

MANUFATURA ADITIVA

CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA

Parte 1

Prof. Sérgio Fernando Lajarin

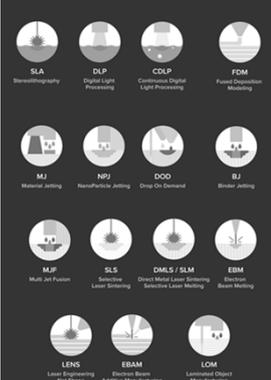


1

Manufatura Aditiva



QUAL PRINCÍPIO E TECNOLOGIA DE AM ESCOLHER?



2

Manufatura Aditiva



CLASSIFICAÇÃO

Princípio para adição e adesão do material - ISO/ASTM 52900:2015(E)

Tecnologia de M.A.	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 (SL), • Produção contínua com interface líquida, • Tecnologia da empresa Invision TEC, • outras.
Extrusão de material	Material é extrudado através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado	• Modelagem por fusão e deposição (FDM), • MarketBot, • RepRap, • Fab@Home, • outras.
Jateamento do material	Material é depositado em pequenas gotas de forma seletiva	• Polyjet, • Impressão por múltiplos jatos (MJP), • Tecnologia da SolidScapes, • outras.
Jateamento de aglutinante	Um agente aglutinante líquido é seletivamente depositado para unir materiais em pó	• Impressão colorida por jato (CIP), • Tecnologia da Voxeljet, • Tecnologia da EvOne, • outras.
Fusão de leito de pó	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó	• Sinterização seletiva a laser (SLS), • Sinterização diretamente de metal a laser (DMLS), • Fusão seletiva a laser (SLM), • LaserCUSING, • Fusão por feixe de elétrons (EBM), • outras.
Adição de lâminas	Lâminas recortadas de material são unidas (coladas) para formar um objeto	• Manufatura laminar de objetos (LOM), • tecnologia da Solido, • Deposição seletiva de laminados (SOL), • outras.
Deposição com energia direcionada	Energia térmica é usada para fundir materiais à medida que estes são depositados	• Forma final obtida com laser (LENS), • Deposição direta de metal (DMD), • Revestimento a laser tridimensional, • outras.

Fonte: Volpato, 2017.

3

Manufatura Aditiva



CLASSIFICAÇÃO

Princípio para adição e adesão do material - ISO/ASTM 52900:2015(E)

TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA



Fonte: Adaptado de 3DHUBS

4

FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA

"Vat Photopolymerization"

TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA



Fonte: Adaptado de 3DHUBS

5

Manufatura Aditiva



FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA

"Vat Photopolymerization"

Polímero líquido fotossensível é exposto a luz com um comprimento de onda específico que provoca a sua solidificação

- Charles W. Hull em 1989, criou resinas sensíveis a irradiação UV emitida por fonte de raio laser;
- O primeiro equipamento comercial foi desenvolvido pela empresa 3D Systems;

Quadro - Exemplos de fabricantes de equipamentos de fotopolimerização em cuba

Empresa	País	Equipamento	Princípio de fabricação
3D Systems	Estados Unidos	ProJet series ProX series	Escaneamento vetorial Escaneamento vetorial
Envision TEC	Alemanha	3SP series Perfactory series	Escaneamento vetorial e projeção de máscaras ou imagens
Formlabs	Estados Unidos	Form -1 e Form +2	Escaneamento vetorial
Carbon3D	Estados Unidos	Carbon M1	Projeção de máscaras ou imagens
Gizmo3D	Austrália	Giz1 series	Projeção de máscaras ou imagens
Autodesk	Estados Unidos	Ember 3D	Projeção de máscaras ou imagens
Olo	Itália	Olo 3D	Projeção de máscaras ou imagens
Lumi industries	Itália	LumiFold Tab LumiFold Cube	Projeção de máscaras ou imagens

Fonte: Volpato, 2017.

6

Manufatura Aditiva

FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA

"Vat Photopolymerization"

Os equipamentos desse processo podem ser agrupados em duas técnicas principais:

- 1 - Escaneamento vetorial
- 2 - Projeção de máscaras ou imagens

POR ESCANEMANDO VETORIAL

Estereolitografia (SLA)

- Tem como base a estereolitografia (3D Systems)
- Utiliza uma plataforma de construção submersa em um tanque translúcido preenchido com resina de fotopolímero líquido.
- Um laser focalizado mapeia uma área da seção transversal (camada) solidificando o material.
- Depois que a camada foi mapeada e solidificada pelo laser, a plataforma sobe e deixa uma nova camada de resina fluir.
- As peças são pós-curadas por luz UV para melhorar suas propriedades mecânicas.
- Diâmetro do laser pode variar de 0,25 até 0,075 mm.
- A espessura da camada é constante ao longo da peça, e pode ser definida entre 0,025 e 0,5 mm.

Computador → Direções X,Y do feixe do laser → Laser → Sistema de varredura → Eixo Z de movimentação da plataforma → Plataforma de construção → Resina Líquida → Lâmina niveladora → Janela → Estrutura de suporte → Peça "verde" é levada ao forno

7

Manufatura Aditiva

FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA

"Vat Photopolymerization"

Estereolitografia (SLA) – Equipamento da empresa Formlabs

Formlabs lançou em 2012 sua máquina, dois anos antes da patente cair.

- Movimento do "Z" de baixo para cima.
- Peça de cabeça para baixo.
- Menor volume de resina na cuba.
- Cura na camada de baixo, sem presença de oxigênio.
- Espessura da camada entre 0,1 e 0,025 mm.

Eixo Z de movimentação da plataforma ↑ Plataforma de Construção
Cuba → Resina Líquida → Janela → Laser

Fonte: Adaptado de Volpato, 2017.

Formlabs Form 2

8

Manufatura Aditiva

FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA

"Vat Photopolymerization"

POR PROJEÇÃO DE MÁSCARAS OU IMAGENS

Processamento de luz direta (DLP)

- Foi desenvolvida no início dos anos 1990.
- Imagens são projetadas por meio de micro espelhos digitais (DMD).
- Fonte de luz é lâmpadas UV.
- Curar simultaneamente toda camada.
- Grande vantagem é a **rapidez** na fabricação da peça.
- Cada fatia da peça é armazenada na forma de *bitmaps*.
- Fonte de luz é lâmpada Ultra Violeta.
- Ex. Tecnologia chamada de V-Flah (*grande problema é o deslocamento da plataforma a cada camada construída*).

Eixo Z de movimentação da plataforma ↑ Plataforma de Construção → Resina Líquida → Janela → Gerador de Imagens Bitmaps

Fonte: Adaptado de Volpato, 2017.

Impressora Anyubic Photon S

9

Manufatura Aditiva

FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA

"Vat Photopolymerization"

POR PROJEÇÃO DE MÁSCARAS OU IMAGENS

Processamento de luz direta Contínuo (CDLP)

- Movimento contínuo da placa de construção na direção Z.
- Ainda mais rápidos, a impressora não precisa parar e separar a peça da placa de impressão após cada camada.

CLIP – Continuous Liquid Interface Production

- Carbon 3D (lançou em 2015).
- 25 a 100 vezes mais rápida que a SLA.

CLIP	6,5 minutos
Polyjet	3 horas
SLS	3,5 horas
SLA	11,5 horas

Peça verde Módulo de Young 250-280 MPa
Peça Curada Módulo de Young 3800-4000 MPa

Fonte: Carbon3D

Plataforma de construção → Resina Curável UV → Zona morta → Janela Permeável de Oxig. → Projetor

Baseado em testes realizados pela Carbon 3D para comparar diferentes tecnologias de impressão 3D

10

Manufatura Aditiva

FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA

"Vat Photopolymerization"

Processamento de luz direta (CDLP) – Equipamento da CARBON 3D

11

Manufatura Aditiva

FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA

"Vat Photopolymerization"

O que há de novo?

- InvisionTEC
- Gizmo3D (Gizpro 2X)
- OLO (Impressão a partir de Smartphone)
- 3D LumiFold (Impressão a partir do Tablet)
- Autodesk (Ember 3D – altíssima resolução)
- Microestereolitografia (Escala Micro ou Nanométrica - Saúde)

12

Manufatura Aditiva

FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA
"Vat Photopolymerization"

PONTOS NEGATIVOS

- Peças frágeis e não são adequadas para protótipos funcionais.
- As propriedades mecânicas e acabamento se degradam quando muito expostas à luz solar.
- Necessita de estruturas de suporte e o pós-processamento para remoção de marcas visíveis.
- Volume de impressão pequeno (SLA) quando comparado ao FDM
- 1L de resina SLA padrão \$150, 1kg de filamento ABS para FDM custa \$ 25.

PONTOS POSITIVOS

- Pode produzir peças com alta precisão dimensional detalhes delicados.
- Bom acabamento superficial, ideal para protótipos visuais.
- Em geral, propriedades físicas isotrópicas;
- Imprime peças transparentes (detalhes internos)
- Materiais específicos para SLA, como resinas transparentes, flexíveis e fundíveis.
- Baixo custo e amplamente disponível (desktop)

! O SLA é o mais adequado para produzir protótipos visuais com superfície bem acabadas e detalhes delicados muito finos a partir de uma variedade de materiais termofixos.

13

Manufatura Aditiva

MATERIAIS PARA O PRINCÍPIO DE FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA (TECNOLOGIA SLA)



14

Manufatura Aditiva

MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

- Produz peças plásticas com alta resolução e precisão, detalhes finos e ótimo acabamento superficial.
- O processo transforma a resina líquida (fotopolimerização) em plástico endurecido (termorigido).
- Em geral, são resinas à base de acrilatos (acrílicas) e epóxi.
- Diferentes combinações dos monômeros, oligômeros, fotoiniciadores e vários outros aditivos que compõem uma resina resultam em diferentes propriedades do material.
- Grande variedade de resinas, aplicadas em diversos setores:
 - Resinas padrão: prototipagem geral
 - Resinas de engenharia: propriedades mecânicas e térmicas específicas
 - Resinas odontológicas e médicas: certificações de biocompatibilidade
 - Resinas para fundição: não têm teor de cinzas após a queima

Prós	Contras
Ótimo acabamento superficial (semelhante ao projeto de injeção)	Relativamente quebradiço (baixo along. até ruptura)
Detalhes pequenos e precisos	Não é adequado para uso externo. Propriedades do material podem mudar com o tempo, devido à superexposição à luz solar.
Alta rigidez	Suscetível a fluência
	Alto preço

15

Manufatura Aditiva

MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

SLA - Resina Padrão

- Garantem alta rigidez, alta resolução e acabamento similar ao de peças injetadas.
- Tem custo mais baixo e por isso são ideais para prototipagem.
- A cor da resina afeta suas propriedades. Por exemplo, a cinza é mais adequada para peças com pequenos detalhes e branca para peças com superfície mais lisas.
- Tem ainda a resina padrão transparente com propriedades semelhantes, mas que pode ser pós processada para transparência próxima à óptica.



Prós	Contras
Ótimo acabamento superficial (semelhante ao projeto de injeção)	Frágil (baixo along. até ruptura)
Detalhes pequenos e precisos	Baixa resistência ao impacto
Menor custo	Baixa temperatura de deflexão térmica

16

Manufatura Aditiva

MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

SLA - Resina de Engenharia

- As peças apresentam propriedades mecânicas e visuais muito parecidas a peças injetadas.
- São ideais para prototipagem, testes e fabricação final.
- As resinas de engenharia requerem pós-cura sob luz UV para alcançar melhores propriedades mecânicas.

Resina resistente (tipo ABS)

- Foi desenvolvida para aplicações que exigem suportar alta tensão e deformação.
- Peças com esse material têm resistência à tração (55.7 MPa) e módulo de elasticidade (2.7 GPa) similar ao ABS.



Prós	Contras
Alta rigidez	Não é adequado para peças com paredes finas (mín 1 mm)
Excelente resistência a cargas cíclicas	Quebradiço (baixo alongamento até ruptura)
	Baixa temperatura de deflexão térmica

17

Manufatura Aditiva

MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

Resina durável (tipo PP)

- Resistente ao desgaste e flexível, com propriedades mecânicas semelhantes ao PP.
- Usada para peças que exigem alta flexibilidade (alto alongamento até ruptura), baixa fricção e ótimo acabamento superficial.
- Adequada para a prototipagem de produtos de consumo, encaixes de pressão, juntas esféricas e peças móveis de baixo atrito.



Prós	Contras
Alta resistência ao desgaste	Não é adequado para peças com paredes finas (mín 1 mm)
Flexível (ótimo alongamento até a ruptura)	Baixa resistência à tração (menor do que a resina resistente)
Alta resistência ao impacto (maior do que a resina resistente)	Baixa temperatura de deflexão térmica

18

Manufatura Aditiva

MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

Resina resistente ao calor

- Alta estabilidade térmica e operam em altas temperaturas.
- Elas tem temperatura de deflexão térmica entre 200-300° C e são ideais para a fabricação de luminárias resistentes ao calor, protótipos de moldes, equipamentos de fluxo de ar quente e fluido e ferramentas de fundição e termoformagem.



Molde de injeção baixa traçagem (fonte: Formlabs)

Prós	Contras
Alta temperatura de deflexão térmica	Não é adequado para peças com paredes finas (mín 1 mm)
Acabamento de superfície lisa	Frágil (baixo alongamento na ruptura)

19

Manufatura Aditiva

MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

Resina flexível (tipo borracha)

- Simula peças de borracha que sejam macias ao toque.
- Baixo módulo de elasticidade e alto alongamento até ruptura. Adequado para objetos que serão dobrados ou comprimidos.
- Podem ser usadas para adicionar recursos ergonômicos a conjuntos de materiais múltiplos, como embalagens, selos, protótipos, alças, moldagens e garras.



Modelo de Pneu de carro (fonte: Formlabs)

Ideal para:

- Protótipo de peças que revestem,
- Montagens multi-materiais,
- Alças ergonômicas,
- Apertos,
- Moldes

Prós	Contras
Alta flexibilidade (alto alongamento na ruptura)	Não tem as propriedades verdadeiras da borracha
Baixa dureza (simula uma borracha)	Requer estruturas de suporte adicionais
Alta resistência ao impacto	As propriedades do material degradam com o tempo exposta à radiação UV
	Não é adequado para peças com paredes finas (espessura mín. 1 mm)

20

Manufatura Aditiva

MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

Resina cerâmica (rígida)

- Reforçadas com vidro ou outras partículas de cerâmica e resultam em peças muito duras e rígidas, com ótimo acabamento superficial.
- Boa estabilidade térmica e resistência ao calor (temperatura de deflexão térmica 0.45MPa de 88°C).
- Alto módulo de elasticidade e menor fluência (maior resistência à deformação ao longo do tempo).
- Adequada para peças com paredes finas e pequenos detalhes (espessura mín. de 100 µm).



Componentes de gerenciamento térmico (fonte: Formlabs)

Ideal para:

- Moldes e ferramentas,
- Gabaritos,
- Coletores,
- Luminárias
- Caixas para aplicações elétricas e automotivas

Prós	Contras
Alta rigidez	Frágil (baixo alongamento na ruptura)
Adequado para peças delicadas	Baixa resistência ao impacto
Moderada resistência ao calor	

21

Manufatura Aditiva

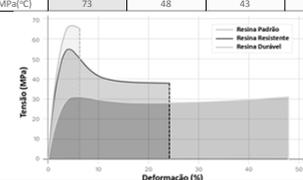
MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

Como escolher a resina certa para sua aplicação?

A tabela abaixo resume as propriedades mecânicas básicas dos materiais SLA padrão e de engenharia.

	Padrão & Transparente	Resistente	Durável	Resistente ao calor	Reforçada com cerâmica
Resistência ao impacto IZOD (J/m)	25	38	109	14	N/A
Alongamento na ruptura (%)	6.2	24	49	2.0	5.6
Tensão de resistência (MPa)	65.0	55.7	31.8	51.1	75.2
Módulo de Young (GPa)	2.80	2.80	1.25	3.60	4.10
Módulo de flexão (GPa)	2.2	1.6	0.82	3.3	3.7
T. deflexão térmica @ 0.45 MPa(°C)	73	48	43	289	88

Fonte: Adaptado de Formlabs



22

Manufatura Aditiva

MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

SLA - Resina Dental & Médica

- Resina para Aparelhos Médicos Personalizados (Classe I biocompatível)
- Resina Biocompatível de Longa Duração (Classe II biocompatível)

Resina Classe I

- Equipamentos médicos personalizados, como guias cirúrgicos.
- Podem ser esterilizados em autoclave, para uso direto na sala de cirurgia.

Prós	Contras
Alta precisão	Desgaste moderado
Excelente acabamento	Moderada resistência à fratura
Biocompatibilidade	

Guia para cirurgia dental impresso em Resina Classe I



fonte: Formlabs

23

Manufatura Aditiva

MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

SLA - Resina Dental & Médica

Resina Classe II

- Usadas em aparelhos ortodônticos de longo prazo.
- Podem estar em contato com o corpo humano por até um ano.
- Usada em dispositivos que entram em contato com fluidos corporais ou feridas abertas, dispositivos invasivos de curto prazo (dispositivos cirúrgicos).
- Sua alta resistência à fratura e ao desgaste fazem com que seja perfeita para produzir talas duras ou retentores.

Prós	Contras
Alta precisão	Alto custo
Alta resistência a fratura e desgaste	
Biocompatibilidade	

Aparelho ortodôntico móvel



fonte: Formlabs

24

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA TECNOLOGIA SLA

SLA - Resina para fundição

Resina fundível para fabricação de joias

- Produz peças com detalhes nítidos, bom acabamento e que vazem perfeitamente do molde sem deixar cinzas ou resíduos.
- Ideais para o processo de fundição em cera perdida.
- Ideais para a fabricação de jóias e outros componentes pequenos e cheios de detalhes.



Protótipo de anel mestre para posterior fundição



Prós	Contras
Baixo teor de cinzas após a queima (menos de 0,02%)	Baixo impacto e resistência ao desgaste
Garante detalhes pequenos e precisos	Requer pós-processamento para garantir melhores resultados

25

EXTRUSÃO DE MATERIAL "Material Extrusion"

TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA



Fonte: Adaptado de 3DFILABS

26

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

EXTRUSÃO DE MATERIAL "Material Extrusion"

O material sólido na forma de filamento é aquecido e extrudado através de um bico calibrado depositando esse material seletivamente.

- Cabeçote extrusor geralmente se desloca no plano X-Y e a mesa se desloca em Z.
- Aquecer para torna-lo pastoso
- Alimentação do cabeçote controlada
- Existem diversas maneiras de alimentar o material
- Materiais: PLA, ABS, PETG, Náilon, Compósitos (Polímero+madeira, polímero+metal, Náilon + fibra), etc.




Volume de impressão: 320 x 220 x 420



Volume de impressão: 320 x 220 x 160

Bico extrusor
Material depositado da peça

Movimentação da plataforma e/ou cabeçote extrusor

27

Manufatura Aditiva

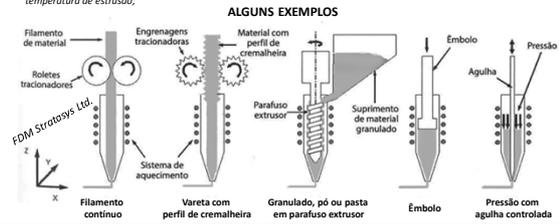
UFPR
DEMEC

EXTRUSÃO DE MATERIAL "Material Extrusion"

FORMAS DE ALIMENTAÇÃO DE MATERIAL

- Alimentação de um filamento contínuo que é tracionado por roletes e empurrado para o interior do cabeçote (Comum).
- O filamento deve possuir propriedades mec. que assegurem que não haja flambagem antes da entrada no cabeçote.
- A reologia do material deve permitir um fluxo contínuo e constante durante o processamento.
- Possíveis falhas: Escorregamento do filamento; Aumento da temperatura antes da entrada no cabeçote; Variações na temperatura de extrusão;

ALGUNS EXEMPLOS



FDM Stratasys Ltd. Filamento contínuo, Engrenagens tracionadoras, Material com perfil de cremalheira, Sistema de aquecimento, Parafuso extrusor, Granulado, pó ou pasta em parafuso extrusor, Êmbolo, Pressão com agulha controlada.

28

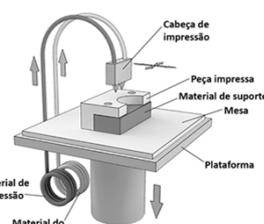
Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

EXTRUSÃO DE MATERIAL "Material Extrusion"

FDM – Modelagem por Fusão e Deposição ("Fused Deposition Modeling")

- S. Scott Crump (1992)
- Patente da Stratasys
- Dois bicos de impressão (material da peça e do suporte)
- Material proprietário, (ABS é o principal)



Cabeça de impressão
Peça impressa
Material de suporte
Mesa
Plataforma
Material de impressão
Material do suporte



Fonte: Stratasys

Fonte: <https://www.makerep.com>

29

Manufatura Aditiva

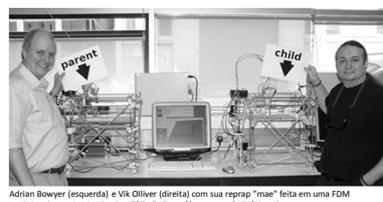
UFPR
DEMEC

EXTRUSÃO DE MATERIAL "Material Extrusion"

Rompimento com FDM

Projetos abertos de extrusão de material

- Vários projetos estão disponíveis abertamente na rede para fabricação própria.
- Reprap, 2005 (Replicador para PR), "FFF" - Fused Filament Fabrication (Fabricação por Filamento Fundido).
- Makerbot Industries (CupCake).

Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Makerbot>

Adrian Bowyer (esquerda) e Yik Oliver (direita) com sua reppap "mãe" feita em uma FDM tradicional e primeira Reprap "filha". (<http://reprap.org/wiki/About>)

30

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

EXTRUSÃO DE MATERIAL "Material Extrusion"

Equipamento comercial típico de extrusão de material



Fonte: SEPR - 2018

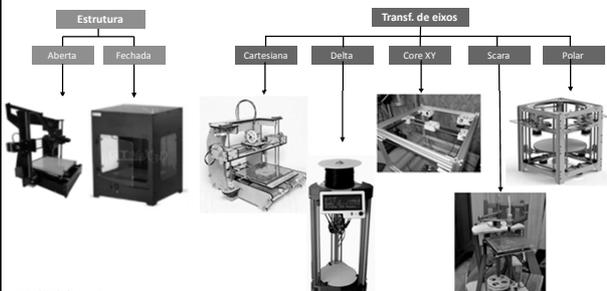
31

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

EXTRUSÃO DE MATERIAL "Material Extrusion"

Classificação das impressoras de extrusão de material de baixo custo



Fonte: Adaptado de Sampão, 2017

32

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

EXTRUSÃO DE MATERIAL "Material Extrusion"

Equipamentos comerciais de extrusão de material

3D Cloner
Volume de impressão
320 x 220 x 250



Ender 3
Volume de impressão
220 x 220 x 250



Prusa i3
Volume de impressão
250 x 250 x 200



Sethi3D
Volume de impressão
200 x 200 x 200



Stella 2
Volume de impressão
100 x 100 x 100



GTMMax
Volume de impressão
220 x 220 x 200



33

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

EXTRUSÃO DE MATERIAL FDM

Makerbot Method X

Qualidade industrial + Desktop + Baixo preço

- Imprime ABS real
- Câmara aquecida a 100°C
- Material de suporte solúvel em água
- Melhor aderência entre camada
- Precisão dimensional de ± 0,2 mm
- Duas vezes mais rápida que as principais impressoras 3D desktop
- Integração CAD com mais de 15 formatos

Volume de impressão
150 x 150 x 157



34

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

EXTRUSÃO DE MATERIAL

FDM industrial x Extrusão de material (desktop)

A tabela abaixo resume as principais diferenças de uma impressora desktop 3D típica e uma FDM industrial.

Propriedade	FDM Industrial	Extrusão de material Desktop
Precisão padrão	± 0.15% (limite inferior: ± 0.2 mm)	± 1% (limite inferior: ± 1.0 mm)
Espessura típica de camada	0.18 - 0.5 mm	0.10 - 0.25 mm
Espessura mínima de parede	1 mm	0.8 - 1 mm
Volume típico de construção	Grande (ex. 900 x 600 x 900 mm)	Média (e.g. 200 x 200 x 200 mm)
Materiais comuns	ABS, PC, ULTEM	PLA, ABS, PETG
Material de suporte	Solúvel em água	Mesmo da peça (geralmente)
Capacidade de produção (por máquina)	Baixa / Média	Baixa
Custo da impressora	\$5000+	\$500 - \$5000

Fonte: Tradução de 3DHubs

35

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

EXTRUSÃO DE MATERIAL "Material Extrusion"

PONTOS NEGATIVOS

- **Tempo de manufatura lento**
 - Bico de diâmetro em torno de 0,4 mm,
 - Movimentação cartesiana do bico
 - Necessita de estruturas de suporte
- **Menor precisão dimensional**
 - Quando comparado SLA, ± 0,15 mm

PONTOS POSITIVOS

- **Custo:**
 - Simplicidade do projeto
 - Fazer a impressora em casa
- **Material processado:**
 - Vasta gama de materiais poliméricos e compósitos
- **Peça pronta:**
 - Não precisa de cura após a impressão



36

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA O PRINCÍPIO DE EXTRUSÃO DE MATERIAL



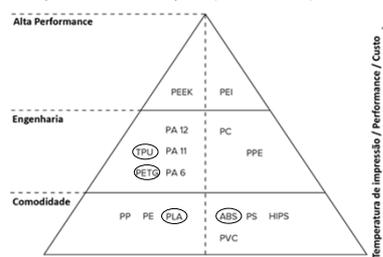
37

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

Uma das grandes vantagens da extrusão de material é a ampla gama de materiais disponíveis. Eles podem variar de termoplásticos comuns (como PLA e ABS) a materiais de engenharia (como PA, TPU e PETG) e termoplásticos de alto desempenho (como PEEK e PEI).



38

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

- Escolher o material está ficando difícil, materiais novos surge regularmente.
- PLA e o ABS são historicamente os dois principais polímeros usados.
- Novos materiais estão ficando populares, por exemplo: PET, Nylon, TPU (Flexível) e PC.
- Os materiais geralmente são classificados em três categorias:
 - Desempenho mecânico
 - Qualidade visual e
 - Processo de fabricação

Na imagem ao lado, a classificação feita pela (3DHub) divide em mais categorias que direciona melhor a escolha do usuário.



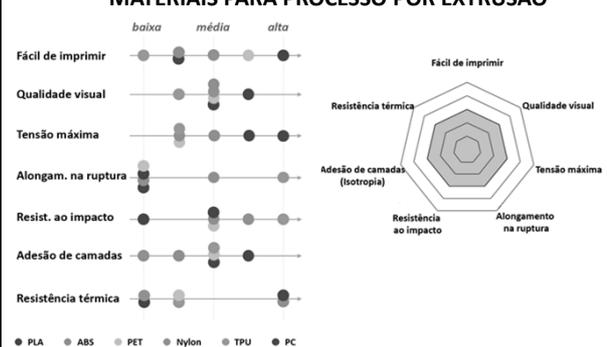
Fonte: Tradução de 3DHub

39

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO



Fonte: Tradução de 3DHub

40

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

PLA (Poli(ácido láctico))

É o polímero mais fácil de imprimir e oferece boa qualidade visual. É muito rígido, resistente, porém muito frágil.



Propriedades	Valor
Limite de Resistência à tração	49,5 MPa
Alongamento total	5,2%
Resistência à flexão	103 MPa
Módulo de flexão	3150,0 MPa
Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23 °C)	5,1 kJ/m2
Dureza (Shore D)	83
Índice de fluidez de polímero fundido	6,2 g/10 min.
Transição vítrea	~60 °C
Temperatura de fusão	145 – 160 °C

Prós	Contras
Fonte biológica, biodegradável	Baixa resistência a umidade
Inodoro	Não pode ser colado facilmente
Podem ser pós-processado com laca e pintura acrílica	
Bom resistência UV	

41

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)

Geralmente, o ABS substitui o PLA quando é necessária maior resistência térmica e tenacidade.



Propriedades	Valor
Limite de Resistência à tração	39,0 MPa
Alongamento total	4,8%
Resistência à flexão	70,5 MPa
Módulo de flexão	2070,0 MPa
Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23 °C)	10,5 kJ/m2
Dureza (Shore D)	76
Índice de fluidez de polímero fundido	41 g/10 min.
Temperatura de amolecimento Vicat a 10 N	97 °C
Temperatura/ intervalo de fusão	225 – 245 °C

Prós	Contras
Pós-processado com vapor de acetona para suavizar a superfície	Sensível a radiação UV
Pós-processado com laca e tinta acrílica	Exala odor ao imprimir
A acetona também pode ser usada como cola	Emite fumaça
Bom resistência à abrasão	

42

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

PLA x ABS: Qual a diferença?

São os termoplásticos mais utilizados em impressões por extrusão.

- ABS é um termoplástico comum na indústria de moldagem por injeção. Ele é usado para aplicações como LEGO, carcaças de eletrônicos e peças de pára-choque automotivo.
- PLA é um termoplástico biodegradável derivado do amido de milho ou cana-de-açúcar. É um dos bioplásticos mais populares, usado para muitas aplicações, desde copos plásticos até implantes médicos.

A tabela abaixo compara as principais propriedades de ambos:

Propriedades*	ABS	PLA
Tensão de resistência**	27 MPa	37 MPa
Alongamento	3.5 - 50%	6%
Módulo de flexão	2.1 - 7.6 GPa	4 GPa
Densidade	1.0 - 1.4 g/cm ³	1.3 g/cm ³
Ponto de fusão	N/A (amorfo)	173 °C
Biodegradabilidade	Não	Sim, sobre condições adequadas
Temperatura de transição vítrea	105 °C	60 °C
Preço carretel*** (1kg, 1.75mm, preto)	USD 21.99	USD 22.99

*Fonte: [3DPrint.com](#)
**Fonte: [Ponoprint](#) para ABS com amostras preenchidas: 100%, 0.2mm de camada e padrão linear
*** Fonte: [Amazon](#), [ABS](#) e [PLA](#)

43

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

PLA x ABS: Qual a diferença?

Precisão das peças:

- As tolerâncias e a precisão dos componentes, dependem muito da calibração da impressora e da complexidade do modelo.
- O ABS e o PLA atingem precisão dimensional e detalhes de impressão de até 0,8 mm e recursos mínimos de até 1,2 mm.
- Para peças de conexão ou intertravamento, recomenda-se uma tolerância de 0,5 mm e espessura de parede mínima de 1-2 mm para garantir resistência adequada as paredes.
- Devido à sua menor temperatura de impressão, o PLA tem menor probabilidade de deformar após o resfriamento e pode imprimir cantos e recursos mais nítidos em comparação com o ABS.

Resistência:

- Resistência à tração semelhantes, o ABS e o PLA são adequados para muitas aplicações de prototipagem.
- O ABS é frequentemente preferido para uso final devido à sua maior ductilidade, maior resistência à flexão e melhor alongamento.
- O PLA é o mais popular para prototipagem rápida quando o formato é mais importante que a função.

44

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

PLA x ABS: Qual a diferença?

Acabamento superficial e pós-processamento:

- O ABS normalmente tem um aspecto mais fosco, e o PLA mais brilhante.
- No pós-processamento é usado acetona para suavizar o ABS e torná-lo mais brilhante.
- O ABS pode ser facilmente lixado e até usinado (ex: perfurado) após a impressão. O PLA tem mais restrições.

Resistência ao calor:

- ABS (TG 105 °C) é mais adequado que o PLA (TG 60 °C).
- Próximo de 60 °C o PLA pode perder rapidamente sua integridade estrutural e pode começar a deformar, particularmente se estiver sob carga.

Biodegradabilidade:

- O PLA é estável em condições atmosféricas gerais e biodegradável dentro de 50 dias em compostores industriais e 48 meses em água.
- ABS não é biodegradável, no entanto, é reciclável.

Fonte: 3DHub

45

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

Náilon (Poliamida)

Fácil de imprimir

Possui grandes propriedades mecânicas e, em particular, a melhor resistência ao impacto para um filamento não flexível. Entretanto, tem menor adesão entre camadas.

Propriedades	Valor
Limite de Resistência à tração	27,8 MPa
Alongamento total	30%
Resistência à flexão	24 MPa
Módulo de flexão	463,5 MPa
Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23 °C)	34,4 kJ/m ²
Dureza (Shore D)	74
Índice de fluidez de polímero fundido	6,2 g/10 min.
Temperatura de fusão	185 - 195 °C
Retração térmica	12,2%

Prós	Contras
Boa resistência química	Absorve umidade
Alta resistência	Emite fumaça

46

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

PC (Policarbonato)

Fácil de imprimir

É o material mais forte entre as opções dadas e pode ser uma alternativa interessante ao ABS, pois as propriedades são bastante semelhantes

Propriedades	Valor
Limite de Resistência à tração	76,4 MPa (I) / 53,7 MPa (p/b)
Alongamento total	5,4% (I) / 5,9% (p/b)
Resistência à flexão	111,0 MPa (I) / 95,5 MPa (p/b)
Módulo de flexão	2410 MPa (I) / 2310 MPa (p/b)
Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23 °C)	4,1 kJ/m ² (I) / 14,9 kJ/m ² (I)
Dureza (Shore D)	82 (I) / 80 (p/b)
Índice de fluidez de polímero fundido	32-35 g/10 min. (I) / 23-26 g/10 min. (p/b)
Transição vítrea	112-113 °C
Temperatura de impressão	Prox. de 300°C

Prós	Contras
Pode ser esterilizado	Sensível UV
Fácil pós-processamento (lixado)	

47

Manufatura Aditiva

UFPR
DEMEC

MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

TPU (Poliuretano termoplástico)

Fácil de imprimir

É usado principalmente para aplicações flexíveis, mas sua alta resistência a impactos permite outras possibilidades.

Propriedades	Valor
Limite de Resistência à tração	39 MPa
Alongamento total	580%
Resistência à flexão	4,3 MPa
Módulo de flexão	78,7 MPa
Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23 °C)	34,4 kJ/m ²
Dureza (Shore D)	46
Índice de fluidez de polímero fundido	15,9 g/10 min.
Temperatura/ intervalo de fusão	220°C

Prós	Contras
Boa resistência à abrasão	Difícil pós-processamento
Boa resistência ao óleo e graxa	Difícil de colar

48

Manufatura Aditiva



MATERIAIS PARA PROCESSO POR EXTRUSÃO

PETG Poli(tereftalato de etileno glicol)

É um polímero ligeiramente mais macio que possui propriedades adicionais interessantes com poucas desvantagens importantes.

Propriedades	Valor
Limite de Resistência à tração	29,4 Mpa
Alongamento total	4,4%
Resistência à flexão	70,5 MPa
Módulo de flexão	2070,0 MPa
Resistência ao impacto Charpy	9,7 kJ/m2
Dureza (Shore D)	-
Índice de fluidez de polímero fundido	35g/10 min.
Transição vítrea	80 °C
Temperatura/ intervalo de fusão	-



Prós	Contras
Pode entrar em contato com alimentos	Mais pesado que o PLA e o ABS
Alta resistência à umidade	
Alta resistência química	
Resistência	
Bom resistência à abrasão	
Prós-processado com lixa e tinta acrílica	

49

Manufatura Aditiva



REFERÊNCIAS

- VOLPATO, R., Manufatura Aditiva Tecnologias e aplicações da impressão 3D, Editora Bluncher, São Paulo, 2017.
- WOHLERS ASSOCIATES. Wohlers report 2015: 3D printing and additive manufacturing, state of the industry annual worldwide progress report. Fort Collins, 2015.
- <https://www.3dhubs.com/>
- SEEPR - Secretaria de Estado de Educação do Paraná, Impressão 3D: imaginar, planejar e materializar, 2018.
- Sampaio, C.L.M., Guia Maker de Impressão 3D – Teoria e práticas consolidadas, 2017.

50