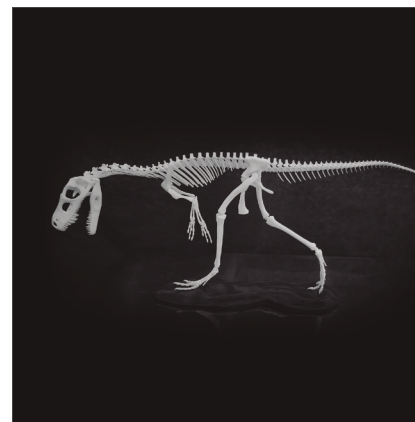
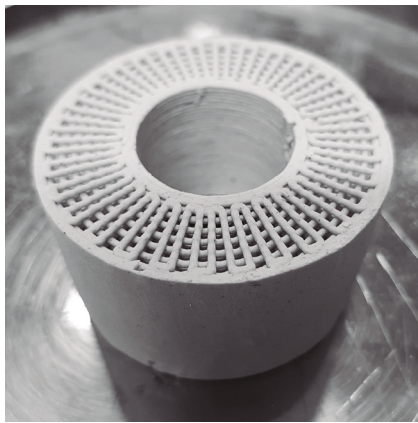
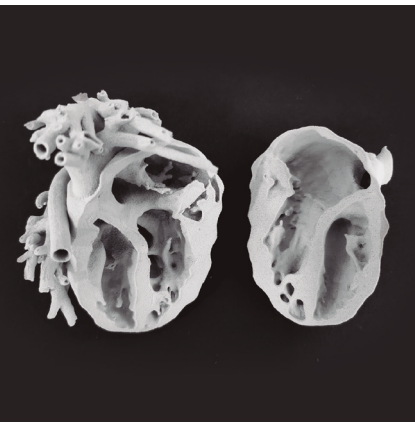


NERI VOLPATO
organizador

TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES DA MANUFATURA ADITIVA



Blucher



AUTORES

Américo Scotti
André Luiz Jardini Munhoz
Carlos Alberto Costa
Carlos Henrique Ahrens
Janaina Dernowsek
Jonas de Carvalho
Jorge Roberto Lopes dos Santos
Jorge Vicente Lopes da Silva
(in memoriam)
José Aguiomar Foggiatto
Milton Sérgio Fernandes de Lima
Neri Volpato

Neri Volpato
(organizador)

TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES DA MANUFATURA ADITIVA

Tecnologias e aplicações da manufatura aditiva

© 2024 Neri Volpato (organizador)

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editor Eduardo Blücher

Coordenador editorial Rafael Fulanetti

Coordenação de produção Andressa Lira

Produção editorial Ariana Corrêa

Preparação de texto Regiane da Silva Miyashiro

Diagramação Roberta Pereira de Paula

Revisão de texto Maurício Katayama

Capa Laércio Flenic

Imagem da capa Coração de recém-nascido Biodesign, Pontifícia Universidade Católica (PUC-RJ); Estrutura cerâmica porosa radial concêntrica e suporte de skate, Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER-UTFPR); Orelha bioimpressa 3D, Janaina Dernowsek; Poltrona sinuosa, Rodrigo Erthal e Pangeia Lab; Esqueleto do Staurikosaurus pricei, Laboratório de Processamento de Imagem Digital e Departamento de Geologia e Paleontologia do Museu Nacional (UFRJ); Pré-forma metálica de um flange hidráulico de alta pressão, Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (Laprosolda-UFU)

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras, julho de 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Tecnologias e aplicações da manufatura aditiva / organizado por Neri Volpato. – São Paulo : Blucher, 2024.

576 p. : il.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-2505-8

1. Impressão tridimensional – Tecnologias 2. Processos de fabricação – Tecnologia I. Volpato, Neri

24-5531

CDD 670

Índice para catálogo sistemático:

1. Impressão tridimensional – Tecnologias

Conteúdo

1. Princípio da manufatura aditiva: impressão 3D.	19
1.1 Introdução	19
1.2 Manufatura aditiva: um novo princípio de fabricação	20
1.3 Nomenclatura	22
1.4 Histórico	23
1.5 Princípios de adição das tecnologias de AM.	29
1.6 Vantagens e limitações gerais da AM.	32
1.7 Visão geral das aplicações	35
1.8 Normatização.	39
1.9 Considerações finais.	40
Referências	40
 2. Fotopolimerização em cuba	 43
2.1 Introdução.	43
2.2 Principais tecnologias e princípios básicos de fabricação	44
2.3 Fotopolimerização por escaneamento vetorial	45
2.4 Fotopolimerização por projeção de imagens	51
2.5 Microestereolitografia e litografia axial computadorizada	55
2.6 Materiais para AM por fotopolimerização em cuba.	58
2.7 Parâmetros de processo	59

2.8	Aplicações, potencialidades e limitações	61
2.9	Considerações finais.	63
	Referências	63
3.	Extrusão de material	67
3.1	Introdução.	67
3.2	Princípio de adição da MEX	68
3.3	Tecnologias MEX para filamentos poliméricos.	76
3.4	Tecnologias MEX para polímeros granulados.	83
3.5	Tecnologias MEX para materiais metálicos	84
3.6	Tecnologias MEX para materiais cerâmicos.	86
3.7	Principais parâmetros de processo da MEX.	87
3.8	Demais características do processo MEX	98
3.9	Pós-processamento para MEX.	107
3.10	Outras potencialidades da MEX	108
3.11	Vantagens e limitações da AM por MEX.	110
3.12	Considerações finais.	111
	Referências	111
4.	Jateamento de material e jateamento de aglutinante	117
4.1	Introdução.	117
4.2	Tecnologias de jato de tinta	118
4.3	Jateamento de material (MJT).	121
4.4	Jateamento de aglutinante (BJT).	133
4.5	Tecnologias de BJT comerciais.	139
4.6	Considerações finais.	149
	Referências	150
5.	Fusão em leito de pó não metálico.	153
5.1	Introdução.	153
5.2	Características do pó para PBF	154
5.3	Mecanismos de aglutinação de pó não metálico	156
5.4	Propriedades dos polímeros para a PBF	158
5.5	Princípio da PBF a <i>laser</i> para não metálico	160
5.6	Sistemas de PBF a <i>laser</i> comerciais mais importantes	171
5.7	Sistemas PBF por radiação infravermelha.	173
5.8	Fusão de leito de pó cerâmico e outros materiais.	180
5.9	Degradação e reciclagem de polímeros.	182

5.10	Vantagens e desvantagens da PBF não metálico	184
5.11	Considerações finais.	185
	Agradecimentos.	186
	Referências	186
6.	Fusão em leito de pó metálico	191
6.1	Introdução.	191
6.2	Processos de fusão em leito de pó metálico	192
6.3	Fusão em leito de pó metálico a <i>laser</i> (PBF-LB).	194
6.4	Fusão em leito de pó metálico por feixe de elétrons (PBF-EB).	200
6.5	Matérias-primas para PBF metálico	204
6.6	Construção de estruturas de suportes para PBF metálico	206
6.7	Pós-processamento de peças obtidas por PBF metálico	208
6.8	Vantagens e limitações dos processos de PBF metálico	210
6.9	Aplicações	210
6.10	Considerações finais.	213
	Referências	214
7.	Adição de lâminas, deposição com energia direcionada e processos híbridos.	219
7.1	Introdução	219
7.2	O uso de <i>laser</i> na manufatura aditiva	220
7.3	Manufatura laminar de objetos	223
7.4	Processo por deposição com energia direcionada.	225
7.5	Tecnologias híbridas	236
7.6	Considerações finais	237
	Referências	238
8.	Deposição com energia direcionada – Deposição a arco (MADA)	247
8.1	Introdução.	247
8.2	Definição da MADA	248
8.3	Considerações sobre a aplicação da MADA.	250
8.4	Fundamentos da impressão por MADA	252
8.5	Processos de soldagem a arco aplicáveis em MADA	257
8.6	O ciclo de processamento	262
8.7	Impressão e códigos de máquina	274
8.8	Considerações finais: tendências e inovações.	276

Agradecimentos	284
Referências	284
9. Representação geométrica 3D para AM	287
9.1 Introdução	287
9.2 Formas de obtenção de modelo geométrico 3D	288
9.3 Formato STL	291
9.4 Exportação de arquivos STL em sistemas CAD	295
9.5 Defeitos mais comuns no processo de representação geométrica 3D para AM	300
9.6 Ferramentas para manipulação e correção de arquivos no formato STL	307
9.7 Formato AMF	308
9.8 Formato OBJ	311
9.9 Formato 3MF	311
9.10 Considerações finais	314
Referências	314
10. Planejamento de processo para AM	317
10.1 Introdução	317
10.2 Processo e planejamento de processo de AM	318
10.3 Sistemas de planejamento de processo para AM	319
10.4 Características gerais das peças obtidas por AM	321
10.5 Etapas do planejamento de processo da AM	330
10.6 Fabricação da peça	353
10.7 Pós-processamento	354
10.8 Considerações finais	355
Referências	356
11. Prototipagem no desenvolvimento de produto	359
11.1 Introdução	359
11.2 O processo de desenvolvimento de produto	359
11.3 Representações físicas de produtos, suas finalidades e vantagens	363
11.4 Mudanças no PDP com a utilização da AM	367
11.5 Exemplos de aplicação de protótipos no PDP	374
11.6 Considerações finais	380
Referências	381

12. Manufatura aditiva no <i>design</i> de produtos	385
12.1 Introdução	385
12.2 Tipos de representação física	386
12.3 Pioneiros no desenvolvimento de modelos e protótipos em <i>design</i>	390
12.4 A manufatura aditiva no <i>design</i> brasileiro	392
12.5 Manufatura aditiva no desenvolvimento e na produção de produtos	393
12.6 Manufatura aditiva pelo mundo: tendências no <i>design</i>	395
12.7 O movimento <i>maker</i>	397
12.8 Considerações finais	398
Referências	399
 13. Fabricação de ferramentais	 401
13.1 Introdução	401
13.2 Classificação quanto a forma e exigências das aplicações	402
13.3 Aplicação direta em gabaritos e dispositivos	404
13.4 Aplicação indireta por meio de modelos-mestre	407
13.5 Aplicação indireta por meio de modelos de sacrifício	415
13.6 Aplicação direta em ferramentais de sacrifício	420
13.7 Aplicação direta em moldes permanentes poliméricos de baixa produção	423
13.8 Aplicação direta em moldes permanentes de média e alta produção	427
13.9 Considerações finais	435
Referências	436
 14. Potenciais para fabricação final e considerações sobre projeto para AM	 441
14.1 Introdução	441
14.2 Considerações iniciais	442
14.3 Potenciais da AM	445
14.4 Restrições, limitações e desafios da AM	457
14.5 Projeto para AM (DFAM)	461
14.6 Casos de aplicação	464
14.7 Considerações finais	468
Agradecimentos	468
Referências	469

15. Aplicações na saúde	473
15.1 Introdução	473
15.2 Modalidades de obtenção de imagens médicas e escâneres.	474
15.3 Tratamento de imagens de exames médicos	477
15.4 Soluções disponíveis para o processamento de imagens médicas.	480
15.5 Algumas aplicações de AM na saúde.	481
15.6 Osteointegração.	498
15.7 Questões regulatórias	499
15.8 Considerações finais.	502
Agradecimentos	503
Referências	503
16. Bioimpressão 3D	507
16.1 Introdução	507
16.2 Fundamentos da bioimpressão 3D	508
16.3 Etapas e métodos da bioimpressão 3D	513
16.4 Biotintas e biomateriais na bioimpressão 3D	517
16.5 Regulamentação, aplicações e potencialidades de mercado a médio e longo prazo	520
16.6 Desafios na bioimpressão 3D de tecidos.	526
16.7 Considerações finais.	528
Referências	529
17. Aplicações em áreas diversas	535
17.1 Introdução	535
17.2 Aplicações na paleontologia	536
17.3 AM na museologia.	539
17.4 AM na arqueologia	540
17.5 AM nas ciências forenses.	541
17.6 AM na medicina veterinária	543
17.7 AM na tecnologia assistiva	547
17.8 AM na gastronomia do “futuro”	552
17.9 AM na arquitetura e na construção civil.	553
17.10 Considerações finais.	556
Referências	556
Índice remissivo	559

CAPÍTULO 1

Princípio da manufatura aditiva: impressão 3D

Neri Volpato

Jonas de Carvalho

1.1 INTRODUÇÃO

As restrições e as potencialidades dos meios de fabricação disponíveis impactam diretamente as decisões tomadas durante o processo de desenvolvimento de produto (PDP), refletindo-se em vários aspectos relativos a forma, funcionalidades, materiais e custos. Com o aparecimento do controle numérico, no final dos anos 1950, mais flexibilidade e liberdade foram oferecidas ao processo de criação e desenvolvimento de produtos, uma vez que permitiu a automatização dos equipamentos tradicionais de fabricação. No entanto, algumas limitações antigas ainda permaneceram. Mais recentemente, no final dos anos 1980, o surgimento de um novo princípio de fabricação baseado na adição de material por camadas, denominado manufatura aditiva (*additive manufacturing* – AM) ou impressão 3D (tridimensional), revolucionou o setor ao adicionar novas potencialidades ao sistema produtivo. O impacto da AM tem sido significativo, pois tem causado grandes mudanças na forma de pensar, desenvolver e fabricar componentes e produtos.

Este capítulo apresenta o princípio geral da fabricação por adição de material por camadas e exibe uma categorização das diferentes tecnologias ou processos de AM disponíveis no mercado. Alguns dos eventos importantes que antecederam o surgimento da AM são descritos, apresentando um breve histórico do seu desenvolvimento. Por fim, uma visão geral das vantagens, limitações e campos de aplicações é discutida. Além de apresentar os conceitos básicos, este capítulo objetiva também direcionar o leitor para as várias tecnologias e principais aplicações que são detalhadas ao longo deste livro.

1.2 MANUFATURA ADITIVA: UM NOVO PRINCÍPIO DE FABRICAÇÃO

Os principais meios de fabricação mecânica implicam em transformar os materiais baseados nos princípios de *moldagem*, *remoção* (ou subtração), *conformação*, *união* e *divisão* (Quadro 1.1). No final da década de 1980, um novo princípio de fabricação baseado na *adição* de material foi apresentado comercialmente, sendo denominado manufatura aditiva ou impressão 3D.

Quadro 1.1 Princípios da fabricação mecânica

Princípio	Principais características
Moldagem	Dar forma ao material envolvendo ou não a sua fusão (por exemplo, vários tipos de fundição de metais em moldes permanentes ou não, moldagem por injeção de plástico, metalurgia do pó, moldagem de peças em fibra de vidro etc.)
Remoção	Subtração de material até chegar à forma desejada (por exemplo, torneamento, fresamento, furação, retífica, eletroerosão, usinagem química, eletroquímica etc.)
Conformação	Deformação plástica do material para gerar a geometria final (por exemplo, forjamento, conformação e estampagem de chapas, extrusão, laminação, entre outros)
União	Junção de partes ou componentes mais simples para compor uma peça mais complexa (por exemplo, soldagem, brasagem, colagem, entre outros)
Divisão	Separação de componentes, ou seja, o contrário da união (por exemplo, serragem, corte por <i>laser</i> , plasma, jato d'água, entre outros)
Adição	Adição sucessiva de camadas de material a partir de dados diretamente obtidos de um modelo geométrico 3D

A AM pode ser definida como **um princípio de fabricação por meio da adição sucessiva de camadas de material a partir de dados diretamente obtidos de um modelo geométrico 3D**. Conforme esquematizado na Figura 1.1, o processo inicia com a criação de um modelo geométrico 3D do objeto a ser produzido, normalmente em um sistema CAD (*computer-aided design*), que, na sequência, é processado por um sistema de planejamento de processo ou CAM (*computer-aided manufacturing*) para AM. Nessa etapa, o modelo 3D é “fatiado” digitalmente, obtendo-se as “curvas de níveis” (normalmente 2D) que serão utilizadas para definir, em cada

camada, onde será ou não adicionado material. A peça física é, então, gerada automaticamente em um equipamento de AM por meio do empilhamento e da aderência (união, solidificação, polimerização) sequencial das camadas, iniciando na base até atingir o topo.

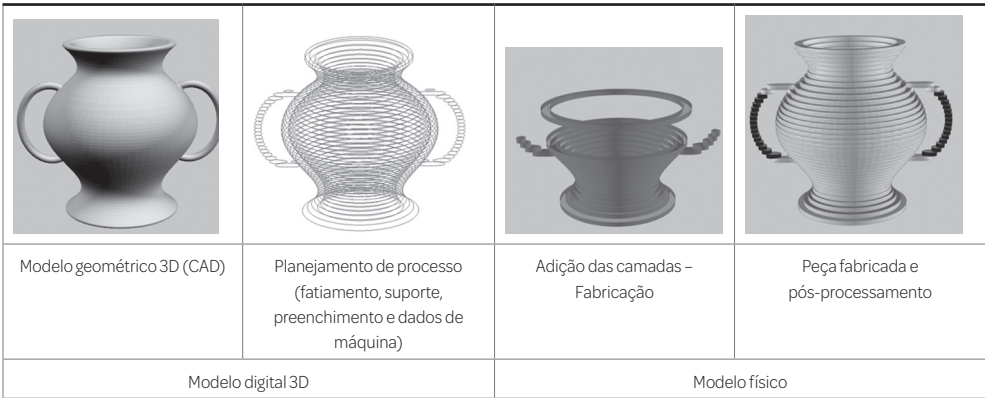


Figura 1.1 Representação das principais etapas da AM ou impressão 3D.

De uma forma mais detalhada, as etapas gerais da AM compreendem:

1. A modelagem tridimensional, gerando-se um modelo geométrico 3D da peça por meio de um sistema CAD, de digitalização 3D, reconstrução de imagem médica ou outro.
2. A transformação do modelo geométrico 3D para um formato adequado para AM, geralmente na forma de uma malha de triângulos, como o STL (*STereoLi-thography*), o AMF (*Additive Manufacturing Format*), o 3MF (*3D Manufacturing Format*), ou outro. Esse tema é tratado no Capítulo 9.
3. O planejamento do processo para a fabricação por camada, envolvendo fatia-mento, cálculo das estruturas de suporte e do preenchimento (estratégias de deposição de material), abordado em detalhes no Capítulo 10.
4. Envio dos dados gerados no planejamento do processo para o equipamento de AM ou impressora 3D e fabricação da peça.
5. O pós-processamento, que varia bastante de acordo com a tecnologia AM, po-dendo envolver limpeza, retirada das estruturas de suporte, etapas de tratamen-to térmico, acabamento por usinagem, pintura etc. Essas duas últimas etapas são apresentadas nos respectivos capítulos de cada tecnologia.

Uma característica importante da AM é o seu nível de automatização, minimizan-do consideravelmente a intervenção do operador durante o processo. Praticamente,

a necessidade do operador ocorre na preparação do equipamento (*setup*), que pode envolver alimentação de material, nivelamento e outras necessidades de cada máquina, e, ao final do processo, na retirada e limpeza da peça. Como as informações geradas pelo sistema de planejamento do processo são enviadas na sequência planejada à máquina, esta executa o trabalho sem a assistência do operador.

Em virtude do seu princípio, a AM tem um enorme potencial para fabricar geometrias complexas, uma vez que transforma uma geometria 3D em uma sequência de geometrias de camadas mais simples, na grande maioria dos casos, geometrias 2D. A AM permite fabricar componentes físicos a partir de vários tipos de materiais, em diferentes estados e formas físicas (líquido, sólido em filamento, pó, lâmina, arame) e a partir de diversos princípios aditivos (Seção 1.5). A maioria dos processos de AM adiciona camadas planas de material, mas isso não é uma regra, pois existem tecnologias que permitem camadas não planas, de acordo com a geometria da peça (ver detalhes no Capítulo 10).

Em função do impacto causado na manufatura, o surgimento da AM tem sido considerado um marco em termos de métodos de fabricação. Nesse sentido, a AM foi descrita pela revista *The Economist*, em sua edição de 21 de abril de 2012, como a Terceira Revolução Industrial [1].

1.3 NOMENCLATURA

Apesar de, no início, vários autores terem sugerido denominações distintas para esse novo princípio de fabricação (Figura 1.2), a nomenclatura que persistiu por muito tempo foi a de prototipagem rápida [2]-[4]. A origem desse nome decorre do fato de, inicialmente, esse processo ter sido aplicado sobretudo na produção rápida de protótipos físicos (*i.e.*, uma primeira materialização de ideias, sem muitas exigências em termos de resistência e precisão). No entanto, os primeiros processos de AM evoluíram consideravelmente, e novas tecnologias surgiram, a ponto de atualmente vários poderem ser utilizados na fabricação final de peças (mais detalhes no Capítulo 14). Adicionalmente, apesar de o termo “rápido” representar o tempo decorrido entre a modelagem geométrica 3D e a materialização (impressão) do componente, o processo de construção é relativamente lento, quando comparado aos métodos tradicionais de fabricação. Assim, a nomenclatura inicial não representava adequadamente o princípio da AM.

Dessa forma, a partir de 2009-2010, houve um esforço da comunidade científica na direção de melhor definir e caracterizar esse princípio de adição como um importante meio de fabricação. Assim, a denominação que melhor o descreve e que se consolidou na academia e na indústria (inclusive com normas técnicas – ver Seção 1.5) é a de **manufatura aditiva**. Observa-se, no entanto, que, com a popu-

larização de algumas tecnologias, o termo **impressão 3D** tem sido bastante adotado por usuários em geral e algumas empresas do setor. Acredita-se que isso se deva principalmente à facilidade de transmitir o conceito ou princípio fundamental dos processos de AM. Portanto, essas duas nomenclaturas são utilizadas como sinônimos neste livro. No entanto, cabe aqui a discussão contida na norma ISO/ASTM 52900:2015(E) [5] de que o termo impressão 3D vem sendo mais comumente aplicado em um contexto relativo aos equipamentos de menor custo e/ou capacidade geral. Fica, então, a sugestão ao leitor que leve em consideração o tipo de equipamento e o público-alvo na escolha do termo a ser empregado.

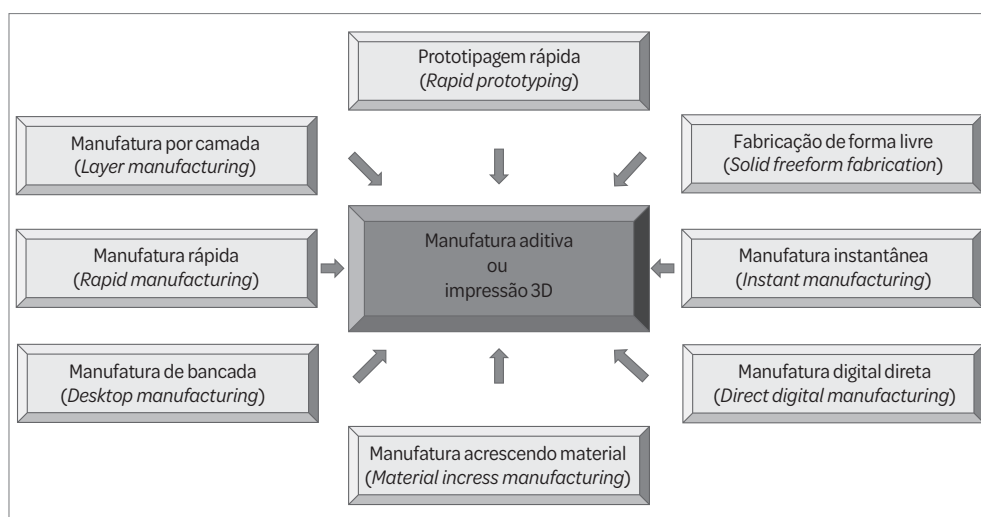


Figura 1.2 Algumas das principais variações iniciais da nomenclatura da área de AM.

1.4 HISTÓRICO

O conceito de construção de objetos físicos por meio de camadas não é uma ideia nova, remontando a aplicações bastante antigas, como a construção de pirâmides egípcias, com a sobreposição de blocos. Segundo Beaman *et al.* e Bourell *et al.* [3] [6], as raízes das tecnologias atuais de AM podem ser traçadas a partir de duas grandes áreas técnicas: a topografia e a fotoescultura, como explicado a seguir.

Na área da topografia, a primeira grande aplicação do método de construção por camadas deve-se a Blather [7], que, por volta de 1890, desenvolveu um método para a construção de moldes para mapas de relevo topográfico em três dimensões. O método consistia na construção de diversos discos de cera com o contorno topográfico (curvas de nível) das cartas topográficas, obtendo-se, dessa forma, a reprodução de superfícies tridimensionais. A Figura 1.3 ilustra o método de Blather.

Diversos refinamentos do método proposto por Blanthier foram desenvolvidos nos anos seguintes com outros materiais, como papel cartão, por Perera (1940), e placas transparentes, por Zang (1964) e Gaskin (1973), conforme citado em Beaman *et al.* [3].

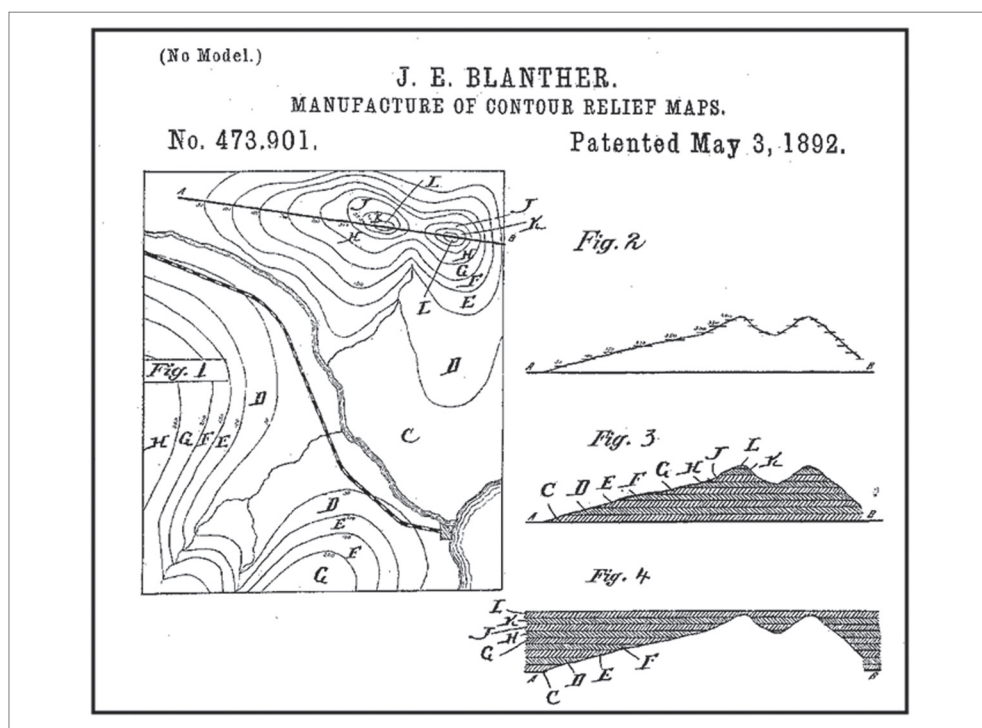


Figura 1.3 Método de Blanthier para a construção de mapas topográficos [7].

Em 1972, Matsubara [8], da Mitsubishi Motors, propôs um método de construção a partir de uma resina fotopolimerizável. Essa resina era coberta com partículas refratárias (por exemplo, pó de grafite ou areia) e curada a partir da emissão de uma fonte de luz coerente, no caso específico, uma lâmpada de vapor de mercúrio, a qual era seletivamente projetada, provocando o endurecimento de uma determinada região. As finas camadas formadas a partir do método proposto eram sobrepostas sequencialmente, constituindo-se, depois, em um modelo de fundição.

DiMatteo [9], em 1974, verificou que a técnica aditiva poderia ter grande utilidade na fabricação de superfícies de geometria complexa, difíceis de serem obtidas pelos métodos tradicionais de fabricação, conforme ilustrado na Figura 1.4. Em 1979, o Professor Takeo Nakagawa [10], da Universidade de Tóquio, utilizou-se das técnicas de construção por adição de camadas para fabricar moldes para injeção, usando técnicas de laminação para a produção de ferramentas de estampagem.

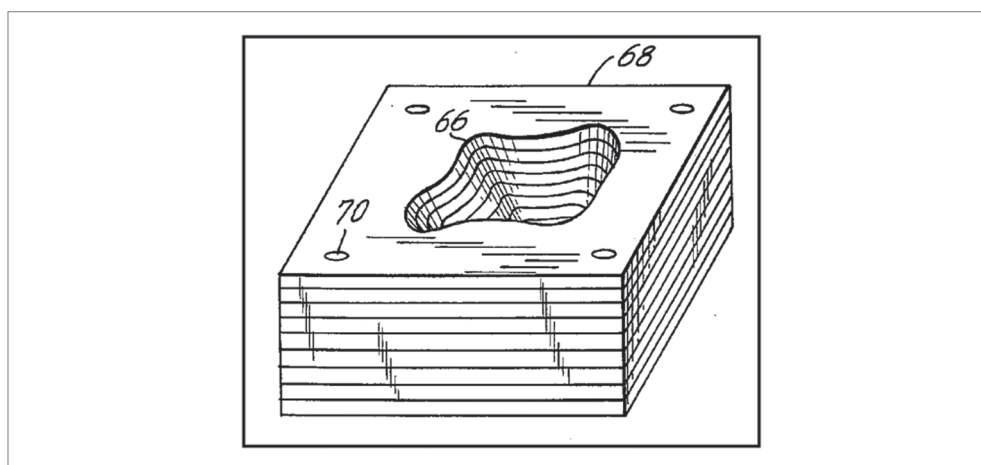


Figura 1.4 Molde fabricado com a técnica de adição de camadas por DiMatteo [9].

A segunda técnica, a fotoescultura, foi desenvolvida no século XIX com o intuito de criar réplicas exatas de objetos, incluindo-se formas humanas. Uma das realizações de sucesso dessa tecnologia foi desenvolvida pelo francês Frenchman François Willème (*apud* Bogart [11]) em 1860. Basicamente, sua técnica consistia em colocar, no centro de uma sala circular, um objeto e, em torno deste, posicionar 24 câmeras fotográficas, distribuídas uniformemente, acionando-as ao mesmo tempo. A silhueta de cada uma das fotos era utilizada depois por um artista para esculpir cada um dos 24 avos ($1/24$) da porção cilíndrica da figura, conforme citado por Beaman *et al.* [3].

Na primeira metade do século XX, mais especificamente em 1935, Morioka [12] desenvolveu, no Japão, um processo combinando técnicas de fotoescultura e topografia. O processo de Morioka consistia basicamente no uso de uma luz estruturada (luz negra) para criar linhas de contorno do objeto a ser reproduzido. As linhas eram, então, transferidas para folhas, as quais eram cortadas e empilhadas ou projetadas sobre o material a ser esculpido.

Munz (*apud* Beaman *et al.* [3]) propôs, em 1951, um sistema que possuía algumas das características da técnica atual de estereolitografia. A técnica de Munz consistia em um sistema com exposição seletiva de seções transversais de um objeto sendo digitalizado sobre uma emulsão fototransparente. Após a exposição de uma camada, um pistão era acionado, abaixando a plataforma e adicionando-se a quantidade apropriada de emulsão e do agente fixador para o início da produção da próxima camada, e assim sucessivamente. Ao final do processo, um cilindro transparente era formado com uma imagem do objeto no seu interior. Posteriormente, esse cilindro era esculpido manualmente ou atacado fotoquimicamente, obtendo-se o objeto

tridimensional. A Figura 1.5 ilustra a técnica de Munz para o desenvolvimento de uma imagem de um objeto tridimensional.

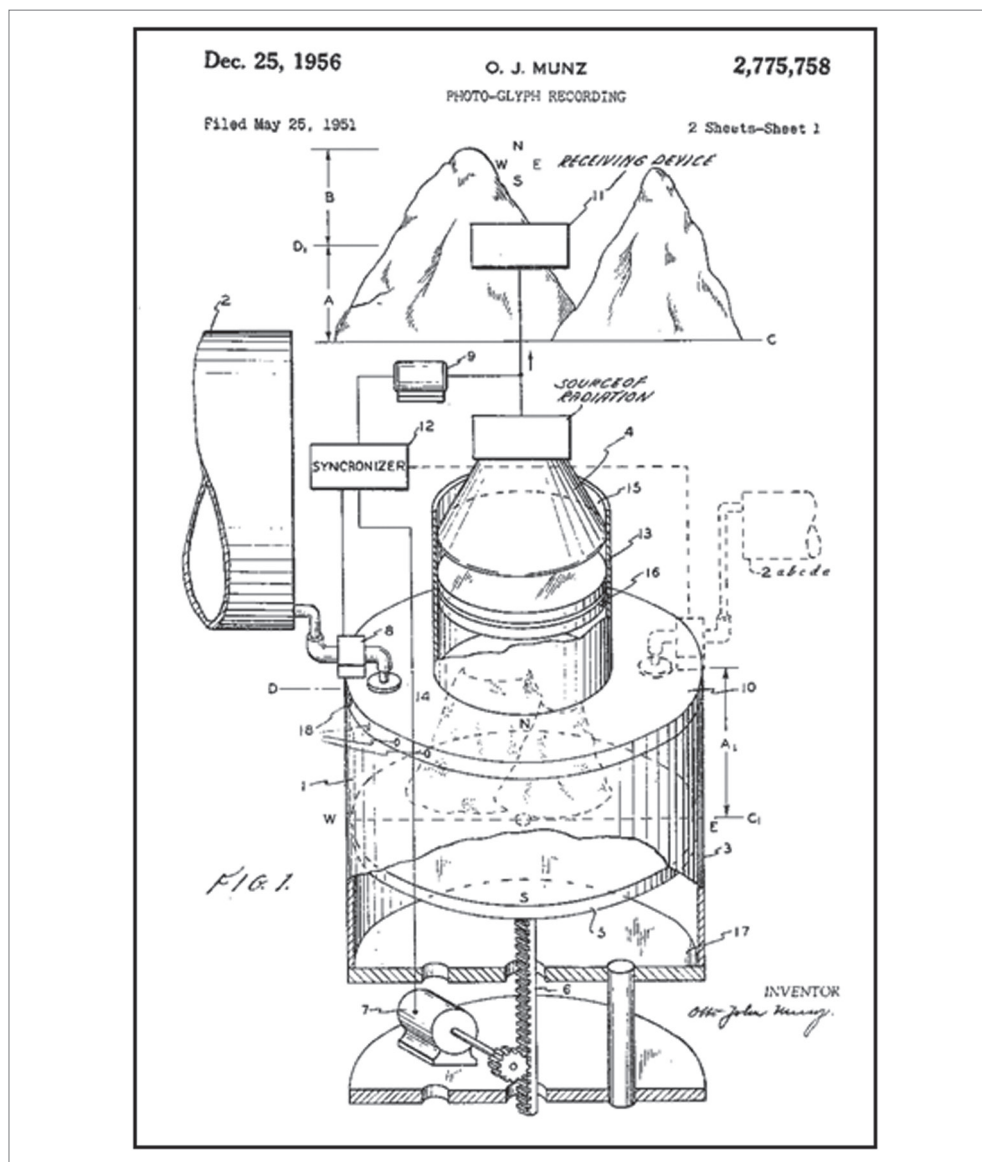


Figura 1.5 Processo de Munz (1956) para reprodução da imagem tridimensional de um objeto [13].

Em 1968, Swainson [14] propôs um processo para a fabricação direta de modelos de plástico pela polimerização seletiva de um polímero fotossensível com a interseção de dois feixes de *laser*. O processo de formação do objeto ocorre pelas reações

fotoquímicas ou pela degradação do polímero em virtude da soma das energias causadas pela interseção dos feixes de *laser*, conforme ilustrado na Figura 1.6.

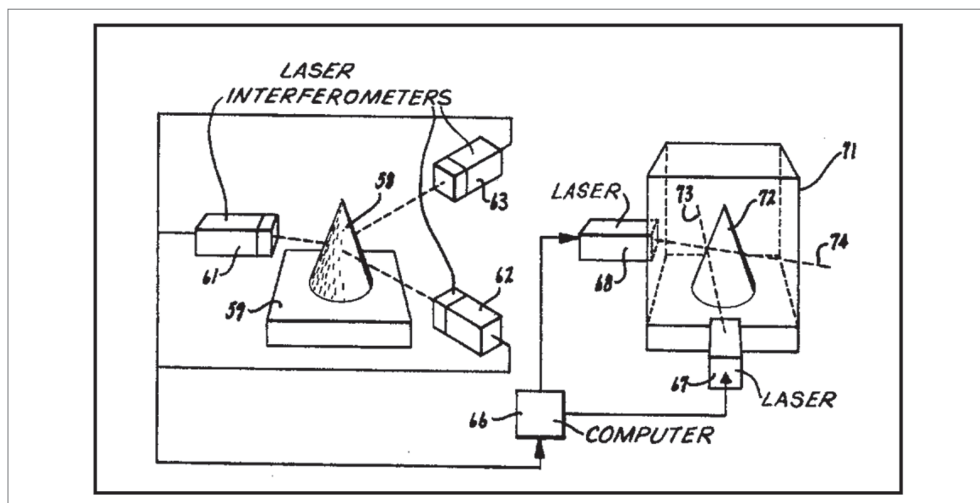


Figura 1.6 Processo de fotoescultura utilizando-se a interseção de *lasers* por Swainson [14].

Aproximando-se mais do conceito da AM atual, um processo utilizando pós de diversos materiais com a propriedade de serem fundidos pela exposição a feixes de *laser* ou plasma foi proposto por Ciraud [15] em 1972. Basicamente, as partículas eram aplicadas a uma matriz por gravidade, ação magnética ou eletrostática, sendo posteriormente fundidas pela ação de um ou mais feixes de *laser* ou plasma, formando camadas contínuas. A Figura 1.7 ilustra o processo proposto por Ciraud.

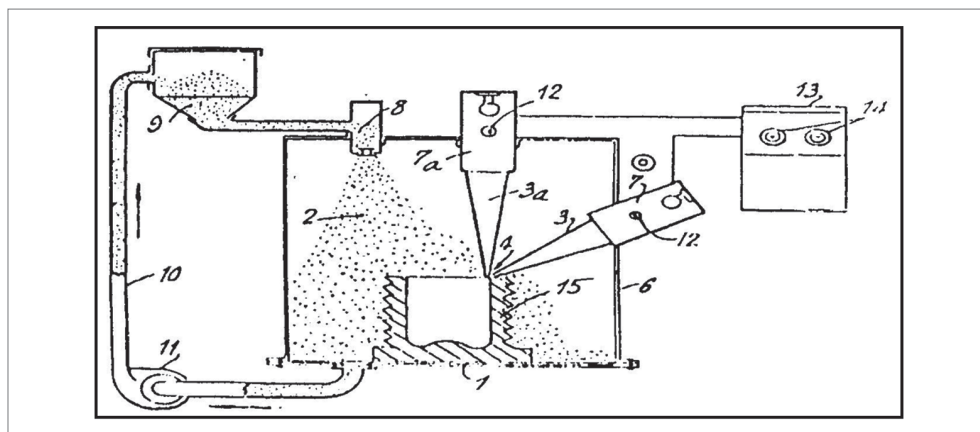


Figura 1.7 Processo de sinterização a *laser* proposto por Ciraud, em 1972 [15].

Outro fato importante em termos históricos foi a patente registrada em 1980 pelo inventor japonês Dr. Hideo Kodama, do Instituto Municipal de Pesquisa Industrial de Nagoya, sendo um dos primeiros a inventar a cura de resina por *laser* de feixe único em um “dispositivo de prototipagem rápida”. O sistema utilizava um *plotter* X-Y e fibra óptica para expor a resina a luz ultravioleta (UV). Infelizmente, ele abandonou o financiamento da patente logo após o depósito, alegando dificuldade de levantar recursos para desenvolver a ideia. Na sequência, em 1984, também no Japão, Yoji Marutani, do Instituto de Pesquisa Industrial da Província de Osaka (OPIRI), entrou com pedido de patente denominada método de moldagem óptica, que é muito similar à tecnologia hoje denominada estereolitografia. Essa patente foi licenciada para um grupo de empresas que formou a empresa CMET para desenvolver, fabricar e comercializar o sistema SOUP em 1990 [16].

Em 1982, também na área de fotopolimerização, Alan Herbert, da empresa 3M, propôs um sistema no qual um feixe de *laser* UV polimerizava uma camada de polímero fotossensível por meio de um sistema de prismas em um *plotter* X-Y [17]. No processo, um computador era utilizado para comandar os movimentos do feixe de *laser* no plano X-Y. Após o término da polimerização da camada, esta era abaixada aproximadamente em 1 mm, e nova quantidade de polímero líquido era adicionada para a construção da próxima camada. Infelizmente, a empresa decidiu não investir na proposta [16].

Outro caso em que não houve recurso e interesse por parte dos financiadores foi a patente de 1984 do trio francês Jean-Claude André, Olivier de Witte e Alain le Méhauté, que trabalhava para a empresa de tecnologia francesa Cilas Alcatel e para o Centro Nacional Francês de Pesquisa Científica (CNRS). A proposta era também um dispositivo na linha de cura de resina por *laser* para produzir peças complexas. Também em 1984, o inventor americano William E. Masters depositou uma patente de um sistema de manufatura automatizado por computador para fabricar objetos 3D por jateamento de material em várias direções, que é semelhante aos sistemas atuais de impressão 3D [18]. Ele abandonou a patente para investir em outras áreas.

Por fim, um marco na área de AM foi o registro da patente de Charles Hull em 1984 do sistema de estereolitografia, que empregava luz UV para curar uma resina fotossensível camada por camada para criar pequenas peças personalizadas [19]. Essa patente deu origem à empresa americana 3D Systems, responsável pelo primeiro equipamento comercial denominado SLA-1 (*stereolithography apparatus*), em 1987. Por ter levado a tecnologia da patente ao mercado com sucesso, Hull é muitas vezes chamado de “o pai” da impressão 3D.

Várias outras patentes, logo nos anos seguintes, também foram muito importantes para o setor, como a de sinterização seletiva a *laser* (*Selective Laser Sintering* – SLS) de Carl Deckard em 1986, a tecnologia de modelagem por fusão e deposição (*Fused Deposition Modeling* – FDM) de Scott Crump em 1989 e a 3D Printing (3DP) pelo MIT, também em 1989. Mais detalhes sobre essas e outras tecnologias similares podem ser encontrados nos Capítulos 5, 3 e 4, respectivamente.

Observa-se, então, que a origem das atuais técnicas de AM decorre de vários trabalhos de pesquisas, técnicas e processos desenvolvidos inicialmente na fotocultura e na topografia, e que convergiram para um princípio de fabricação de aplicação geral.

1.5 PRINCÍPIOS DE ADIÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE AM

Todas as tecnologias de AM são baseadas no princípio geral da adição de material em camadas, mas elas diferem quanto a tipo, forma e método de processamento do material, ou seja, no princípio de adição (deposição, materialização) das camadas. Uma proposta simples de classificar os processos de AM foi feita com base no estado ou forma inicial da matéria-prima utilizada na fabricação. Nessa linha, os processos eram classificados como baseados em líquido, sólido e pó [4]. No entanto, essa forma de agrupar não fornece nenhuma informação sobre o princípio específico da adição do material das diferentes tecnologias, ou seja, como o material é processado e os mecanismos de adição e aderência envolvidos.

As tecnologias de AM tornaram-se possíveis pela integração de processos tradicionais de manufatura (como metalurgia do pó, extrusão, soldagem etc.) com diversas outras tecnologias (como controle numérico computadorizado – CNC, sistemas de acionamento de alta precisão, sistemas de impressão a jato de tinta, *laser*, feixe de elétrons etc.). Adicionalmente, houve o desenvolvimento de materiais adequados a cada uma das rotas adotadas. Nesse sentido, vários processos empregando diferentes princípios e materiais foram e continuam sendo desenvolvidos para materializar os objetos.

Visando justamente utilizar os diferentes princípios como método de classificação das tecnologias de AM disponíveis, a norma ISO/ASTM 52900:2015(E) [5] propõe o enquadramento em sete categorias ou grupos, conforme descritos no Quadro 1.2. A Figura 1.8 apresenta, de forma esquemática e simplificada, essas diferentes categorias da AM. Importante frisar que tais categorias estão descritas individualmente nos Capítulos 2 a 8, assim como as tecnologias citadas no quadro.

Quadro 1.2 Classificação das tecnologias de AM de acordo com o princípio de adição do material [5]

Categorias da AM	Descrição do método/princípio de adição	Algumas tecnologias disponíveis
Fotopolimerização em cuba (<i>vat photopolymerization – VPP</i>).	Polímero fotossensível líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz (Capítulo 2).	Estereolitografia (<i>stereolithography – SL</i>), <i>continuous liquid interface production</i> (CLIP), <i>digital light processing</i> (DLP), tecnologia InvisionTEC, outros.
Extrusão de material (<i>material extrusion – MEX</i>).	Material é extrudado através de um bico ou orifício fino e é seletivamente depositado (Capítulo 3).	Modelagem por fusão e deposição (<i>fused deposition modeling – FDM</i>), <i>fused filament fabrication</i> (FFF), <i>direct ink write</i> (DIW), outros.
Jateamento de material (<i>material jetting – MJT</i>).	O material é jateado e depositado de forma seletiva em pequenas gotas (Capítulo 4).	PolyJet, impressão por múltiplos jatos (<i>MultiJet printing – MJP</i>), tecnologia da Solidscape, outros.
Jateamento de aglutinante (<i>binder jetting – BJT</i>).	Um agente aglutinante líquido é jateado para unir seletivamente partículas de material em um leito de pó (Capítulo 4).	Impressão colorida por jato (<i>ColorJet Printing – CJP</i>), tecnologia da VoxelJet, tecnologia da ExOne, outros.
Fusão em leito de pó (<i>powder bed fusion – PBF</i>).	Energia térmica funde seletivamente as partículas de material em um leito de pó (Capítulos 5 e 6).	Sinterização seletiva a laser (<i>selective laser sintering – SLS</i>), <i>high speed sintering</i> (HSS), sinterização direta de metal a laser (<i>direct metal laser sintering – DMLS</i>), fusão seletiva a laser (<i>selective laser melting – SLM</i>), fusão por feixe de elétrons (<i>electron beam melting – EBM</i>), <i>multi jet fusion</i> (MJF), outros.
Adição de lâminas (<i>sheet lamination – SHL</i>).	Lâminas de material são recortadas e unidas (coladas, soldadas, brasadas) para formar um objeto (Capítulo 7).	Manufatura laminar de objetos (<i>laminated object manufacturing – LOM</i>), <i>selective deposition lamination</i> (SDL), outros.
Deposição com energia direcionada (<i>directed energy deposition – DED</i>).	Energia térmica é empregada para fundir o material de adição (e o de base) à medida que este é depositado (Capítulos 7 e 8).	Forma final obtida com laser (<i>laser engineered net shaping – LENS</i>), deposição direta de metal (<i>direct metal deposition – DMD</i>), <i>3D laser cladding</i> , manufatura aditiva por deposição a arco (<i>wire arc additive manufacturing – WAAM</i>), outros.

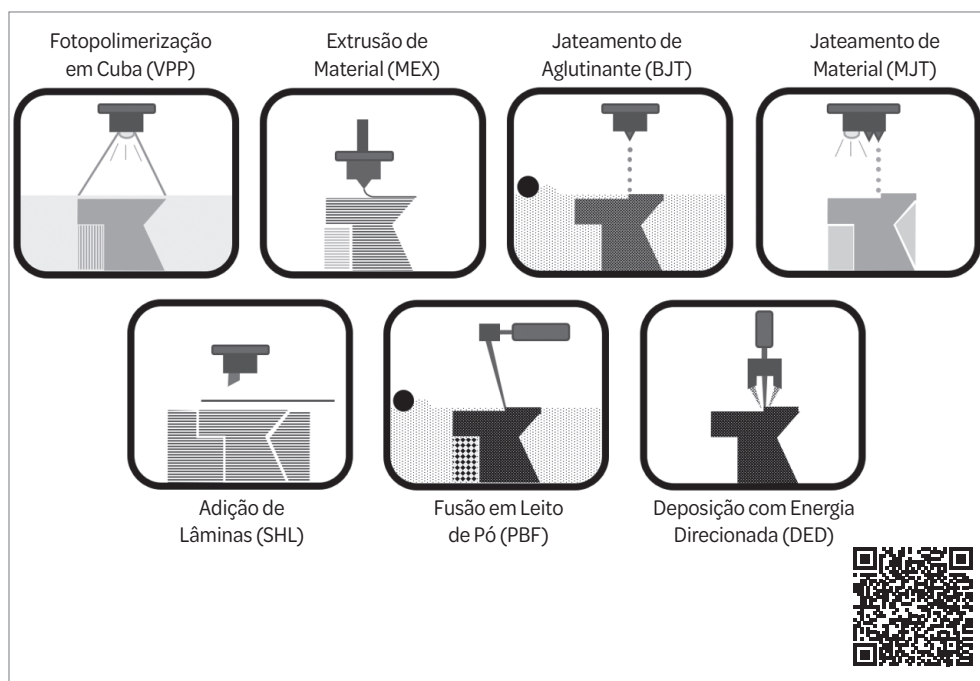


Figura 1.8 Ilustração das sete categorias da AM.

Outra forma de classificação da AM que ajuda a diferenciar as tecnologias e a entender a sua evolução em termos de velocidades de adição é a análise dimensional do princípio de processamento do material. A Figura 1.9 mostra que grande parte das tecnologias atuais processam o material de forma pontual (0D) e a camada é formada pela varredura desse princípio ao longo da seção transversal da peça. São exemplos as tecnologias MEX, VPP vetorial a *laser*, PBF a *laser*, DED e SHL. As tecnologias MJT e BJT, que geralmente utilizam um cabeçote de jateamento com um vetor (*array*) de furos, adicionam ou processam o material de forma linear (1D) e tendem a ser mais rápidas do que as anteriores. A camada de material pode ser também processada totalmente de uma única vez (2D), em tecnologias que utilizam projeção ou preparação seletiva da camada antes da exposição a uma fonte de energia. Nesse grupo, encontram-se as VPP de projeção (Capítulo 2) e as PBF por radiação infravermelha (Capítulo 5), com uma velocidade de processamento bem maior que as 0D e 1D. Por fim, recém-chegada e ainda com poucas opções no mercado, estão as VPP volumétricas (Capítulo 2), que processam todos os pontos da peça quase que simultaneamente. Estas vêm sendo denominadas AM volumétrica (3D) e o ganho de tempo é considerável, reduzindo o ciclo de impressão de horas para alguns minutos.

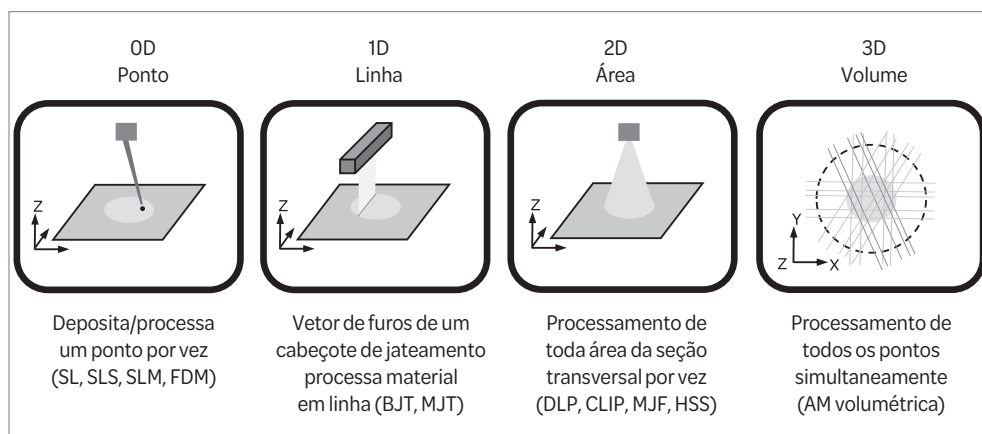


Figura 1.9 Classificação da AM pela dimensão do meio de processamento do material.

1.6 VANTAGENS E LIMITAÇÕES GERAIS DA AM

Quando comparado aos processos de fabricação tradicionais, em especial com a usinagem CNC, os processos de AM apresentam várias vantagens, mas também limitações. A seguir, são apresentados os pontos mais relevantes ao analisar o princípio de fabricação da AM. Outras vantagens gerais relativas às aplicações da AM (prototipagem no PDP, *design*, ferramental, fabricação final, saúde, bioimpressão e em áreas diversas) são apresentadas nos Capítulos 11 a 17.

Algumas das principais vantagens são:

- Grande liberdade geométrica oferecida ao projeto. A fabricação por AM praticamente independe da complexidade geométrica da peça. Geometrias normalmente impossíveis de serem fabricadas por outros processos (Quadro 1.1) podem ser obtidas por AM. Isso abre uma série de oportunidades em termos de projeto. Por exemplo, pode-se consolidar várias peças em uma só e, assim, reduzir o número de peças nas montagens, tem-se maior liberdade para criar projeto/*design* com formas livres (*freeform*), é possível ter um projeto com relação ótima entre peso e resistência por meio da otimização topológica ou do emprego de materiais celulares, é possível customizar o projeto para uma aplicação específica, entre outras características especiais. O Capítulo 14 mostra mais detalhes sobre essas potencialidades. Vale destacar também a vantagem na aplicação em ferramental (fabricação de moldes), com a obtenção de insertos com canais conformados que permitem reduzir o ciclo de processamento e melhorar a qualidade do moldado (ver mais detalhes no Capítulo 13).
- Pouco desperdício de material e maior eficiência energética. Na maioria das tecnologias de AM, o material gasto para fabricar um componente equivale aproxi-

madamente ao volume de material da peça. Isso depende da tecnologia empregada e é motivo de discussão nos capítulos específicos de cada classe de tecnologia.

- Fabricação sem ferramental (molde) ou dispositivo de fixação. A fabricação por AM não requer nenhum ferramental para dar forma à peça (*tool-less production*) e dispensa qualquer dispositivo específico, pois as peças são fixadas nas plataformas de construção por estruturas depositadas pela própria tecnologia. Este cenário é importante para organizar o fornecimento de peças de reposição, prevendo um baixo ou nenhum estoque e sem os custos de armazenagem, manutenção e *setup* de ferramental. Outro ponto a destacar é a flexibilidade em termos de *design* do produto quando não há amarração a um ferramental, ou seja, melhorias e ajustes no projeto são facilitados, pois podem ser implementados na produção imediatamente após aprovação.
- Processo em etapa única. O componente é fabricado em um único equipamento, numa única etapa e sem troca do meio de processamento do material durante a fabricação. No entanto, dependendo da tecnologia e da finalidade da peça, algumas etapas de pós-processamento podem ser necessárias. Adicionalmente, algumas tecnologias podem ser combinadas com outros processos, criando-se tecnologias híbridas. Mais detalhes estão disponíveis no Capítulo 10 e ao longo dos capítulos que descrevem cada processo.
- Planejamento de processo simplificado. Uma vez que o processista definiu a orientação, a posição, a escala e os parâmetros de processo, o *software* de planejamento de processo realiza, de forma automática, todos os cálculos para deposição de material, que envolvem principalmente a obtenção de trajetórias no plano 2D. Para as tecnologias que permitem trabalhar com camadas não planas, os cálculos das trajetórias se assemelham àqueles necessários à usinagem CNC.
- Passagem rápida do digital ao físico. A obtenção de uma peça ou de um pequeno lote é rápida quando comparada aos processos tradicionais. Isso porque é possível passar do CAD ao modelo físico em poucas horas, sendo assim importante tanto na obtenção de protótipos físicos quanto na produção de peças finais, dentro da lógica de estoque zero (*print on demand*). As grandes vantagens advindas da utilização da AM durante o PDP, permitindo uma utilização mais rápida e frequente de representações físicas do produto (por exemplo, *mock-up*, modelos volumétricos, vários tipos de protótipos), estão detalhadas nos Capítulos 11 e 12.
- Flexibilidade da produção. A AM permite uma mudança rápida dos componentes sendo produzidos, o que favorece a programação da produção estabelecendo lotes mais econômicos e ajustados às demandas, permitindo uma resposta rápida a elas. Como decorrência, tem-se menos estoques parados e os

custos associados a eles. Adicionalmente, pensando em escala global, há a possibilidade de reduzir custos de distribuição de peças, pois estas podem ser fabricadas próximos aos usuários finais.

- Potencial de variar material e/ou características e propriedades ao longo da peça. Algumas tecnologias permitem misturar materiais ou mudar suas características físicas (densidade, porosidade) e propriedades (resistência, dureza, flexibilidade etc.) durante o seu processamento, o que possibilita empregar o conceito de materiais com gradação funcional (*functionally graded materials* – FGM) na mesma peça. Isso abre novos campos de aplicações, até então impossíveis ou inimagináveis, sendo considerado um grande potencial disruptivo da AM para inovação (mais detalhes no Capítulo 14).

Algumas restrições ou deficiências atuais da AM como processo de fabricação são [4], [20]:

- Processo lento. Considerando que a fabricação é realizada pela adição de camadas finas de material, a AM é lenta quando comparada aos processos tradicionais. No entanto, para aplicações de elevado valor agregado, altamente customizadas e de baixa produção, esses processos têm, cada vez mais, ocupado um espaço como método de produção final (ver Capítulo 14).
- Anisotropia do material. Em geral, as propriedades dos materiais obtidos por AM não são as mesmas dos materiais processados de forma tradicional. Isso decorre do fato de a fabricação ser por adição de camadas, portanto, o material pode adquirir propriedades anisotrópicas. Isso implica em algumas restrições a serem consideradas no projeto ou até mesmo limitações na aplicação das peças produzidas.
- Limitação de materiais. A grande maioria das tecnologias de AM possui limitação quanto aos materiais que podem ser empregados. Em muitos casos, somente estão disponíveis alguns materiais desenvolvidos especificamente para cada tecnologia, que podem ainda ser ou não proprietários (específico para um dado equipamento). Isso se deve ao fato de que nem todos são controláveis dentro do princípio de adição em questão. Geralmente, os materiais disponíveis possuem propriedades semelhantes às dos convencionais, mas não iguais, o que pode limitar o emprego da tecnologia para certas aplicações.
- Baixa precisão e acabamento superficial. A precisão e o acabamento superficial das peças impressas são inferiores ao que se obtém por alguns processos convencionais, como a usinagem CNC. Vários fatores contribuem para isso, mas grande parte decorre do princípio básico de adição de camadas, que dá origem

aos degraus de escada nas superfícies de regiões inclinadas e curvas (ver Figura 1.1 – peça fabricada). Os desvios geométricos e outros efeitos inerentes da AM são detalhados no Capítulo 10. Geralmente, esses problemas podem ser sanados na etapa de pós-processamento.

- **Custo elevado.** O custo das tecnologias de AM de porte industrial ainda é muito elevado, principalmente pela aquisição e operação do equipamento, incluindo materiais e insumos dos processos. Outro ponto sobre o custo é que ele praticamente não reduz com o aumento da escala de produção, o que normalmente se observa nos processos convencionais. No entanto, o advento das impressoras 3D de baixo custo tem facilitado muito o seu emprego em várias áreas, a ponto de não haver hoje, por exemplo, justificativa para não utilizar protótipo físico em um PDP (ver Capítulo 11). Já para os casos de aplicação na produção de componentes finais (em especial os metálicos), a AM é justificada mais facilmente naqueles de alto valor agregado (mais detalhes no Capítulo 14).
- **Pós-processamento.** Todas as tecnologias de AM do mercado requerem algum tipo de pós-processamento, o qual pode variar de uma simples limpeza com remoção de suporte até etapas mais custosas e demoradas, como tratamento térmico, usinagem para melhorar o acabamento e a precisão de algumas regiões. O pós-processamento varia muito com a tecnologia e a finalidade da peça fabricada (mais detalhes nas descrições das tecnologias, Capítulos 2 a 8).
- **Distorções e empenamento.** Em virtude da natureza térmica/química/metalúrgica do princípio de adição e do material utilizado em alguns processos, tensões internas podem ser geradas causando problemas como distorções e empenamento do componente. Isso é mais crítico para alguns materiais específicos, podendo chegar ao ponto de ser inviável o seu processamento. Com a evolução das tecnologias de AM, esses problemas vêm sendo minimizados cada vez mais.
- **Restrições quanto a tamanho da peça.** Apesar de algumas tecnologias permitirem peças grande (na escala de metro), a maioria dos processos de mercado possui limitação quanto ao tamanho da plataforma que permite um controle aceitável (dimensional, distorções etc.).

1.7 VISÃO GERAL DAS APLICAÇÕES

Conforme comentado anteriormente, as primeiras tecnologias de AM se restringiam à obtenção de protótipos para os estágios iniciais do PDP, com menos exigências em termos de tipos de materiais, precisão dimensional e desempenho (função). Com o aumento da percepção do potencial oferecido pela AM, o campo de aplicações foi sendo ampliado. Em fases mais avançadas do PDP, cresce a necessidade de utilizar um número maior de protótipos com características funcionais, para uso

dentro ou fora da empresa (testes de campo). Esses protótipos devem ser fabricados com o mesmo material da peça final (ou o mais próximo possível) e, em alguns casos, com o mesmo processo de fabricação que será empregado para a produção final. Nesses casos, a AM também pode auxiliar, de forma indireta, por meio da obtenção de ferramental (tipo moldes-protótipo), sendo que esse tipo de aplicação vem sendo buscado desde as primeiras gerações de equipamentos. Em particular, algumas técnicas de AM foram desenvolvidas e aperfeiçoadas para a produção de vários tipos de ferramentais (por exemplo, modelos-mestre e de sacrifícios, moldes-protótipo etc.) que são explicados no Capítulo 13. Mais recentemente, tem crescido o interesse de utilizar as tecnologias de AM como processos de fabricação final (ver Capítulo 14), o que tem exigido mais dos processos em termos de melhoria geral da qualidade dos componentes, novos materiais e funcionalidade.

Em resposta a essa ampliação das aplicações e as novas exigências impostas, as tecnologias de AM evoluíram, e novos processos foram criados. Observa-se, então, que a aplicação da AM, que se iniciou no projeto, foi estendida primeiramente para engenharia, análise e planejamento e, depois, para etapas de manufatura e ferramental [4]. A Figura 1.10 apresenta um retrato de 2018 de algumas aplicações da AM (*hype cycle* da concepção à maturidade), feito pela empresa Gartner [21], onde coloca-se que estas estão em estágio distintos. Destacam-se algumas aplicações que possuíam elevadas expectativas na época, como a impressão 4D (ver Capítulo 14), impressão de medicamentos e de tecidos, que evoluíram bastante, mas ainda carecem atingir estágios maiores de desenvolvimento.

Esse gráfico pode não refletir o quadro atual, como pode ser percebido pelos casos relatados ao longo deste livro, mas ele pode ser analisado pela óptica da evolução da percepção e expectativa de cada usuário quanto à utilização da AM, ou seja, pode ajudar a identificar em que estágio desse ciclo cada um se encontra. Não é difícil imaginar que, ao entrar em contato pela primeira vez com a AM (pela mídia, por exemplo), as expectativas podem ser demasiadamente elevadas, a ponto de achar que tudo será impresso no futuro. Ao iniciar um contato mais efetivo com as tecnologias e compará-las com os métodos tradicionais, é possível haver uma certa desilusão em vários aspectos (como os apresentados na Seção 1.6). É nessa fase em que há o risco de negligenciar ou até abandonar a tecnologia. No entanto, ao persistir e entender melhor as características e o real potencial das várias tecnologias, aos poucos, o usuário começará a identificar exatamente em que casos elas trarão benefícios para as suas atividades profissionais e cotidianas. A velocidade com que cada um adquire esse entendimento vai variar muito de caso a caso, e também com a aplicação almejada. Dessa forma, não é difícil concluir que é mais rápido identi-

ficar o potencial da AM como ferramenta de apoio à prototipagem do que o seu emprego para ferramental ou como processo de fabricação final.

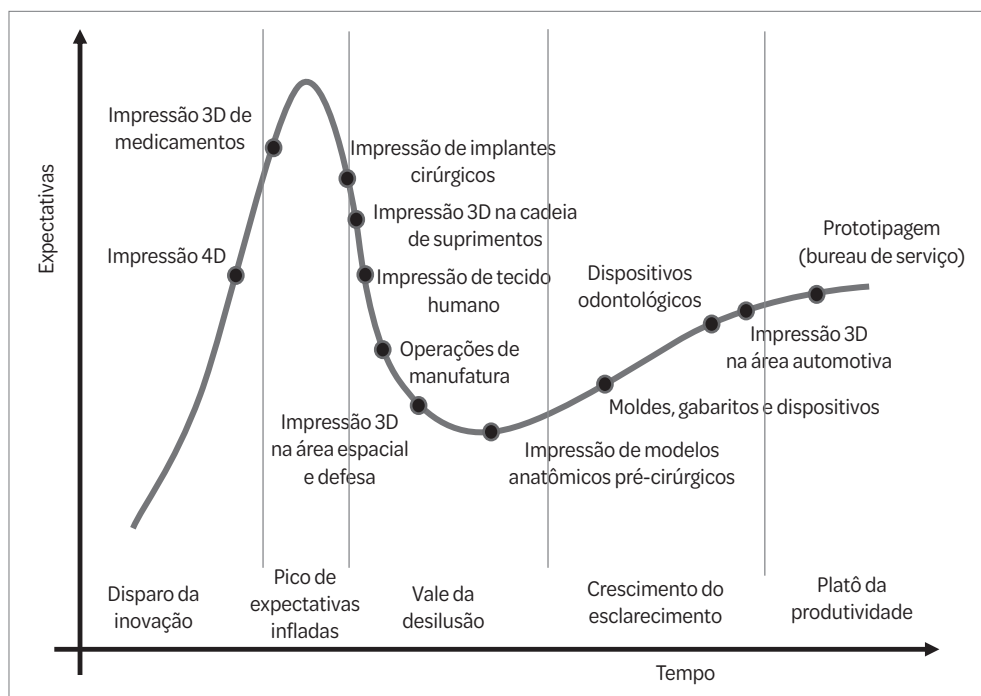


Figura 1.10 Hype cycle da AM.

Fonte: adaptada de [21].

Para ter uma ideia mais atualizada de como a AM está sendo utilizada de uma forma geral, um levantamento recente (publicado em 2023) realizado com 241 empresas prestadoras de serviço de impressão e fabricantes de máquinas reportou a distribuição apresentada na Figura 1.11 [16]. Ressalta-se que 37,1%, mais de um terço, das aplicações ainda está concentrada em prototipagem (protótipos funcionais e modelos visuais e de apresentação), mas as aplicações em manufatura de peças finais já chegam a 30,5%. Já as aplicações em ferramental continuam relevantes e chegam a 15,7% (modelos e moldes-protótipo de polímero, machos e moldes de areia, modelos para fundição de metal, componentes para gabaritos, dispositivos, guias etc.).

Vários setores estão se beneficiando do uso das tecnologias de AM, em especial o aeroespacial, automobilístico, saúde (medicina e odontologia), bioengenharia, linha branca (utensílios domésticos), eletrônicos, joalheria, artes, engenharia civil, arquitetura etc. Observa-se ainda que, cada vez mais, novos campos de aplicação estão surgindo, à medida que aumenta o número de profissionais e empresas que

tomam conhecimento dessas tecnologias. Alguns exemplos dessas aplicações são apresentados nos capítulos que descrevem as principais tecnologias de AM e nos de aplicações específicas (Capítulos 11 a 14). A área da saúde tem sido uma das pioneiras em empregar a AM em vários procedimentos e produtos específicos (ver Capítulo 15) e, mais recentemente, com os desenvolvimentos da bioimpressão 3D (ver Capítulo 16).

Adicionalmente, é importante ressaltar que, com a popularização das impressoras 3D de baixo custo, um campo de aplicação mais popular e ligado aos inventores tem crescido, principalmente impulsionado pela cultura *maker* e espaços *makers* espalhados em várias instituições (ver Capítulo 12). Nesse universo, as aplicações são as mais variadas possíveis, em todas as áreas, envolvendo produtos customizados, de entretenimento (brinquedos em geral), utensílios, dispositivos etc. Ainda, setores como os de alimentos e confeitarias têm utilizado tecnologias de impressão 3D para produzir comidas e doces das mais variadas formas, agregando valor aos seus produtos [22]. Esta e demais aplicações em diversas áreas são abordadas no Capítulo 17.

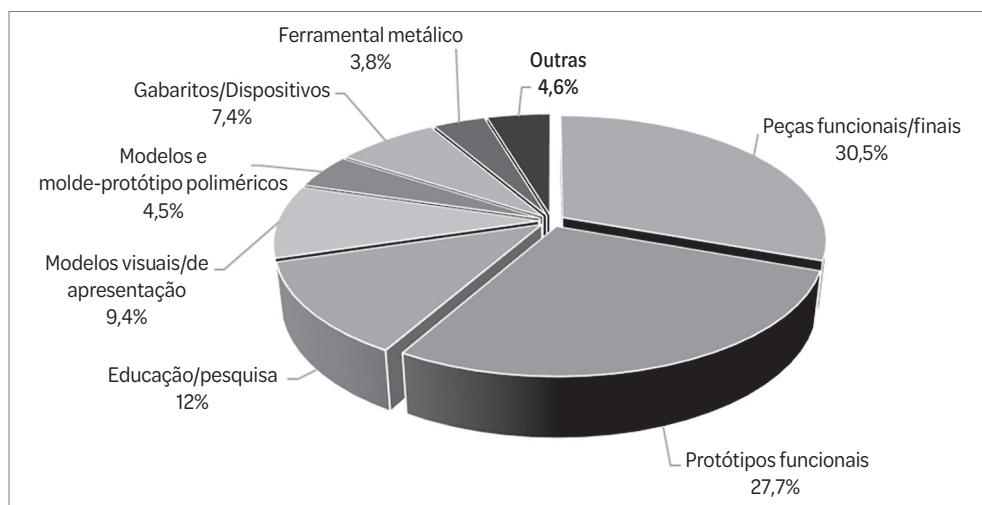


Figura 1.11 Áreas de aplicação da AM [16].

Por fim, destaca-se que a AM tem sido apontada como um dos pilares da Indústria 4.0, considerada por muitos autores como a Quarta Revolução Industrial [23]-[25] (Figura 1.12). O termo Indústria 4.0 foi criado em 2011 na Alemanha por meio de uma parceria do governo federal com universidades e empresas privadas, com o objetivo de criar um programa estratégico para o desenvolvimento de sistemas avançados de produção, visando ao aumento de produtividade e à eficiência dos meios produtivos [23].

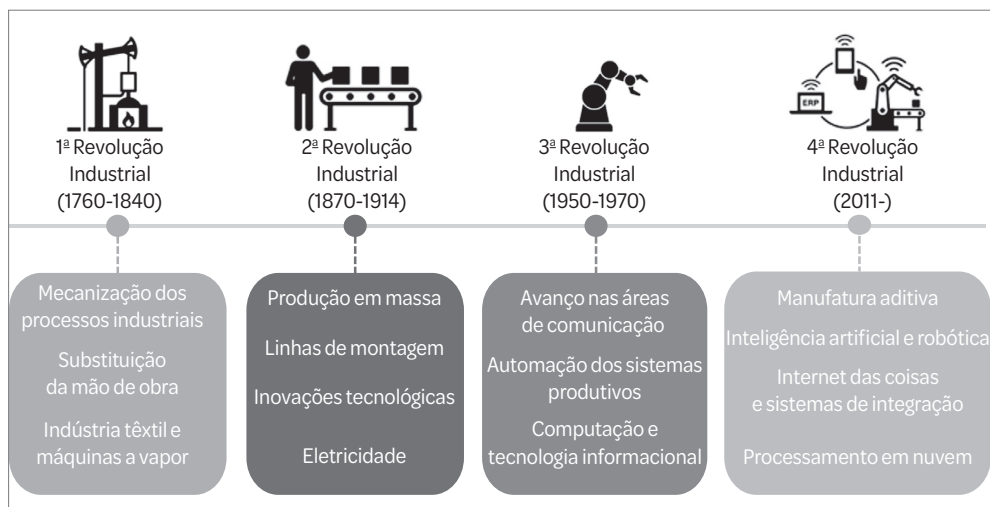


Figura 1.12 Desenvolvimento industrial ao longo do tempo [25].

De modo geral, os objetivos principais da Indústria 4.0 visam ao aumento de qualidade, produtividade e flexibilidade do modo com que os produtos são comercializados, produzidos e entregues aos consumidores, permitindo que, de uma forma sustentável, eles possam ser customizados, atendendo a necessidades especiais de cada indivíduo e/ou empresas [23], [25]. Para que isso seja possível, novos sistemas e conceitos têm sido estudados e desenvolvidos nos últimos anos, permitindo altos níveis de adaptabilidade das linhas de produção. Dentre essas tecnologias, sistemas e pilares, encontram-se, além da AM, inteligência artificial, internet das coisas (incluindo o processamento em nuvem), criptografia (incluindo *blockchain*) e robótica colaborativa. Nesse ambiente, algumas tecnologias de AM se destacam por possibilitarem a produção de maneira rápida de produtos personalizados, muitas vezes complexos, permitindo o que tem sido chamado de “customização em massa”, reduzindo a necessidade de grandes estoques físicos, uma vez que os produtos podem ser armazenados digitalmente e fabricados somente quando necessários [23].

1.8 NORMATIZAÇÃO

Outro indicativo de que a AM já está consolidada como um importante princípio de fabricação é a quantidade de normas internacionais que surgiram e estão sendo definidas na área. A *American Society for Testing and Materials* (ASTM International) estabeleceu em 2009 um comitê técnico internacional, chamado F42, para tratar de tecnologias de AM. Atualmente, esse comitê possui mais de 1.150 membros em 39 países, divididos em vários subcomitês, entre eles os que abordam: métodos de teste, projeto, materiais e processos, saúde ambiental e segurança, aplicações,

dados e terminologias. A *International Organization for Standardization* (ISO) montou também o comitê técnico 261 (ISO/TC 261) no tema AM em 2011 e estabeleceu parceria técnica com a ASTM para o desenvolvimento conjunto de normas técnicas. Desde então, a ISO atua com sete grupos de trabalho em temas bem semelhantes aos dos subcomitês da ASTM. Em janeiro de 2023, a ASTM, em parceria com a ISO, já possuía 43 normas publicadas relativas a AM e mais de 70 trabalhos em andamento, relativos a revisões e elaborações de novas normas [16].

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem realizado esforço em adaptar as principais normas ISO/ASTM para o português e já possui mais de dez normas publicadas por meio do ABNT/CEE-261 – Comissão de Estudo Especial de Manufatura Aditiva.

1.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo introduziu o conceito da manufatura aditiva (AM) ou impressão 3D como um princípio de fabricação baseado na adição de camadas sucessivas de material. Um breve relato histórico do surgimento das tecnologias foi apresentado e as diversas tecnologias existentes foram agrupadas de acordo com o princípio de processamento do material empregado (mecanismo de adição), com base na norma ISO/ASTM 52900:2015(E).

O aparecimento da AM vem sendo considerado um marco em termos de tecnologias de manufatura e, nesse sentido, uma ideia geral das vantagens e limitações da AM como princípio de fabricação foi apresentada. No entanto, para melhor assimilá-las e entender seu grande impacto em vários setores, recomenda-se entrar nos vários capítulos deste livro.

Com o aumento das exigências nas várias áreas de aplicação da AM, observa-se que existe ainda muito espaço para novos desenvolvimentos. Isso tem gerado um cenário de grandes oportunidades de pesquisas, tanto em materiais como em processos e aplicações, onde o limite passa ser a criatividade.

REFERÊNCIAS

- [1] Editor, The third industrial revolution (Manufacturing). *The Economist*, Apr. 21, 2012. Disponível em: <http://www.economist.com/node/21553017>. Acesso em: 31 out. 2015.
- [2] J. P. Kruth, Material increment manufacturing by rapid prototyping techniques. *Annals of the CIRP*, v. 40, n. 2, p. 603-614, 1991.
- [3] J. J. Beaman, H. L. Marcus, D. L. Bourell, J. W. Barlow, R. H. Crawford, *Solid freeform fabrication: a new direction in manufacturing*. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1997.

- [4] C. K. Chua, K. F. Leong, C. S. Lim, *Rapid prototyping: principles and applications*. 3rd ed. Singapore: Manufacturing World Scientific Pub Co, 2010.
- [5] ISO/ASTM International, ISO/ASTM 52900: 2015(E) Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles - Terminology. *ISO/ASTM International*, 2015. Disponível em: <http://www.ansi.org>.
- [6] D. L. Bourell, J. J. Beaman, M. C. Leu, D. W. Rosen, A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing looking back and looking ahead. In: *US – TURKEY Workshop On Rapid Technologies*, p. 5-11, 2009.
- [7] J. E. Blanner, Manufacture of contour relief maps. 473,901, 1892. Disponível em: www.uspto.gov. Acesso em: 5 nov. 2022.
- [8] K. Matsubara, Molding method of casting using photocurable substance. Japanese Kokai Patent Application. *Sho*, 51[1976]-10813, 1974.
- [9] P. L. DiMatteo, Method of generating and constructing three-dimensional bodies, Patente 3,932,923, 1976. Disponível em: www.uspto.gov. Acesso em: 5 nov. 2022.
- [10] T. Nakagawa, Blanking tool by stacked bainite steel plates. *Press Technique*, p. 93-101, 1979.
- [11] M. Bogart, In art the ends don't always justify means. *Smithsonian*, v. 10, p. 104-110, 1979.
- [12] I. Morioka, Process for manufacturing a relief by the aid of photography. Patente 2,015,457, 1935. Disponível em: www.uspto.gov. Acesso em: 5 nov. 2022.
- [13] O. J. Munz, Photo-glyph recording. Patente 2,775,758, 1956. Disponível em: www.uspto.gov. Acesso em: 5 nov. 2022.
- [14] W. K. Swainson, Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product. Patente 4,041,476, 1977. Disponível em: www.uspto.gov. Acesso em: 5 nov. 2022.
- [15] P. A. Ciraud, Process and device for the manufacture of any objects desired from any meltable material. Patente 2263777, 1972.
- [16] I. Campbell, O. Diegel, R. Huff, J. Kowen, T. Wohlers, *Wholers Report 2023 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry*. Washington, DC, 2023.
- [17] A. J. Herbert, Solid object generation. *Journal of Applied Photographic Engineering*, v. 8, n. 4, p. 185-188, 1982.
- [18] W. E. Masters, Computer automated manufacturing process and system. Patente 4,665,492, 1987. Disponível em: www.uspto.gov. Acesso em: 5 nov. 2022.
- [19] C. W. Hull, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Patente 4,575,330, 1986. Disponível em: www.uspto.gov. Acesso em: 5 nov. 2022.
- [20] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive manufacturing technologies – 3d printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer, 2015.

- [21] Gartner, Hype cycle for 3d printing, 2019. Disponível em: <https://www.gartner.com/en/documents/3947508-hype-cycle-for-3d-printing-2019>. Acesso em: 9 nov. 2022.
- [22] V. Carlota, A guide to 3D Printed Food – revolution in the kitchen? *3Dnatives*. Disponível em: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-food-a-new-revolution-in-cooking/>. Acesso em: 7 nov. 2022.
- [23] M. Khorasani *et al.*, A review of Industry 4.0 and additive manufacturing synergy. *Rapid Prototyping Journal*, v. 28, n. 8, p. 1462-1475, 2022.
- [24] S. Mittal, M. A. Khan, D. Romero, T. Wuest, Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, v. 233, n. 5, p. 1342-1361, 2019.
- [25] A. C. Guastaldi *et al.*, *Bioimpressão 3D no contexto da Indústria 4.0 aplicada à saúde*. EDUFSCAR, 2021.

CAPÍTULO 2

Fotopolimerização em cuba

Carlos Henrique Ahrens

2.1 INTRODUÇÃO

Os processos de manufatura aditiva (*additive manufacturing* – AM) por fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization* – VPP) baseiam-se na construção, a partir de resinas poliméricas em estado líquido, de objetos solidificados por meio da irradiação de uma fonte de luz ultravioleta (UV) ou visível. A incidência da luz fornece a energia capaz de iniciar uma reação química na resina fotopolimérica líquida, permitindo a sua solidificação em uma cuba ou reservatório (bandeja). Essa reação de fotopolimerização, denominada reação de cura, decorre da presença de agentes químicos fotoiniciadores contidos na composição da resina fotocurável, que dão início à reação após sofrerem excitação eletrônica pela absorção da luz incidente [1].

Como o processo ocorre em meio líquido, o que permite a utilização de espessuras de camadas micrométricas, atribui-se a ele a fabricação de peças com elevada precisão dimensional e excelente acabamento superficial. O processo de VPP foi o primeiro a ser utilizado por um equipamento comercial de AM, o que evidencia sua importância no contexto das tecnologias de impressão 3D. Fotopolímeros sensíveis

à luz UV também são usados em alguns equipamentos com base no princípio de jateamento de material ou de aglutinante, assunto que é apresentado no Capítulo 4.

Este capítulo tem por objetivo apresentar ao leitor uma visão geral das principais tecnologias por VPP, dividindo-as conforme o princípio básico de fabricação empregado no equipamento de AM. Nesse sentido, são apresentadas as tecnologias baseadas em fotopolimerização por escaneamento vetorial e por projeção de imagens. Em função da possibilidade única da técnica de fabricar objetos em escala micrométrica e nanométrica, a tecnologia de microestereolitografia (μ SL), designada como litografia de dois fótons (*two-photon lithography* – TPL) é também abordada. Em decorrência da importância que vem sendo dada ao termo manufatura aditiva volumétrica (*volumetric additive manufacturing* – VAM), a recente tecnologia de litografia axial computadorizada (*computed axial lithography* – CAL) é brevemente apresentada. Além de descrever o funcionamento básico de cada processo, são apresentados aspectos relativos aos principais parâmetros de fabricação e aos tipos de materiais utilizados nessa tecnologia. Uma abordagem sobre aplicações, potencialidades e limitações desse processo é apresentada ao final do capítulo.

2.2 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS E PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FABRICAÇÃO

O primeiro equipamento de AM baseado no processo de fotopolimerização surgiu comercialmente na década de 1980. Experimentos desenvolvidos por Charles W. Hull mostraram ser possível curar resinas sensíveis à irradiação UV a partir de sua exposição à luz emitida por uma fonte de raios *laser* [2]. A partir dessa descoberta, foi patenteado o primeiro equipamento de AM, focado inicialmente em atender à fabricação de protótipos, sob a designação estereolitografia [3] [4].

Desde que surgiu no mercado, são vários os fabricantes de equipamentos de AM que oferecem soluções com base na fotopolimerização em cuba. O primeiro equipamento foi comercializado pela empresa estadunidense 3D Systems, fundada por Charles W. Hull e considerada até hoje uma das empresas líderes de mercado no segmento de AM.

Equipamentos de AM que utilizam fotopolímeros em estado líquido ou resinas fotocuráveis podem ser agrupados em dois tipos principais: (a) baseados em escaneamento vetorial, em que a irradiação de energia é direcionada pontualmente para uma região da camada a ser curada; e (b) baseados em projeção de imagens, em que a energia é direcionada em toda a extensão de uma camada da peça a ser construída.

Independentemente da tecnologia empregada (escaneamento vetorial ou projeção de imagens), os equipamentos de VPP se diferenciam também em função do sentido de construção das peças (sobreposição das camadas no eixo Z). Existem

equipamentos que constroem as peças movimentando a plataforma de construção “de cima para baixo”, e outros o fazem “de baixo para cima”, variações estas detalhadas nas próximas seções.

O Quadro 2.1 apresenta algumas das principais empresas que comercializam equipamentos de VPP, evidenciando o princípio de fabricação empregado nos equipamentos. Cabe salientar que algumas empresas comercializam um único modelo, enquanto outras oferecem ao mercado equipamentos com diferenças em tamanhos (dimensões máximas de fabricação) e capacidades de processamento.

Quadro 2.1 Exemplos de fabricantes de equipamentos de VPP

Empresa	Endereço na internet	Equipamentos (exemplos)	Princípio de fabricação
3D Systems	https://br.3dsystems.com/	SLA750 series ProX950 Figure 4	Escaneamento vetorial Escaneamento vetorial Projeção de imagens
EnvisionTEC	https://etec.desktopmetal.com/	ETEC Xtreme	Projeção de imagens
Formlabs	https://formlabs.com/	Form 3 series	Escaneamento vetorial
Carbon	https://www.carbon3d.com/	Carbon M3 e L1	Projeção de imagens
Gizmo	https://www.gizmo3dprinters.com.au/	Gizi series	Projeção de imagens
Anycubic	https://www.anycubic.com/	Anycubic DLP Anycubic Photon	Projeção de imagens
Creality	https://www.creality.com/	Halot-one series	Projeção de imagens
Lumi Industries	https://www.lumiindustries.com/	LumiFold TB LumiCube	Projeção de imagens

Um detalhamento dessas tecnologias, dos materiais disponibilizados e dos parâmetros de processo empregados é apresentado nos itens a seguir.

2.3 FOTOPOLIMERIZAÇÃO POR ESCANEAMENTO VETORIAL

Como já mencionado, nesse grupo de processos, o escaneamento vetorial é realizado predominantemente por uma fonte de energia *laser*. Outras fontes, como feixe de elétrons ou plasma, também podem ser utilizadas *a priori*. Todos os processos baseados em escaneamento vetorial têm como base o processo de estereolitografia (*stereolithography* – SL).

2.3.1 Estereolitografia

Nesse processo, patenteado pela empresa 3D Systems, a resina fotocurável é inserida em uma cuba que contém uma plataforma mergulhada, a qual se desloca para baixo conforme as camadas são construídas, como mostra a Figura 2.1. O feixe do

laser é movimentado através de um conjunto óptico que reproduz a geometria 2D (direções X e Y) obtida no fatiamento e cálculo do preenchimento a partir da peça representada no sistema de projeto auxiliado por computador (*computer-aided design* – CAD). O sistema de varredura move o feixe de *laser* sobre a camada correspondente na superfície da cuba com a resina fotocurável. Quando exposta ao feixe de *laser*, a resina polimeriza, mudando do estado líquido para sólido, gerando uma camada da peça em construção. Em seguida, a plataforma de construção desce (direção Z) um valor correspondente à próxima camada a ser construída, recobrimdo com nova resina a camada anteriormente solidificada. O procedimento de movimentação do *laser* é repetido para esta nova camada, que, então, adere à camada anterior, e assim sucessivamente; o processo se repete até que a peça seja construída por completo. Ao final do processo, a plataforma de construção com a peça aderida a ela sobe verticalmente no eixo Z até ficar totalmente não submersa na resina líquida presente na cuba, para que a resina líquida não curada, mas ainda em contato com a superfície da peça fabricada, possa ser escoada, por ação da gravidade, em direção à cuba. Posteriormente, a peça é removida da plataforma de construção e levada para um forno UV, onde a cura total da resina da peça é concluída. Trata-se, portanto, de uma tecnologia de processamento 0D em que o material é processado pontualmente, como descrito na Figura 1.9 do Capítulo 1.

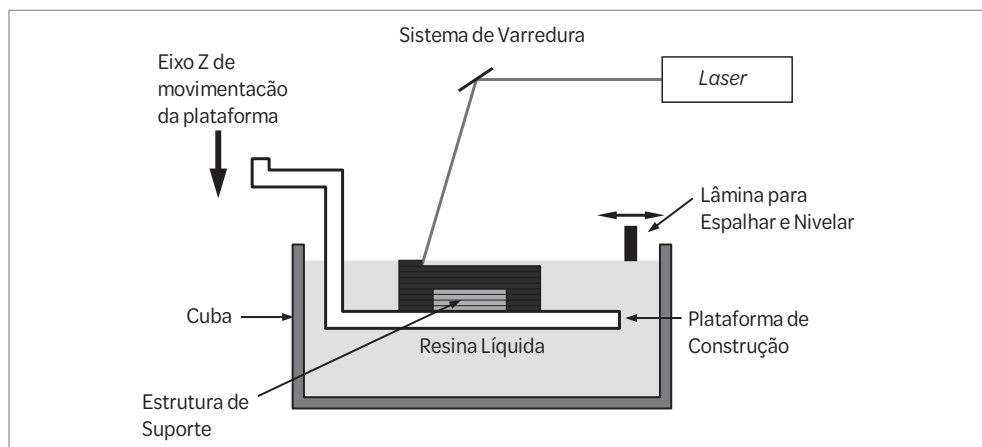


Figura 2.1 Princípio do processo SL [5].

Nessa tecnologia, peças que contenham em sua geometria partes desconectadas ou em balanço requerem a inclusão de estruturas de suporte (Figura 2.2), para evitar que, durante a construção, essas partes se deformem, afundem ou flutuem livremente na resina líquida. Uma recomendação geral é incluir suporte para regiões que

apresentam ângulos menores que 45° em relação ao plano horizontal. Contudo, para evitar o risco de empenamento em regiões da peça que contenham partes em balanço, é necessário utilizar suportes em qualquer região em balanço que possua comprimento maior que 1 mm e ângulo menor que 19° [6]. Nesse processo, o material do suporte é o mesmo da peça, por isso, o volume dos suportes deve ser mantido ao mínimo. Normalmente, a identificação das regiões da peça que requerem suporte e o seu projeto são realizados automaticamente pelo sistema computacional de planejamento de processo que acompanha o equipamento de SL. Para aproveitar a área disponível da plataforma de construção, é recomendável fabricar o maior número possível de peças em uma mesma batelada, como ilustrado na Figura 2.3.

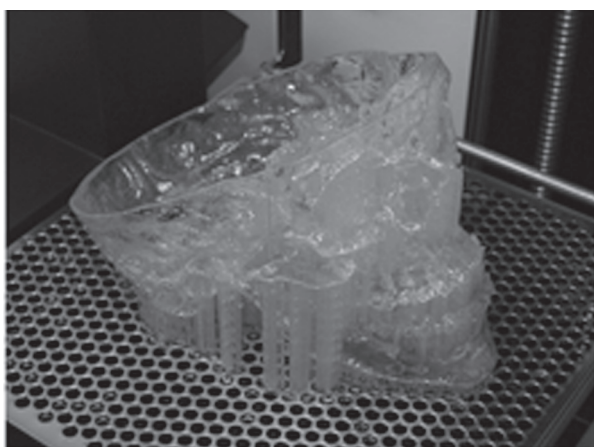


Figura 2.2 Exemplo de um crânio (biomodelo) fabricado por estereolitografia mostrando as respectivas estruturas de suporte.

Fonte: cortesia de NIMMA/UFSC.

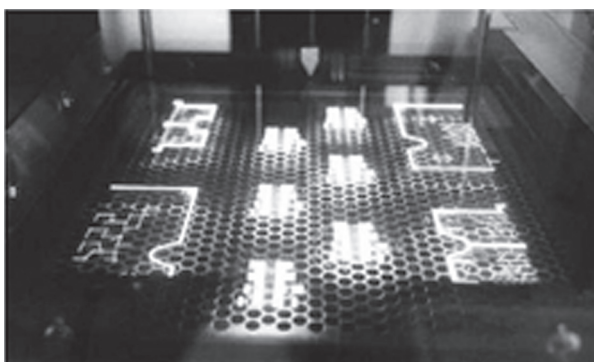


Figura 2.3 Exemplo de peças sendo fabricadas simultaneamente na plataforma de construção.

Fonte: cortesia de NIMMA/UFSC.

Os primeiros *lasers* UV utilizados nos equipamentos de SL foram do tipo Hélio-Cádmio (He-Cd), com potência variando de 6 mW até 12 mW e comprimento de onda de 325 nm, ou do tipo Nd:YVO4 no estado sólido, com potência variando de 100 mW a 800 mW e comprimento de onda de 354,7 nm. Atualmente, os comprimentos de onda mais utilizados nos equipamentos de VPP estão na faixa de 355 nm a 405 nm, faixa na qual a maioria dos fotoiniciadores presentes na resina possuem máxima absorção da luz UV [7]. Alguns equipamentos têm empregado *lasers* de maior potência, chegando a valores em torno de 1.500 mW [8].

O deslocamento do feixe de *laser* na superfície da camada é realizado por um par de espelhos movimentados por galvanômetros. Por meio de um conjunto de lentes e um sistema de abertura, o foco do feixe de *laser* é calibrado para incidir na superfície da resina líquida. O diâmetro do *laser* normalmente utilizado está em torno de 0,25 mm, mas, em alguns equipamentos, pode ser reduzido até 0,075 mm para aplicações que requerem alta resolução. A espessura de camada é mantida constante ao longo de toda a peça, podendo variar entre 0,025 mm e 0,5 mm.

Ao final do processo de SL, tem-se a peça em estado “verde”, ou seja, não completamente curada, em decorrência da geometria típica deixada pelo *laser* ao penetrar na resina líquida e da distância entre varreduras (estratégia de movimentação) utilizada. A Figura 2.4 ilustra a geometria resultante dessa situação, evidenciando as regiões de retenção da resina líquida (região não curada), regiões curadas e regiões sobrecuradas após a varredura do *laser*. Essa situação permite que sejam fabricadas peças com controle do volume de resina líquida a ser aprisionado em regiões não curadas, buscando assim melhorar a eficiência do processo e reduzir a presença de empenamentos após a obtenção da cura total alcançada no forno UV.

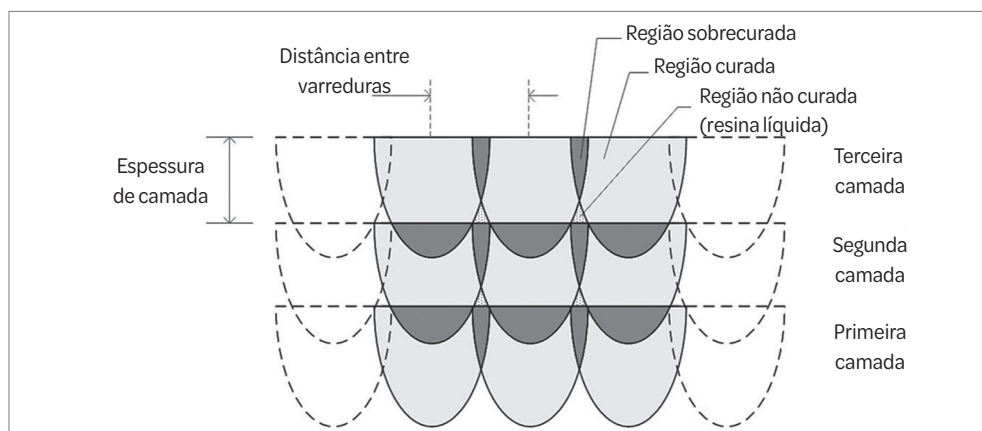


Figura 2.4 Representação dos efeitos de penetração do *laser* no processo de manufatura aditiva por SL.

Fonte: adaptada de [9].

Pelo fato de a resina convencional permitir que a luz UV passe através dela, a intensidade com que o *laser* se distribui através desse meio governa o processo de fotopolimerização e determina quais áreas são curadas. O feixe de *laser* utilizado na SL é do tipo gaussiano, o que indica que sua intensidade diminui a partir do centro do feixe e propaga-se ao longo do eixo Z até uma certa profundidade, resultando em uma geometria de simetria em torno de um eixo coincidindo com o eixo Z. Uma vez que o *laser* varre uma trajetória retilínea a uma velocidade constante sobre a superfície da resina, uma geometria obtida pela curva parabólica de revolução em torno do eixo Z é solidificada, gerando um cordão ao longo da trajetória. Portanto, o perfil 2D parabólico de cura da resina dependerá da distribuição da intensidade do feixe incidente. Cada cordão resultante terá uma profundidade e largura específicas conhecidas como profundidade de cura e largura de cura, respectivamente, que afetam as resoluções vertical (profundidade) e lateral do cordão [10].

Após retirar a peça da máquina, primeiro se realiza uma limpeza com solvente para remover a resina não curada. Usualmente, emprega-se álcool isopropílico. Em seguida, é necessário retirar as estruturas de suporte com cuidado, para não danificar a superfície da peça. A peça, então, é levada a um forno UV para se obter a cura completa da resina, aumentando a sua resistência mecânica. Finalmente, se necessário, um acabamento superficial é aplicado manualmente ou por algum processo automático específico para essa tecnologia.

No processo de consolidação das camadas, são empregadas diferentes estratégias de varredura que são válidas não somente para a SL, mas também para outras tecnologias que utilizam o princípio de escaneamento vetorial. Esse assunto é apresentado na Seção 2.7.

2.3.2 Outras tecnologias por escaneamento vetorial

Diversas empresas comercializam equipamentos com princípio similar ao da SL, construindo as peças movimentando o eixo Z “de cima para baixo”. Basicamente, as diferenças entre os equipamentos estão na qualidade dos dispositivos ópticos e eletromecânicos, nas dimensões dos envelopes de construção e na resolução que o equipamento é capaz de garantir.

A configuração “de cima para baixo” apresenta diversas desvantagens em relação à abordagem “de baixo para cima”. O movimento descendente da plataforma para cada nova preparação da camada a ser solidificada perturba o nivelamento de resina na cuba, consumindo tempo adicional no processo para a recuperação do estado de equilíbrio, o que reduz a agilidade de todo o procedimento. Além disso, logo após a deposição da nova camada de resina líquida no topo da camada previamente curada, não é possível garantir uma espessura uniforme da camada. A superfície de resina

precisa então ser nivelada usando uma lâmina ou régua niveladora (*recoater*), tornando o processo mais demorado. Por esse motivo, resinas de baixa viscosidade são as mais recomendadas para uso nessa configuração [10], evitando-se ao máximo a formação de meniscos ou abaulamento da superfície da resina.

Alternativamente, o princípio de solução de movimentação do eixo Z no sentido “de baixo para cima” vem sendo cada vez mais adotado por novas empresas fabricantes de equipamentos de VPP. Ou seja, as peças são construídas de cabeça para baixo, na medida em que a plataforma de construção vai subindo e se afastando da cuba que contém a resina líquida. Nesse tipo de configuração, a cuba é rasa, sendo necessária menor quantidade de resina, diferentemente da configuração “de cima para baixo”, que requer cubas maiores e maior quantidade de resina para iniciar a fabricação da peça. Um exemplo desse processo (Figura 2.5) é o empregado pela empresa Formlabs, que comercializa os equipamentos da série Form, possibilitando a construção em camadas de espessura da ordem de 25 μm a 100 μm [11]. No início do processo, a plataforma de construção desce (sentido Z) em direção ao reservatório que contém a resina líquida, adentrando-o de modo a estabelecer uma distância de uma camada entre a plataforma e a janela de material transparente. Após a irradiação, a camada da resina curada se adere à plataforma de construção. Posteriormente, a plataforma contendo a peça em construção sobe, permitindo que nova camada de resina líquida ocupe o espaço entre a janela e a camada já curada. Esse processo se repete até que toda a peça seja construída. Uma das vantagens atribuídas a esse princípio invertido de construção é que a cura acontece no fundo da cuba, em uma região onde não há a presença de oxigênio, e, portanto, mais rapidamente. No entanto, o desprendimento da camada solidificada em contato com a janela transparente é considerado um momento crítico do processo, uma vez que essa camada pode aderir à superfície da janela, sendo uma das maiores causas de falhas que ocorrem nesse tipo de processo de fabricação.

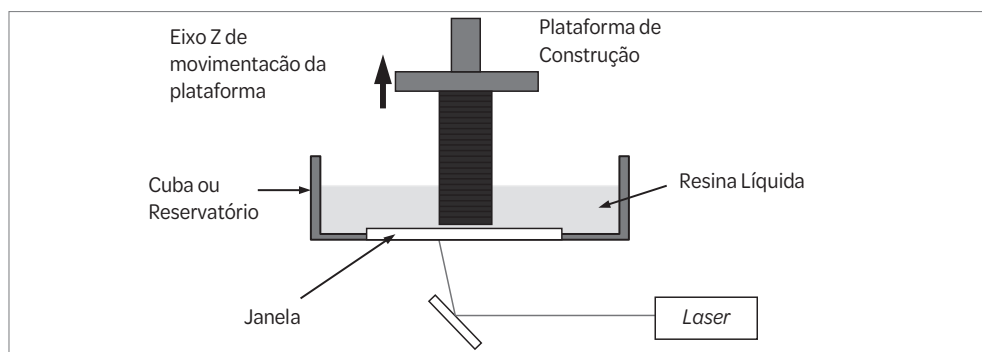


Figura 2.5 Princípio do processo “de baixo para cima” empregado pela empresa Formlabs.

Mais recentemente, a empresa Formlabs buscou empregar uma solução alternativa para a qual atribuiu o termo LFS (*low force stereolithography*). Nessa alternativa, o aparato óptico para direcionar o feixe de *laser* está inserido no interior da unidade de processamento da luz (*light processing unit* – LPU) cujo conjunto se movimenta na direção do eixo X, como mostra a Figura 2.6. Um galvanômetro posiciona o feixe de *laser* na direção Y, depois o direciona através de um espelho flexível e parabólico para entregar um feixe sempre perpendicular ao plano de construção, de modo que se mantenha sempre em linha reta vertical, o que proporciona mais precisão e acurácia [11]. Uma particularidade adicional que permite fabricar peças de elevada qualidade por meio dessa alternativa decorre do uso de uma janela em material transparente e flexível, garantindo leve deformação da janela flexível, nas etapas de descida e subida da plataforma entre as etapas de fabricação de cada camada.

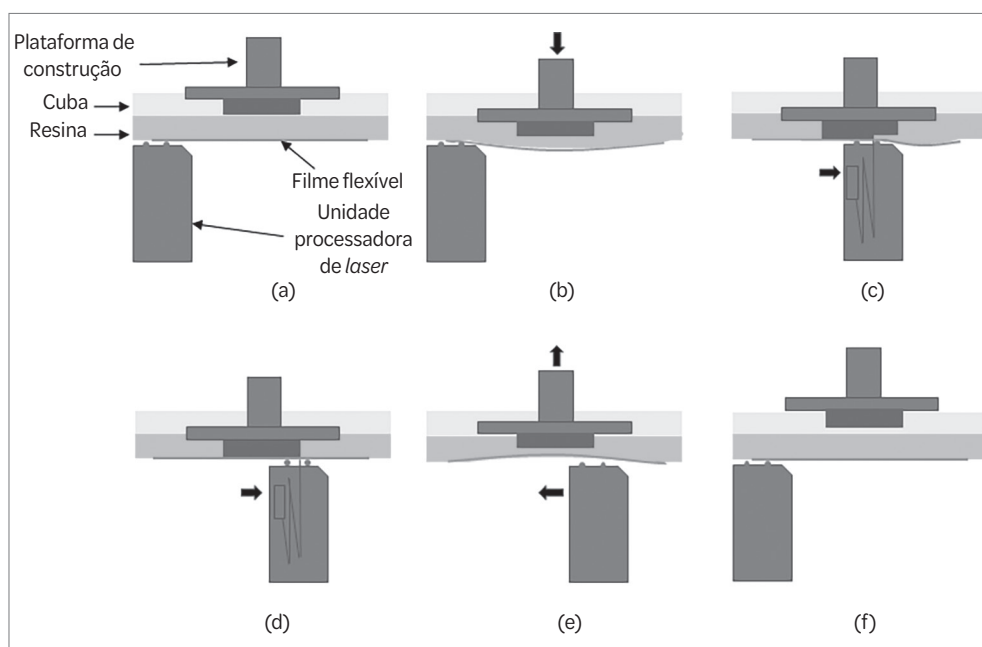


Figura 2.6 Etapas de construção pelo processo LFS da empresa Formlabs.

2.4 FOTOPOLIMERIZAÇÃO POR PROJEÇÃO DE IMAGENS

A tecnologia de projeção de imagens sobre uma superfície de resina com o objetivo de curar simultaneamente toda uma camada de uma peça foi inicialmente desenvolvida no início dos anos 1990 por pesquisadores que desejavam desenvolver equipamentos de SL especiais capazes de fabricar peças em escala microscópica. Equipamentos de AM que se utilizam desse princípio são designados de fotopolimerização por projeção de imagens.

merização por projeção de imagens. A grande vantagem desse tipo de equipamento é a rapidez na fabricação da peça, em função de a cura ocorrer instantaneamente em toda a extensão da camada. Conforme mencionado no Capítulo 1, trata-se de uma tecnologia de processamento 2D, uma vez que a cura ocorre simultaneamente em toda extensão da área projetada.

Similarmente ao princípio tradicional de fabricação por SL, os equipamentos de AM por projeção partem do fatiamento do modelo representado em CAD. Contudo, enquanto um sistema tradicional forma a geometria de uma camada baseada em *pixels*, nos equipamentos de projeção de imagens estas são geradas com base em dados gráficos. Cada seção fatiada é armazenada na forma de imagens *bitmaps*, formando uma imagem ou uma máscara a ser disponibilizada em um visor ou tela digital. As imagens digitais podem ser geradas diretamente, de forma dinâmica, por meio de um dispositivo de microespelho digital (*digital micromirror device* – DMD) controlado por um processador de luz digital (*digital light processing* – DLP). Alternativamente, uma máscara negativa da imagem da camada a ser fabricada, ou seja, que só deixa passar a luz referente à imagem desejada (bloqueando as regiões que não fazem parte da peça), pode ser gerada dinamicamente por sistemas tipo LCD (*liquid crystal display*). Nesses equipamentos, a fonte de luz é predominantemente de lâmpadas UV tradicionais ou LED, com custo bem inferior aos *lasers* UV, embora também existam equipamentos que empregam lâmpadas no comprimento de onda visível. A imagem de cada camada armazenada no visor é transferida para a superfície da resina disponibilizada na cuba, promovendo a sua cura.

Assim como ocorre em alguns equipamentos que utilizam *laser*, também há equipamentos em que a construção é realizada mediante a movimentação em Z “de baixo para cima”. Nestes, o reservatório contendo a resina líquida é preenchido, e seu conteúdo é posteriormente curado a cada camada de construção. A parte inferior da cuba contendo a resina líquida possui uma janela de material transparente, permitindo que a resina seja iluminada verticalmente pela fonte de luz UV, como mostra a Figura 2.7. Similar às etapas descritas anteriormente, no início do processo, a plataforma de construção desce (sentido Z) em direção ao reservatório que contém a resina líquida, adentrando-o de modo a estabelecer uma distância de uma camada entre a plataforma e a janela de material transparente. Após a irradiação e a cura da camada da resina, esta se adere à plataforma de construção, que, posteriormente, sobe, permitindo que nova camada de resina líquida ocupe o espaço entre a janela e a camada já curada. Esse processo se repete até que toda a peça seja construída. Dependendo da geometria da peça, estruturas de suporte podem ser necessárias e deverão ser retiradas em etapa posterior à fabricação.

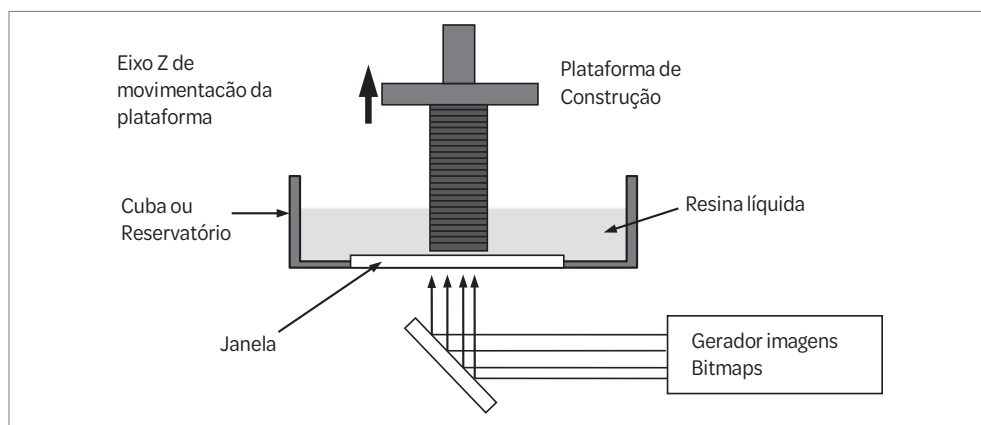


Figura 2.7 Princípio do processo por projeção de máscara ou imagens.

Dentre os processos de projeção de imagens, tem recebido destaque o processo CLIP (*continuous liquid interface production*), apresentado ao mercado pela empresa Carbon.

2.4.1 Processo CLIP – Produção contínua com interface líquida (*continuous liquid interface production*)

Novas alternativas de construção com pequenas variações em relação ao processo convencional têm surgido, como é o caso do processo CLIP. O processo se baseia em permitir a presença controlada de uma pequena quantidade de oxigênio na região ocupada pela resina, que fica situada entre a janela e a superfície da peça que está sendo construída no interior da cuba (zona morta mostrada na Figura 2.8). A presença de oxigênio nessa região tem por objetivo inibir a polimerização evitando, assim, a adesão da camada da peça no fundo da cuba no momento em que a luz UV está sendo irradiada. Para propiciar esse controle de oxigênio, a janela é de um material especial, denominado Teflon AF 2400, que possibilita a passagem de oxigênio através de sua estrutura, para o interior da cuba. Nesse caso, a cura acontece logo acima dessa zona morta. Isso é relevante pois o material curado não adere à superfície da janela, permitindo a elevação da plataforma sem a necessidade de subir e descer para formar uma próxima camada [12]. Assim, a empresa Carbon considera o processo de construção como sendo contínuo, ou seja, não pela adição de camadas discretas, uma vez que a camada de resina que está sendo curada não entra em contato direto com a janela de Teflon AF. A Figura 2.8 ilustra, de forma comparativa, as diferenças básicas entre as etapas tradicionais de fabricação por SL (sentido “de baixo para cima”) e as empregadas no processo CLIP. Como pode ser observado, em decorrência da existência da região morta, as etapas de subida e

descida da plataforma de construção, após cada etapa de consolidação da cura durante a fabricação, não existem no processo CLIP. Em decorrência disso, é possível acelerar consideravelmente a velocidade do processo, e a empresa anuncia tempos de fabricação de vinte a cem vezes mais rápidos que os de outros processos que se baseiam em fotopolimerização. Esse avanço tecnológico pode ser considerado altamente significativo em termos de aceleração para a área da AM.

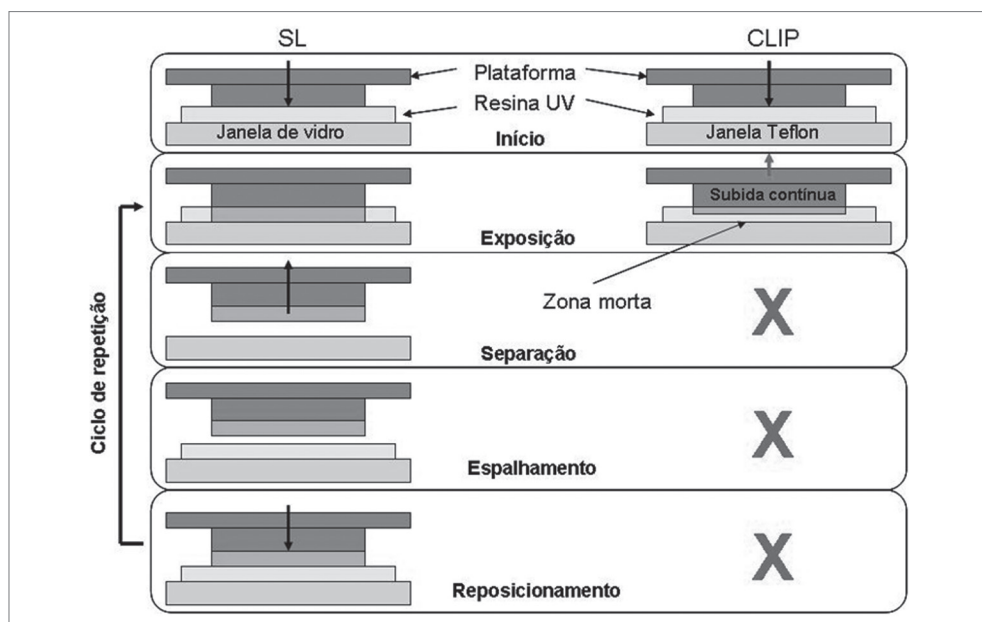


Figura 2.8 Diferenças básicas entre etapas dos processos SL por projeção de imagens e CLIP.

Com um princípio similar ao CLIP, o processo designado de HARP (*high area rapid printing*) substituiu a presença de oxigênio na região da “zona morta” pela inclusão da vazão de uma fina camada de um óleo fluorado imiscível, que se mantém entre a camada da resina curada e o fundo (janela) da cuba. Através dessa interface líquida móvel (camada de óleo), a adesão da camada curada ao fundo da cuba é reduzida [13].

2.4.2 Outras tecnologias por projeção de imagens

Uma vasta gama de equipamentos que utilizam o princípio de projeção de imagens também é disponibilizada pela empresa EnvisionTEC, também conhecida por ETEC. Dentre esses, há desde impressoras pequenas, com envelope de construção em torno de 90 mm × 56 mm × 180 mm, até impressoras maiores, com envelope de construção de 233 mm × 142 mm × 180 mm e resolução variando de 23 µm a 60 µm.

Entre as diferentes configurações de impressoras, vale destacar a impressora ETEC Xtreme 8k, que emprega o método de construção “de cima para baixo”, similar ao utilizado originalmente na SL, substituindo, no entanto, o *laser* por um sistema de projeção DLP. Segundo o fabricante, o equipamento é capaz de produzir as maiores peças nessa categoria de projeção de imagens, por possuir um envelope de 450 mm × 371 mm × 399 mm com resolução X/Y de 100 μm [14]. Novas versões empregam até dois sistemas DLP simultâneos para acelerar a construção das peças.

Outra opção de fabricação considerada revolucionária e mais rápida que a tradicional SL foi apresentada pela empresa Gizmo. No equipamento Gizipro 2X, da mesma forma que a SL, as peças são construídas sobre uma plataforma móvel que vai sendo submersa durante o processo de fabricação [15]. Nessa alternativa, porém, são utilizados dois processadores de luz digital (DLP) de alta definição (*high definition* – HD), responsáveis pela projeção das imagens na superfície da resina contida na cuba, acelerando, assim, a velocidade de fabricação. De acordo com o fabricante, a tecnologia imprime camadas a uma velocidade de 3 mm/min com resolução X/Y de 36 μm a 200 μm .

Nesse segmento, destacam-se também as impressoras de VPP de baixo custo que utilizam sistemas DLP e até LCD. Exemplos são as impressoras *desktop* das empresas Anycubic e Creality que permitem elevada precisão na cura das resinas empregadas. Os fabricantes oferecem ao mercado impressoras capazes de construir peças com espessuras de camada da ordem de 10 μm a 100 μm , alcançando uma resolução nos eixos X/Y de 50 μm [16] [17].

Uma curiosidade nessa área é a utilização da tecnologia de projeção de máscaras da empresa Lumi Industries, que disponibiliza equipamentos capazes de fabricar objetos a partir de *smartphones* e *tablets* por meio de suas impressoras 3D LumiFold [18]. A fotopolimerização a partir de imagens é obtida mediante a luminosidade presente nas telas dos respectivos aparelhos de uso pessoal.

2.5 MICROESTEREOLITOGRAFIA E LITOGRAFIA AXIAL COMPUTADORIZADA

Nos últimos anos, tem crescido bastante o desenvolvimento de variantes da tecnologia VPP, como os processos designados microestereolitografia (*micro stereolithography* – μSL), quando são empregados *lasers*, ou microestereolitografia por projeção (*projection micro stereolithography* – $\text{P}\mu\text{SL}$), no caso de utilização de DLP. Essas tecnologias são capazes de confeccionar peças em escala micrométrica ou nanométrica, sendo desenvolvidas com o objetivo de produzir microestruturas 3D, especialmente em materiais biocompatíveis com dimensões da ordem de 7 μm a 25 μm . Sistemas microeletromecânicos e microestruturas geometricamente complexas empregadas

na área médica são alguns exemplos onde essas tecnologias têm sido aplicadas [19]. A tecnologia tem sido designada também como litografia de dois fótons (*TPL – two-photon lithography*) ou polimerização de dois fótons (*2PP* ou *TPP – two-photon polymerization*). Diferentemente dos demais processos de VPP, nesse tipo de tecnologia, a energia luminosa fornecida à resina é a necessária para estimular a absorção de dois fótons, e não somente um, por parte do fotoiniciador presente na resina [20] [21]. A absorção da energia dos dois fótons é um fenômeno não linear que ocorre em todos os materiais quando a irradiação é suficientemente elevada e quando a energia combinada de dois fótons corresponde à energia de transição entre um estado estacionário da matéria e um estado excitado [22]. Pelo fato de a energia dos dois fótons ser absorvida pontualmente, a polimerização ocorre localmente em um *voxel* (elemento de volume, designado por Kruth [23] em alusão ao *pixel* em 2D), permitindo que sejam geradas superfícies mais suaves e de elevada resolução [21] [24] [25]. Nessa área, tem se destacado a tecnologia da empresa Nanoscribe, que comercializa a impressora Photonic Professional GT2, capaz de fabricar peças com dimensões entre 50 μm e 700 μm [26] [24]. O equipamento utilizado para a fabricação integra um conjunto de dispositivos que englobam um microscópio óptico, um *laser* de pulso na escala femtossegundo, um *scanner* galvonométrico a *laser* de elevada velocidade e um sistema piezoelétrico de elevada precisão. O conjunto integrado é controlado por um sistema computacional que permite a leitura e o planejamento de processo a partir de modelos geométricos 3D.

Mais recentemente, a AM volumétrica (*volumetric additive manufacturing – VAM*) surgiu como uma nova alternativa aos processos de fabricação a partir de camadas, prometendo revolucionar significativamente o segmento da impressão 3D. O processo conhecido por litografia axial computadorizada (*computed axial lithography – CAL*) é um exemplo de VAM tomográfico baseado em fotopolimerização que constrói objetos projetando sistematicamente padrões de iluminação em direção a um recipiente, contendo uma resina polimérica fotossensível, à medida que esse recipiente gira no interior de um segundo recipiente estacionário contendo um fluido com índice de refração ajustado em relação à resina contida no recipiente giratório, conforme ilustrado na Figura 2.9 [20].

Diferente dos demais processos, a VAM ocorre sem a adição de camada sobre camada. Como a projeção dos padrões de iluminação ocorre em sincronismo com o movimento giratório do recipiente que contém a resina, todas as regiões da peça são curadas simultaneamente. Recentes implementações demonstraram que o processo é capaz de fabricar peças sem necessidade de estruturas de suporte, à escala de centímetros, com baixa rugosidade superficial e propriedades mecânicas isotró-

picas, em tempos que variam de segundos a minutos. A tecnologia possibilita fabricar peças em torno de objetos metálicos ou cerâmicos inseridos na resina, ampliando, assim, o espectro de possibilidades da AM.

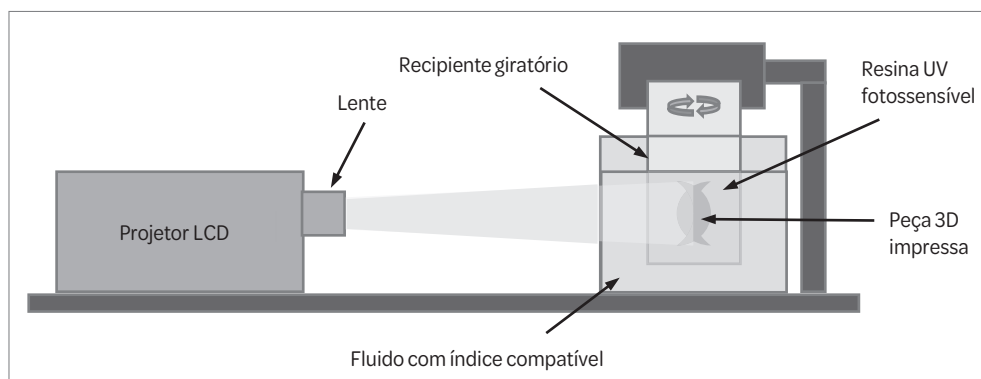


Figura 2.9 Princípio do processo de litografia axial computadorizada (CAL).

Ainda no contexto da AM volumétrica, porém com um princípio um pouco diferente, a empresa *start-up* alemã Xolo comercializa uma tecnologia que foi denominada *Xolography*. O processo se baseia no conceito designado por *dual-colour photoinitiator* (DCPI), no qual fotoiniciadores comutáveis contidos na resina são usados para induzir a polimerização local em um volume de monômero confinado, após sua excitação linear ter sido causada pela interseção de feixes de luz de diferentes comprimentos de onda. No processo, são utilizadas resinas especialmente desenvolvidas e otimizadas para fornecer alta reatividade química para polimerização e formação rápida das ligações cruzadas, com máxima transparência óptica, bem como alta viscosidade. Nesse processo, a cuba contendo a resina se desloca linearmente, enquanto é atravessada transversalmente por uma fonte *laser* de um primeiro comprimento de onda (375 nm) que excita os fotoiniciadores da resina, gerando uma folha planar de luz. Ao mesmo tempo, um projetor DLP de um segundo comprimento de onda (entre 450 nm e 700 nm), disposto ortogonalmente à fonte *laser*, gera energia luminosa suficiente para completar a polimerização, focalizando imagens seccionais do modelo tridimensional (3D) a ser fabricado no plano da folha de luz [27] [28]. Em comparação com os métodos de impressão volumétrica atualmente existentes, a empresa considera que a técnica tem uma resolução cerca de dez vezes maior do que a litografia axial computadorizada (CAL) e uma taxa de geração de volume de quatro a cinco ordens de magnitude maior do que a fotopolimerização de dois fótons (2PP).

2.6 MATERIAIS PARA AM POR FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA

As resinas fotopoliméricas empregadas em VPP são constituídas basicamente de monômeros, oligômeros/aglutinantes, fotoiniciadores e alguns aditivos [24] [29]. A resina típica para SL consiste aproximadamente de 25% de monômeros, 5% de fotoiniciadores e 70% de oligômeros [7]. Os principais componentes da resina são os monômeros e os oligômeros, responsáveis por solidificar a resina devido ao processo de polimerização (cura), cuja estrutura molecular tridimensional resultante contém ligações cruzadas (*crosslinking*). Quando expostos à fonte de luz, os fotoiniciadores se convertem em radicais e reagem com os oligômeros e os monômeros, proporcionando as ligações cruzadas mencionadas e formando as cadeias poliméricas presentes na estrutura do material solidificado. Alguns aditivos, como nanopartículas ou pigmentos, podem ser incorporados na resina objetivando melhorar suas propriedades físicas ou a coloração desejada.

As resinas disponíveis atualmente são sobretudo à base de acrilatos ou metacrilatos (resinas acrílicas) e epóxis (resinas epoxídicas). As resinas epoxídicas apresentam menor contração e melhores propriedades mecânicas e térmicas que as resinas à base de acrilatos, tendo como desvantagem o fato de necessitarem de maior energia para a polimerização. Do ponto de vista de fabricação, isso implica maior tempo de processamento em comparação às acrílicas se utilizada a mesma potência do *laser* [30]. Por essa razão, são mais indicadas para equipamentos que utilizam *laser* pelo princípio de escaneamento vetorial, em decorrência da possibilidade de concentrar melhor a energia da irradiação luminosa. Já nos equipamentos por projeção, têm sido empregadas predominantemente resinas acrílicas. As resinas epoxídicas utilizadas possuem diferentes formulações capazes de imitar, visualmente e pelo manuseio, materiais como polipropileno (PP), acrilonitrila butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC), polietileno (PE), ABS/PP, além de materiais elastoméricos e ceras. Mais recentemente, tem crescido o desenvolvimento de resinas compósitas à base de metacrilatos e epóxis.

Nos equipamentos por projeção de imagens, a oferta de resinas acrílicas tem crescido nos últimos anos no sentido de ampliar o espectro de cores, permitindo fabricar principalmente nas cores azul, vermelho, amarelo, branco, preto ou tons de cinza. As resinas também são fornecidas em diferentes formulações para atender a diferentes aplicações, buscando oferecer propriedades e características que vão desde elevada rigidez (típicas de materiais acrílicos) até alta flexibilidade (típicas de materiais elastoméricos), ou propriedades similares às dos termoplásticos ABS, PP ou PC.

A Tabela 2.1 exemplifica as características de duas resinas comercializadas pela empresa DuPont, uma acrílica e outra epoxídica, para emprego em equipamentos a *laser*. Já a Tabela 2.2 apresenta uma comparação entre propriedades de resinas

acrílicas tipicamente utilizadas em equipamentos por projeção, de acordo com dados publicados pela empresa Formlab [11].

Tabela 2.1 Características gerais de resinas tipicamente acrílicas e epoxídicas para fotopolimerização por escaneamento vetorial a *laser* [30]

Características	SOMOS 3100 (acrílica)	SOMOS 6100 (epoxídica)
Precisão		
Contração volumétrica (%)	5 – 7	2 – 3
Propriedades mecânicas		
Módulo de elasticidade (MPa)	1.083	1.222
Resistência à tração (MPa)	24,2	58,3
Dureza (Shore D)	84,6	86,7
Resistência ao impacto (J/m)	65,4	42,3
Resistência à flexão (MPa)	23	103
Propriedade térmica		
Temperatura de deflexão ao calor (°C)	47,5	55
Velocidade de produção		
Energia crítica requerida (mJ/cm²)	4	26

Tabela 2.2 Propriedades mecânicas de resinas acrílicas usadas em alguns equipamentos por projeção de imagens [11]

Propriedades	Formlabs Tough	InvisionTEC ABS-Tuff	3DS Visijet SL Tough
Resistência à tração (MPa)	52,2	48,6	41
Alongamento (%)	31	7	18
Resistência ao Impacto (J/m)	51,1	s/dados	43,8

Diferentemente das tradicionais resinas acrílicas e epoxídicas, resinas à base de poliuretano (PU) com metacrilatos também vêm sendo utilizadas, oferecendo alternativas para simular materiais poliméricos com diferentes níveis de rigidez e flexibilidade (como o termoplástico poliuretano – TPU) [11] [31].

2.7 PARÂMETROS DE PROCESSO

Nos processos de VPP, os principais parâmetros que influenciam na qualidade da peça a ser fabricada estão relacionados com o tempo de exposição da fonte de luz na superfície da resina a ser curada. Isso é particularmente importante no caso dos processos que empregam o princípio de escaneamento vetorial com *lasers* UV, que necessitam seguir trajetórias de movimentação em função de estratégias de varredura (*raster*). Nestes, a cura da resina ocorre pela exposição pontual do *laser* sobre

o material. Com isso, o tempo de exposição em cada ponto leva à cura de um volume de material no interior de um *voxel*. Para garantir uma continuidade do material curado, especifica-se um sobreamento entre cada *voxel* e seu vizinho, formando, assim, uma linha contínua ou cordão. Em função do pequeno diâmetro do *laser* ($\sim 0,25$ mm), seria necessário um tempo considerável para curar toda a área de cada camada. Dessa forma, existem alguns padrões de varredura das camadas pelo *laser* que foram desenvolvidos para reduzir tempo e evitar distorções, denominados estilos de construção (*build styles*).

Para as resinas acrílicas, um estilo denominado *Star-WEAVE* é o mais indicado [32]. Nesse estilo, é aplicada uma estratégia de forma a deixar algum material sem curar aprisionado em pequenas células dentro da peça. Com o intuito de evitar que o material não polimerizado escape desses volumes, a casca externa da peça (*3D shell*) deve ser processada de forma integral. Esse estilo requer um pós-processamento das peças em um forno após a remoção da máquina para a cura do material aprisionado nessas células. Com o desenvolvimento das resinas à base de epóxi, foi introduzido o estilo conhecido como ACES (*accurate clear epoxy solid*). Nesse estilo, um rastreamento mais denso, com um sobreamento de 40% entre as linhas de varredura, resulta em uma peça verde precisa, livre de tensões internas e sem conter resinas líquidas [30]. Segundo Jacobs [32], a contração na pós-cura da resina epóxi utilizando o estilo ACES é de 0,12%; já o da resina acrílica é de 0,72%. O desenvolvimento de estilos de construção em função do tipo de resina propiciou uma melhora considerável nos resultados da distorção de superfícies planas na pós-cura ao longo do tempo.

Para um determinado valor de potência, velocidade de deslocamento do *laser* e distância entre varreduras, a espessura da camada é um dos parâmetros de processo mais importantes a ser definido pelo usuário ao fatiar o modelo CAD da peça durante a preparação para o processamento. A profundidade da região sobrecurada entre as camadas (ver Figura 2.4), resultante da penetração de cada cordão na camada inferior adjacente, é a responsável por manter as camadas individuais conectadas umas às outras para construir uma peça 3D completa. Para assegurar a união entre essas camadas impressas, a distância de penetração do cordão na camada inferior é estimada entre 10% e 35% da espessura da camada, para evitar defeitos de impressão como delaminação [29].

Nos equipamentos por projeção de imagens, a fotopolimerização deve ocorrer de forma homogênea e rápida em toda a extensão da camada. Nesse sentido, a potência da luz UV também é um fator importante. Em equipamentos da Gizmo 3D, são empregadas lâmpadas de até 240 W. Segundo a empresa, com o uso de lâmpadas de 180 W, é possível curar uma camada de 0,05 mm em aproximadamente 2 s.

Uma camada de igual espessura é capaz de ser curada em apenas 0,5 s ao se utilizar um projetor com lâmpadas de 240 W [15]. Além do tempo de exposição da resina à luz durante a fabricação de cada camada, é usual, nos *softwares* de programação, indicar valores para espessura da camada e velocidades de subida e descida da plataforma de fabricação (eixo Z). Convém salientar que cada valor a ser definido/selecionado pelo usuário do equipamento dependerá do tipo de resina a ser empregada em cada tipo de equipamento. Para facilitar a utilização por parte do usuário, diversos fabricantes de equipamentos fornecem orientações dos melhores parâmetros para cada situação, como as contidas no endereço da internet da empresa Anycubic [16].

2.8 APLICAÇÕES, POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES

Os processos de VPP se apresentam como vantajosos, especialmente quando se considera a elevada precisão dimensional e a suavidade das superfícies das peças a serem fabricadas, podendo fabricar peças com características flexíveis ou rígidas. Sobretudo quando se consideram os processos baseados em projeção de imagens, a tecnologia é vantajosa em termos de velocidade de fabricação.

Atualmente, equipamentos para fotopolimerização permitem construir peças com elevada precisão que contenham dimensões na ordem de 300 μm com espessuras de camadas de 25 μm a 100 μm [11]. Como já mencionado, a μSL , capaz de fabricar em escala nanométrica, é apontada como importante vantagem em termos de dimensões impossíveis de serem atendidas por outro processo de AM. Em termos de limitação quanto ao tamanho máximo capaz de ser fabricado com a tecnologia, a empresa 3D Systems comercializa a impressora ProX 950, capaz de fabricar peças de até 1.500 mm de comprimento [4].

Para além de precisão dimensional e rapidez, esses processos são considerados vantajosos para aplicações em que se desejam peças transparentes ou semitransparentes, uma vez que facilitam a observação de detalhes internos das peças, como geometrias de estruturas internas e microcanais que permitam a passagem de fluidos. Como a resina não curada na fabricação permanece na cuba e pode ser continuamente utilizada em uma nova fabricação, o processo é considerado de baixo desperdício de material.

A Figura 2.10 ilustra exemplos de peças obtidas com a tecnologia SL. A Figura 2.10a mostra um conjunto montado de um controle de direção de empilhadeiras, consistindo de quatro partes, fabricado em um antigo equipamento SL 250A. A Figura 2.10b apresenta o protótipo de um sistema de túnel de vento da Lotus F1 em escala real, gerado em um equipamento modelo SLA 7000.

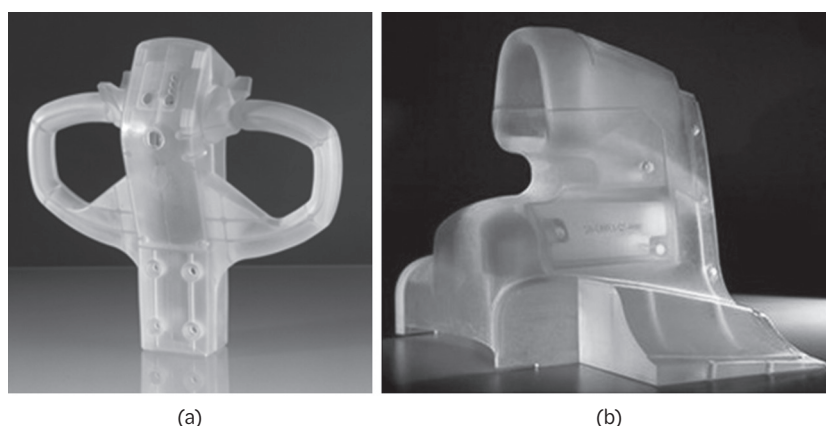


Figura 2.10 Exemplos de peças obtidas com o processo SL.

Fonte: cortesia da empresa Robtec, antiga representante da 3D Systems no Brasil.

Além da fabricação de peças a partir de resinas puras, a tecnologia de VPP também é utilizada na fabricação indireta de peças em material cerâmico ou metálico. Demonstrado pela primeira vez em 1994, por Griffith *et al.*, para a obtenção de peças cerâmicas, o processo consiste em utilizar resinas convencionais incorporadas com um percentual de cargas na forma de pó para a construção de peças 3D geometricamente complexas. A peça fabricada pelo processo de VPP, designada de peça verde compósita, é posteriormente pós-processada. O pós-processamento consiste em remover a resina presente na peça verde por meio de sua queima em uma operação chamada *debinding*, seguida de sinterização da carga para obtenção das dimensões finais da peça cerâmica ou metálica densificada [10]. Ao término dessas etapas, o volume final da peça é reduzido em comparação ao volume da peça verde fabricada por VPP, podendo chegar a uma redução de até 30%. Até o momento, a tecnologia é predominantemente usada para materiais cerâmicos, como alumina (Al_2O_3), zircônia (ZrO_2), sílica (SiO_2), hidroxiapatita (HA) e nitreto de silício (Si_3N_4), com cargas contendo partículas de dimensões d50 da ordem de $0,5\ \mu\text{m}$ a $12\ \mu\text{m}$ [10] [13]. Embora a tecnologia tenha surgido inicialmente empregando equipamentos a *laser*, como é o caso da SL, tem crescido o uso de VPP por projeção de imagens utilizando DLP [13].

Apesar das vantagens atribuídas a esses processos de AM, a pouca diversificação de materiais, restrita àqueles que sofrem ação da luz UV, tem sido apontada como uma importante desvantagem ou limitação da tecnologia. Nesse mesmo sentido, o fato de ser necessária uma etapa posterior à fabricação para concluir o processo de cura em forno, que atribuirá as propriedades mecânicas finais das peças, é considerado desvantajoso em comparação a outras tecnologias de AM.

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância dada às tecnologias de VPP é reconhecida desde o início da AM. A este-reolitografia proporcionou o começo de uma nova era de processos de fabricação.

Com o crescente interesse por equipamentos voltados à AM para uso doméstico, de baixo custo e que alcançam escala micrométrica e nanométrica, os processos de VPP continuam tendo um lugar de destaque entre as tecnologias de AM. De acordo com Wohlers [33], os processos de VPP são os que detêm a maior participação no mercado de materiais para manufatura aditiva.

As várias alternativas de modelos e configurações de equipamentos de VPP surgidas na última década têm acirrado a disputa no mercado de equipamentos de AM de baixo custo. Exemplo disso são os recentes equipamentos apresentados pelas empresas Carbon, Gizmo, Creality e Anycubic, assim como o aumento considerável de resinas sensíveis à UV que são oferecidas ao mercado, especialmente em decorrência do crescimento de aplicações para as áreas médica e odontológica.

O surgimento da manufatura aditiva volumétrica (VAM), como a tecnologia de litografia axial computadorizada (CAL), tem-se revelado uma nova e importante quebra de paradigma na AM, colocando os processos de AM por fotopolimerização em um novo patamar. A técnica, no entanto, ainda requer avanços significativos em termos de resolução e produção quando comparada com os já consagrados métodos de camada a camada. Melhorias em termos do *hardware* e dos métodos computacionais que suportam a VAM ainda são consideradas necessárias para contribuir para o seu estabelecimento e até expansão de suas capacidades.

REFERÊNCIAS

- [1] M. R. Rodrigues, M. G. Neumann, Fotopolimerização: Princípios e métodos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 13, n. 4, p. 276-286, 2003.
- [2] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. Springer, 2010. p. 459.
- [3] C. W. Hull, *Apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography*, 1986. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US4575330.pdf>. Acessado em: set. de 2015.
- [4] 3D Systems. Disponível em: <https://br.3dsystems.com/3d-printers>. Acesso em: abr. 2023.
- [5] N. Volpato, Os principais processos de prototipagem rápida. In: N. Volpato (ed.). *Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações*. Edgard Blücher, 2007. p. 244.
- [6] HLHRapid Design Guide. Disponível em: <https://hlhrapid.com/knowledge/design-guide-sla-3d-printing>. Acesso em: nov. 2023.

- [7] M. Shah, A. Ullah, K. Azher, A. U. Rehman, W. Juan, N. Aktürk, C. S. Tüfekci, M. U. Salamci, Vat photopolymerization-based 3D printing of polymer nanocomposites: current trends and applications. *RSC Advances*, v. 13, p. 1456-1496, 2023.
- [8] C. K. Chua, K. F. Leong, C. S. Lim, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 2nd ed. Manufacturing World Scientific Pub Co, 2003. p. 448.
- [9] G. V. Salmoria, V. E. Beal, A. N. Pires, C. H. Ahrens, Manufacturing and post-processing parameters effect in the cure shrinkage of stereolithography parts built with the resin DSM SOMOS 7110. *Anais do COBEM*, 2003.
- [10] S. Zakeri, M. Vippola, E. Levanen, A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography. *Additive Manufacturing*, v. 35, 2020.
- [11] Formlab. Disponível em: <http://formlabs.com>. Acesso em: mar. 2023.
- [12] J. R. Tumbleston, D. Shirvanyants, N. Ermoshkin, R. Januszewicz, A. R. Johnson, D. Kelly, K. Chen, R. Pinschmidt, J. P. Rolland, A. Ermoshkin, E. T. Samulski, J. M. DeSimone, Continuous liquid interface production of 3D objects, *Science*, v. 347, n. 6228, p. 1349-1351, 2015.
- [13] R. Chaudhary, P. Fabbri, E. Leoni, F. Mazzanti, R. Akbari, C. Antonini, Additive manufacturing by digital light processing: a review, *Progress in AM*, v. 8, p. 331-351, 2023.
- [14] InvisionTec. Disponível em: <http://envisiontec.com/3d-printers>. Acesso em: abr. 2023.
- [15] Gizmo3D. Disponível em: www.gizmo3dprinters.com.au/. Acesso em: mar. 2023.
- [16] Anycubic. Disponível em: <http://www.anycubic.com>. Acesso em: 6 dez. 2022.
- [17] Creality. Disponível em: https://www.creality.com/products/halot-mage-pro-3d-printer?spm=..index.header_1.1. Acesso em: abr. 2023.
- [18] Lumi Industries. Disponível em: www.lumindustries.com/3d-printers. Acesso em: abr. 2023.
- [19] Y. M. Ha, I. B. Park, H. C. Kim, S. H. Lee, Three-dimensional microstructure using partitioned cross-sections in projection microstereolithography. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, v. 11, n. 2, p. 335-340, 2010.
- [20] I. Bhattacharya, J. Toombs, H. Taylor, High fidelity volumetric additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, v. 47, 2021.
- [21] F. Kotz, *et al.* Two-Photon Polymerization of Nanocomposites for the Fabrication of Transparent Fused Silica Glass Microstructures. *Advanced Materials*, v. 33, 2021.
- [22] P. J. Bártolo, *Stereolithography: materials, processes and applications*, New York: Springer, 2011.
- [23] J. P. Kruth, Material in excess manufacturing by rapid prototyping techniques. *Annals of the CIRP*, v. 40, p. 603-614, 1991.
- [24] F. Zhang, L. Zhu, Z. Li, S. Wang, I. Shi, W. Tang, N. Li, J. Yang, The recent development of vat photopolymerization: a review. *Additive Manufacturing*, v. 48, 2021.

- [25] Y. He, Q. Shao, S. Chen, R. Zhou, Characterization of two-photon photopolymerization fabrication using high-speed optical diffraction tomography. *Additive Manufacturing*, v. 60, 2022.
- [26] Nanoscribe, Disponível em: <https://www.nanoscribe.com/en/products/photonic-professional-gt2/>. Acesso em: abr. 2023.
- [27] M. Regehly, Y. Garmshausen, M. Reuter, N. F. König, E. Israel, D. P. Kelly, C.-Y. Chou, K. Koch, B. Asfari, S. Hecht, Xolography for linear volumetric 3D printing. *Nature*, v. 588, p. 24-31, 2020.
- [28] Xolo. Disponível em: <https://www.xolo3d.com>. Acesso em: nov. 2023.
- [29] A. Al Rashid, W. Ahmed, M. Y. Khalid, M. Koç, Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications. *Additive Manufacturing*, v. 47, 2021.
- [30] J. P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa, Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *Annals of the CIRP*, v. 47, p. 525-540, 1988.
- [31] Carbon3D. Disponível em: <https://www.carbon3d.com/>. Acesso em: nov. 2023.
- [32] P. F. Jacobs, *Stereolithography & other RP&M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling*, society of manufacturing engineers, 1996. p. 450.
- [33] Wohlers. *Wohlers report 2019. 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, 2019.

Descubra o potencial da manufatura aditiva/impressão 3D! Este livro é o seu ponto de partida para dominar as principais tecnologias, pois apresenta desde fundamentos e princípios básicos até aplicações avançadas. Se você é um profissional de engenharia, *design*, arquitetura, da saúde, ou outra área, que necessita de modelos físicos, ferramentais, biomodelos, ou mesmo de um processo de fabricação final para seu produto inovador ou customizado, este livro é para você. A obra explora diversas técnicas, seus benefícios e desafios, além de apresentar casos de uso em diferentes setores. Embarque nessa jornada e descubra como a manufatura aditiva pode transformar a forma como você projeta e produz.



