



O MUNDO
DA IMPRESSÃO

3D

E O FABRICO DIGITAL

Carlos Relvas

AUTOR

Carlos Relvas

TÍTULO

O mundo da impressão 3d e do fabrico digital

EDIÇÃO

Publindústria, Edições Técnicas

Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO

www.publindustria.pt

DISTRIBUIÇÃO

Engebook - Conteúdos de Engenharia e Gestão

Tel. 220 104 872 · Fax 220 104 871 · E-mail: apoiocliente@engebook.com · www.engebook.com

REVISÃO

Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

DESIGN DE CAPA

Gabriela César



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2017 | Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

Todos os direitos reservados a Publindústria, Produção de Comunicação, Lda. para a língua portuguesa.

A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, no todo ou em parte, sob qualquer forma ou meio, seja eletrónico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros sem autorização prévia por escrito do autor.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

CDU

681,6

621,7

ISBN

E-book: 978-989-723-268-8

Engebook – Catalogação da publicação

Família: Eng. Mecânica

Subfamília: Tecnologia/Fabrico

O MUNDO
DA IMPRESSÃO

3D

E O FABRICO DIGITAL

PREFÁCIO

Muito do que conhecemos, usamos e fazemos desde há muito tempo é baseado sobretudo em processos subtrativos. Partindo de um elemento/peça base, a peça ou componente final pretendido obtém-se por subtração/remoção de material desse elemento base. Com os processos subtrativos houve todo um universo de máquinas, equipamentos, técnicas e ferramentas que foram desenvolvidas. A par com isso houve o desenvolvimento de sistemas de comando numérico das máquinas e equipamentos, bem como das linguagens de comunicação e de programação dos sistemas de comando numérico.

A impressão 3D apresenta-se como uma abordagem distinta: formar elementos e peças de modo aditivo, por consolidação de materiais. Partindo do nada, as peças são formadas do interior para o exterior, ou camada sobre camada, com a deposição e consolidação do material depositado a dar corpo e forma à peça pretendida, que é formada crescendo sobre si mesma.

Inicialmente tratava-se de técnicas para obtenção, mais ou menos rápida, de protótipos. Peças com a forma final pretendida, mas sem as características funcionais e de resistência, mecânica e/ou outra, requeridas para as peças finais. Se bem que tais métodos e técnicas continuem a ser usados para a elaboração de protótipos, cada vez mais evoluídos, são crescentemente usadas para a obtenção de elementos e de peças com características funcionais e de resistência cada vez mais próximas, se não mesmo idênticas, às pretendidas para as peças finais. Assim se podem obter pequenas, médias ou mesmo grandes séries de peças com as características funcionais pretendidas.

Múltiplas são as facetas dos processos de impressão 3D.

Desde logo os materiais usados, que podem ir de materiais poliméricos a materiais cerâmicos ou metálicos. A forma como os materiais se apresentam é também variada, podendo ser sólidos (geralmente na forma de filamentos ou de pós) ou líquidos. Quando o material é um sólido é necessária a adição localizada de energia para promover a sua fusão localizada, seguida da deposição e consolidação localizadas do material, formando-se a peça a obter por crescimento sobre si mesma. Quando o material é um líquido não é necessária a adição de energia para a sua fusão, mas é necessária a criação de condições para a sua consolidação. Os materiais usados são importantes, mas não são menos importantes os processos de adição localizada de energia para promoção da fusão localizada do material e da sua deposição sobre o material já consolidado. Os processos de adesão das sucessivas deposições de material sobre o material já consolidado, e a consolidação do material depositado, são também da maior importância. Para que o processo, no seu todo, tenha sucesso é necessária a correta adequação dos materiais usados, dos sistemas de fornecimento de energia e de aquecimento localizado, dos processos de adesão, e dos processos de arrefecimento e de consolidação. Trata-se, por isso, de uma tecnologia em que materiais, processos e equipamentos estão intimamente relacionados, com fortes relações de interdependência, necessitando de ser considerados em conjunto, e em simultâneo.

O aquecimento localizado para fundir o material e a subsequente posição de deposição do material requerem sistemas de posicionamento com elevado rigor dimensional, e de grande flexibilidade já que não há limites às peças que se espera poderem vir a ser obtidas por aplicação desta tecnologia. Esta é, porventura, a maior proximidade entre os sistemas de impressão 3D e os sistemas de fabrico subtrativos que os precederam, e que com eles atualmente coexistem, que também requerem sistemas de posicionamento de elevado rigor dimensional. Os sistemas de comando numérico e as linguagens de comunicação e de programação usadas em ambas as tecnologias são também similares.

Há aplicações industriais de impressão 3D, incluindo as que usam metais como material de deposição, que são sistemas caros e não acessíveis ao grande público. Todavia, há muitas, e cada vez mais, aplicações que são acessíveis ao grande público. Os baixos esforços requeridos, o facto de o aquecimento ser localizado, e os baixos pontos de fusão de muitos dos materiais usados, levam a que esses sistemas de impressão 3D não necessitem de ser mecanicamente muito robustos e tenham já hoje preços relativamente baixos, e que se antevê sejam ainda mais baixos no futuro. Os materiais usados estão cada vez mais facilmente acessíveis, a preços cada vez mais baixos. Baixo custo dos equipamentos de pequena ou média dimensão, globalmente seguros e não sujeitos a temperaturas elevadas, com crescentes preocupações de design e de grande versatilidade, e com interfaces de utilização simples e intuitivas, e baixo custo dos materiais, levam a uma disseminação crescente deste tipo de tecnologia. Trata-se cada vez mais de soluções gerais para o grande público, que podem ser obtidas a preços cada vez mais acessíveis, sem requererem conhecimentos específicos muito especializados e eminentemente técnicos. Haverá sempre problemas a resolver e desenvolvimentos a fazer, e desse ponto de vista estas tecnologias podem ser encaradas como sendo para especialistas. Todavia, do ponto de vista da utilização e do utilizador comum, esse não é de todo o caso, analogamente ao que acontece com a utilização das tecnologias de informação e de comunicação.

Uma tecnologia acessível a baixos custos e sem requerer conhecimentos especializados deixa um imenso caminho livre para a descoberta, para a criatividade e para a personalização na utilização da impressão 3D. Obter, com rapidez e a baixo custo, peças diferentes e personalizadas, com características funcionais e de resistência, mecânica e/ou outra, é porventura uma das características mais atrativas desta tecnologia, que potencia e que promoverá o seu crescimento exponencial.

Para lá do fabrico de peças funcionais e/ou ornamentais e de decoração usando a impressão 3D, há todo um vasto conjunto de aplicações, algumas que se podem antever mas muitas mais que só o futuro virá a revelar.

Se a impressão 3D é já uma realidade presente na vida de muitos, e a entrar cada vez mais na vida de muitos mais, augura-se um futuro muito alargado para esta tecnologia, com resultados porventura ainda mais notórios e marcantes que os atingidos com a utilização massiva das tecnologias de informação e de comunicação. Trata-se de tecnologias que mudaram, e mudam, o modo de conceber, o modo de pensar, o modo de trabalhar, o modo de fabricar, o modo de usar, etc. Trata-se de tecnologias que inundam as nossas vidas, e que as mudam. De salientar ainda que as tecnologias de informação e de comunicação são elementos de suporte, da maior importância, para as tecnologias

de impressão 3D atuais. E sê-lo-ão também para os seus desenvolvimentos futuros. Cada uma destas tecnologias influencia cada vez mais a outra, cada uma colocando desafios cada vez maiores à outra.

O Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro tem dado especial atenção às técnicas e tecnologias de conceção, representação, desenvolvimento, prototipagem, projeto e fabrico, incluindo processos e tecnologias subtrativas e aditivas. Não só tem prestado especial atenção a essas técnicas e tecnologias, como tem acompanhado as suas evoluções e está muito atento às tendências a elas associadas. Assim, e naturalmente, trata-se de temáticas presentes nas diferentes vertentes da sua atuação, que incluem a formação, a investigação, o desenvolvimento, e a cooperação.

Neste livro podem ser encontradas as diversas facetas da impressão 3D, incluindo, mas sem se limitar a elas: perspetiva histórica, vantagens e desvantagens, materiais usados, diferentes técnicas, diferentes equipamentos, equipamentos atualmente disponíveis, e sistemas de informação e de comunicação em que se apoiam. São detalhadas as principais técnicas/tecnologias de impressão 3D atualmente em uso, não como soluções acabadas e estagnadas, mas com as portas abertas a futuras evoluções e desenvolvimentos. É dada especial importância às diferentes etapas que compõem o processo de obtenção de peças por impressão 3D, as quais devem ser conhecidas antecipadamente para planear esse processo, e para levar a cabo, com sucesso, a obtenção dos componentes/peças pretendidas. São também abordadas as oportunidades de mercado e de negócio proporcionadas por esta tecnologia, bem como a atual oferta do mercado. Não menos importante é a, vasta e muito específica, terminologia usada quando está em causa esta tecnologia.

Trata-se, pois, de uma obra que ajuda a enquadrar e a contextualizar quem se inicia na impressão 3D, podendo o leitor usá-la de diferentes modos, consoante os seus diferentes objetivos e/ou conhecimentos anteriores. Pode ser usada na íntegra, ou apenas parcialmente se o que estiver em causa forem apenas alguns aspetos específicos. Pode ser usada para obter conhecimentos aprofundados para quem neles estiver interessado, ou apenas para obter uma boa perspetiva da tecnologia da impressão 3D por quem se queira ficar por essa abordagem mais geral, ainda que rigorosa. Pode servir de porta de entrada para o conhecimento desta tecnologia, servindo de aperitivo e abrindo as portas para estudos mais aprofundados para os leitores que neles estejam, ou venham a ficar, interessados.

A impressão 3D tem já em um lugar assegurado na atualidade, e irá marcar cada vez mais a vida de todos nós, antevendo-se que a venha a mudar e marcar a níveis não hoje imagináveis. Conhecer esta tecnologia é fundamental para antecipar e melhor perceber o futuro, e para estar melhor preparado para intervir no futuro. Este livro constitui um precioso auxiliar para melhor conhecer esta tecnologia, e para estar melhor preparado para dela tirar o maior partido, a todos os níveis.

Vítor Costa

Diretor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Prototipagem rápida, impressão 3D e fabrico aditivo	4
1.2	Benefícios da impressão 3D	5
1.2.1	Vantagens da impressão 3D	8
1.2.2	Desvantagens da impressão 3D	9
1.3	Tipo de aplicações	10
1.3.1	Modelos conceituais	11
1.3.2	Prova de conceito	11
1.3.3	Design industrial	12
1.3.4	Protótipos funcionais	12
1.3.5	Pré-produção	12
1.4	Áreas de aplicação	13
1.4.1	A impressão 3D por segmentos de mercado	14
1.4.2	A impressão 3D por áreas e setores	16
2	A IMPRESSÃO 3D	27
2.1	Conceitos e definições	28
2.1.1	Prototipagem rápida (rapid prototyping)	28
2.1.2	Processos aditivos	29
2.2	Desenvolvimento do processo de impressão 3D	30
2.2.1	Desenvolvimento de um modelo ou protótipo	32
2.3	Subcontratação da Prototipagem	35
2.4	Inovações de 3DP radicalmente novas	37
2.4.1	Impressoras 3D personalizadas	37
2.4.2	A Bio-Impressão	38
2.4.3	Criação de robots	39
2.5	A impressão 4D	39
3	HISTÓRIA DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA E DOS PROCESSOS ADITIVOS	41
3.1	Precedentes do fabrico aditivo	42

3.1.1	Origens da estereolitografia.....	42
3.2	Cronologia da prototipagem rápida e dos processos aditivos	44
4	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS.....	49
4.1	Classificação dos processos aditivos	50
4.1.1	Pela ordem cronológica da tecnologia	51
4.1.2	Pelo estado inicial da matéria-prima.....	52
4.1.3	Pela natureza do material: polímeros ou metálicos.....	52
4.1.4	Pela tecnologia utilizada para o processamento do material.	53
4.1.5	Tipo de mercado: industrial vs impressão 3D de consumo	56
4.2	Impressão 3D de consumo	57
4.2.1	Limitações e desafios à adoção generalizada da impressão 3D de consumo:	58
4.3	Impressão 3D profissional.....	59
4.3.1	Limitações e desafios da impressão 3D profissional.....	60
5	TECNOLOGIAS DE MATERIAIS POLIMÉRICOS	63
5.1	Impressão 3D em materiais poliméricos	64
5.1.1	Seleção de materiais e processos	65
5.1.2	Tipos de materiais poliméricos	68
5.1.3	Compósitos e novas opções de materiais	71
5.2	Fotopolimerização de resina.....	72
5.2.1	Estereolitografia (SL ou SLA)	72
5.2.2	Projeção digital de luz (DLP-digital light projection)	75
5.2.3	Cura Sólida na Base (SGC - Solid Ground Curing).....	77
5.2.4	A cura por ultravioleta (UV) não é SLA.....	78
5.3	Extrusão de Material	79
5.3.1	Modelação por extrusão e deposição de plástico (FDM)	79
5.3.2	Acabamentos e pós-processamento	81
5.4	Fusão em cama de pó.....	82
5.4.1	Sinterização seletiva por laser (SLS).....	82
5.4.1	Acabamentos e pós-processamento	84
5.5	Jato de material.....	85

5.5.1	Material Jetting (tecnologia thermojet).....	85
5.5.2	Multi-Jetting Modelling (tecnologia PolyJet).....	86
5.5.3	Processo DoD (tecnologia Solidscape).....	88
5.6	Jato de aglutinante.....	90
5.6.1	Binder Jetting (Tecnologia zprinter).....	90
5.6.2	ColorJet Printing (CJP).....	90
5.6.3	Acabamentos e pós-processamento.....	92
5.6.4	Multi Jet Fusion (tecnologia HP).....	93
5.7	Construção por Laminados.....	94
5.7.1	Processo de Fabrico de Objetos por Laminados (LOM).....	94
5.7.2	Selective Deposition Lamination (SDL).....	96
6	TECNOLOGIAS DE MATERIAIS METÁLICOS.....	97
6.1	Introdução à impressão 3D de metal.....	90
6.1.1	Benefícios do fabrico aditivo de metais.....	92
6.1.2	Materiais.....	93
6.2	Áreas de aplicação.....	96
6.3	Fusão em cama de pó.....	99
6.3.1	Sinterização direta de metais por laser (DMLS).....	99
6.3.2	SLS metais - Processo "LONG RUN".....	101
6.3.3	Fusão seletiva por laser (SLM).....	103
6.3.4	Fusão por feixe de eletrões (EBM).....	105
6.3.5	Acabamentos e pós-processamento.....	106
6.4	Deposição de material.....	107
6.4.1	Deposição de metal a laser (LMD).....	107
6.4.2	<i>Laser engineering net shape</i> (LENS®).....	108
6.4.3	<i>Electron beam directed energy deposition</i> (EBAM).....	110
6.4.4	Bound metal deposition extrusion process (BMD).....	111
6.5	Jato de aglutinante.....	113
6.5.1	Processo de impressão por jato de aglutinante.....	113
6.5.2	Acabamentos e pós-processamento.....	114

6.6	Construção por Laminados	115
6.6.1	<i>Solid-state layered bonding</i> (UAM)	115
6.7	Fabrico digital híbrido.....	116
6.8	Comparação dos processos.....	119
6.8.1	Análise do processo de impressão 3d de metal.....	119
6.8.2	Utilização do metal em pó	119
6.8.3	Processos de ded utilizando material em pó ou em fio	120
6.8.4	EBAM vs LMD	121
7	RAPID TOOLING e RAPID MANUFACTURING	123
7.1	O fabrico aditivo no fabrico de ferramentas	124
7.1.1	Conceito de <i>Rapid Tooling</i>	125
7.1.2	Benefícios do fabrico aditivo no fabrico de ferramentas	126
7.2	Tipologias de processos de fabrico de ferramentas	128
7.2.1	Processos diretos	129
7.2.2	Processos indiretos.....	130
7.3	Tecnologias de impressão 3d para prototipagem e produção.....	131
7.3.1	Insertos por FDM	131
7.3.2	Insertos por estereolitografia (Direct AIM™)	133
7.3.3	Componentes metálicos por fundição (Processo ZCast®).....	134
7.3.4	Processo RTV	136
7.3.5	Vazamento de pós metálicos (<i>Keltool</i>).....	139
7.3.6	Deposição por pulverização metálica	140
7.4	<i>Direct Digital manufacturing</i>	141
7.5	Benefícios da impressão 3D associados à produção de peças finais.....	142
7.6	Impressão 3D na produção de peça final	143
8	DESENHO, PREPARAÇÃO DE MODELOS E PÓS-PROCESSADORES	145
8.1	Modelação 3D.....	146
8.1.1	Redução dos constrangimentos.....	146
8.1.2	Alteração da forma de projetar.....	147
8.1.3	Otimização de topologia	149

8.2	Formatos CAD.....	152
8.2.1	Resolução do ficheiro STL.....	153
8.3	Estruturas de suporte.....	154
8.3.1	Tipos de estruturas de apoio	157
8.3.2	Exemplos de projeto de estruturas de suporte.....	159
8.4	Design for Manufacturing (DFM)	160
8.4.1	Recomendações para fabrico	161
8.4.2	Características dos modelos a obter por impressão 3D	163
8.4.3	Preparação dos modelos CAD	164
8.5	DFM – FDM.....	171
8.5.1	Restrições do processo.....	171
8.6	DFM - SLA	173
8.6.1	Restrições do processo.....	173
8.6.2	Estruturas de suporte.....	174
8.7	DFM - SLS.....	175
8.7.1	Restrições do processo.....	175
8.8	DFM - DMLS	179
8.8.1	Restrições do processo.....	179
8.9	DFM - Jato de aglutinante	181
8.9.1	Restrições do processo.....	181
8.10	3D Printing software	184
9	TECNOLOGIA DE MAQUINAGEM CNC e MAQUINAGEM DE ALTA VELOCIDADE.....	187
9.1	Tecnologia de maquinagem cnc.....	189
8.1.1	Fenomenologia do processo de maquinagem.....	190
8.1.2	Maquinagem de alta velocidade e multieixos.....	192
9.2	Fabrico de protótipos por maquinagem cnc	195
8.1.3	Fases do processo de fabrico de modelos por maquinagem CNC	197
9.3	O controlo numérico	199
9.3.1	História do aparecimento do controlo numérico.....	199
9.4	Tecnologia das máquinas cnc.....	201

9.5	Tecnologia de maquinagem em torno.....	204
9.5.1	Parâmetros de corte	205
9.5.2	Operações realizáveis.....	206
9.5.3	As ferramentas	207
9.5.4	Exemplos de peças obtidas em torno CNC.....	209
9.6	Tecnologia de maquinagem em fresadora.....	210
9.6.1	Tipos e movimentos da fresagem	212
9.6.2	Operações de fresagem.....	215
9.6.3	Operações em furos	217
9.6.4	Ferramentas e porta-ferramentas.....	219
9.6.5	Exemplos de peças obtidas em CM	221
9.7	Programação CN.....	222
9.7.1	Sistemas de coordenadas.....	222
9.7.2	Ponto-zero da peça.....	223
9.8	Programação manual.....	224
9.8.1	Linguagens de programação normalizadas	224
9.8.2	Tipos de informações do programa.....	224
9.8.3	Sequência de operações e divisão em elementos de contorno	225
9.8.4	Termos da programação cn.....	226
9.8.5	Funções preparatórias.....	228
9.8.6	Funções auxiliares ou mistas	229
9.8.7	Elaboração de programas cn.....	230
9.8.8	Exemplo de programação	232
9.9	Programação automática	233
9.9.1	Fases do processo CAD/CAM/CNC	234
9.9.2	Estratégias de maquinagem.....	235
10	MATERIAIS E PROCESSOS TABELAS	239
10.1	Materiais poliméricos.....	244
10.2	Materiais metálicos.....	252
10.3	Tecnologia maquinagem.....	256

10.4	Listagem de softwares gratuitos.....	258
11	Bibliografia.....	259
11.1	Introdução.....	259
11.2	Impressão 3d.....	261
11.3	História da prototipagem rápida.....	263
11.4	Classificação dos processos.....	264
11.5	Tecnologias de materiais poliméricos.....	265
11.6	Tecnologias de materiais metálicos.....	267
11.7	Rapid tooling e rapid manufacturing.....	268
11.8	Desenho e preparação de modelos.....	270
11.9	Tecnologia de maquinagem cnc.....	272
11.10	Webgrafia.....	273

RESUMO

A impressão 3D ou fabricação aditiva é um processo que permite, com base num modelo 3D digital, construir objetos físicos através da deposição de materiais em camadas. A tecnologia de impressão 3D pode ser usada para criar protótipos, peças simples ou produtos finais altamente sofisticados, como peças de engenharia, implantes médicos e até órgãos artificiais.

Julga-se que a impressão 3D terá um impacto nas nossas vidas que poderá até romper com o que hoje estabelecemos para o processo de design e fabrico. Com a impressão 3D é possível sonhar, projetar e construir em qualquer lugar ou circunstância, até na nossa própria casa, bastando um computador e uma impressora.

Este livro tenta resumir “o mundo da impressão 3D” que apesar de ter mais de 30 anos, só agora se democratizou e se tornou alvo de curiosidade por muitos. Assim, apresenta-se a tecnologia e todo o seu potencial, os processos, materiais e equipamentos. Por vezes, “o mais fácil é adquirir” o físico e tangível por isso, não foram esquecidos os aspetos mais técnicos, nomeadamente os relacionados com as recomendações para a obtenção de “bons resultados” (referimo-nos às recomendações de fabrico e preparação do modelo digital). Também a fabricação digital, hoje igualmente muito evocada, e que envolve a maquinagem CNC e a maquinagem de alta-velocidade, por isso não ficou esquecida, porque quando se fala de precisão este “ainda” é o processo de eleição.



1.3 TIPO DE APLICAÇÕES

Escolher a impressora 3D certa entre as várias alternativas pode, em princípio, parecer uma tarefa assustadora. Existem diferenças significativas entre tecnologias e na forma como estas transformam dados digitais num objeto sólido. As impressoras 3D atuais podem utilizar uma variedade de materiais com grandes diferenças nas propriedades mecânicas, características, acabamento superficial, resistência, aparência visual, exatidão e precisão, vida útil, propriedades térmicas e muito mais e dessa forma condicionar os resultados.

Portanto, é importante definir primeiro as aplicações primárias onde a impressão 3D será usada para fazer a seleção das tecnologias certas e quais as que poderão fornecer um maior impacto positivo nos resultados.

Um equívoco comum sobre a prototipagem é que esta está reservada ao início do ciclo de desenvolvimento do produto. A verdade é que podem-se usar protótipos em várias fases do desenvolvimento, muitas vezes para apresentar, testar e aperfeiçoar ideias, outras para testar e validar decisões de melhoria de produtos.

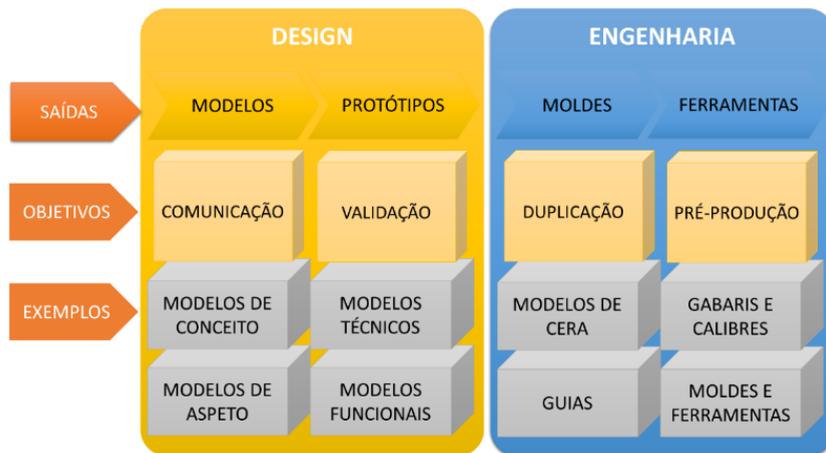


Figura 1.5 – Áreas de intervenção da impressão 3D

A decisão de prescindir da construção de vários protótipos em fases mais adiantadas do desenvolvimento pode aumentar o tempo de entrada do produto no mercado, resultar num projeto de produto subótimo, ou gastar mais em processos de produção desajustados.

Para aperfeiçoar um projeto e economizar em custos, devemos considerar cinco fases principais de prototipagem: modelos conceituais; prova de conceito; design industrial; protótipos funcionais e pré-produção.

1.4.1 A IMPRESSÃO 3D POR SEGMENTOS DE MERCADO

O mercado global de impressão 3D pode ser segmentado com base em componentes, áreas e aplicações e regiões geográficas. Com base em componentes, o mercado é classificado em tecnologia, material e serviços. Por áreas e aplicações, o mercado é categorizado em produtos para a indústria aeronáutica e aeroespacial, indústria automóvel, produtos industriais, produtos de consumo, área médica, educação, I&D, etc.

No que se refere às matérias-primas, o mercado de impressão 3D é sub-segmentado em polímeros, metais, cerâmicas e outros. Numa análise de mercado por regiões geográficas, podemos referir que a América do Norte é provavelmente a maior região em termos de participação de mercado, devido ao desenvolvimento da tecnologia 3D nesta região, mas o mercado da Ásia-Pacífico e da Europa também deverão crescer rapidamente num futuro próximo.



Figura 1.6 – As áreas e segmentos do mercado da impressão 3D

Espera-se que o mercado global de impressão 3D continue a crescer significativamente nos próximos anos, impulsionado por fatores como o aumento das despesas dos *players* do mercado no desenvolvimento de produtos, o crescimento do segmento de utilizadores finais, aumento da facilidade de fabricação e atividades de investigação e desenvolvimento suportadas por políticas e apoios governamentais. O desenvolvimento tecnológico no setor de saúde também tem contribuído para o aumento da aplicação da impressão 3D, o que oferece boas oportunidades de expansão e crescimento do mercado.

Os fatores que impulsionam o mercado são a redução de erros, o elevado grau de precisão, uma utilização mais eficiente de matérias-primas, a capacidade de construir produtos personalizados, o uso simultâneo de múltiplos materiais, e ainda a melhoria de fatores como: tempo de produção; custo financeiro; competência técnica; etc. Entre os fatores restritivos para o crescimento do mercado incluem-se o custo do material (nomeadamente nos metálicos), a indisponibilidade e a má qualidade de alguns materiais, falta de *know-how* para usar e gerir esta tecnologia ou o acesso a ela.

A inovação de produtos e o aumento das despesas em investigação e desenvolvimento são as principais tendências seguidas pelos *players* do mercado. Os fabricantes concentram-se na criação e oferta de soluções e produtos de baixo volume e baixo custo que podem ser usados em várias áreas ou indústrias.

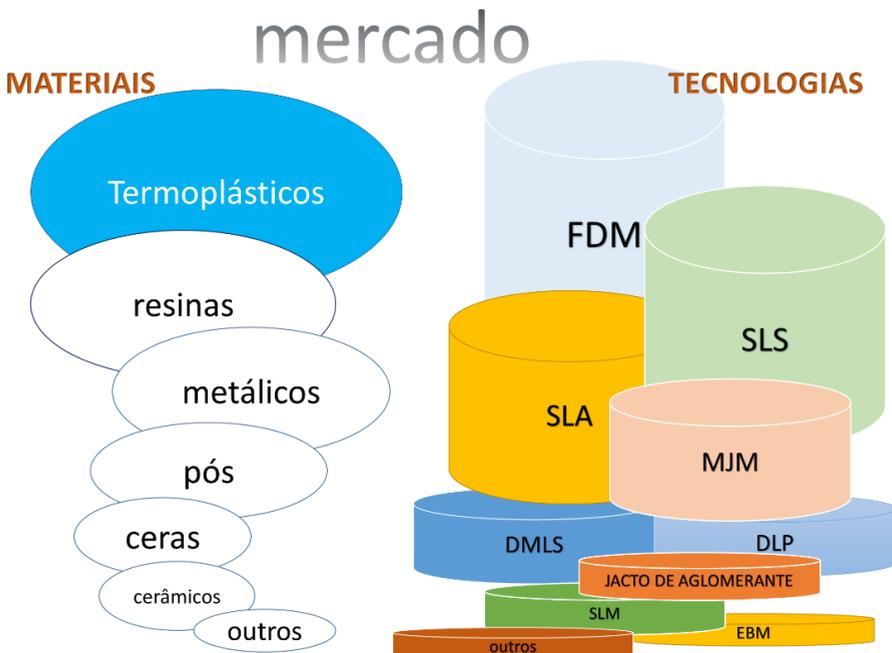


Figura 1.7 – Representatividade do mercado da impressão 3D por materiais e tecnologias

2.1.2 PROCESSOS ADITIVOS

Os processos aditivos realizam um fabrico orientado por camadas, onde os modelos são construídos camada a camada (layer oriented manufacturing). Estes processos permitem realizar peças de elevada complexidade geométrica e “praticamente impossíveis” de obter através de meios de fabrico convencionais, nomeadamente a maquinagem.

Os processos aditivos podem ser igualmente designados por *Solid Freeform Fabrication* ou por *Layered Manufacturing*, e definem-se como um conjunto de processos tecnológicos que permitem fabricar modelos físicos tridimensionais diretamente a partir de um modelo CAD.

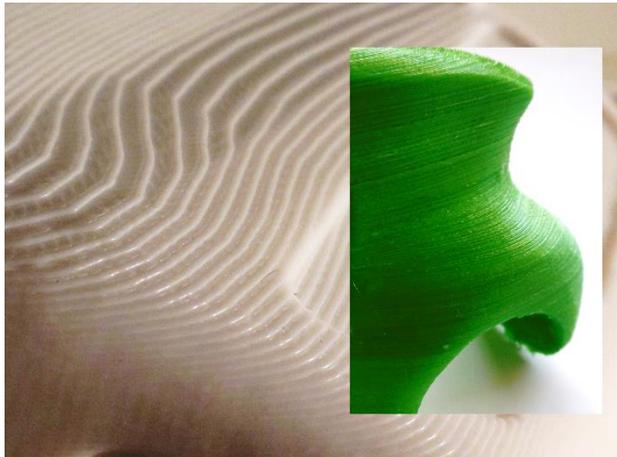


Figura 2.2 – Modelos de camadas

A característica comum dos processos de fabrico aditivo está no modo como os modelos são construídos, por camadas sucessivas, em que cada camada se assemelha a uma secção bidimensional que é construída uma sobre a outra até se atingir a forma final pretendida. A espessura de cada camada é geralmente da ordem da décima de milímetro e a aproximação à geometria final do objeto tridimensional é considerada aceitável.

Uma das vantagens dos processos de fabrico aditivo consiste no facto da geometria das peças, na maior parte das vezes, ser independente do processo de construção. Podendo uma peça complexa, constituída por uma variedade de formas e de finos detalhes, ser obtida tão facilmente como outra qualquer peça simples. A peça é construída de forma automática, numa única operação e sem a necessidade de dispositivos de fixação ou operações especiais.

Os equipamentos utilizados no processo de fabrico aditivo são frequentemente designados por Impressoras 3D. As Impressoras 3D utilizam modelos digitais 3D provenientes de desenhos CAD ou scanners 3D para criar objetos sólidos tridimensionais num qualquer material.

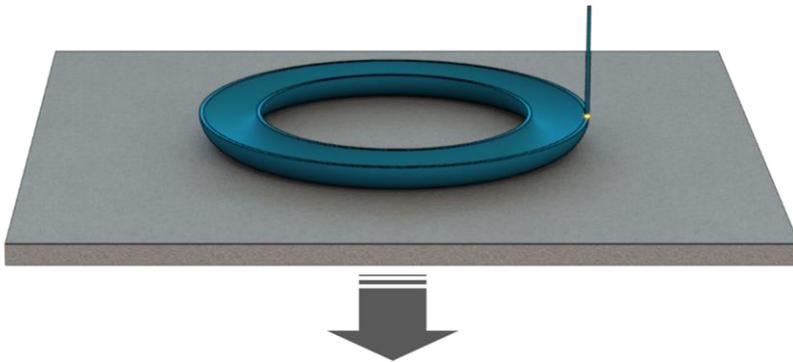


Figura 2.3 - Os modelos são construídos camada a camada sobre uma plataforma

2.2 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

A obtenção de modelos físicos por recurso à impressão 3D ou fabrico aditivo está sujeita a uma metodologia genérica que começa obrigatoriamente no modelo 3D digital, seja ele obtido por modelação direta no sistema CAD 3D, ou proveniente de um processo inverso de modelação (*reverse engineering*).

Refira-se que o processo inverso pode ser utilizado quando estamos perante um objeto físico e sem suporte digital. Neste caso, o objeto é previamente submetido a um processo de aquisição de forma, eventualmente através de um sistema de *scanner* 3D, do qual resulta uma nuvem de pontos que é posteriormente processada através de *software* até se atingir uma cópia digital 3D do objeto físico que pretendemos fabricar.

Uma vez obtido o modelo 3D digital, este é convertido para um formato poligonal, normalmente STL. O modelo STL é posteriormente "fatiado" em secções 2D, com espessuras na ordem das décimas de milímetro e correspondentes a cada camada de material, dando origem ao ficheiro SLI. Dependendo da tecnologia utilizada ainda pode ser necessário definir as condições de varrimento ou preenchimento das zonas interiores de cada camada. No entanto, refira-se que este ficheiro é gerado automaticamente pelo *software* de programação do equipamento.

5.2 FOTOPOLIMERIZAÇÃO DE RESINA

5.2.1 ESTEREOLITOGRAFIA (SL OU SLA)

A tecnologia de estereolitografia constrói as peças ou modelos através da fotopolimerização de uma resina líquida que é solidificada por ação de um feixe laser ultravioleta. Este processo foi considerado o processo pioneiro da prototipagem rápida e do fabrico por camadas, tendo sido inventado em 1984 por Charles Hull e patenteado em 1986. A primeira máquina surgiu no mercado em finais de 1987 (SLA-1 da 3D Systems Inc.).

O sistema é composto por quatro componentes principais: o computador com *software* que gera as camadas, o computador de controlo do sistema, o compartimento do processo e a unidade laser. Os componentes principais do compartimento do processo são a tina e a plataforma elevatória (elevador). No início do processo, a tina é cheia com uma resina líquida fotopolimerizável (resina epóxi ou acrílica) e a plataforma de construção posiciona-se imediatamente abaixo da superfície a uma distância igual à espessura da primeira camada.

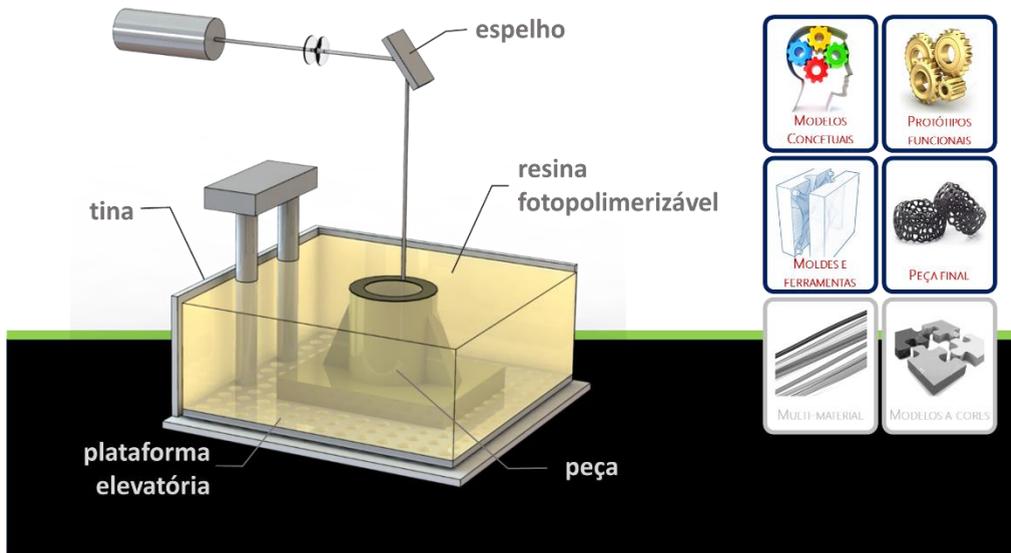


Figura 5.1 - Processo de estereolitografia (SLA)

5.2.2.1 EXEMPLOS DE PEÇAS DE DLP

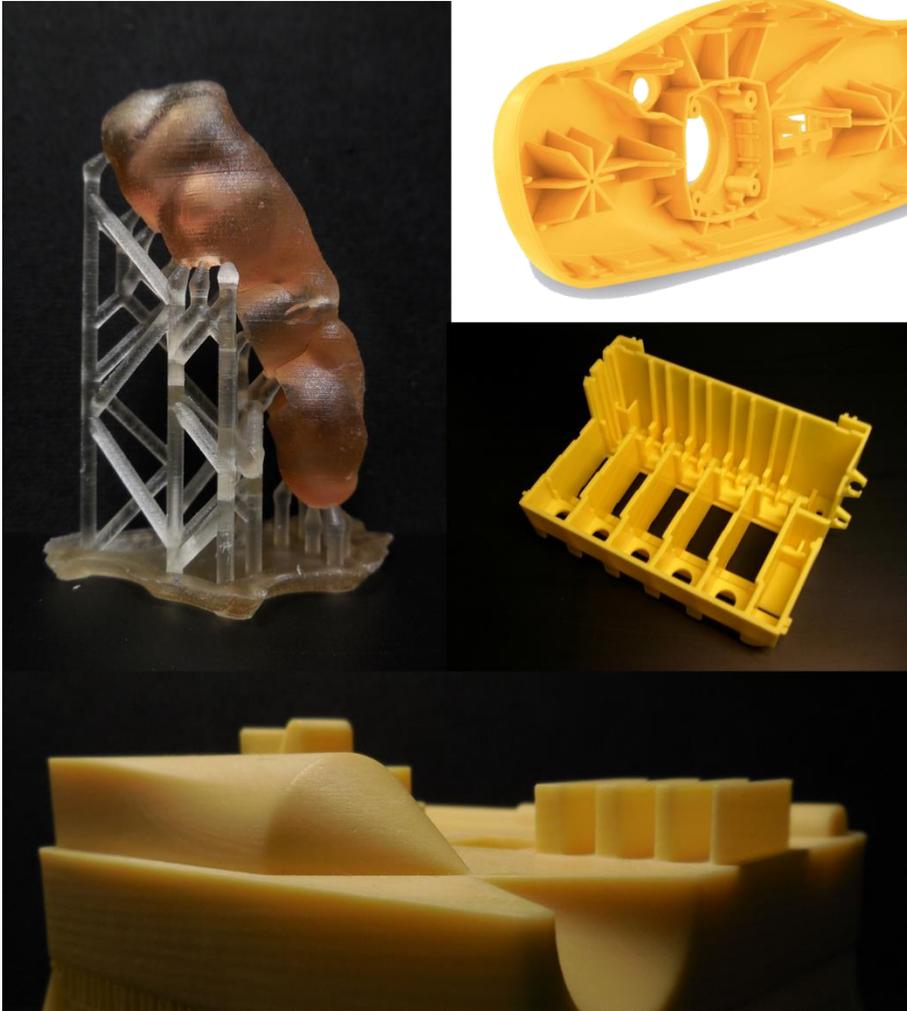


Figura 5.4 - Exemplo de peças obtidas por DLP

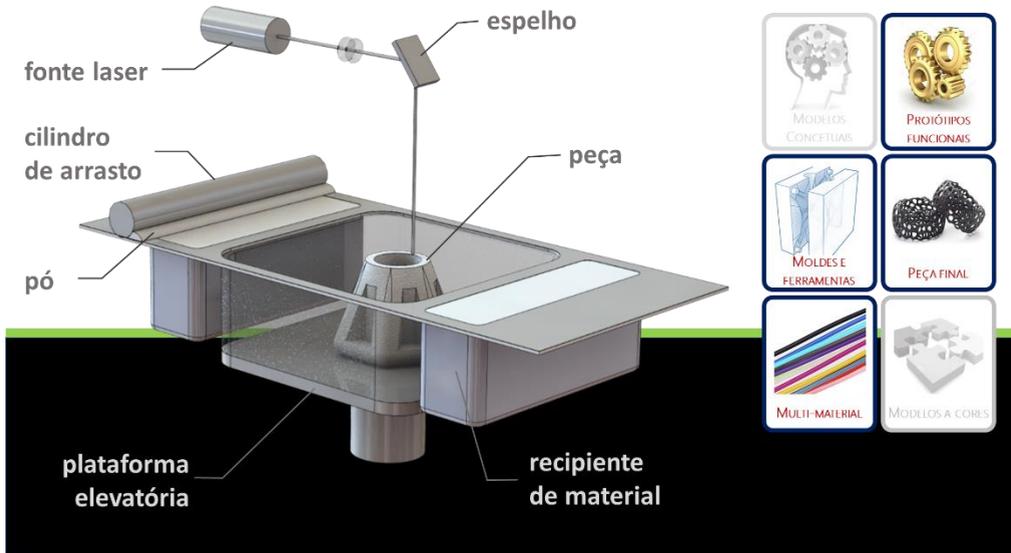


Figura 5.8 - Processo de SLS

5.4.1.1 EXEMPLOS DE PEÇAS DE SLS

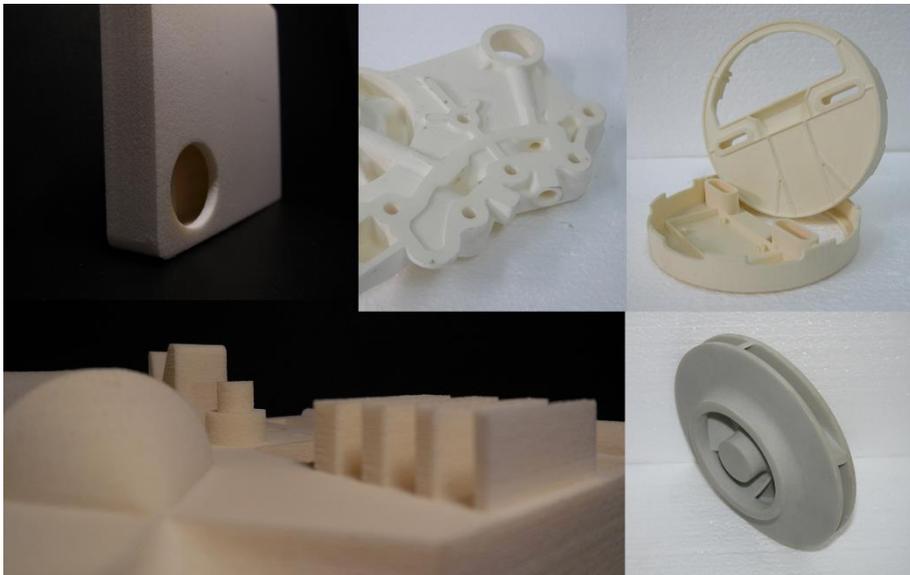


Figura 5.9 – Exemplo de peças obtidas por SLS (Cortesia CINFU)

5.5.3 PROCESSO DoD (TECNOLOGIA SOLIDSCAPE)

O processo da SolidScape combina a tecnologia de injeção de um material termoplástico DoD (*Drop On Demand*) e a fresagem de alta precisão de cada camada. A impressão DoD da SolidScape é reconhecida pela qualidade na construção de modelos em cera, onde utiliza uma tecnologia de impressão proprietária, SCP® (*Smooth Curvature Printing*), que permite que os seus sistemas ofereçam a mais alta precisão e acabamento superficial da indústria. O sistema permite depositar entre 6000 a 12000 gotículas de cera por segundo de 0,06 mm de diâmetro e as camadas são de 0,006 mm.

Assim, esta tecnologia é amplamente utilizada para criar modelos de joalheria, pois permite construir peças pequenas, altamente detalhadas e com elevada precisão, o que faz com que seja reconhecida como líder de impressoras de 3D para aplicações em cera perdida em fundição por carapaça (*investment casting*) e que exigem precisão superior, detalhes ultrafinos e um acabamento de superfície lisa. No entanto, esta tecnologia é lenta para o fabrico de componentes de maiores dimensões.

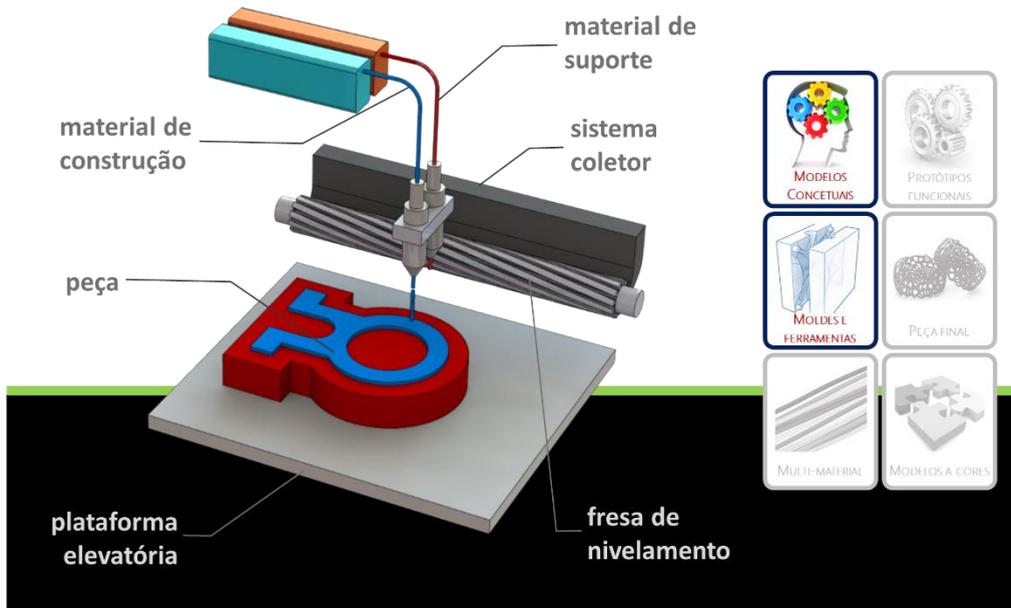


Figura 5.13 – Processo DoD (SolidScape)

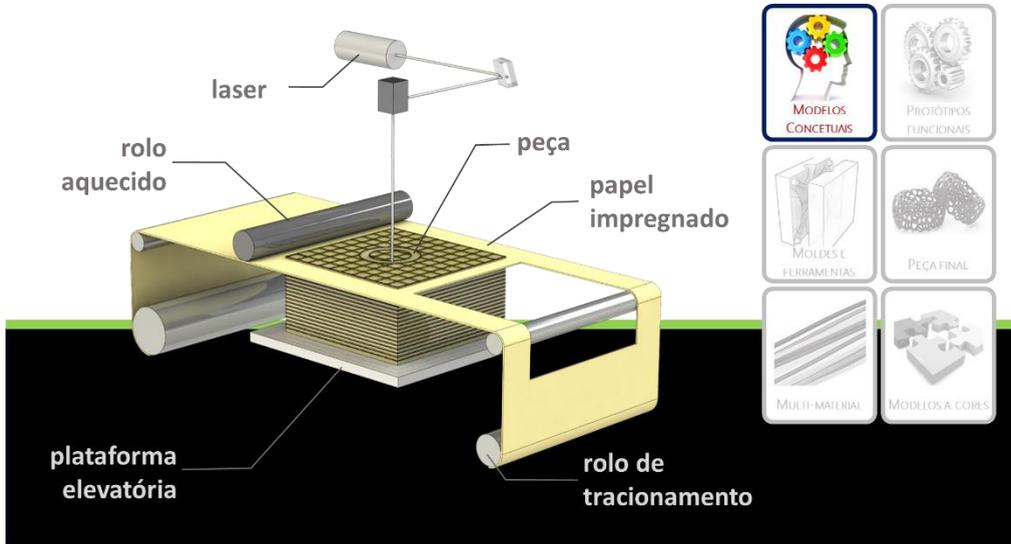


Figura 5.18 – Processo de LOM

5.7.1.1 EXEMPLOS DE PEÇAS DE LOM



(Cortesia CINFU)

(Cortesia DEM-Universidade de Aveiro)

Figura 5.19 - Exemplo de peças obtidas por LOM

6.3.2 SLS METAIS - PROCESSO "LONG RUN"

O processo designado por *Long Run* foi desenvolvido inicialmente pela *DTM-Corporation*, com o objetivo de fabricar insertos metálicos para moldes de injeção. A construção do inserto ou peça metálica compreende duas etapas. A primeira é efetuada numa máquina de SLS e a outra em dois ciclos em forno de atmosfera controlada.

O processo inicia-se com o fabrico da peça ou inserto na máquina SLS que tal como no processo de SLS normal, a matéria-prima apresenta-se em pó, mas ao invés de ser todo da mesma natureza, este apresenta-se sob a forma de uma mistura de partículas metálicas e poliméricas.

O laser quando incide sobre a superfície de pó faz a consolidação das partículas através da sinterização das partículas poliméricas (uma vez que estas têm um ponto de fusão mais baixo) fazendo com que os grãos de material polimérico promovam a retenção dos grãos metálicos no seu interior. Esta primeira etapa completa-se com a construção do modelo, designado por modelo verde (*green part*) que na sua composição só apresenta ligações poliméricas.

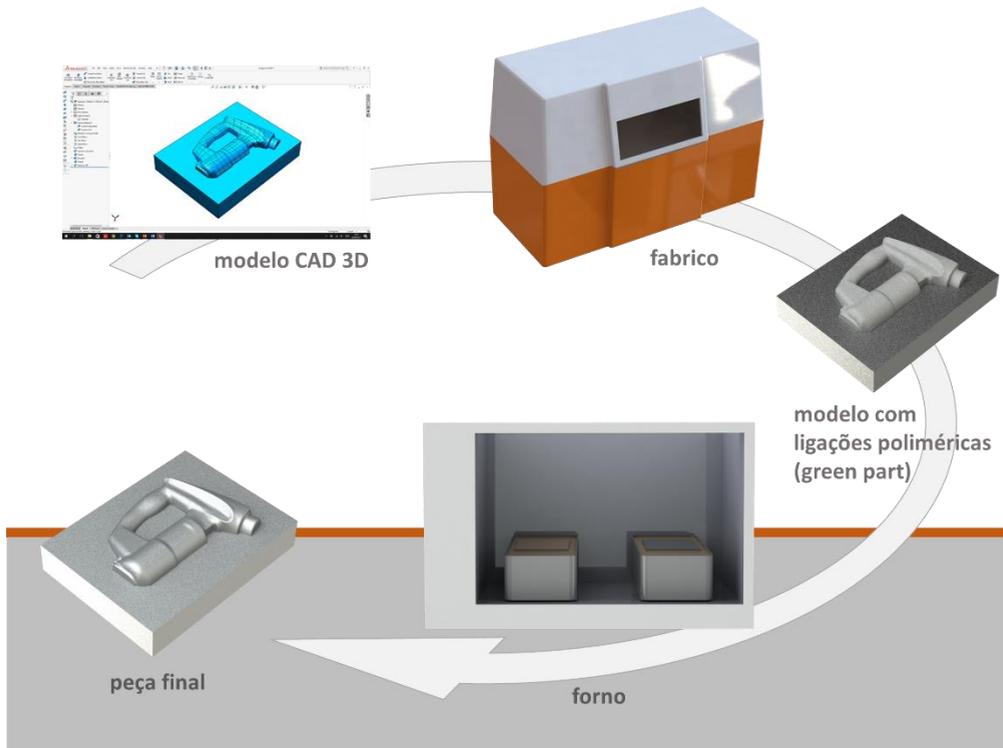
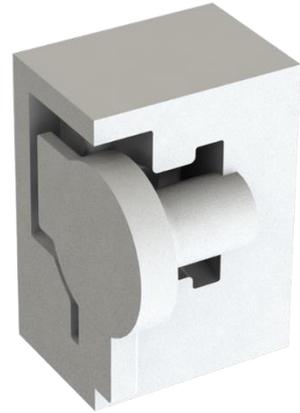
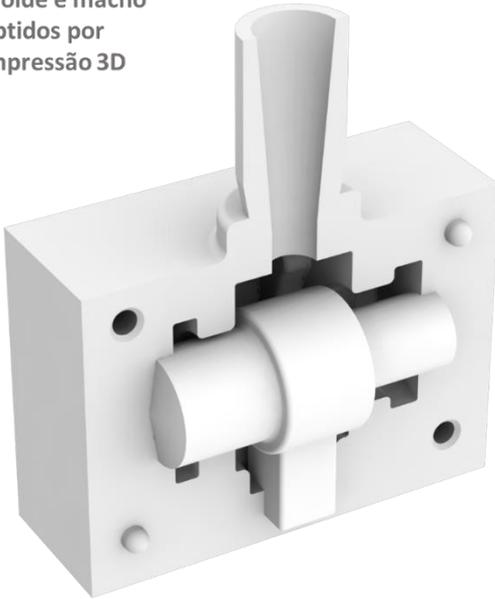


Figura 6.8 – Esquema ilustrativo do processo SLS metais (LONG RUN)

areia de fundição) para aumentar a consistência e rigidez do molde durante o vazamento. Este método permite uma redução significativa do tempo e do material de impressão, especialmente em peças de grande dimensão;

Molde Híbrido (*Combination Method*): Neste método só os componentes mais complexos, como machos ou insertos, são obtidos por impressão 3D. As restantes partes do molde podem ser obtidas por processos convencionais, nomeadamente por moldação em areia, permitindo deste modo obter machos de geometria muito complexa e encurtar os tempos de produção.

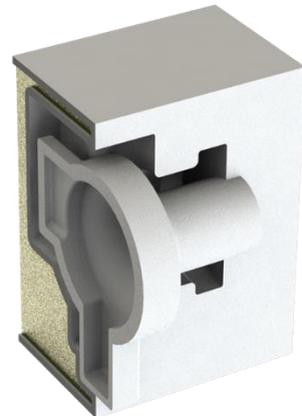
**molde e macho
obtidos por
impressão 3D**



**molde e macho totalmente sólidos
(direct pour method)**



**peça final em
alumínio fundido**



**molde e macho em casca
(shell method)**

Figura 7.8 - Processo "Zcast"

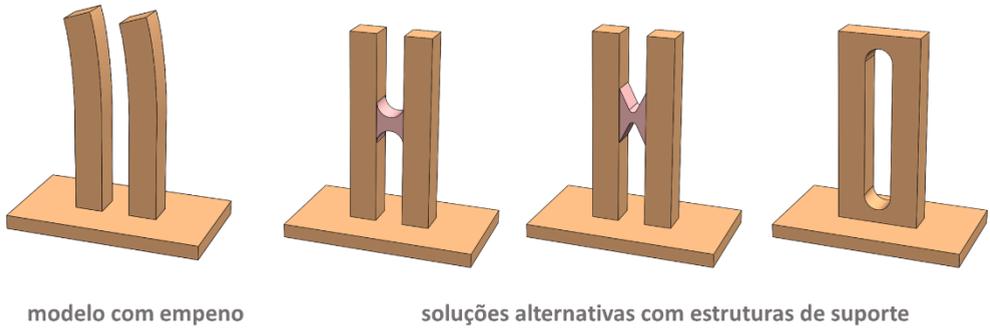


Figura 8.9 - Exemplos de estruturas de suporte

8.3.1 TIPOS DE ESTRUTURAS DE APOIO

Podem ser utilizados vários métodos para suportar uma geometria pendente. Dependendo da peça e das características circundantes, cada método tem aspectos positivos e negativos.

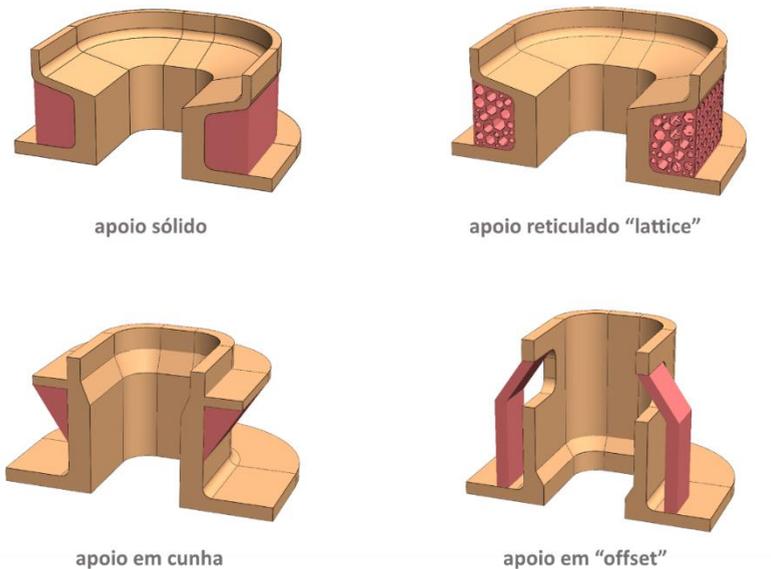


Figura 8.10 - Diferentes estruturas de suporte para apoiar as peças durante a sua construção

O surgimento da tecnologia MAV associada à tecnologia multieixos permitiu a maquinação de peças em 3+2 ou 5 eixos simultâneos e com elevada complexidade, e impossíveis de realizar em máquinas de 3 eixos. A tecnologia MAV possibilita também a utilização de fresas com dimensões mais reduzidas e mais rígidas, o que permite igualmente eliminar vibrações e melhorar o acabamento superficial, assim como contribui para o aumento de produtividade decorrente da utilização de uma única posição de aperto, permitindo eliminar perdas de tempo na troca da fixação e imperfeições resultantes da mudança de aperto.

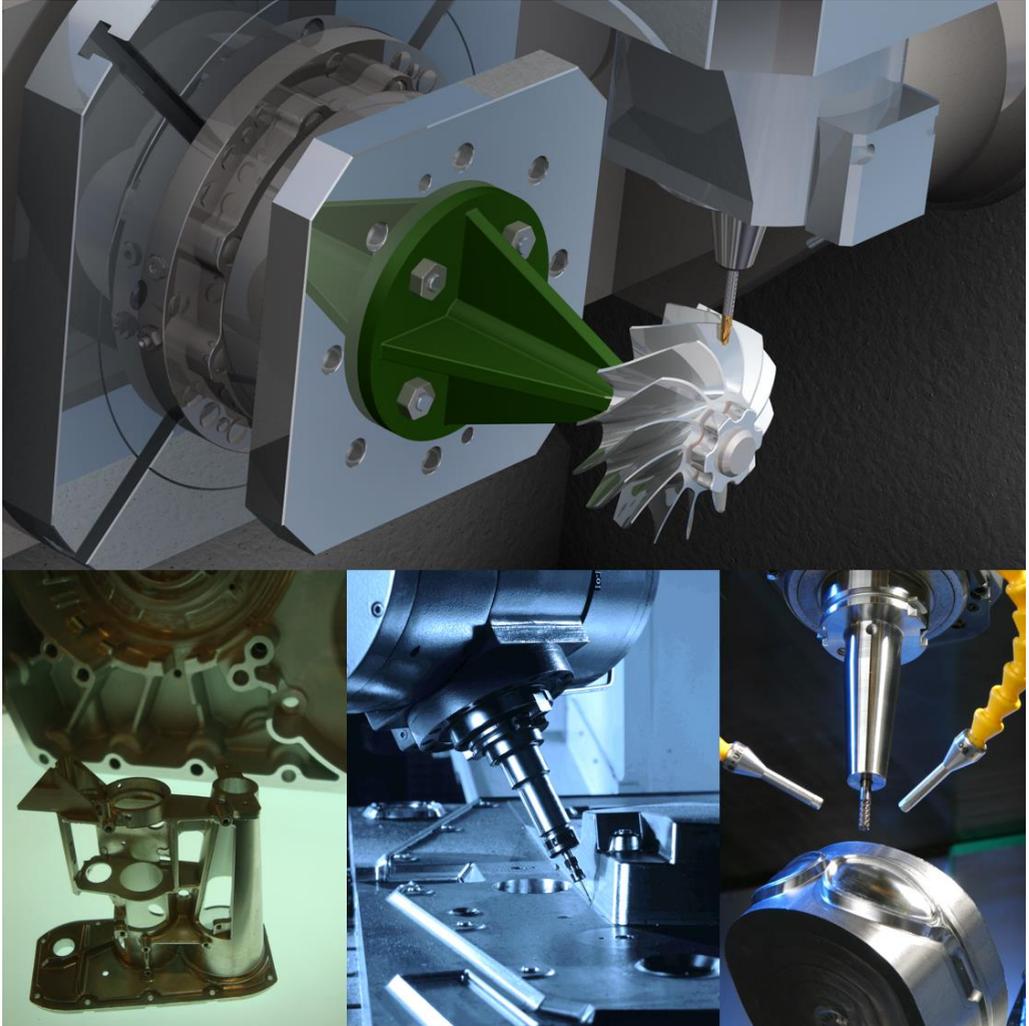


Figura 8.2 - Exemplos de maquinação de alta velocidade e multieixos

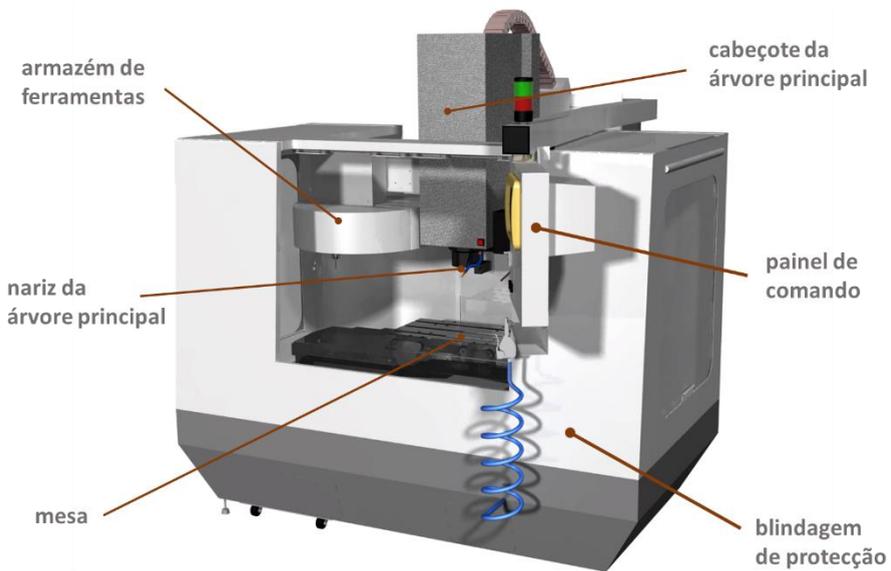
9.6 TECNOLOGIA DE MAQUINAGEM EM FRESADORA

A fresagem é um processo de maquinagem em que o material da peça é removido por uma ferramenta giratória de aresta múltipla chamada fresa. Este processo permite a obtenção de superfícies com qualquer orientação, atendendo a que tanto a peça como a ferramenta podem ser movimentadas em diferentes direções. Deste modo podem ser produzidas formas prismáticas, tanto interiores como exteriores, superfícies planas ou complexas.

Um centro de maquinagem (CM) é uma máquina-ferramenta baseada numa fresadora, mas que pode apresentar em relação a esta um conjunto de funções e possibilidades, como:

- ✓ Troca automática de ferramentas (*Automatic Tool Changer – ATC*);
- ✓ Mesas de trabalho amovíveis (*Pallets*)
- ✓ Sistema de calibração e deteção automática de quebra da ferramenta (*Sensor Broken Tool*),
- ✓ Eixos suplementares, rotativos e outros (4º e 5º eixos),
- ✓ Blindagens exteriores e transportador de limalha (*Chip Conveyor*).

Num CM é possível realizar a maquinagem completa e automática de uma peça, executar operações de fresar, furar, roscar, mandrilar, digitalizar, controlar dimensional, trocar automaticamente a ferramenta e fixar a peça em diversas posições.



9.6.1 TIPOS E MOVIMENTOS DA FRESAGEM

Os parâmetros de corte para uma operação de fresagem são: a velocidade de rotação, velocidade de avanço, profundidade de corte e largura de corte.

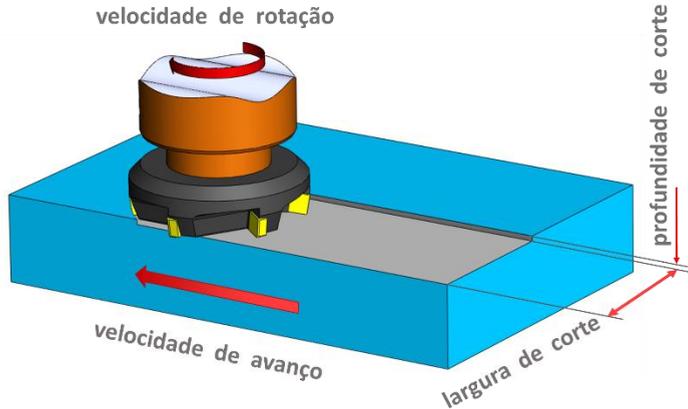


Figura 8.22 - Parâmetros de corte de uma operação de fresagem

Velocidade de rotação: Velocidade angular da fresa programada em rotações por minuto. O seu valor depende da velocidade de corte estabelecida para uma dada operação. A velocidade de corte corresponde à velocidade linear de um ponto na periferia da fresa e estabelece a velocidade a que se pode cortar o material.

Cálculo da velocidade de rotação

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D}$$

V_c - velocidade de corte (m/min)
D - diâmetro da ferramenta (mm)
n - velocidade de rotação (rpm)

exemplo:

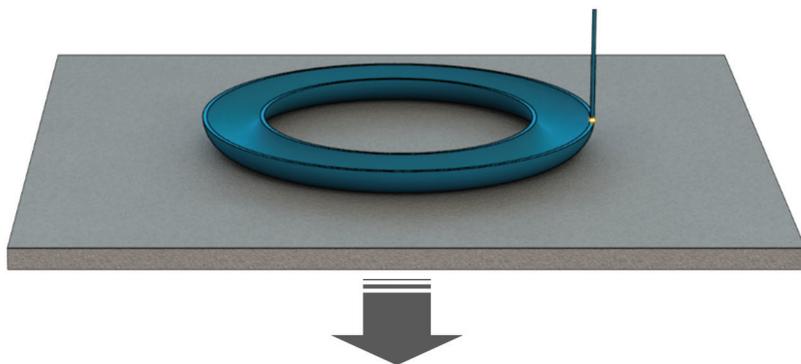
V_c = 130 m/min.
Fresa = Ø16 mm
n = ?

$$n = \frac{130 \times 1000}{3,14 \times 16} ; n = 2586,2 ; n \approx 2600 \text{ rpm}$$

9.6.5 EXEMPLOS DE PEÇAS OBTIDAS EM CM



Figura 8.31 - Exemplos de peças obtidas em CM



O MUNDO DA IMPRESSÃO 3D E DO FABRICO DIGITAL

A impressão 3D é o aspeto mais conhecido do fabrico digital e está a revolucionar as nossas vidas e a romper com o que hoje estabelecemos para o processo de design e fabrico. Esta tecnologia pode ser usada para criar protótipos, peças simples ou produtos finais altamente sofisticados, como peças de engenharia, implantes médicos e até órgãos artificiais.

Com a impressão 3D é possível sonhar, projetar e construir em qualquer lugar ou circunstância, até na nossa própria casa, bastando um computador e uma impressora.

O livro “O mundo da impressão 3D” apresenta a tecnologia de impressão 3D e todo o seu potencial, a história e o seu aparecimento, os processos, materiais e equipamentos. Também não foram esquecidos os aspetos mais técnicos, nomeadamente os relacionados com as recomendações de fabrico e preparação do modelo digital para garantir a obtenção de bons resultados. Porque quando se fala de fabrico digital, fala-se também de maquinaria CNC e a maquinaria de alta-velocidade e estes ainda são os processos de eleição na indústria.



CARLOS RELVAS é Doutorado em Engenharia Mecânica e Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Tem desenvolvido atividade científica e pedagógica na área de conceção e fabrico assistidos por computador, engenharia e desenvolvimento de produto e fabrico aditivo. É autor e coautor de 3 livros técnicos, nomeadamente Controlo Numérico Computorizado: conceitos fundamentais (2012), Engenharia e Design: da ideia ao produto (2017) e Design&Engenharia (2017). Tem mais de 40 artigos publicados em revistas internacionais e mais de 100 outras publicações e comunicações em congressos. Orientou mais de 30 dissertações de mestrado na área de desenvolvimento de produto e participou em mais de 20 projetos de investigação e desenvolvimento.

É responsável pelo Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Prototipagem Rápida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, desde 2008, onde tem desenvolvido investigação na área do fabrico digital e no uso de metodologias e utilização de ferramentas estruturadas no desenvolvimento de novos produtos. Foi o primeiro diretor do curso de mestrado em engenharia e design de produto da Universidade de Aveiro, criado em 2011.

Também disponível em formato papel



ISBN E-Book

978-989-723-268-8

www.engebook.com