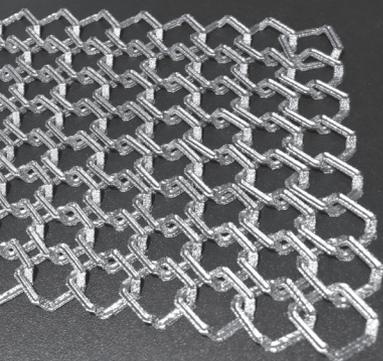




NERI VOLPATO
organizador

MANUFATURA ADITIVA

Tecnologias e aplicações da impressão 3D



Blucher



AUTORES

André Luiz Jardini Munhoz
Carlos Alberto Costa
Carlos Henrique Ahrens
Jonas de Carvalho
Jorge Roberto Lopes dos Santos
Jorge Vicente Lopes da Silva
José Aguiomar Foggiatto
Milton Sergio Fernandes de Lima
Neri Volpato

Neri Volpato
(organizador)

MANUFATURA ADITIVA
Tecnologias e aplicações da impressão 3D

Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D

© 2017 Neri Volpato (organizador)

Editora Edgard Blücher Ltda.

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 5. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

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

Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D / organização de Neri Volpato. – São Paulo: Blucher, 2017.
400 p. : il.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-1150-1

1. Impressão tridimensional 2. Processos de fabricação – Automação 3. Projeto de produto 4. Materiais – Inovações tecnológicas 5. Sistemas CAD/CAM 6. Desenho industrial I. Título

16-1534

CDD 621.988

Índices para catálogo sistemático:

1. Impressão tridimensional
2. Engenharia mecânica: Processos de fabricação
3. Engenharia de produção: Processos de fabricação

CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO À MANUFATURA ADITIVA OU IMPRESSÃO 3D	15
1.1 Introdução	15
1.2 Manufatura aditiva: um novo princípio de fabricação	16
1.3 Nomenclatura	18
1.4 Histórico	19
1.5 Princípios de processamento das tecnologias de AM	23
1.6 Vantagens e limitações gerais dos processos de fabricação por AM	23
1.7 Aplicações	27
1.8 Conclusões	28
Referências	29
2. A MANUFATURA ADITIVA NO <i>DESIGN</i> DE PRODUTOS	31
2.1 Introdução	31
2.2 Pioneiros no desenvolvimento de modelos e protótipos em <i>design</i>	32
2.3 A manufatura aditiva no <i>design</i> brasileiro	34
2.4 Manufatura aditiva no desenvolvimento e na produção de produtos	36
2.5 Manufatura aditiva pelo mundo: tendências no <i>design</i>	38
2.6 Tipos de modelos de representação física no <i>design</i> de produtos	39
2.7 Considerações finais	43
Referências	44

3. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO AUXILIADO PELA AM	45
3.1 Introdução	45
3.2 O processo de desenvolvimento de produto	45
3.3 Representações físicas de produtos, suas finalidades e suas vantagens	48
3.4 Mudanças no PDP com a utilização da AM	53
3.5 Considerações sobre as tecnologias de AM no PDP	58
3.6 Exemplos de aplicação de protótipos no PDP	59
3.7 Considerações finais	64
Referências	65
4. REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA 3D PARA AM	69
4.1 Introdução	69
4.2 Formas de obtenção de modelo geométrico 3D	70
4.3 Formato STL	75
4.4 Exportação de arquivos STL em sistemas CAD 3D	79
4.5 Problemas mais comuns encontrados nos arquivos no formato STL	83
4.6 Ferramentas para manipulação e correção de arquivos no formato STL	88
4.7 Formato AMF	88
4.8 Formato VRML	91
4.9 Formato CLI	91
4.10 Formato OBJ	92
4.11 Formato 3MF	92
4.12 Conclusões	93
Referências	93
5. PLANEJAMENTO DE PROCESSO PARA TECNOLOGIAS DE AM	97
5.1 Introdução	97
5.2 Características gerais das peças que são inerentes à tecnologia AM	99
5.3 Orientação para fabricação	103
5.4 Posicionamento no volume de construção	107

5.5	Aplicação de fator de escala	111
5.6	Definição da base e das estruturas de suporte	111
5.7	Fatiamento	114
5.8	Planejamento da trajetória de contorno e/ou preenchimento	119
5.9	Sistemas de planejamento de processo (CAM) para AM	121
5.10	Fabricação da peça no equipamento de AM	122
5.11	Pós-processamento	123
5.12	Considerações finais	124
	Referências	125
6.	PROCESSOS DE AM POR FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA	129
6.1	Introdução	129
6.2	Principais tecnologias e princípios básicos de fabricação	130
6.3	Fotopolimerização por escaneamento vetorial	131
6.4	Fotopolimerização por projeção de máscaras ou imagens	135
6.5	Microestereolitografia	138
6.6	Materiais para AM por fotopolimerização em cuba	139
6.7	Parâmetros de processo	140
6.8	Aplicações, potencialidades e limitações	141
6.9	Considerações finais	142
	Referências	143
7.	PROCESSOS DE AM POR EXTRUSÃO DE MATERIAL	145
7.1	Introdução	145
7.2	Princípio das tecnologias de extrusão de material	145
7.3	Modelagem por fusão e deposição – FDM	150
7.4	Tecnologias de baixo custo baseadas na extrusão de material	154
7.5	Principais parâmetros de processo de AM por extrusão de material	157
7.6	Características construtivas do processo	164
7.7	Pós-processamento para os processos de extrusão de material	172
7.8	Outras potencialidades	172
7.9	Conclusões	175
	Referências	175

8. PROCESSOS DE AM POR JATEAMENTO DE MATERIAL E JATEAMENTO DE AGLUTINANTE	181
8.1 Introdução	181
8.2 Tecnologias tradicionais de jato de tinta	182
8.3 Processos de AM por jateamento de material	184
8.4 Processos de AM por jateamento de aglutinante	194
8.5 Processos de AM pelo princípio de jateamento de fluido envolvendo a fusão do pó	204
8.6 Conclusões	208
Referências	209
9. PROCESSOS DE AM POR FUSÃO DE LEITO DE PÓ NÃO METÁLICO	213
9.1 Introdução	213
9.2 Princípio da AM por fusão de leito de pó não metálico	214
9.3 Mecanismos de aglutinação de pó não metálico	217
9.4 Propriedades dos polímeros para fusão em leito de pó	219
9.5 <i>Laser</i> e interação <i>laser</i> -material	222
9.6 Degradação e reciclagem de polímeros	228
9.7 Sistemas comerciais mais importantes	233
9.8 Fusão de leito de pó cerâmico	238
9.9 Vantagens e desvantagens dos sistemas por fusão de leito de pó não metálico	240
9.10 Outros materiais e aplicações para processamento por fusão em leito de pó não metálico	242
9.11 Conclusões	242
9.12 Agradecimentos	243
Referências	243
10. PROCESSOS DE AM POR FUSÃO DE LEITO DE PÓ METÁLICO	247
10.1 Introdução	247
10.2 Processos de fusão de leito de pó metálico utilizando <i>laser</i>	248
10.3 Processo de fusão de leito de pó metálico utilizando feixe de elétrons	255
10.4 Materiais e ligas em pó	259

10.5	Pós-processamento de peças obtidas por processos de fusão de leito de pó metálico	260
10.6	Vantagens e limitações dos processos por fusão de leito de pó metálico	262
10.7	Aplicações	263
10.8	Conclusões	265
	Referências	266
11.	PROCESSO DE AM POR ADIÇÃO DE LÂMINAS, POR DEPOSIÇÃO COM ENERGIA DIRECIONADA E HÍBRIDOS	271
11.1	Introdução	271
11.2	O uso do <i>laser</i> na manufatura aditiva	272
11.3	Processo por adição de lâminas	274
11.4	Processo por deposição com energia direcionada	278
11.5	Tecnologias híbridas	286
11.6	Conclusões	287
	Referências	287
12.	FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAL	293
12.1	Introdução	293
12.2	Formas de aplicação da AM na fabricação de ferramental	294
12.3	Modelos-mestre	295
12.4	Modelos de sacrifício	302
12.5	Gabaritos e/ou dispositivos	307
12.6	Ferramentais de sacrifício	308
12.7	Moldes permanentes de baixa produção	310
12.8	Moldes permanentes de média e alta produção	314
12.9	Considerações finais	320
	Referências	320
13.	APLICAÇÃO DIRETA DA MANUFATURA ADITIVA NA FABRICAÇÃO FINAL	325
13.1	Introdução	325
13.2	Considerações gerais	325

13.3	AM como processo de fabricação final	326
13.4	Projeto para AM	328
13.5	Otimização topológica	331
13.6	Estruturas celulares	332
13.7	Possibilidade de se utilizar materiais distintos ou materiais com gradação funcional	333
13.8	Desafios e limitações	334
13.9	Estudos de caso	336
13.10	Considerações finais	341
	Referências	341
14.	APLICAÇÕES DA AM NA ÁREA DA SAÚDE	345
14.1	Introdução	345
14.2	Modalidades de imagens médicas e <i>scanners</i>	346
14.3	Tratamento de imagens médicas	349
14.4	Soluções disponíveis para o processamento de imagens médicas	351
14.5	Algumas aplicações de AM na saúde	353
14.6	Questões regulatórias	366
14.7	Engenharia tecidual com AM	368
14.8	Conclusões	370
14.9	Agradecimentos	371
	Referências	371
15.	APLICAÇÕES DA AM EM ÁREAS DIVERSAS	375
15.1	Introdução	376
15.2	AM na paleontologia	376
15.3	AM nas ciências forenses	379
15.4	AM na arqueologia	381
15.5	AM na medicina veterinária	382
15.6	AM em arquitetura e urbanismo	386
15.7	AM nas tecnologias assistivas	388
15.8	AM para aplicação espacial	392
15.9	Conclusões	393
	Referências	393
	ÍNDICE REMISSIVO	397

CAPÍTULO 1

Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D

Neri Volpato

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Jonas de Carvalho

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP

1.1 INTRODUÇÃO

A elevada concorrência e a crescente complexidade dos produtos têm exigido das empresas alterações substanciais no processo de desenvolvimento de produtos (PDP), principalmente visando reduzir o tempo envolvido e aumentar a qualidade e a competitividade dos produtos. Essas alterações envolvem tanto aspectos de gestão desse processo como também o emprego de novas técnicas e ferramentas para projeto, análise, simulação e otimização de componentes e sistemas desse produto. O sucesso comercial de uma empresa está associado à sua habilidade em identificar as necessidades dos clientes e, rapidamente, desenvolver produtos que possam atendê-las. Dentre todas as atividades envolvidas no PDP, a utilização de protótipo físico é essencial para melhorar a comunicação entre as equipes envolvidas no processo, de modo a reduzir a possibilidade de falhas e melhorar a qualidade do produto, atendendo aos requisitos dos usuários.

Este capítulo apresenta o princípio do processo de fabricação denominado manufatura aditiva (*additive manufacturing* – AM), também conhecido como impressão 3D (tridimensional), termo comumente empregado pela mídia em geral. São descritos

alguns eventos importantes que antecederam o seu surgimento e algumas de suas possíveis aplicações. Descrições mais detalhadas de tecnologias de AM existentes, processos e aplicações encontram-se nos demais capítulos deste livro.

1.2 MANUFATURA ADITIVA: UM NOVO PRINCÍPIO DE FABRICAÇÃO

Os principais processos de fabricação possuem princípios baseados na *moldagem* do material, que envolve 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.); na *remoção* (ou subtração) de material, até se chegar à forma desejada (por exemplo, torneamento, fresamento, furação, retífica, eletroerosão, usinagem química, eletroquímica etc.); na *conformação*, que gera a geometria final da peça a partir da deformação plástica do material inicial (por exemplo, forjamento, conformação e estampagem de chapas, extrusão, laminação, entre outros); na *união* de componentes (por exemplo, soldagem, brasa-gem, colagem, entre outros), que pode promover a junção de partes mais simples para compor uma peça mais complexa; e na *divisão* de componentes (por exemplo, serragem e cortes), que faz o contrário da união. No final da década de 1980, um novo princípio de fabricação baseado na *adição* de material foi apresentado, denominado atualmente de AM ou impressão 3D.

A AM pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente, como ilustrado na Figura 1.1. Normalmente, essa representação é na forma de um modelo geométrico 3D originado de um sistema CAD (*computer-aided design*). Esse processo aditivo permite fabricar componentes físicos a partir de vários tipos de materiais, em diferentes formas e a partir de diversos princípios. O processo de construção é totalmente automatizado e ocorre de maneira relativamente rápida, se comparado aos meios tradicionais de fabricação. Na maioria dos processos de AM, as camadas adicionadas são planas, mas isso não é uma regra, pois existem tecnologias que permitem adicionar material seguindo a geometria da peça (ver detalhes no Capítulo 5).

O processo tem início com o modelo 3D da peça sendo “fatiado” eletronicamente, obtendo-se as “curvas de nível” 2D que definirão, em cada camada, onde será ou não adicionado material. A peça física é, então, gerada por meio do empilhamento (e da adesão) sequencial das camadas, iniciando na base até atingir o seu topo. De uma forma geral e mais detalhada, as etapas do processo compreendem:

- (1) a modelagem tridimensional, gerando-se um modelo geométrico 3D da peça (por exemplo, em um sistema CAD);
- (2) a obtenção do modelo geométrico 3D num formato específico para AM, geralmente representado por uma malha de triângulos, em um padrão adequado (por exemplo, STL – *STereoLithography*, AMF – *additive manufacturing format*, ou outro). Esses dois temas são tratados no Capítulo 4;

- (3) o planejamento do processo para a fabricação por camada (fatiamento e definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição de material), abordado em detalhes no Capítulo 5;
- (4) a fabricação da peça no equipamento de AM; e
- (5) o pós-processamento, que varia bastante de acordo com a tecnologia (pode envolver limpeza, etapas adicionais de processamento e acabamento com processos tradicionais de usinagem por remoção). Essas duas últimas etapas são apresentadas nos respectivos capítulos de cada tecnologia.

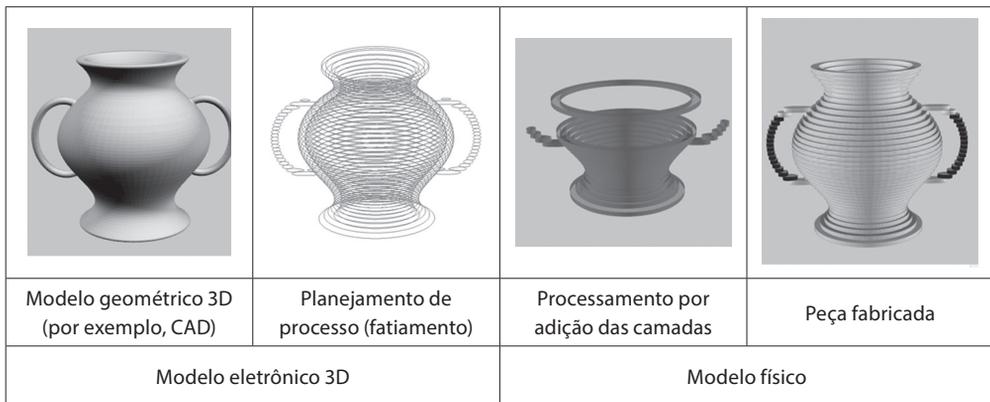


Figura 1.1 Representação das principais etapas do processo de AM ou impressão 3D.

Uma característica importante da AM é a sua facilidade de automatização, minimizando consideravelmente a intervenção do operador durante o processo. Praticamente, a necessidade do operador ocorre na preparação do equipamento, com a alimentação de materiais e devidos parâmetros de máquina, e, ao final do processo, na retirada e na limpeza da peça. Durante a fabricação, utilizam-se as informações geométricas obtidas por meio de um sistema de planejamento do processo diretamente da representação computacional 3D da peça. As informações geradas são enviadas na sequência planejada diretamente à máquina, que, então, executa o trabalho sem a assistência do operador.

As tecnologias de AM tornaram-se possíveis pela integração de processos tradicionais de manufatura (como metalurgia do pó, extrusão, soldagem, usinagem CNC etc.) com diversas outras tecnologias (como controles de movimento de alta precisão, sistemas de impressão a jato de tinta, tecnologias *laser*, feixe de elétrons etc.) e pelo desenvolvimento de materiais adequados a cada um desses processos.

Em virtude de seu princípio, a AM possui um enorme potencial para fabricar geometrias complexas, uma vez que transforma uma geometria 3D em uma sequência de geometrias 2D (camadas) mais simples. Em função do impacto causado na manufatura, o seu aparecimento tem sido considerado um marco em termos de processos 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 vários autores terem sugerido nomes distintos para esse novo princípio de fabricação [2, 3] (ver Figura 1.2), a denominação que persistiu até recentemente foi a de prototipagem rápida [4]. Esta surgiu pelo fato de esse processo, inicialmente, ter sido aplicado principalmente na produção rápida de protótipos físicos (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 algumas, inclusive, poderem ser utilizadas na fabricação de peças para uso como um produto final.

Dessa forma, nos últimos anos, a comunidade científica tem feito um esforço na direção de melhor caracterizar esse princípio de adição como um importante processo de fabricação. Assim, a denominação que descreve melhor o processo e que vem sendo aceita pela academia, e também por parte da indústria (inclusive com normas técnicas – ver Seção 1.5), é a de manufatura aditiva. Observa-se, no entanto, que, com a popularização de algumas tecnologias, o termo impressão 3D tem sido adotado pela sociedade em geral (usuários e algumas empresas do setor). Acredita-se que isso se deve, principalmente, pela facilidade deste em transmitir o conceito ou princípio fundamental dos processos. 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 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.

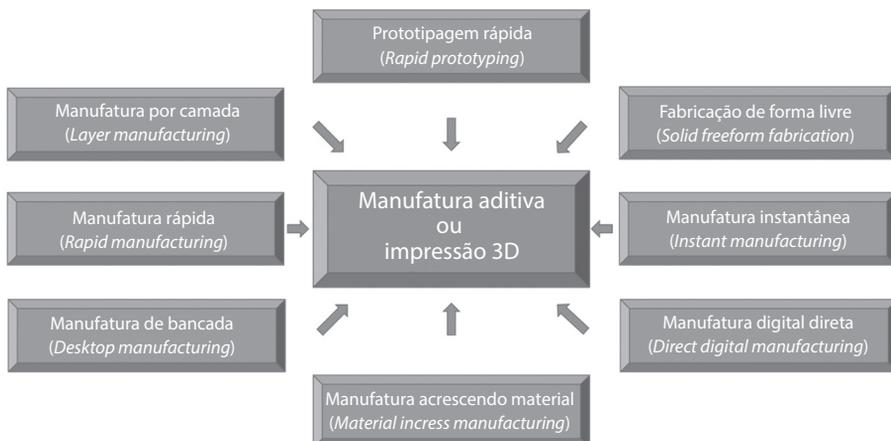


Figura 1.2 Algumas das principais variações da nomenclatura da área de AM.

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 [2], as raízes das tecnologias atuais de AM podem ser traçadas a partir de duas grandes áreas técnicas: a topografia e a fotoscultura, como explicado a seguir.

Na área da topografia, a primeira grande aplicação do método de construção por camadas deve-se a Blather [6], 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.

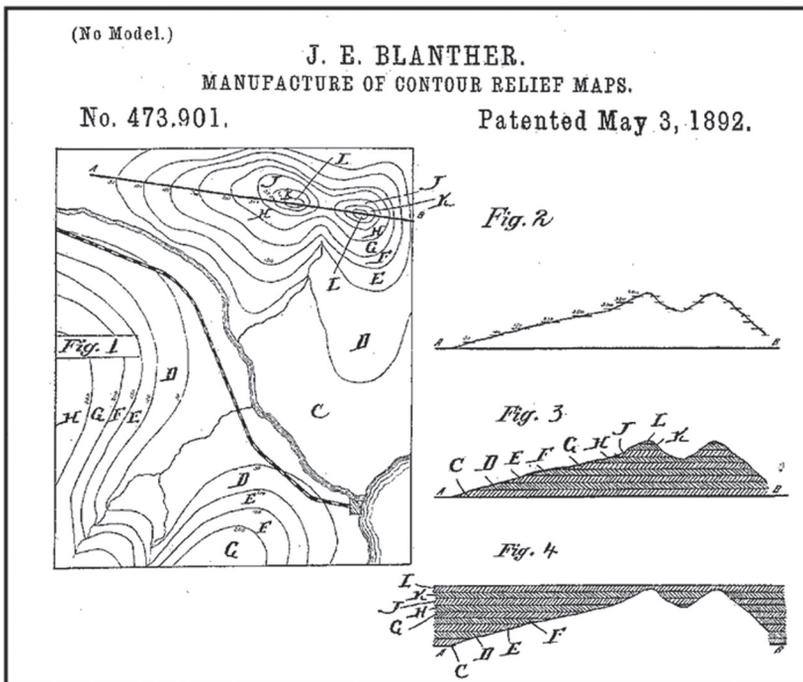


Figura 1.3 Método de Blather para a construção de mapas topográficos [6].

Diversos refinamentos do método proposto por Blather 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 [2].

Em 1972, Matsubara [7], 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, posteriormente, um modelo de fundição.

DiMatteo [8], em 1974, verificou que a técnica 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.

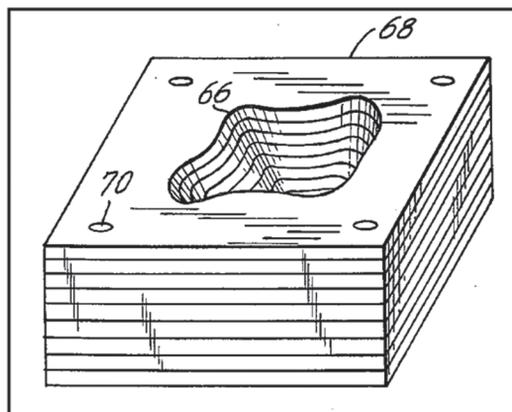


Figura 1.4 Molde fabricado com a técnica de adição de camadas por DiMatteo [8].

Em 1979, o Professor Takeo Nakagawa [9], 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.

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 [10]) em 1860. Basicamente, a 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 simultaneamente. A silhueta de cada uma das fotos era utilizada depois por um artista para esculpir cada um dos 1/24 da porção cilíndrica da figura, conforme citado por Beaman [2].

Na primeira metade do século XX, mais especificamente em 1935, Morioka [11] 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 [2]) propôs, em 1951, um sistema que possuía algumas das características da técnica atual de estereolitografia. A técnica de Munz consistia de

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 desenvolvida por Munz para o desenvolvimento de uma imagem de um objeto tridimensional.

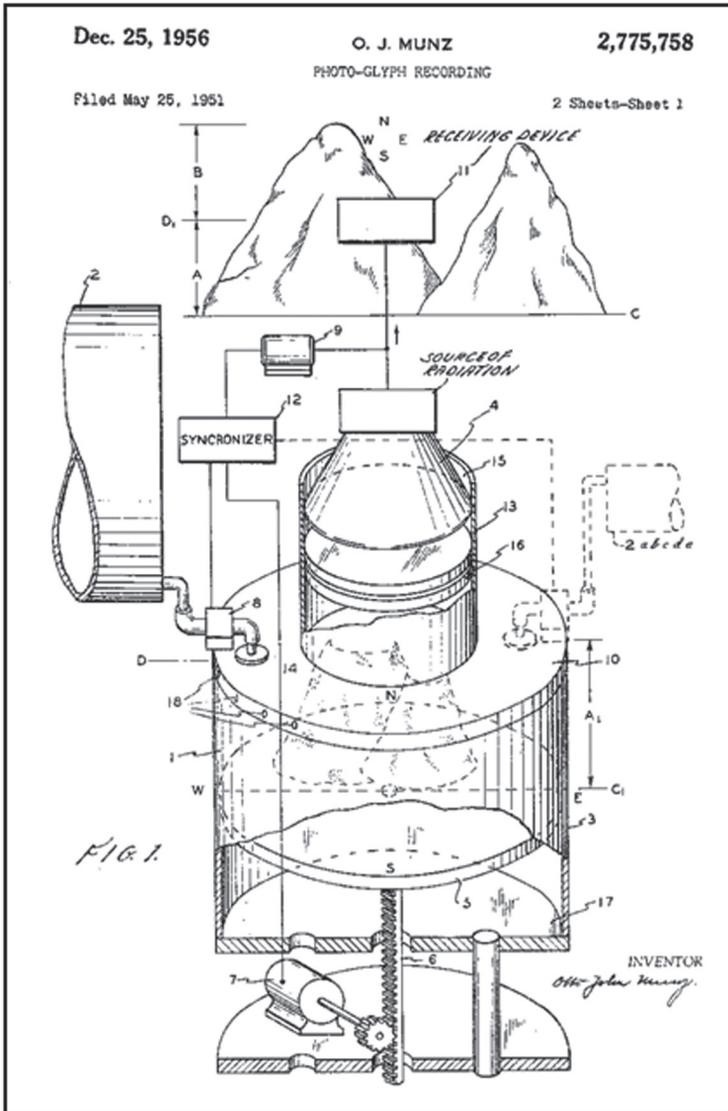


Figura 1.5 Processo de Munz (1956) para reprodução da imagem tridimensional de um objeto [12].

Em 1968, Swainson [13] 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.

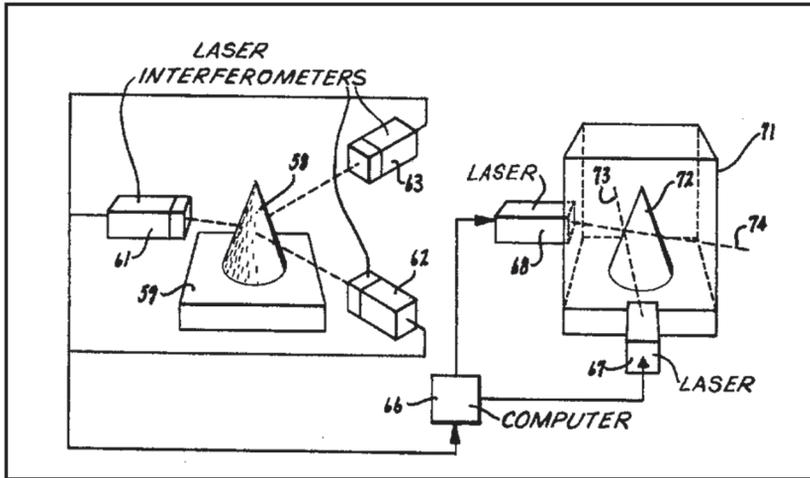


Figura 1.6 Processo de fotoescultura utilizando-se a interseção de lasers por Swainson [13].

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 [14] 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.

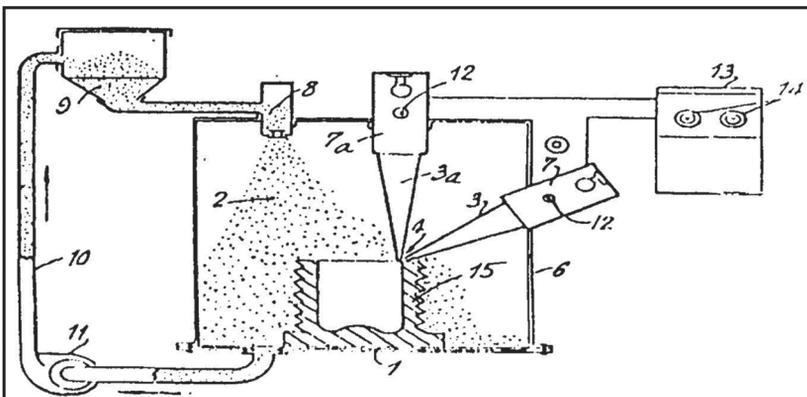


Figura 1.7 Processo de sinterização a laser proposto por Ciraud, em 1972 [14].

Em 1982, na área de fotopolimerização, Herbert [15], da empresa 3M, propôs um sistema no qual um feixe de *laser* ultravioleta (UV) polimerizava uma camada de polímero fotossensível por meio de um sistema de prismas em um *plotter* X-Y. No processo proposto por Herbert, 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.

Observa-se, assim, que os trabalhos de pesquisas, técnicas e processos desenvolvidos para a fotoescultura e para a topografia deram origem às atuais técnicas de AM. Todavia, essas técnicas passaram a ser empregadas de forma mais intensa somente após o aparecimento de equipamentos comerciais, sendo o primeiro deles denominado SLA-1 (*stereolithography apparatus*), apresentado pela empresa americana 3D Systems em 1987.

1.5 PRINCÍPIOS DE PROCESSAMENTO DAS TECNOLOGIAS DE AM

Uma forma simples de classificar os processos de AM é por estado ou forma inicial da matéria-prima utilizada na fabricação. Nessa linha, os processos são classificados como sendo baseados em líquido, sólido e pó [4]. No entanto, essa forma de agrupar não fornece nenhuma informação sobre o princípio de processamento do material em camadas das diferentes tecnologias, ou seja, informação sobre os mecanismos de adição e adesão envolvidos. Visando justamente utilizar os diferentes princípios como método de classificação das tecnologias de AM, a norma ISO/ASTM 52900:2015(E) [5] propõe o enquadramento em sete categorias ou grupos, conforme descritos no Quadro 1.1. Cada um desses grupos é descrito individualmente nos Capítulos 6 a 11, assim como as tecnologias citadas no quadro.

1.6 VANTAGENS E LIMITAÇÕES GERAIS DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO POR AM

Quando comparados aos processos de fabricação tradicionais, em especial com a usinagem CNC, os processos de AM apresentam vantagens e limitações.

Quadro 1.1 Classificação das tecnologias AM de acordo com o princípio de processamento das camadas [5].

Classificação das tecnologias AM	Descrição dos princípios	Algumas tecnologias na categoria
Fotopolimerização em cuba	Polímero fotossensível líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz*	Estereolitografia (<i>stereolithography</i> – SL), produção contínua com interface líquida (<i>continuous liquid interface production</i> – CLIP), tecnologia da empresa Invision-TEC, outros
Extrusão de material	Material é extrudado através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado	Modelagem por fusão e deposição (<i>fused deposition modeling</i> – FDM), MakerBot, RepRap, Fab@Home, outros
Jateamento de material	Material é depositado em pequenas gotas de forma seletiva	PolyJet, impressão por múltiplos jatos (<i>MultiJet printing</i> – MJP), tecnologia da Solidscape, outros
Jateamento de aglutinante	Um agente aglutinante líquido é seletivamente depositado para unir materiais em pó	Impressão colorida por jato (ColorJet Printing – CJP), tecnologia da VoxelJet, tecnologia da ExOne, outros
Fusão de leito de pó	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó	Sinterização seletiva a laser (<i>selective laser sintering</i> – SLS), sinterização direta de metal a laser (<i>direct metal laser sintering</i> – DMLS), fusão seletiva a laser (<i>selective laser melting</i> – SLM), LaserCUSING, fusão por feixe de elétrons (<i>electron beam melting</i> – EBM), outros
Adição de lâminas	Lâminas recortadas de material são unidas (coladas) para formar um objeto	Manufatura laminar de objetos (<i>laminated object manufacturing</i> – LOM), tecnologia da Solido, deposição seletiva de laminados (<i>selective deposition lamination</i> – SDL), outros
Deposição com energia direcionada	Energia térmica é usada para fundir materiais à medida que estes são depositados	Forma final obtida com laser (<i>laser engineered net shaping</i> – LENS), deposição direta de metal (<i>direct metal deposition</i> – DMD), revestimento a laser tridimensional (<i>3D laser cladding</i>), outros

*Observação: os processos que utilizam projeção de luz UV (com ou sem máscara) e cujo material não fica necessariamente em uma cuba estão inclusos nesse grupo.

1.6.1 VANTAGENS

Algumas das principais vantagens podem ser sintetizadas como:

- Grande liberdade geométrica na fabricação, isto é, independência da complexidade da peça. Geometrias normalmente impossíveis de serem fabricadas por outros processos podem ser obtidas por AM. Isso abre uma série de oportu-

tunidades em termos de projeto. Por exemplo, pode-se reduzir o número de peças nas montagens por meio da integração das funções e tem-se maior liberdade para criar projeto/*design* com formas livres (*freeform*) e a possibilidade de otimizar o projeto para a máxima resistência e o mínimo peso (por exemplo, otimização de forma e estrutural, materiais com estruturas celulares), entre outras. O Capítulo 13 mostra mais detalhes sobre essas vantagens. Destaca-se também a aplicação em ferramental (fabricação de moldes), com a obtenção de insertos e canais conformados com características construtivas que permitem reduzir o ciclo de processamento e melhorar a qualidade do moldado. Esses detalhes são apresentados no Capítulo 12.

- Pouco desperdício de material e utilização eficiente de energia. Na maioria das tecnologias, o material gasto para fabricar um componente equivale aproximadamente ao volume de material da peça. Isso depende fortemente da tecnologia empregada e é motivo de discussão nos capítulos específicos de cada classe de tecnologia.
- Não requer dispositivos de fixação. Geralmente, as peças são fixadas nas plataformas de construção por materiais depositados pela própria tecnologia, dispensando o projeto de qualquer dispositivo específico.
- Não é necessária a troca de ferramentas durante a fabricação do componente, como no caso de máquinas CNC. Normalmente, um único meio de processamento do material é utilizado do início ao fim do processo, como descrito no Quadro 1.1 (cura UV, sinterização a *laser*, extrusão de material, jateamento de material etc.).
- O componente é fabricado em um único equipamento, do início ao fim, ou seja, numa única etapa. No entanto, dependendo da tecnologia e da finalidade da peça, algumas etapas de pós-processamento podem ser necessárias, por exemplo, para reforçar a resistência mecânica da peça, para melhorar o acabamento, a precisão etc. Mais detalhes estão disponíveis no Capítulo 5 e ao longo dos capítulos que descrevem cada processo.
- Não são necessários cálculos complexos das trajetórias de ferramentas. Quando se trabalha com camadas planas, o planejamento de processo é bastante simplificado, pois os cálculos se restringem à obtenção de trajetórias no plano 2D e, por isso, são realizados de forma praticamente automática por sistemas de planejamento de processo.
- Rapidez na obtenção de baixa quantidade de componentes quando comparados aos processos tradicionais. Em especial, destaca-se a vantagem na obtenção de protótipos físicos, principalmente os mais complexos. O impacto da AM, mais especificamente na fase de *design* de produto, é abordado no Capítulo 2. 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 2 e 3.

- Possível produção de peças finais, em especial por meio das tecnologias baseadas em materiais metálicos ou polímeros de engenharia. Em relação à produção, existe uma quantidade de peças de um lote que estabelece o ponto de equivalência de custo em relação aos processos tradicionais. Assim, o custo por AM é menor que o tradicional quando a demanda está abaixo dessa quantidade e maior, quando acima dela. A flexibilidade para produzir peças para várias aplicações e com grande diversidade geométrica é também uma grande vantagem quando se trata da produção de componentes finais. Mais detalhes podem ser encontrados no Capítulo 13.
- Algumas tecnologias têm o potencial de misturar materiais diferentes, ou mesmo mudar a densidade do material durante o processamento, o que permite criar materiais com gradação funcional, variando as propriedades (resistência, dureza, porosidade, flexibilidade etc.) ao longo da peça. Isso tem aberto novos campos de aplicações até então não possíveis ou inimagináveis.

1.6.2 LIMITAÇÕES

Algumas restrições ou deficiências atuais da AM como processo de fabricação são [4, 16, 17]:

- 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; assim, o material possui, em geral, propriedades anisotrópicas. Isso implica em algumas limitações na aplicação das peças produzidas por esses processos.
- A precisão e o acabamento superficial são inferiores aos das peças obtidas por processos convencionais, como a usinagem. Isso também se deve ao princípio de adição de camadas, que dá origem aos degraus de escada nas superfícies de regiões inclinadas e curvas (ver Figura 1.1 – Peça fabricada). Outro ponto é o desvio dimensional na direção de construção que pode chegar ao valor de uma espessura de camada. Esses efeitos, e outros que são detalhados no Capítulo 5, provocam desvios da geometria da peça que são inerentes aos processos de AM.
- A maioria das tecnologias possui limitação quanto à escolha dos materiais que podem ser empregados. Em muitos casos, somente estão disponíveis alguns materiais proprietários, desenvolvidos especificamente para uma dada tecnologia. Esses materiais possuem, em alguns casos, propriedades semelhantes às dos materiais convencionais, mas não exatamente iguais, o que pode limitar essa tecnologia para certas aplicações.
- No caso de tecnologias AM de porte industrial, o custo envolvido é elevado, principalmente de aquisição e operação do equipamento, incluindo materiais e insumos nos processos. Entre outras consequências, isso leva, por exemplo, à

tendência de se limitar o seu uso durante o PDP. No entanto, com o advento das impressoras 3D de baixo custo, esse cenário vem se alterando. Já para os casos de aplicação na produção de componentes finais (Capítulo 13) ou em que os componentes tenham alto valor agregado, o emprego da AM tem se justificado.

- Problemas como distorções e empenamento do material podem ser observados em alguns processos, se não totalmente sob controle e calibrados, em virtude da natureza térmica/química do princípio de adesão utilizado. Cada vez mais, esses problemas vêm sendo minimizados com a evolução das tecnologias de AM.
- Considerando a fabricação de lotes grandes, a AM é ainda lenta e mais cara se comparada aos processos tradicionais. No entanto, para aplicações altamente customizadas ou de baixa produção, como nas áreas médica e aeroespacial, esses processos têm, cada vez mais, ocupado um espaço como método de manufatura e produção final de componentes (ver Capítulo 14).

1.7 APLICAÇÕES

As primeiras tecnologias de AM possibilitavam, principalmente, a obtenção de protótipos para visualização, com menores exigências em termos de materiais, precisão dimensional e desempenho (função). A aplicação se restringia aos estágios iniciais do PDP. Com o aumento da percepção do potencial oferecido pela AM, o campo de aplicações foi se ampliando consideravelmente. Isso passou a exigir mais dos processos em termos de melhoria geral da qualidade dos componentes produzidos, novos materiais e funcionalidade.

Outra exigência crescente foi em relação à necessidade de se utilizar um maior número de protótipos no PDP, para uso dentro ou fora da empresa (testes de campo), por exemplo, fornecedores, ferramentarias, clientes e outros atores da cadeia. Adicionalmente, também cresceu a necessidade de se ter protótipos funcionais. Para tanto, exige-se a utilização do mesmo material (ou o mais próximo possível) da peça final e também do mesmo processo de fabricação que será empregado para a produção final, em grande escala. Em geral, para essas necessidades, a utilização de um molde-protótipo é primordial, e a aplicação da AM nessa área vem sendo buscada desde as primeiras gerações de equipamentos.

Em resposta a essas exigências, as tecnologias de AM evoluíram, e novos processos foram criados. 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 serão explicados no Capítulo 12.

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]. Um levantamento recente realizado com 127 empresas usuárias das tecnologias AM apresentou uma distribuição geral de onde estas estão

sendo utilizadas (Figura 1.8). Ressalta-se que mais de um terço das aplicações (36,8%) concentra-se em modelagem e prototipagem (auxílio visual, modelos de apresentação e encaixe e montagem). Aplicações em manufatura final chegam a 29%, e aplicações em ferramental, a 23% (modelos para molde-protótipo, modelos para fundição de metal e componentes para ferramental) [18].

Vários são os setores que podem se beneficiar do uso das tecnologias de AM, sendo já bastante difundidas nas indústrias aeroespacial, automobilística, de bioengenharia (medicina e odontologia), de produtos elétricos (utensílios domésticos), de produtos eletrônicos em geral e nos setores de 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 3 e 6 a 11, que descrevem as principais tecnologias de AM, bem como nos Capítulos 14 e 15.

Por fim, é importante ressaltar que, com a popularização das impressoras 3D de baixo custo, um campo de aplicação mais popular e doméstico tem crescido. Destaca-se a obtenção de produtos customizados e de entretenimento (brinquedos em geral). Além disso, setores como confeitarias têm utilizado tecnologias específicas, baseadas no princípio da AM, para produzir doces das mais variadas formas, agregando valor aos seus produtos [19, 20].

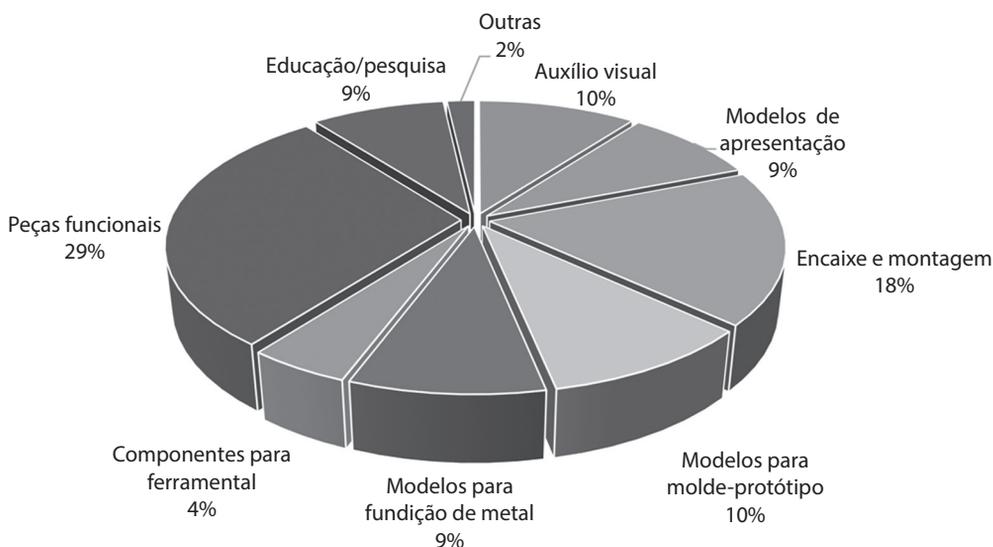


Figura 1.8 Áreas de aplicação da AM [18].

1.8 CONCLUSÕES

Neste capítulo, foi introduzido o conceito da manufatura aditiva ou impressão 3D como um processo de fabricação baseado na adição de camadas sucessivas de material. Um breve relato histórico do surgimento das tecnologias foi apresentado, desde

os primeiros experimentos para a produção de sólidos por adição de camadas, ocorridos no final do século XIX, até o surgimento do primeiro equipamento comercial, em 1987. As diversas tecnologias existentes foram agrupadas de acordo com o princípio de processamento do material empregado (mecanismo de adição, adesão etc.), com base na norma ISO/ASTM 52900:2015(E).

O aparecimento da AM vem sendo considerado um marco em termos de tecnologias de manufatura, com grande impacto em vários setores. Observa-se uma ampliação constante nas áreas de aplicação da AM, existindo ainda muito espaço para novos desenvolvimentos. Isso tem gerado um cenário de grandes oportunidades de pesquisas, tanto em materiais como em processos e aplicações.

REFERÊNCIAS

- 1 THE ECONOMIST. The third industrial revolution. *The Economist*, San Francisco, Apr. 21st 2012. Disponível em: <<http://www.economist.com/node/21553017>>. Acesso em: 6 out. 2016.
- 2 BEAMAN, J. J. et al. *Solid freeform fabrication: a new direction in manufacturing*, dordrecht. London: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- 3 KRUTH, J. P. Material increment manufacturing by rapid prototyping techniques. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Amsterdam, v. 40, n. 2, p. 603-614, 1991.
- 4 CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. *Rapid prototyping: principles and applications*. 3. ed. Singapore: Manufacturing World Scientific Pub Co., 2010.
- 5 ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; ASTM – AMERICAN SOCIETY OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING AND MATERIALS. *ISO/ASTM 52900:2015(E): standard terminology for additive manufacturing – general principles – terminology*. Genève: ISO; West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- 6 BLANTHER, J. E. *Manufacture of contour relief-maps*. US473901 A, 24 Apr. 1890, 3 May 1892. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US473901>>. Acesso em: 6 out. 2016.
- 7 MATSUBARA, K. *Molding method of casting using photocurable substance*. Japanese Kokai Patent Applications, Sho 51[1976]-10813, 1974.
- 8 DIMATTEO, P. L. *Method of generating and constructing three-dimensional bodies*. US3932923 A, 21 out. 1974, 20 jan. 1976. Disponível em: <<https://www.google.ch/patents/US3932923>>. Acesso em: 6 out. 2016.
- 9 NAKAGAWA, T. et al. Blanking tool by stacked bainite steel plates. *Press Technique*, [s.l.], p. 93-101, 1979.

- 10 BOGART, M. In art the ends don't always justify means. *Smithsonian*, Washington, DC, p. 104-110, 1979.
- 11 MORIOKA, I. *Process for manufacturing a relief by the aid of photography*. US2015457 A, 20 fev. 1933, 24 set. 1935. Disponível em: <<https://www.google.ch/patents/US2015457>>. Acesso em: 6 out. 2016.
- 12 MUNZ, O. J. *Photo-glyph recording*. US2775758 A, 25 maio 1951, 25 dez. 1956, Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US2775758>>. Acesso em: 6 out. 2016.
- 13 SWAINSON, W. K. *Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product*. US4041476, 23 jul. 1971, 9 ago. 1977. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US4041476>>. Acesso em: 6 out. 2016.
- 14 CIRAUD, P. A. *Process and device for the manufacture of any objects desired from any meltable material*. FRG Disclosure Publication 2263777, 1972.
- 15 HERBERT, A. J. Solid object generation. *Journal of Applied Photographic Engineering*, Springfield, v. 8, n. 4, p. 185-188, 1982.
- 16 KOCHAN, D.; CHUA, C. K. State-of-the-art and future trends in advanced rapid prototyping and manufacturing. *International Journal of Information Technology*, Singapore, v. 1, n. 2, p. 173-184, 1995.
- 17 GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, 2010.
- 18 WOHLERS ASSOCIATES. *Wohlers report 2015: 3D printing and additive manufacturing, state of the industry annual worldwide progress report*. Fort Collins, 2015.
- 19 3D SYSTEMS. *3D systems culinary lab*. Rock Hill, [2016]. Disponível em: <<http://www.3dsystems.com/culinary>>. Acesso em: 13 out. 2016.
- 20 THE CANDYFAB PROJECT. Disponível em: <<http://candyfab.org/>>. Acesso em: 13 out. 2016.



Clique aqui e:

[Veja na loja](#)

Manufatura Aditiva

Tecnologias e aplicações da impressão 3D

Neri Volpato (Organizador)

ISBN: 9788521211501

Páginas: 400

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2017

Peso: 0.652 kg