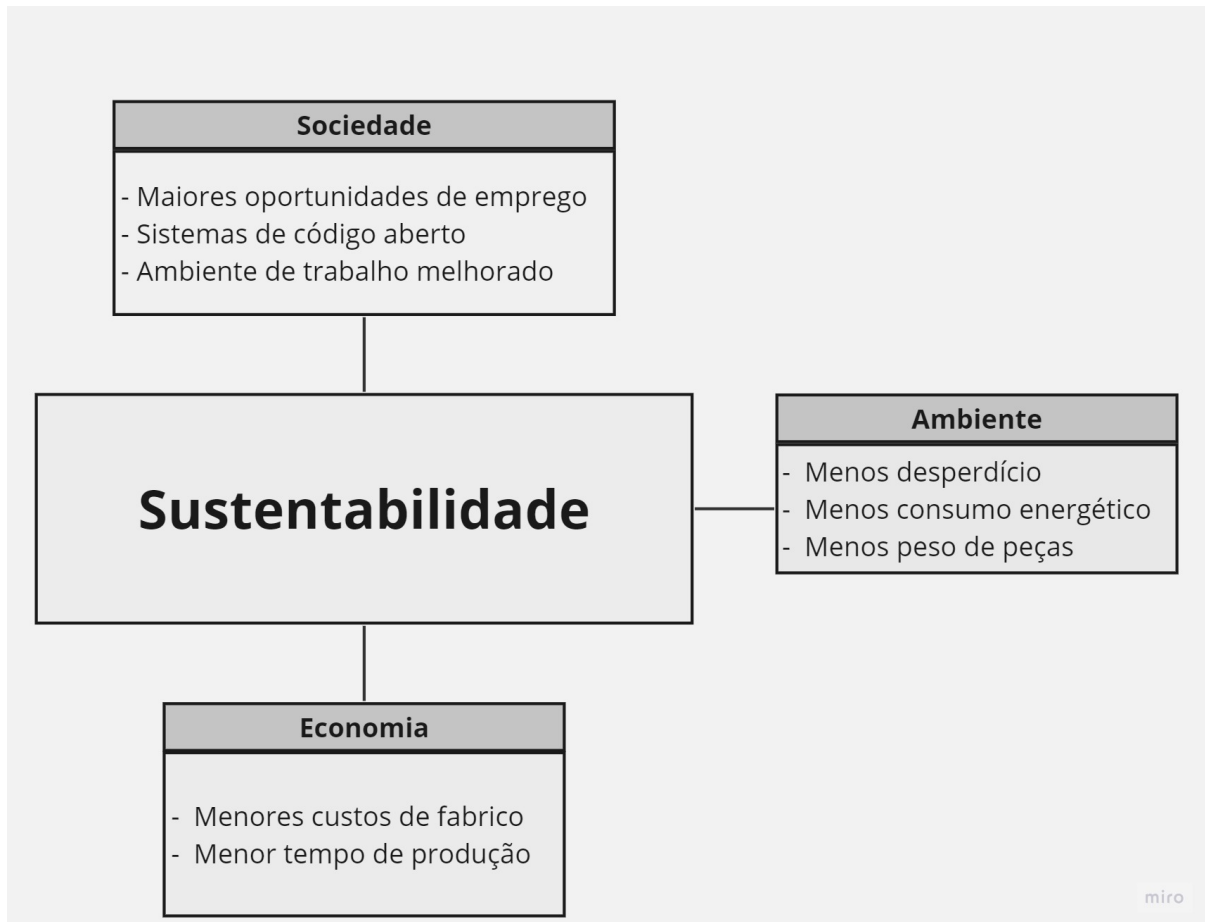


Figura 2.47: Sustentabilidade na AM - Fonte: Adaptado de (Rouf et al., 2022)

perdícios e emissão de CO<sub>2</sub> (Niaki et al., 2019).

Alguns estudos têm sugerido que a utilização da AM em grande escalavai ajudar a reduzir a utilização de energia não só por causa da redução das fases de fabrico, mas também com menores estágios de pós-processamento (Laplume et al., 2016).

Outros estudos indicaram que até 40% dos resíduos podem ser reduzidos, enquanto 95 a 98% de material não fundido pode ser reutilizado (Petrovic et al., 2011). Além disso, materiais como lubrificantes ou outras substâncias danosas ao meio ambiente podem ser evitadas (Gebler et al., 2014) .

- **Aspetos sociais:** a prototipagem 3D sendo altamente automatizada está a fazer uma grande mudança nas estruturas de trabalho. Para países desenvolvidos ela pode ser benéfica, mas para subdesenvolvidos, podem ocorrer problemas de desemprego (Campbell, Williams, Ivanova, & Garrett, 2011).

Por uma perspetiva técnica, esta tecnologia ajuda a dar mais saúde a um ambiente de trabalho mais amigável, ao reduzir exposições prolongadas do trabalhador ao ar e água impuros. Ao ter um ambiente de trabalho bem projetado,

não apenas as lesões fatais são evitadas, mas problemas fatais como o câncer também (Chen et al., 2015).

Esse sistema democratizado ajuda a dar oportunidades iguais aos consumidores no mercado e na sociedade de um modo global. Este sistema de código aberto ajudará a superar não só o tecnológico, mas também o cultural e lacunas educacionais entre países subdesenvolvidos e desenvolvidos.

## 2.21 Barreiras

Conforme referido por (Rouf et al., 2022), a impressão 3D não está ganhando uso generalizado no setor industrial principalmente devido a algumas barreiras, conforme representado na figura 2.48. O custo inicial da máquina, o custo dos materiais embrutados e a falta de mão de obra qualificada estão restringindo o uso da impressão 3D para uma variedade de produtos industriais.

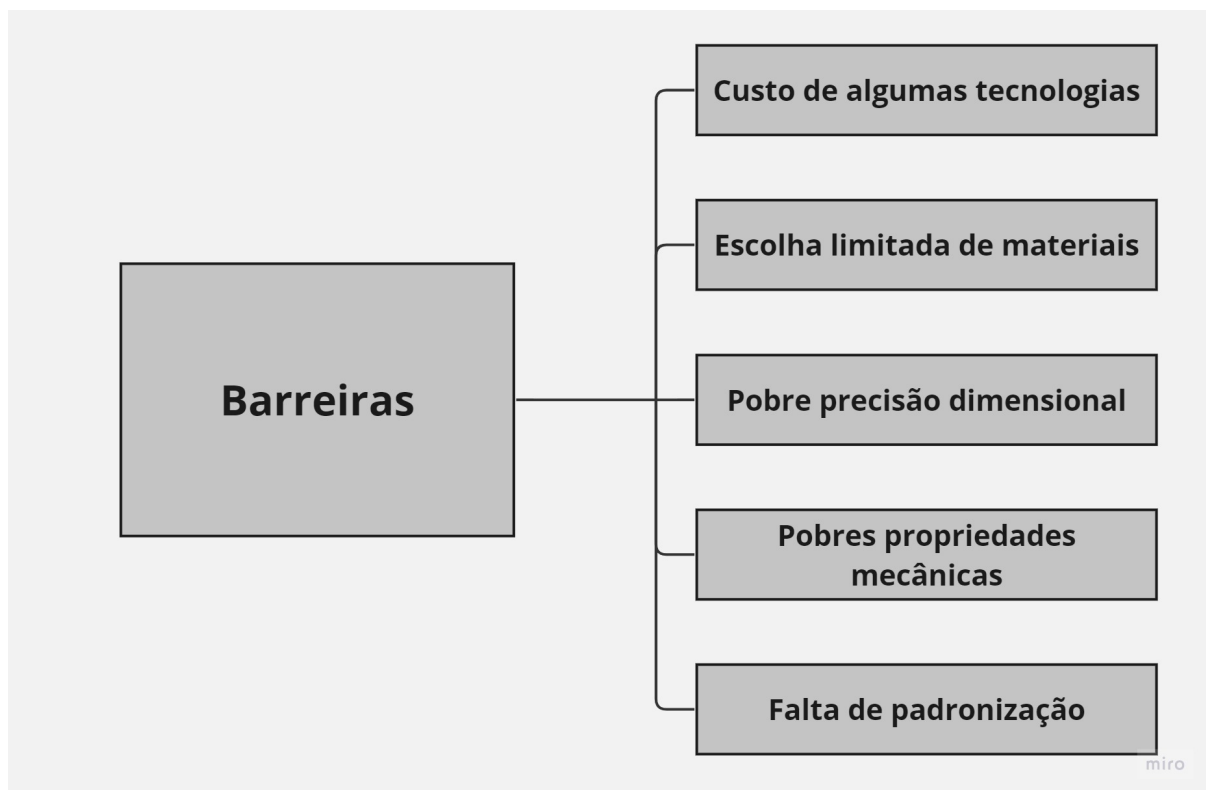


Figura 2.48: Barreiras na AM - Fonte: Adaptado de (Rouf et al., 2022)

No entanto, além disso, existem muitos problemas, como baixa precisão dimensional e repetibilidade das propriedades dos materiais, o que não oferece aos designers e cientistas de materiais uma total confiança no processo até o momento.

As pobres propriedades mecânicas das peças desenvolvidas e o acabamento superficial inadequado também estão a limitar o uso de peças impressas em 3D para várias aplicações críticas. No entanto, esses desafios podem ser superados ao estudar o

efeito de vários parâmetros de processo que afetam as propriedades mecânicas e desenvolver um maior entendimento do processo, de modo que possam ser mais eficientes no desenvolvimento de produtos com propriedades superiores.

O tempo de impressão também é considerado um dos desafios para o fabrico aditivo. Os processos geralmente são lentos e consomem muito tempo. A menos que o tempo de impressão seja reduzido, o fabrico aditivo não poderá substituir totalmente a convencional. O custo dos equipamentos de fabrico aditivo é alto, mas pode não ser um futuro problema.

Impressoras 3D para fabrico em larga escala ainda possuem um alto custo. Não apenas a configuração, mas também os materiais embrutos como filamentos, são caros. O custo de cada filamento para impressão 3D varia de €25 a €50 dependendo das especificações do filamento.

A anisotropia das estruturas fabricadas aditivamente é um dos principais desafios no cenário atual. Isso pode resultar em propriedades mecânicas variáveis em diferentes condições de carga.

A aparência dos objetos impressos em 3D não é suficientemente refinada, pois podem exibir o padrão de impressão camada por camada quando vistos lateralmente. Esse defeito pode não importar em aplicações onde a estética não é tão importante, mas em casos onde ela é importante isso pode sim ser uma barreira.

A falta de padronização na prototipagem 3D é mais um desafio. Existe uma falta de processos padronizados, materiais e medidas de controle de qualidade no campo da impressão 3D. Isso torna difícil comparar e reproduzir resultados entre diferentes máquinas e tecnologias.

A ausência de padrões abrangentes na indústria dificulta a adoção generalizada da impressão 3D para fins de prototipagem. Esforços de padronização são cruciais para garantir consistência, confiabilidade e compatibilidade na impressão 3D, facilitando a colaboração e a troca de ficheiros e projetos entre diferentes partes interessadas.

Porém, uma das maiores limitações pode estar no processo de qualificação e certificação pelas autoridades competentes. A curto prazo a opção é produzir a peça usando meios convencionais como fundição ou moldagem por injeção, mas fabricar o ferramental usando a AM (Sirichakwal & Conner, 2016).

## 3

### Casos de Estudo

Os investigadores (Yin, 2001) e (Stake, 1978) caracterizam o caso de estudo como uma abordagem metodológica, que permite a análise aspectual aprofundada de um fenómeno, situação ou problema, ou seja, do caso.

A seguir neste capítulo alguns casos de estudo serão abordados detalhadamente e de forma mais aprofundada para que seja possível analisá-los e perceber como a impressão 3D está a facilitar a vida de muitas empresas e pessoas no sector automóvel.

#### 3.1 Caso de estudo: Porsche 959 e sua alavanca de embraiagem

Um dos atuais parceiros dos amantes de veículos clássicos aparece claramente no ramo da prototipagem 3D. Casos como o citado já são de alta importância para manter vivo o sonho de eternizar um ou mais modelos que um dia foram os cobiçados pelos aficionados por carros “de verdade”.

Segundo as estatísticas temos cerca de 70% dos Porsche já produzidos, em condições de circular. Com tamanha história e idade da marca, é de se impressionar tamanha percentagem; confirmando ainda mais a fiabilidade e a durabilidade destes modelos (F. Cruz, 2018).

Isso se deve a uma razão, a conceituada fabricante de veículos desportivos de Stuttgart, é fiel aos seus clientes e tenta ao máximo produzir peças de substituição que possam servir a carros mais atuais e ao mesmo tempo aos mais antigos.

De acordo com o fabricante alemã, existe atualmente no departamento de clássicos da empresa, chamado Porsche Classic, um catálogo com aproximadamente 52 mil peças de reposição para os diferentes modelos fabricados (F. Cruz, 2018).

Esse número é bastante extenso, porém, mesmo com essa significativa lista, ainda existem peças extremamente raras que foram utilizadas apenas em versões especiais e

de produção limitada. Nessas situações, é necessário fabricar essas peças sob medida quando são necessárias, devido à sua escassez no mercado.

Isso demonstra o compromisso da Porsche em fornecer suporte e manutenção para os modelos clássicos, mesmo quando as peças originais se tornam difíceis de encontrar. Um grande diferencial para seus clientes no pós-venda (mesmo após tanto tempo).

Além de continuar a produzir peças de substituição pela maneira tradicional, está atualmente a recorrer a processos de impressão 3D para reproduzir peças de modelos clássicos e icônicos, como por exemplo a embraiagem do modelo raro 959 (figura 3.1), do qual foram produzidas apenas 292 unidades (F. Cruz, 2018; Pedrosa, 2022).



Figura 3.1: Porsche 959 - Fonte: (F. Cruz, 2018)

Isso faz com que as peças para o modelo sejam, não só raras, como pouco requisitadas. Porém, vez em quando, estas são necessárias, como aconteceu com um cliente da marca. A impressão 3D foi a solução que acabou por permitir solucionar o problema e criar uma peça equivalente e de boa qualidade (F. Cruz, 2018). Dessa forma, a Porsche pôde criar uma réplica da alavanca da embraiagem do Porsche 959, com as mesmas especificações e funcionalidades da peça original.

O processo foi realizado recorrendo a uma impressora SLS, que derreteu uma fina camada de pó metálico — neste caso aço — com apenas 0,1 mm de espessura, colocando-o sobre uma base. Camada a camada, foi sendo depositado mais material, e no final, obtiveram o objeto completo tridimensional (F. Cruz, 2018; Pedrosa, 2022).

A marca alemã alega que este novo componente tem a mesma reação ao contacto com fluídos lubrificantes e resistência às variações de temperatura, descansando os

proprietários que possam vir a necessitar de tal componente.

### 3.2 Caso de estudo: Assentos personalizados da Porsche

A Porsche está a revolucionar os assentos desportivos: em 2020 a empresa apresentou uma alternativa inovadora para o estofamento convencional de assentos tipo concha com o estudo de conceito "Assento tipo concha com formato do corpo impresso em 3D"(N. Toberer, 2020).

O assento (figura 3.2) é baseado no assento tipo concha leve da Porsche e apresenta uma construção em forma de sanduíche: um suporte de base feito de polipropileno expandido é unido a uma camada de conforto respirável composta por uma mistura de materiais à base de PU fabricados por manufatura aditiva - ou seja, em uma impressora 3D. A pele externa do banco é feita de "Race-tex" e apresenta um padrão de perfuração específico para controle climático (N. Toberer, 2020).



Figura 3.2: Assento Porsche feito em 3D - Fonte: (N. Toberer, 2020)

Os assentos são um refinamento do design encontrado nos assentos Porsche existentes, como aqueles encontrados opcionalmente em determinados modelos 911 e 718 (Boxster e Cayman) e estão disponíveis para a venda para esses modelos (N. Toberer, 2021; V. Vijayenthiran, 2021).

Primeiramente 40 protótipos dele foram fabricados em maio de 2020 com o intuito de serem usados em algumas pistas de corrida da Europa e se adaptaram aos carros com cinto de seis pontos (N. Toberer, 2020).

Baseando-se em depoimentos dos corredores, melhorias foram feitas e a partir de fevereiro de 2022 ele entrou em venda, já legalmente adequados para uso nas ruas, em três níveis de firmeza diferentes e cores (N. Toberer, 2020, 2021).

A longo prazo, a tecnologia também possibilitará soluções totalmente personalizadas, caso haja interesse suficiente por parte dos clientes. Uma ampla variedade de cores e assentos adaptados ao contorno corporal específico de cada cliente também serão desenvolvidos e oferecidos. (N. Toberer, 2020).

Além de oferecer aos compradores um novo nível de personalização, afirma-se que o assento é 8% mais leve do que um assento tipo concha produzido de forma convencional (V. Vijayenthiran, 2021).

### **3.3 Caso de estudo: O grupo BMW**

O grupo BMW está a dar um próximo passo na integração sistemática do fabrico aditivo. O objetivo é expandir o fabrico aditivo para níveis industriais e estabelecê-la firmemente em várias áreas, principalmente no desenvolvimento e produção de veículos com efeitos econômicos positivos. O grupo BMW se beneficia plenamente das vantagens da tecnologia, que oferece disponibilidade rápida de componentes, design flexível de componentes e a capacidade de fabricar peças sem a utilização de ferramentas muito complexas (C. Seidel, 2020).

Daniel Schäfer, vice-presidente sênior de integração de produção e fábrica piloto do grupo, afirma: "Processos como o fabrico aditivo nos ajudam a acelerar os ciclos de desenvolvimento e levar nossos veículos à maturidade em série mais rapidamente. A impressão 3D também reduz os tempos de produção de componentes ao mesmo tempo em que atende a rigorosos requisitos de qualidade"(C. Seidel, 2020).

Desde o meio de 2020, o grupo BMW tem fabricado peças de metal e polímero por meio do fabrico aditivo para a Rolls-Royce Motor Cars. Essas peças (figura 3.3) são produzidas em vários pontos da cadeia de processo e em diferentes locais da rede global de produção (C. Seidel, 2020).

As peças em questão são destinadas ao corpo do veículo e à célula de passageiros, sendo altamente funcionais e rígidas. O processo de fabrico foi desenvolvido e preparado para aplicação na produção automotiva pelo Grupo BMW, no próprio campus de fabrico aditivo da empresa, que também produz peças de polímero por meio da MJF e da SLS(C. Seidel, 2020).

Na fábrica em Landshut, as peças de metal são atualmente fabricadas por meio da SLM. Na produção, os componentes de metal impressos em 3D são instalados nos corpos dos carros por meio de um processo quase totalmente automatizado. Os componentes de polímero do campus de fabrico aditivo e o substrato de metal para o painel

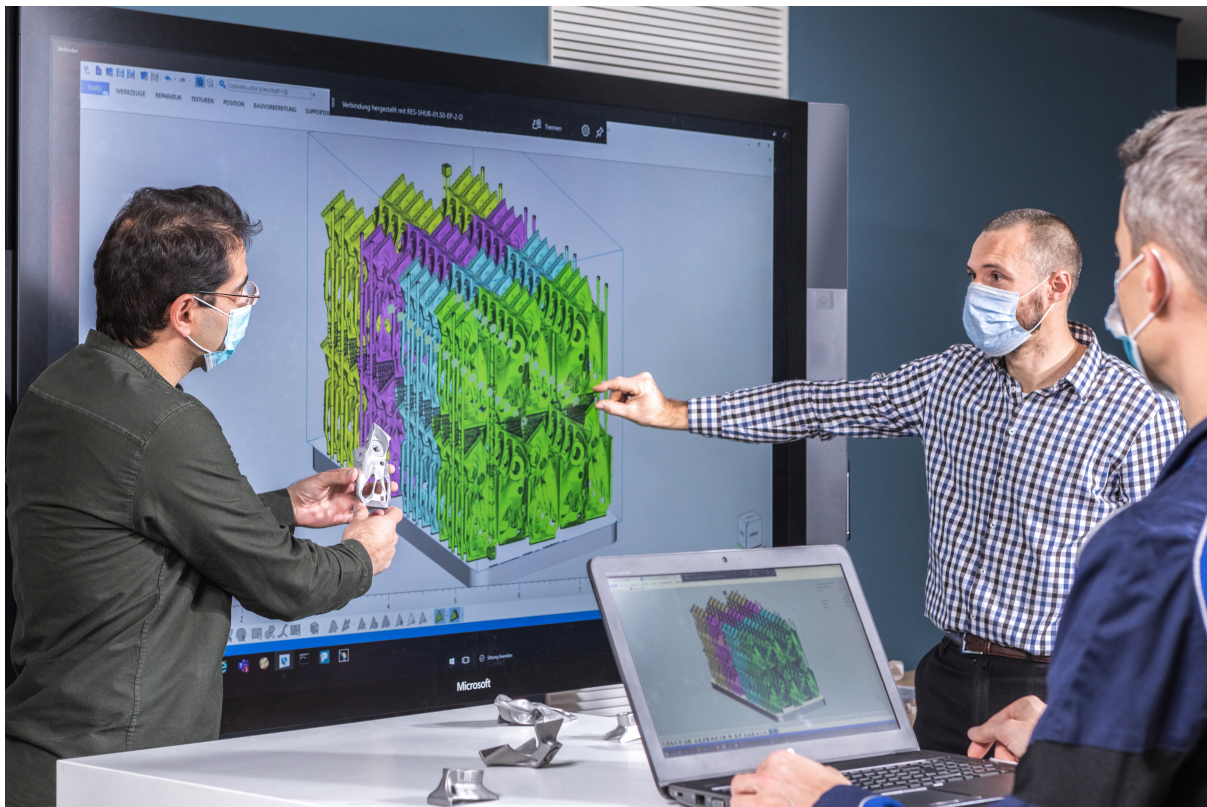


Figura 3.3: Funcionários do grupo BMW a discutir sobre a produção das peças 3D - Fonte: (C. Seidel, 2020)

de acabamento são instalados nos automóveis (C. Seidel, 2020).

Para o grupo, o *design* generativo resultou em soluções otimizadas de topologia, onde forma e função foram significativamente aprimoradas. Os componentes são cerca de 50% mais leves do que componentes convencionais comparáveis e aproveitam ao máximo o espaço disponível, como é o caso do amortecedor para a tampa traseira (C. Seidel, 2020).

O grupo BMW tem concentrado, desde de junho de 2020, todo o seu conhecimento tecnológico no campus de fabrico aditivo, localizado nos arredores de Munique. O novo campus também oferece treinamento para colaboradores de todo o mundo no uso das novas tecnologias e é o local de produção de componentes protótipos. Até então, o centro de excelência contava com até 80 colaboradores e já operava cerca de 50 sistemas de processamento de metal e polímero. Mais de 50 sistemas adicionais estavam em operação em outros locais de produção ao redor do mundo (C. Seidel, 2020).

### 3.4 Caso de estudo: Alfa Romeo Sauber F1 Team

Na Fórmula 1, o desempenho de um carro de corrida muitas vezes faz a diferença entre uma vitória ou uma derrota. No entanto, projetar um carro de corrida bem-sucedido é

um desafio, não apenas por causa dos altos custos envolvidos, mas também pelo ciclo rápido de desenvolvimento necessário (AutonomousManufacturing, 2019).

A Sauber tem utilizado máquinas da 3D Systems há mais de uma década em seu departamento de Manufatura Aditiva, que já inclui seis sistemas de sinterização a laser seletiva (SLS), entre outras tecnologias de impressão (L. Griffiths, 2018).

"Quando decidimos atualizar nossa capacidade de produção de SLA, sentimos que era hora de aprofundar nossa cooperação com a 3D Systems. Também precisávamos expandir nossa capacidade, então substituir algumas das antigas máquinas de SLA da 3D Systems pelo ProX 800, com maior capacidade de produção, foi a escolha natural", diz Christoph Hansen, chefe de manufatura aditiva na Sauber. "Estamos utilizando as soluções de SLA da 3D Systems predominantemente e extensivamente para testes em túnel de vento, mas também para ferramentas de laminação de carbono e fundição a vácuo para peças de silicone"(L. Griffiths, 2018).

A tecnologia tem sido aplicada a um modelo de teste em escala de 60% de um carro de corrida de Fórmula 1 usado para testes em túnel de vento. Impressoras 3D SLS e SLA são utilizadas para fabricar desde asas dianteiras, dutos de freio e capas de suspensão até capas de motor, dutos internos e defletores de mão. As peças finais são tipicamente produzidas em fibra de carbono usando tanto moldes e ferramentas fabricados de forma convencional quanto moldes e ferramentas impressos em 3D (figura 3.4) (L. Griffiths, 2018).

"Não podemos realmente comparar esse processo ao fabrico convencional, porque seria impossível fazê-lo de outra forma que não seja a impressão 3D; precisamos de muitas peças com qualidade de superfície superior em um tempo muito curto", diz Reto Trachsel, chefe de design aero na Sauber. "Houve momentos em que o túnel de vento, que também é usado por nossos clientes terceirizados, funcionou 24 horas por dia, 7 dias por semana, e aproveitamos nossas soluções da 3D Systems para produzir de 200 a 300 peças plásticas por dia de trabalho (L. Griffiths, 2018).

Christoph Hansen também afirma que preferem imprimir em 3D em vez de utilizar técnicas convencionais de ferramentaria pois conseguem obter a complexidade de diversos designs gratuitamente, o que é essencial para peças como sistemas de dutos complexos"(L. Griffiths, 2018).

### **3.5 Caso de estudo: Coletor de admissão do Ford Hoonitruck**

Quando Ken Block, piloto americano de rali, decidiu criar um carro especial para a Gimkhana 10, lembrou-se de uma veterana Ford F-150. Apelidada de Hoonitruck, recebe o motor V6 Ecoboost do Ford GT com duplo turbo próximo de 1000 cavalos de

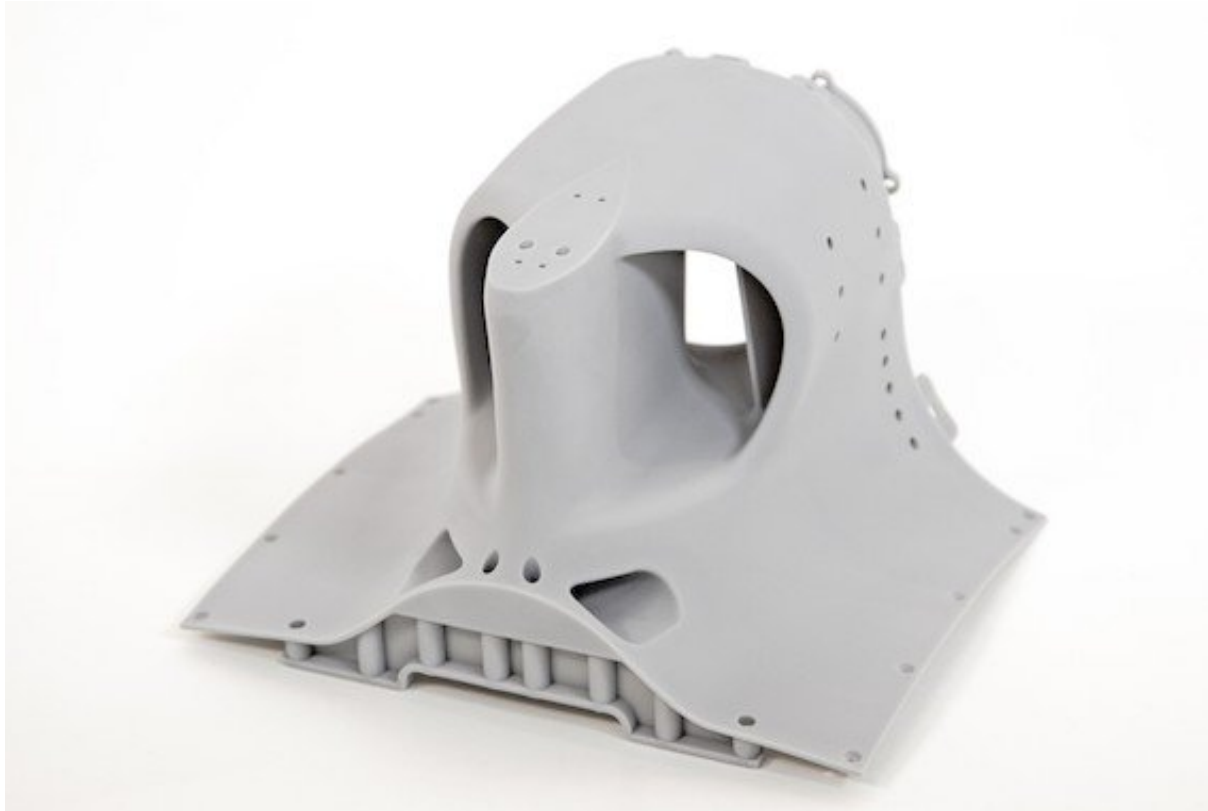


Figura 3.4: Parte *rollhoop* para modelo de testes em túnel de vento - Fonte: (L. Griffiths, 2018)

potência (J. M. Costa, 2019).

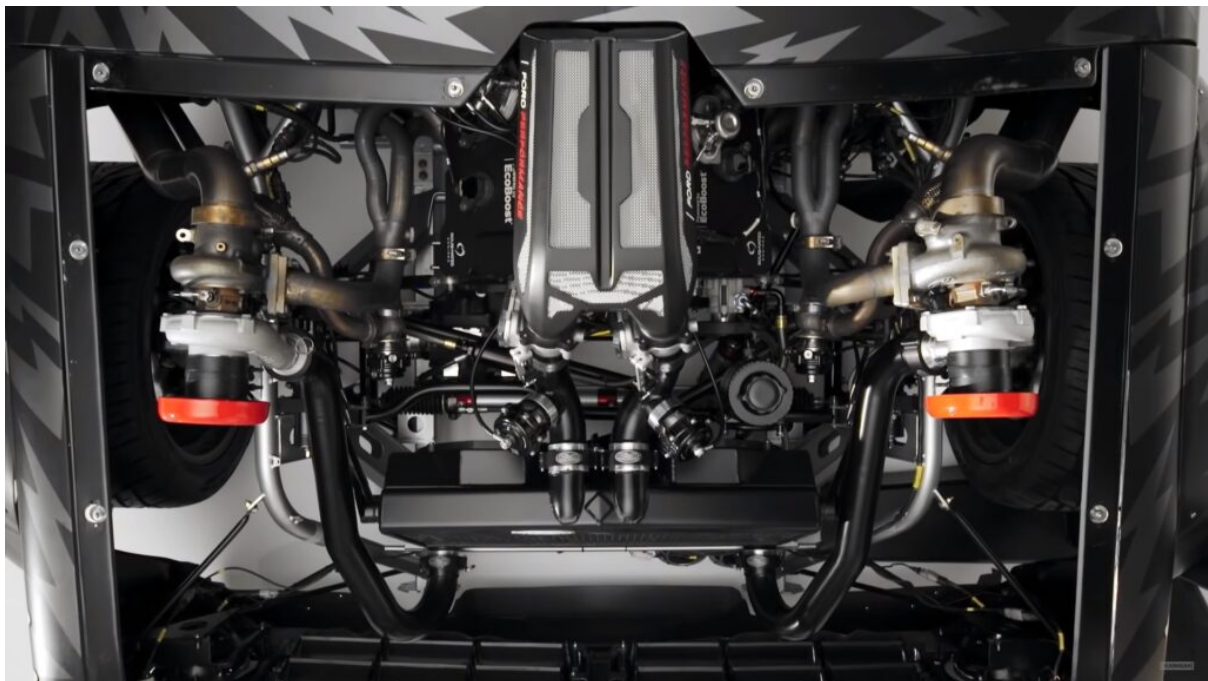


Figura 3.5: Vista superior do novo motor - Fonte: (J. M. Costa, 2019)

Para chegar a esta potência, o motor do GT passou por muitas alterações (figura

3.5), destacando-se o coletor de admissão. Coletor que foi desenhado pelos engenheiros da Ford Performance e por um grupo de engenheiros do departamento de pesquisa e desenvolvimento europeu da casa da oval azul. Feito o estudo estrutural da peça e o seu funcionamento, os homens da Ford Performance recorreram ao Instituto de Produção Aditiva Digital, em Aachen, na Alemanha, para produzir o coletor de admissão (J. M. Costa, 2019).

O desenho desta peça levou a algum esforço, mas com a ajuda do instituto alemão, foi conseguida fazer a prototipagem em 3D em alumínio. Vale ressaltar que, segundo os homens da Ford Performance, seria impossível maquinar uma peça destas a partir de um bloco de alumínio, com o mesmo grau de detalhamento (J. M. Costa, 2019).

A impressão 3D oferece muita flexibilidade de projeto, ajuda a melhorar a performance e diminui o peso. Para fazer a belíssima peça para o motor do Hoonitruck, a impressora 3D esteve a trabalhar cinco dias, mas a peça não chega nem aos 6 quilogramas de peso (J. M. Costa, 2019).

“Temos a felicidade de ter acesso a tecnologia incrível, mas esta peça foi algo complicado que exigiu muito de nós e do poder dos nossos computadores. Fomos ao limite. O coletor de admissão do Hoonitruck é muito complexo e era impossível ser feito pela maneira tradicional” referiu Raphael Koch, engenheiro do departamento de processos e materiais avançado da Ford Europa (J. M. Costa, 2019).

## 4

# Conclusão

Esta dissertação de mestrado foi realizada para estudar e aprofundar a manufatura aditiva no sector automóvel e subseqüentes desafios inerentes a esta indústria, bem como tecnologias sobre *scanning* de uma peça e sua impressão com a utilização de diferentes tipos de tecnologia e materiais, e seus respetivos pontos positivos e negativos. De mesmo modo, os seus aspetos sustentáveis e suas barreiras perante a sociedade são estudados nesta tese.

Para além disso, também é encontrado na parte introdutória um pequeno contexto histórico de todo o desenvolvimento industrial até chegar aos dias atuais. Dia após dia, os avanços tecnológicos vêm sendo aprimorados, fazendo com que a indústria automóvel reinvesta na tecnologia de processo de desenvolvimento num crescente dinamismo de soluções inovadoras e competitivas a nível económico.

A manufatura aditiva permite a criação de um protótipo antes mesmo da inserção ou produção de um produto, obtendo um *feedback* entre *designer* e consumidor. Evitando retrabalho e prevendo mudanças que serão necessárias para o desenvolvimento de novos projetos. Ela também faz com que as empresas arrisquem mais com a criação de um novo ou obsoleto produto (substituição de peças indisponíveis no mercado), pois os custos podem ser relativamente baixos ou a criação por meio dela seja o único caminho.

A prototipagem 3D ainda contribui para um paradoxo de ideais. Enquanto pode ser usada para desenvolver e lançar cada vez mais rapidamente novas peças, também é capaz de servir de base de reposição para partes já obsoletas ou esgotadas. Em outras palavras, enquanto ela pode destruir algumas tecnologias deixando-as ultrapassadas junto aos seus lançamentos, a mesma tecnologia consegue preservar e manter reposições a objetos antigos. Isto quer dizer o quão fantástico é a versatilidade do seu uso.

O uso desta tecnologia, mesmo com algumas limitações, está em crescimento constante e o sector automóvel deve estar preparado para mudanças e inovações que estão cada vez mais crescentes junto aos interesses dos consumidores e de outros *sta-*

*keholders.*

Diversos processos de impressão 3D existem no sector automóvel, e dentre cada processo algumas tecnologias únicas que podem ou não servir para o que é desejado. Vale lembrar que para termos o modelo de impressão tem-se previamente um árduo trabalho até obtermos o modelo final e assim preparamos e começamos a impressão de fato. Isso vai desde o *scanning*, após preparações, ou modelagem 3D em *softwares* específicos para tal. Após isso ainda tem-se a preparação das configurações, códigos e parâmetros para a impressão. E aí sim obtemos o que desejamos.

Casos de estudo atuais mostram-nos que com investigação, testes e estudos, uma nova era irá consolidar-se. O que mais impede e trava tal consolidação são as barreiras que envolvem ainda altos custos, limitações de materiais, propriedades mecânicas, precisões dimensionais e padronizações, para além de eventuais conflitos a nível de propriedade intelectual, naturalmente excluídos da presente dissertação.

Em termos gerais, é tudo muito recente e falta um pouco de maturidade. Consultas incessantes por menores custos e tempos com eficiência de fabrico ainda possuem, junto da tecnologia, um longo caminho evolutivo. E ademais, tem-se a falta ou quase nenhuma regulamentação e certificação do que tem sido feito. Grandes empresas até obtêm certificações do que tem produzido, porém pequenas fábricas ainda não; isso pode ser arriscado.

Com o passar dos anos e com o seu uso em grande escala, a obtenção e utilização da tecnologia de fabrico aditivo por meio da prototipagem 3D deverá sofrer uma redução de custos, assim como ocorreu com o uso de outras tecnologias.

Para o futuro, não é errado arriscar afirmar que as indústrias mudarão o tipo de fabrico principal para o aditivo e que o convencional subtrativo será uma segunda opção usada apenas para quando não for realmente viável devido ao tipo de produção para uma peça *x* ou *y*.

A continuar a falar do que vem por aí, já temos acesso a *chatbots* de inteligência artificial como o ChatGPT que utilizam algoritmos para consultar em gigantescas bases de dados com informações sobre o que e como podemos gerar uma peça automóvel, por exemplo. Necessitamos apenas de informar os dados de nossa impressora e ele mostra-nos os melhores códigos para termos o melhor resultado estrutural possível no fabrico de tal peça. É claro que ainda é só o começo, mas o crescimento é exponencial e perceptível.

As bases de dados desses *chatbots* ou mais corretamente *large language models* dão um contributo crescente a esta área e podemos concluir que a prototipagem 3D em diversos sectores, está em franco desenvolvimento havendo naturalmente uma expectativa de crescente inovação e redução de custos conforme demonstrado nesta dissertação.

## Bibliografia

- 3DFila. (2019). *Impressão 3d: O guia completo atualizado*. 3DFila. Retrieved from <https://3dfila.com.br/blog/impressao-3d/#11-os-principais-sofwares-de-impress%C3%A3o-3d>  
{citado nas páginas 92 e 94.}
- 3DFila. (2021). *Os 8 formatos mais comuns de arquivos 3d*. 3DFila. Retrieved from <https://3dfila.com.br/blog/8-formatos-de-arquivos-3d-2019/>  
{citado na página 88.}
- 3DLab. (2020, Fev.). *Impressora 3d dlp: aprenda como funciona essa tecnologia*. 3D Lab Indústria Ltda. Retrieved from <https://www.webmaissistemas.com.br/blog/industria-5-0/>  
{citado na página 67.}
- All3DP. (2022). *Os melhores scanners 3d de 2023 – guia de compras*. All3DP. Retrieved from <https://all3dp.com/pt/1/melhores-scanners-3d/#section-tecnologias-de-scanners-3d>  
{citado nas páginas 41, 45, 46 e 47.}
- All3DP. (2023, May.). *What is an stl file? – the stl format simply explained*. All3DP. Retrieved from <https://all3dp.com/1/stl-file-format-3d-printing/#what-is-an-stl-file>  
{citado na página 87.}
- Alomarah, A., Ruan, D., Masood, S., & Gao, Z. (2019). Compressive properties of a novel additively manufactured 3d auxetic structure. *Smart Materials and Structures*, 28(8), 1-32. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab0dd6>  
{citado na página 71.}
- Aparecida, M., Marinês, M., Valéria, M., & Carvalho, L. (2006). *Documentos acadêmicos: Um padrão de qualidade*. Recife, PE: Editora Universitária UFPE.  
{citado na página 13.}
- AutonomousManufacturing. (2019). *Chasing victory: 3d printing for motorsports*. <https://amfg.ai/2019/05/28/7-exciting-examples-of-3d-printing-in-the-automotive-industry/>. (Acessado: 2023-07-17)

{citado na página 104.}

- Badini, S., Regondi, S., Frontoni, E., & Pugliese, R. (2023). Assessing the capabilities of chatgpt to improve additive manufacturing troubleshooting. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Rese*, 6, 278-287. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.03.003>  
{citado nas páginas 59, 60 e 61.}
- Bai, Y., Wagner, G., & Williams, A. B. (2017). Effect of particle size distribution on powder packing and sintering in binder jetting additive manufacturing of metals. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(8), 6 pages. <https://doi.org/10.1115/1.4036640>  
{citado na página 72.}
- Barbieri, L., Calzone, F., & Muzzupappa, M. (2022). Form and function: Functional optimization and additive manufacturing. In *Advances on mechanics, design engineering and manufacturing ii* (p. 649–658). Cham, Switzerland: Springer.  
{citado na página 23.}
- Baxter, M. (2011). *Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos*. São Paulo, SP: Blucher.  
{citado nas páginas 11 e 12.}
- Beamler. (2020, Dec.). *Qual é a diferença entre tpe e tpu na impressão 3d?* Beamler Additive Manufacturing. Retrieved from <https://www.beamler.com/pt/qual-e-a-diferenca-entre-tpe-e-tpu-na-impressao-3d/>  
{citado na página 76.}
- Bernardini, F., & Rushmeier, H. E. (2002). The 3d model acquisition pipeline. *Computer Graphics Forum*, 21, 149–172. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00574>  
{citado na página 39.}
- Blupointscan. (2014). *"dino seatbelt cover*. <https://www.blupointscan.com/ferrari-dino>. (Acessado: 2023-07-04)  
{citado na página 83.}
- Böhler, W., & Marbs, A. (2002). 3d scanning instruments. In *Proceedings of the cipa wg 6 international workshop on scanning for cultural heritage recording* (p. 9-18). Corfu, Greece: The Ministry of Macedonia and Thrace.  
{citado na página 41.}
- C. Ponticelli and C. A. Suski. (2010). *O avanço do desenvolvimento de produtos através da engenharia reversa*. <https://periodicos.unifebe.edu.br/index.php/RevistaUnifebe/article/view/513>. (Acessado: 2023-07-07)  
{citado na página 35.}
- C. Seidel. (2020). *Industrial-scale 3d printing continues to advance at bmw group*. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0322259EN/industrial-scale-3d-printing-continues-to-advance-at-bmw-group?language=en>. (Acessado: 2023-07-16)

{citado nas páginas 102 e 103.}

C.A. Giffi and B. Gangula and P. Illinda. (2014). *Opportunity in the automotive industry: Additive manufacturing hits the road*. [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-automotive/DUP\\_707-3D-Opportunity-Auto-Industry\\_MASTER.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-automotive/DUP_707-3D-Opportunity-Auto-Industry_MASTER.pdf). (Acessado: 2023-06-25)

{citado na página 23.}

Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., & Garrett, B. (2011, October). *Could 3d Printing Change the World? technologies, potential, and implications of additive manufacturing* (Tech. Rep.). Washington, DC: Atlantic Council.

{citado na página 96.}

Carrión, P. V., Gonzáles, C. S., Aciar, S., & Morales, G. (2018). Methodology for systematic literature review applied to engineering and education. In *Proceedings of the 2018 IEEE Global Engineering Education Conference* (p. 1364-1373). Ilhas Canárias, Espanha.

{citado na página 29.}

Chakravorty, D. (2023, Mar.). *The obj file format – simply explained*. All3DP. Retrieved from <https://all3dp.com/1/obj-file-format-3d-printing-cad/>

{citado nas páginas 87 e 88.}

Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrímsson, J., & Thiede, S. (2015). Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. *J. Clean. Prod.*, *107*, 615–625. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.009>

{citado na página 97.}

Correa, J., Martínez, S., Artigao, E., & Lázaro, E. (2020). Using scada data for wind turbine condition monitoring: A systematic literature review. *Energies*, *13*(12), 3132. <https://doi.org/10.3390/en13123132>

{citado nas páginas 29 e 34.}

Dalpadulo, E., Petruccioli, A., Gherardini, F., & Leali, F. (2022). A review of automotive spare-part reconstruction based on additive manufacturing. *J. Manuf. Mater.*, *6*(133), 2. <https://doi.org/10.3390/jmmp6060133>

{citado na página 24.}

Davis, J., & Chen, X. (2001). A laser range scanner designed for minimum calibration complexity. In *Proceedings third international conference on 3-d digital imaging and modeling* (p. 91-98). Quebec City, QC, Canada: IEEE.

{citado na página 40.}

Delgado, J., Ciurana, J., & Rodríguez, C. A. (2012). Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for dmls and slm with iron-based materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, *60*, 601-610. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3643-5>

{citado na página 69.}

- Delic, M., & eyers, D. R. (2020). The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry. *Int. J. Prod. Econ.*, 228, 107689. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107689>  
{citado na página 23.}
- Deloitte Insights. (2020). *Industry 4.0 in automotive. digitizing the end-to-end automotive value chain.* [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/automotive-news\\_industry-4-0-inautomotive/DI\\_Automotive-News-Supplement.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/automotive-news_industry-4-0-inautomotive/DI_Automotive-News-Supplement.pdf). (Acessado: 2023-06-27)  
{citado na página 24.}
- Designifying. (2019). *3d printing dmils direct metal laser sintering.* <http://www.designifying.com/blog/3d-printing-technology/3d-printing-dmils-direct-metal-laser-sintering/>. (Acessado: 2023-06-30)  
{citado nas páginas 69 e 70.}
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manuf.*, 11, 545-554. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>  
{citado na página 23.}
- E. Manzini. (2011). *Small, local, open and connected: Design for social innovation and sustainability.* <https://pt.scribd.com/document/233208981/Manzini-SLOC>. (Acessado: 2023-07-09)  
{citado na página 95.}
- E. Rakitin and I. Rakitin and V. Staleva and F. Arnaoutoglou and A. Koutsoudis and G. Pavlidis. (2008). *An overview of 3d laser scanning technology.* <http://www.ipet.gr/~akoutsou/docs/A03D.pdf>. (Acessado: 2023-07-21)  
{citado na página 40.}
- EngiPrinters. (2017). *Quais são os tipos de filamento usados nas impressoras 3d?* EngiPrinters. Retrieved from <https://engiprinters.com.br/quais-sao-os-tipos-de-filamento-usados-nas-impressoras-3d/>  
{citado nas páginas 75, 76, 77, 78 e 79.}
- EngiPrinters. (2019). *O que é e como funciona a impressão sla?* EngiPrinters. Retrieved from <https://engiprinters.com.br/o-que-e-e-como-funciona-a-impressao-sla-d90/>  
{citado na página 66.}
- Esperto, L., & Osório, A. (2008). Rapid tooling - sinterização directa por laser de metais. *Mecânica Experimental*, 15, 117-124.  
{citado na página 69.}
- Extxe. (2018, Nov.). *Ceramic materials for additive technologies.* Extxe. Retrieved from <https://extxe.com/3737/keramicheskie-materialy-dlja-additivnyh-tehnologij/>

{citado na página 68.}

F. Cruz. (2018). *Impressão 3d ajuda a manter os porsches clássicos na estrada*. <https://www.razaoautomovel.com/noticias/porsche-classicos-impressao-3d/>. (Acessado: 2023-07-14)

{citado nas páginas 99 e 100.}

Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., & Iribarne, M. (2015). Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyp. J.*, 21(1), 14–33. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067>

{citado na página 95.}

Filament2print. (2020, Sep.). *Resinas avançadas para impressão 3d*. Filament2print. Retrieved from [https://filament2print.com/pt/blog/100\\_resinas-avancadas-para-impressao-3d.html](https://filament2print.com/pt/blog/100_resinas-avancadas-para-impressao-3d.html)

{citado nas páginas 79, 80 e 81.}

FileFormat. (2022). *O que é um arquivo ply?* FileFormat. Retrieved from <https://docs.fileformat.com/pt/3d/ply/>

{citado na página 91.}

Gache, C. C., Tuazon, B., Espino, M. T., & Advincula, R. C. (2022). 3d-printed polymeric spare parts for industrial applications: A state-of-the-art review. *Sci. Engg. J.*, 15(2), 128–144.

{citado na página 25.}

Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Williams, C., Wang, C., ... Zavattieri, P. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Comput. Aided Des.*, 66, 65-89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>

{citado na página 23.}

Gebler, M., Uiterkamp, A. J. M. S., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3d printing technologies. *Energy Policy*, 74, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>

{citado nas páginas 95 e 96.}

Geng, J. (2011). Structured-light 3d surface imaging: a tutorial. *Adv. Opt. Photonics.*, 3, 128–160. <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>

{citado na página 40.}

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2020). Binder jetting. *Additive Manufacturing Technologies*, 237-252. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7\\_8](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7_8)

{citado na página 72.}

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2021). *Additive manufacturing technologies: 3d printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, NY: Springer.

{citado nas páginas 22 e 72.}

Grant, M. J., & Booth, A. (2009). 3d-printed polymeric spare parts for industrial appli-

- cations: A state-of-the-art review. *Health Information and Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>  
{citado na página 24.}
- Groetelaars, N. J., & Amorin, A. L. (2011). Tecnologia 3d laser scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos. In *Xv congresso sigradi* (p. 1-5). Santa Fé, Argentina.  
{citado na página 48.}
- GrypYoungtimersParts. (2023). *Ferrari - 328 - hood release control - raw finish*. <https://www.gryp-3d.com/gb/ferrari-328/85-commande-d-ouverture-de-capot.html>. (Acessado: 2023-07-04)  
{citado na página 83.}
- Gualdo, F. (2019, Apr.). *Polyjet technology: because details matter*. Spring - Engineering & Prototyping. Retrieved from <https://www.spring-italia.com/polyjet-technology-because-details-matter/?lang=en>  
{citado na página 71.}
- Guey, W. (2022, Apr.). *Tipos de materiais de impressão 3d e suas aplicações*. Print it 3D. Retrieved from <https://www.printit3d.com.br/post/tipos-de-materiais-de-impressao-3d-e-suas-aplicacoes>  
{citado nas páginas 74, 75, 76, 77, 78 e 81.}
- Hernandez, C., Vogiatzis, G., & Cipolla, R. (2008). Multiview photometric stereo. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 30, 548–554. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.70820>  
{citado na página 44.}
- HP. (2023). *Hp jet fusion 5200 series industrial 3d printing solution*. <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/products/multi-jet-fusion-5200.html>. (Acessado: 2023-07-07)  
{citado nas páginas 85 e 86.}
- Hubs. (2020). *What is 3d printing?* Hubs - A protolabs Co. Retrieved from <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>  
{citado nas páginas 62, 66, 68, 69 e 71.}
- Impressoras3D.com. (2021, May.). *Guia de tipos de resina 3d para impressão*. Impressoras3D.com. Retrieved from <https://www.impressoras3d.com/pt/guia-sobre-tipos-de-resinas-3d-para-imprimir/>  
{citado nas páginas 79, 80 e 81.}
- Ishfaq, K., Abdullah, M., & Mahmood, A. M. (2021). A state-of-the-art direct metal laser sintering of ti6al4v and als10mg alloys: Surface roughness, tensile strength, fatigue strength and microstructure. *Optics & Laser Technology*, 143, 107366. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107366>  
{citado nas páginas 81 e 82.}
- J. M. Costa. (2019). *Ford performance produziu coletor de admissão em metal numa impressora*

- 3d. <https://automais.autosport.pt/noticias/ford-performance-produziu-coletor-de-admissao-em-metal-numa-impressora-3d/>. (Acessado: 2023-07-17)  
{citado nas páginas 105 e 106.}
- Johnson, S. (2021). Classic cars: Keep motoring heritage alive. *Eng. Technol.*, 16, 1–6. <https://doi.org/10.1049/et.2021.0911>  
{citado na página 24.}
- Kim, W. J., Nguyen, H. H., Kim, H. Y., Nguyen, M. T., Park, H. S., & Kim, J. C. (2017). Sintering and microstructures of sus 316l powder produced by 3d printing process. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62, 1215-1218. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0180>  
{citado na página 68.}
- Kim, Y., Yoon, C., Ham, S., Park, J., Kim, S., Kwon, O., & Tsa, P.-J. (2015). Emissions of nanoparticles and gaseous material from 3d printer operation. *Environ. Sci. and Technol.*, 49(20), 12044–12053. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02805>  
{citado na página 95.}
- Koller, J., Häfner, R., & Döpfer, F. (2022). Decentralized spare parts production for the aftermarket using additive manufacturing - a literature review. *Procedia CIRP*, 107, 894–901. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.081>  
{citado na página 24.}
- Krassenstein, B. (2015). *Ornl 3d printsworking shelby cobra replica—president obama approves*. <https://3dprint.com/36433/3d-printed-shelby-cobra/>. (Acessado: 2023-07-05)  
{citado na página 84.}
- Kreiger, M., & Pearce, J. M. (2013). Environmental life cycle analysis of distributed three-dimensional printing and conventional manufacturing of polymer products. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 1(12), 1511–1519. <https://doi.org/10.1021/sc400093k>  
{citado na página 94.}
- L. Carolo. (2023). *3d printer g-code commands: Main list & quick tutorial*. <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-code-commands-list-tutorial/#i-14-writing-g-code>. (Acessado: 2023-08-02)  
{citado nas páginas 52, 53 e 54.}
- L. Columbus. (2019). *The state of 3d printing*. <https://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2019/05/27/the-state-of-3d-printing-2019/>. (Acessado: 2023-07-09)  
{citado na página 95.}
- L. Griffiths. (2018). *Alfa romeo sauber f1 team upgrades 3d printing capabilities with five new 3d systems machines*. <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/sauber-motorsport-3d-printing-five-3d-systems/>.

- (Acessado: 2023-07-17)  
{citado nas páginas 104 e 105.}
- Laplume, A., Petersen, B., & Pearce, J. (2016). Global value chains from a 3d printing perspective. *J. Int. Bus. Stud.*, 47(5), 595–609. <https://doi.org/10.1057/jibs.2015.47>  
{citado nas páginas 95 e 96.}
- LaserScanningEurope. (2023). *Terrestrial laser scanners*. Laser Scanning Europe. Retrieved from <https://www.laserscanning-europe.com/en/servicesdevices/terrestrial-laser-scanners>  
{citado na página 42.}
- Lawless, R., & Pires, R. (2022, Dec.). *3mf file format (3d printing) – simply explained*. All3DP. Retrieved from <https://all3dp.com/2/3mf-file-format-3d-printing-simply-explained/>  
{citado nas páginas 90 e 91.}
- Lim, J., Le, K. Q., & Wong, C. (2016). An overview of 3-d printing in manufacturing, aerospace, and automotive industries. *IEEE*, 35, 18-22. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2016.2540098>  
{citado na página 23.}
- Lima, C. B. (2003). *Engenharia reversa e prototipagem rápida: Estudos de casos* (Unpublished master's thesis). Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.  
{citado na página 35.}
- Liu, Z., Jiang, Q., Zhang, Y., Li, T., & Zhang, H.-C. (Eds.). (2016). *Proceedings of the asme 2016 international manufacturing science and engineering conference* (Vol. 49903). Blacksburg, Virginia, USA: ASME.  
{citado nas páginas 94 e 95.}
- Makerbot. (2023). *Makerbot digitizer desktop 3d scanner | order today!* MakerBot. Retrieved from <https://www.makerbot.com/stories/news/makerbot-digitizer-desktop-3d-scanner-order-today/>  
{citado nas páginas 46 e 47.}
- M.Ambrosio, & Vezzoli, C. (Eds.). (2019). *Proceedings of the 3rd lens world distributed conference, milano, mexico city, beijing, bangalore, curitiba, cape town, 3-5 april 2019* (Vol. 1). Milano, Mexico City, Beijing, Bangalore, Curitiba, Cape Town: LeNS.  
{citado na página 94.}
- Mani, M., Lyons, K., & Gupta, S. (2014). Sustainability characterization for additive manufacturing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119, 419–428. 10.6028/jres.119.016  
{citado na página 94.}
- Mansouri, A., Lathuilière, A., Marzani, F., Voisin, Y., & Gouton, P. (2007). Toward a 3d multispectral scanner: An application to multimedia. *IEEE Multimed.*, 14,

- 40–47. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2007.22>  
{citado na página 43.}
- Matias, S. (2023, Feb.). *Indústria 5.0: Entenda o que é, quais as tecnologias e os impactos?* Web Mais. Retrieved from <https://www.webmaissistemas.com.br/blog/industria-5-0/>  
{citado na página 17.}
- Mayer, R. (1999). *Scientific canadian: Invention and innovation from canada's national research council*. Vancouver, Canadá: Raincoast Books.  
{citado na página 39.}
- Mehrpouya, M., Dehghanghadikolaei, A., Fotovvati, B., Vosooghnia, A., Emamian, S., & Gisario, A. (2019). The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review. *Appl. Sci.*, 9, 3865. <https://doi.org/10.3390/app9183865>  
{citado na página 23.}
- Mercedes-Benz. (2018). *“future meets classic”: Next generation of genuine mercedes-benz replacement parts from the 3d printer*. <https://www.mercedes-benz.com/en/vehicles/mercedes-benz-classic/classiccenter/classic-spare-parts/next-generation-mercedes-benz-replacement-parts-from-3d-printer/>. (Acessado: 2023-07-04)  
{citado nas páginas 83 e 84.}
- Moutinho, D., & Ferreira, P. (2022). A tecnologia de impressão 3d aplicada em processos de projeto de arquitetura e engenharia. In *4.º congresso português de building information modelling* (p. 75-84). Lisboa, PT: Universidade do Minho.  
{citado nas páginas 49 e 50.}
- MultipixImaging. (2023). *Halcon's imaging software technique 'photometric stereo' explained*. Multipix imaging. Retrieved from <https://multipix.com/supportblog/imaging-software-technique-photometric-stereo-explained/>  
{citado na página 44.}
- N. Toberer. (2020). *Porsche presents innovative 3d-printing technology for bucket seats*. <https://newsroom.porsche.com/en/2020/products/porsche-3d-printed-bodyform-full-bucket-seat-concept-study-19996.html>. (Acessado: 2023-07-14)  
{citado nas páginas 101 e 102.}
- N. Toberer. (2021). *Sales launch for innovative 3d-print bodyform full bucket seat*. <https://newsroom.porsche.com/en/2021/products/porsche-innovative-3d-print-bodyform-full-bucket-seat-sales-launch-26060.html>. (Acessado: 2023-07-14)  
{citado nas páginas 101 e 102.}
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3d printing): A review of materials. *methods, applications and challenges. Compos. Part B Eng.*, 143, 172-196.

- <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>  
{citado na página 23.}
- Niaki, M. K., Torabi, S. A., & Nonino, F. (2019). Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: the role of sustainability. *J. Clean. Prod.*, 222, 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.019>  
{citado nas páginas 95 e 96.}
- O’Connel, J. (2021, Jan.). *Dae files: Collada files simply explained*. All3DP. Retrieved from <https://all3dp.com/2/collada-file-dae-file-simply-explained/>  
{citado na página 92.}
- O’Connel, J. (2022, Dec.). *The step file format – simply explained*. All3DP. Retrieved from <https://all3dp.com/2/step-file-format-simply-explained/>  
{citado na página 89.}
- Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., & Chamzas, C. (2007). Methods for 3d digitization of cultural heritage. *J. Cult. Herit.*, 8, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.10.007>  
{citado na página 40.}
- Pedrosa, R. M. C. (2022). *Revestimento de componentes produzidos por fdm na indústria automóvel* (Unpublished master’s thesis). Escola superior de tecnologia e gestão do IPL, Leiria, PT.  
{citado na página 100.}
- Petrovic, V., Gonzalez, J. V. H., Ferrando, O. J., Gordillo, J. D., Puchades, J. R. B., & Portoles, L. (2011). Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. *Int. J. Prod. Res.*, 49(4), 1061–1079. <https://doi.org/10.1080/00207540903479786>  
{citado na página 96.}
- Porshe-Newsroom. (2018). *Porsche classic supplies classic parts from a 3d printer*. <https://newsroom.porsche.com/en/company/porsche-classic-3d-printer-spare-parts-sls-printer-production-cars-innovative-14816.html>. (Acessado: 2023-07-04)  
{citado nas páginas 83 e 84.}
- Printit3D. (2021, Jan.). *Impressão 3d com filamento peek e pei - guia completo*. Print it 3D. Retrieved from <https://www.printit3d.com.br/post/impres%C3%A3o-3d-com-filamento-peek-e-pei-guia-completo>  
{citado na página 79.}
- R. Castells. (2016). *Dmls vs slm 3d printing for metal manufacturing*. <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing/>. (Acessado: 2023-07-01)  
{citado na página 70.}
- R. Hawken. (2018). *Classic cars make great investment vehicles*. <http://www.futuresmag.com/2018/03/16/classic-cars-make-great-investment-vehicles>. (Aces-

- sado: 2023-06-28)  
{citado na página 24.}
- RedaçãoWishbox. (2020, Nov.). *Como funciona uma impressora 3D? conheça todos os tipos*. Wishbox Technologies. Retrieved from <https://www.wishbox.net.br/blog/como-funciona-uma-impressora-3d-conheca-todos-os-tipos/>  
{citado na página 67.}
- Rindfleisch, A., O'Hern, M., & Sachdev, V. (2017). The digital revolution, 3d printing, and innovation as data. *Prod. Innov. Manag.*, 34(5), 681–690. <https://doi.org/10.1111/jpim.12402>  
{citado na página 95.}
- Roberts, C., & Hyatt, L. (2018). *The dissertation journey: A practical and comprehensive guide to planning, writing, and defending your dissertation*. Thousand Oaks, CA: Corwin, A Sage Company.  
{citado na página 13.}
- Rouf, S., Raina, A., Haq, U., Irfan, M., Naveed, N., & Kichloo, S. J. A. (2022). 3d printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(9), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.02.001>  
{citado nas páginas 82, 94, 96 e 97.}
- S. Matias. (2023). *Indústria 5.0: Entenda o que é, quais as tecnologias e os impactos?* <https://webmaissistemas.com.br/blog/industria-5-0>. (Accessed: 2023-06-17)  
{citado nas páginas 17 e 18.}
- Schwab, K. (2019). *A quarta revolução industrial*. Lisboa, PT: Edipro.  
{citado na página 16.}
- Sedlák, J., Ptáčková, M., Nejedlý, J., Madaj, M., Dvořáček, J., Zouhar, J., ... Rozkošný, L. (2013). Material analysis of titanium alloy produced by direct metal laser sintering. *International Journal of Metalcasting*, 7(2), 43-50. <https://doi.org/10.1007/BF03355552>  
{citado na página 69.}
- Sintratec. (2023). *Sintratec s2 - more than just a 3d printer*. <https://sintratec.com/sls-3d-printer/amp/sintratec-s2/>. (Acessado: 2023-07-07)  
{citado nas páginas 85 e 86.}
- Sirichakwal, I., & Conner, B. (2016). Implications of additive manufacturing for spare parts inventory. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(1), 56-63. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0035>  
{citado na página 98.}
- Sousa, J. F. C. (2015). *Scanner a 3d* (Unpublished master's thesis). Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Minho, PT.  
{citado nas páginas 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45.}

- Stake, R. E. (1978). The case study method in social inquiry. *Educational Researcher*, 7(2), 5-8. <https://doi.org/10.2307/1174340>  
{citado na página 99.}
- Thompson, M., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., & et al. (2016). Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 65, 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>  
{citado na página 23.}
- Truer. (n.d.). *Introdução à tecnologia electron beam melting (ebm)*. Shanghai Truer Industrial Development Co. Retrieved from <https://am-material.com/pt/ebm-technology/>  
{citado na página 70.}
- Tuazon, B. J., V., N. A., Basuel, R. B., Reyes, L. A. D., & Dizon, J. R. C. (2022). 3d printing technology and materials for automotive application: A mini-review. *Key Eng. Mater.*, 913, 3–16. <https://doi.org/10.4028/p-26o076>  
{citado nas páginas 24 e 82.}
- V. Vijayenthiran. (2021). *Porsche starts offering 3d printed seats*. [https://www.motorauthority.com/news/1127483\\_porsche-starts-offering-3d-printed-seats](https://www.motorauthority.com/news/1127483_porsche-starts-offering-3d-printed-seats). (Acessado: 2023-07-14)  
{citado nas páginas 101 e 102.}
- VTI. (2014). *Resumo - revolução industrial*. Só história. Retrieved from <https://www.sohistoria.com.br/resumos/revolucaoindustrial.php>  
{citado nas páginas 15 e 16.}
- Welander, T., Marsh, R., & Amin, M. N. (2018). G-code modeling for 3d printer quality assessment. In *Proceedings of the the midwest instruction and computing symposium* (p. 1-10). Duluth, MN: ResearchGate.  
{citado nas páginas 51, 52, 53, 55, 57, 58 e 59.}
- Wiese, M., Thiede, S., & Herrmann, C. (2020). 3rapid manufacturing of automotive polymer series parts: A systematic review of processes, materials and challenges. *Additive Manufacturing*, 36, 101582. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101582>  
{citado na página 83.}
- Yakout, M., Elbestawi, M., & Veldhuis, S. C. (2018). A review of metal additive manufacturing technologies. *Solid State Phenomena*, 278, 1-14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.278.1>  
{citado nas páginas 69 e 70.}
- Yin, R. K. (2001). *Estudo de caso: planejamento e métodos*. Porto Alegre, RS: Bookman.  
{citado nas páginas 13 e 99.}
- Yu, F., Luo, H., & Wang, P. (2010). *Three-dimensional model analysis and processing*. China: Springer.  
{citado na página 38.}

Zhao, M., Yang, J., Shu, C., & Liu, J. (2020). Sustainability orientation, the adoption of 3dprinting technologies, and new product performance: a crossinstitutional study of american and indian firms. *Technovation*, 101(4), 102197. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2020.102197>

{citado na página 95.}

Zubiría, S. M. (1997). *Contemporary didactics-mentefacts*. Bogotá, Colombia: Sage.

{citado na página 29.}



**Instituto Superior  
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra