



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR 3203

Fused Deposition Modelling FDM e Freeform
Fabrication (FFF)

Grupo 12

Henry Chuang - 10771142

João Victor Campos - 4203104

Murilo Moura - 10705763

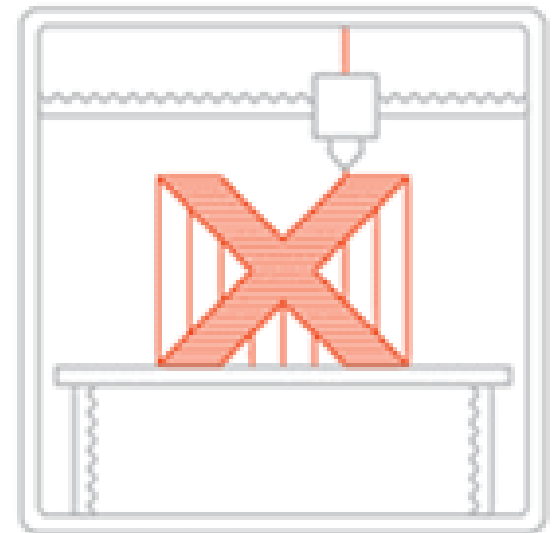
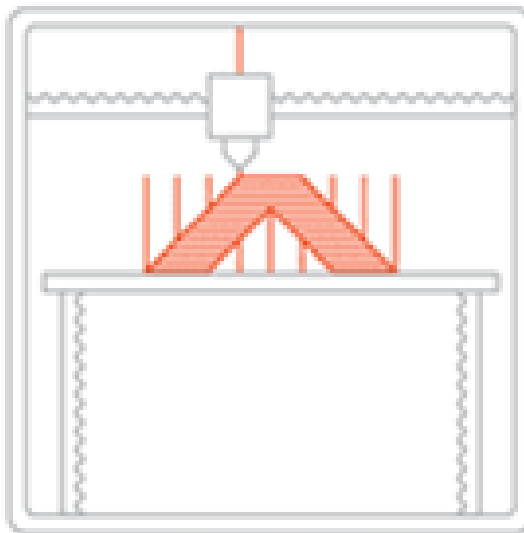
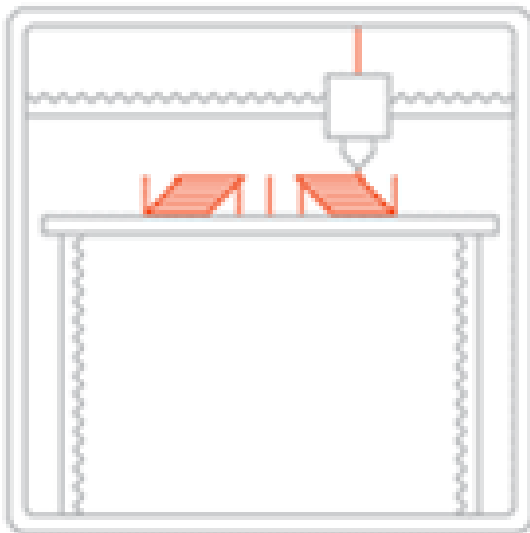
Raissa Toledo - 9373650

Vitor Eike - 10693531



Introdução

- Tecnologia de impressão 3D
- Não há diferenças entre FDM e FFF





Objetivo

O intento do grupo é apresentar a tecnologia de Fabricação por Filamento Fundido, explicando as etapas desse processo de impressão 3D, ressaltando suas singularidades e apontando as vantagens e desvantagens.



Carregamento do material

- Fornecimento contínuo de material
- Para materiais líquidos, ideal é bombeamento
- Para materiais sólidos (pós ou granulos), por gravidade ou com ajuda de parafuso

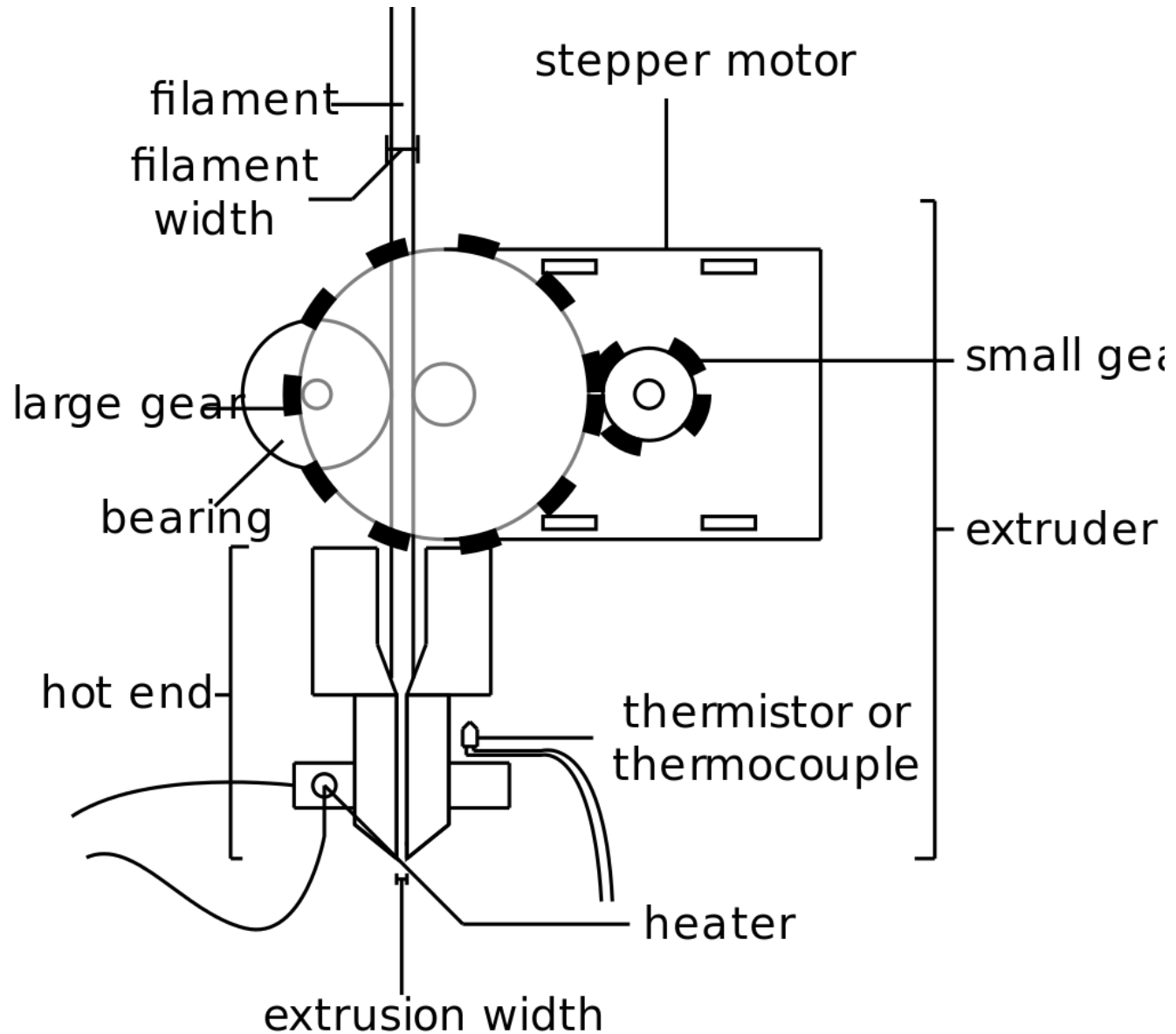


Fusão

- Armazena-se o material e aplica-se calor, de modo a transformá-lo em líquido.
- Idealmente, a temperatura do material deve ser uniforme e a mais baixa possível.
- Quanto maior volume de material armazenado, maior a dificuldade em manter uma temperatura uniforme.



Extrusão





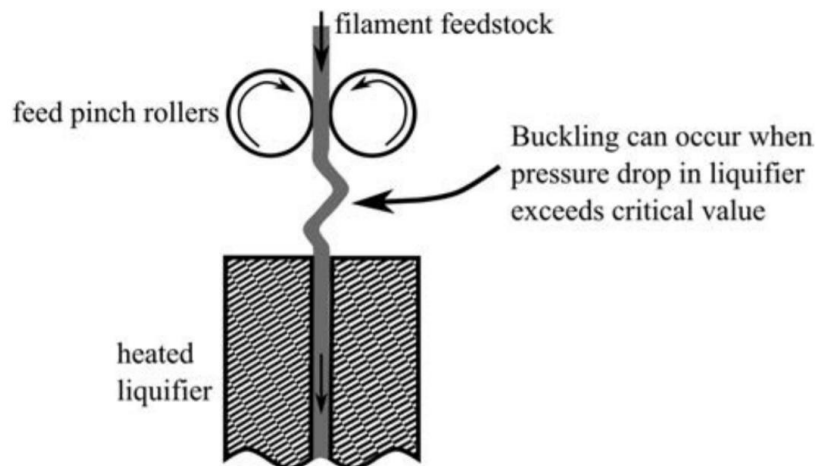
Extrusão

- Bocal determina o formato e tamanho do filamento extrudado
- É recomendado que a espessura de paredes e o tamanho de elementos do modelo seja de pelo menos o dobro do diâmetro do bocal



Extrusão

- O mecanismo mais comum para gerar pressão no extrusor é o rolamento por atrito
- Caso a pressão gerada seja maior que a pressão de saída, poderá ocorrer flambagem no filamento (assumindo que não haja escorregamento)



$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E d_f^2}{16 L_f^2}$$



Solidificação

- Uma vez que o material foi extrudado, idealmente, ele deveria manter o mesmo formato e tamanho
- No entanto, a gravidade e as tensões superficiais podem alterar esse formato
- Além disso, partes podem encolher ao esfriar



As newly deposited layers cool they shrink, pulling the underlying layer upward resulting in warping





Ligação

- Para sistemas baseados em calor, deve haver energia residual suficiente para que as superfícies sejam ativadas, causando a ligação entre as camadas
- Se não houver energia suficiente, as superfícies podem aderir, mas poderão ser facilmente separadas
- Energia demais também é um problema para as camadas inferiores, mas é mais previsível



Ligação

- Para contornar o problema do resfriamento em excesso, modelos matemáticos foram desenvolvidos

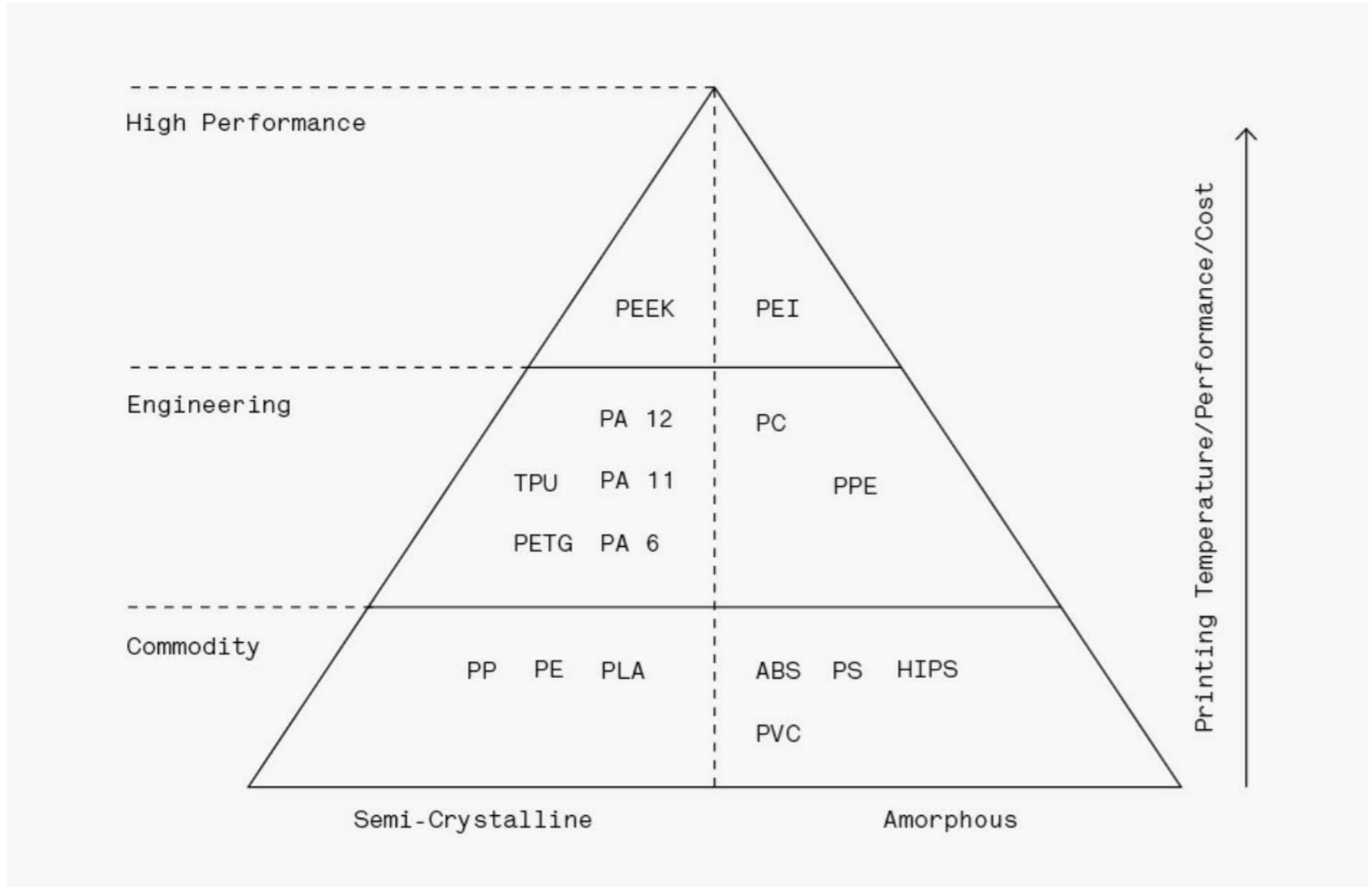
$$\rho \frac{\partial q}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - S_c - S_1 \quad S_1 = \frac{k}{\text{Width}^2} (T - T_{\text{neigh}})$$

$$S_c = \frac{h}{h_{\text{eff}}} (T - T_{\infty}) \quad \varphi = \int_0^t (T - T_c) d\tau$$



Materiais (plásticos)

- Termoplásticos
- Quanto melhor as propriedades, maior será a temperatura para aquecer
- Materiais a base de Policarbonato



Pirâmide de materiais termoplásticos



Material	Common Brands	Characteristics
ABS	eSun Stratasys Ultimaker	<ul style="list-style-type: none">- Good mechanical properties- Good temperature resistance- Susceptible to warping
PLA	ColorFabb (PLA/PHA) Formfutura Innofil Polymaker Ultimaker	<ul style="list-style-type: none">- Most common 3D printing plastic- Easy to print with- Lower impact strength, elongation and temperature resistance than ABS
Nylon (PA)	Stratasys Taulman3D Ultimaker	<ul style="list-style-type: none">- Suitable for end-use prints- Good flexibility- Excellent chemical resistance
PETG	ColorFabb (XT) eSun	<ul style="list-style-type: none">- High impact & chemical resistance- Good thermal properties- Susceptible to warping
TPU	Ninjaflex Ultimaker TPU 95A Polymaker Polylex	<ul style="list-style-type: none">- Flexible and rubber-like parts- Good elongation- Difficult to print accurately
PEI	Stratasys (ULTEM)	<ul style="list-style-type: none">- Excellent strength to weight- Fire and chemical resistance- High cost

Termoplásticos mais comuns e suas características



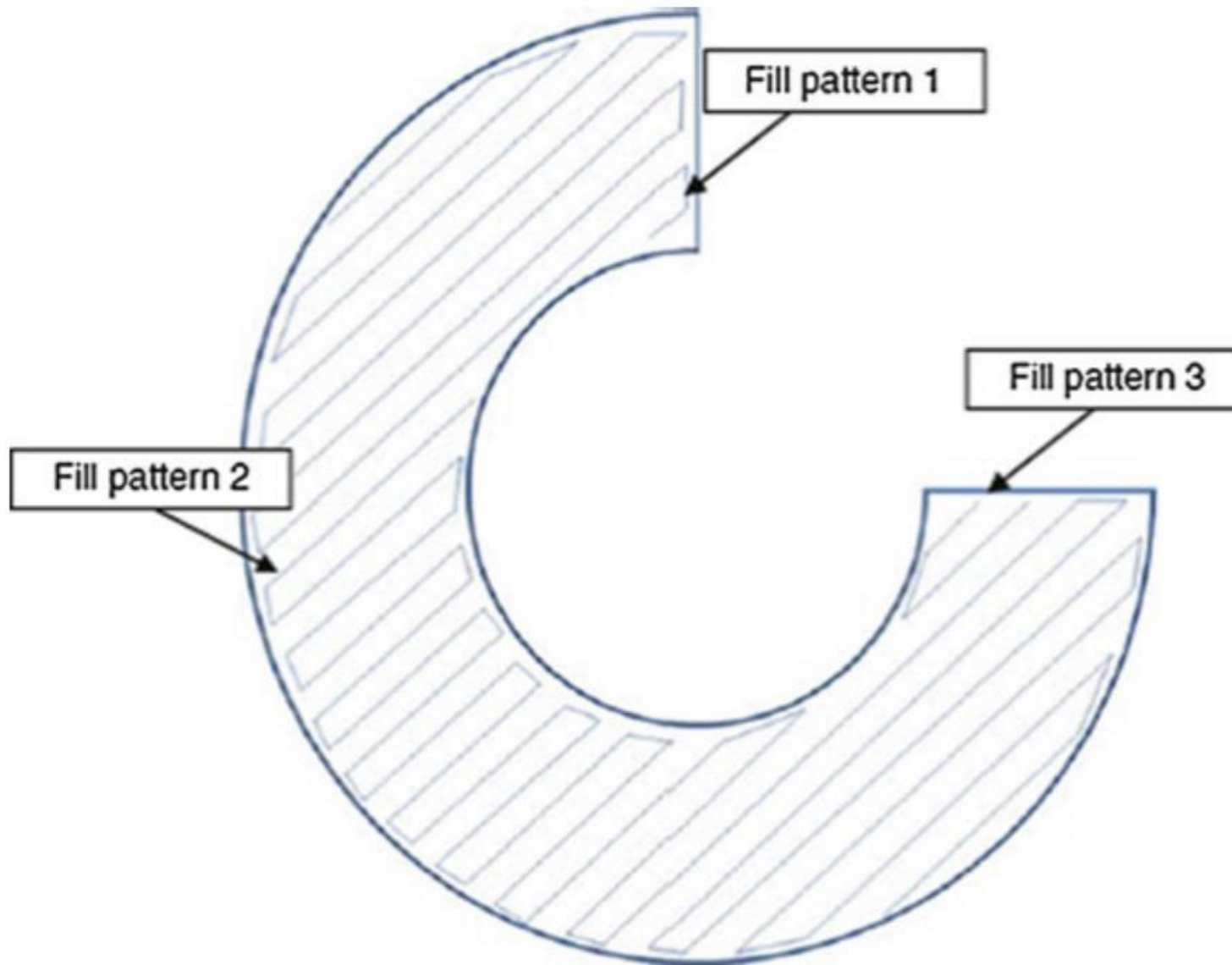
Property	ABS	ABSi	ABSplus	ABS/PC
Tensile strength (MPa)	22	37	36	34.8
Tensile modulus (MPa)	1,627	1,915	2,265	1,827
Elongation (%)	6	3.1	4	4.3
Flexural strength (MPa)	41	61	52	50
Flexural modulus (MPa)	1,834	1,820	2,198	1,863
IZOD impact (J/m ²)	106.78	101.4	96	123
Heat deflection at 66 psi (°C)	90	87	96	110
Heat deflection at 264 psi (°C)	76	73	82	96
Thermal expansion (in./in./F)	5.60E – 05	6.7E – 6	4.90E – 05	4.10E – 5
Specific gravity	1.05	1.08	1.04	1.2

Variações nas propriedades da linha ABS de materiais FDM (compilado pela folha de dados de Stratasys)



Controle da posição

- Sistemas a base de extrusão usam uma plataforma que coloca na direção vertical para a formação de camadas.
- Taxa de fluxo de material
- Sistema confiável sem perda de calibração
- Preenchimento interno mais rápido



Padrão de preenchimento usando um sistema de extrusão base



Estruturas de suporte

- As estruturas de suporte são exigidas quando há saliências menores que 45°
- Base sólida é necessária para imprimir em novas camadas
- A desvantagem do suporte é seu efeito prejudicial na superfície de contato, resultando em uma superfície final mais áspera. É necessária um pós processo para ter uma superfície mais lisa
- Estruturas de suporte que se dissolvem, podem dar melhor acabamento para a impressão



Overhangs less than 45° degrees,
supports are needed



Overhangs more than 45° degrees,
supports are not needed



Tipos de máquinas

Máquinas industriais



Máquinas de desktop





Tipos de máquinas

- **Máquinas industriais:**
 - Máquinas de alto custo.
 - Muitas opções de materiais a serem utilizados.
 - Condições de temperatura e umidade são controladas.
 - Maior precisão e volume de produção.



Tipos de máquinas

- **Máquinas de desktop:**
 - Baixo custo.
 - Performa bem em grande parte das aplicações.
 - Permite maior controle sobre os parâmetros de impressão.
 - Menos opções de materiais.



Pós processos

- Utilizada quando se deseja uma superfície suave.
- Importante considerar como as dimensões gerais da peça irão se alterar com o pós-processo



Pós processos

Obrigatório

- **Remoção do suporte**

- O suporte é removido após a impressão da peça.
- Lixamento da superfície de contato.
- Extrusão dupla: suporte pode ser dissolvido.



Pós processos

Acabamento da Superfície

- **Lixamento**

- Lixamento leve com alta densidade de grãos (600 ou maior).

- **Preenchimento de Lacuna**

- Superfície uniformemente lisa.
 - Resina Epóxi → pequenas lacunas
 - Preenchimento de reparo automotivo (Bondo) → grandes lacunas
- Quando o preenchimento é curado, a superfície é lixada.



Pós processos

Conectar

- **Soldagem a frio**
 - Acetona → fundição das peças
 - Dimensões das partes reduzidas.
 - Após secagem a junta é lixada



Pós processos

Estética

- **Polimento**

- Após lixar, um composto de polimento é usado na superfície.

- **Aplicar primer e pintar**

- É o pós processo mais comum de FFF.
- A superfície é lixada (grão 600).
- Primer é aplicado em duas camadas finas antes da pintura.
- Para a pintura, tinta de spray resulta numa superfície lisa.



Pós processos

Estética

- **Chapeamento de metal**

- Cobertas com uma casca condutora.
- Processo tradicional de revestimento de metal.

- **Suavização a vapor**

- Tipicamente associado com plástico ABS.
- Peças são colocadas numa câmara e expostas a vapor de acetona.
- O vapor dissolve a superfície externa, resultando numa superfície suave e polida.
- Pode resultar em perda de detalhe



Vantagens e Desvantagens

Vantagens:

- Custo competitivo (baixo custo de materiais e de maquinário).
- Simplicidade de operação.
- Alta variedade de materiais.
- Prototipação rápida.

Desvantagens:

- Natureza anisotrópica das peças (partes são fracas em uma direção específica).
- Deformações e encolhimento
- Pós processos se desejar uma superfície lisa.
- Alto nível de precisão = maquinário mais caro.



Aplicações comuns

- Utilizado em aplicações não-comerciais
- Fundição por investimento
- Caixas eletrônicas
- Testes de forma e encaixe
- Ferramentas de fixação



Figure 2.17 – An FFF printed pattern (left) and the final metal investment cast part (right)



Figure 2.18 – The lid of a speaker enclosure being printed on a desktop FFF printer with snap-fit joints (top). The final assembled speakers printed from PLA (bottom)



Conclusões ou Comentários Finais

A nova indústria possibilita:

- Redução nos custos.
- Alto nível de customização.
- Menor desperdício.

Até 2023, preve-se:

- Crescimento anual médio de 25,76%
- Movimentação de 32 bilhões de dólares ao ano.



Referências

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies**. 2. ed. New York: Springer, 2015.

REDWOOD, B., SCHÖFFER, F. and GARRET, B. **The 3D Printing Handbook technologies, design and applications**, 3D Hubs 2017.

TURNER, Brian & STRONG, Robert & GOLD, Scott. (2014). **A review of melt extrusion additive manufacturing processes**: I. Process design and modeling. Rapid Prototyping Journal. 20. 10.1108/RPJ-01-2013-0012.

YARDIMCI, Atif; GUÇERİi, S. **Conceptual framework for the thermal process modelling of fused deposition**. Rapid Prototyping Journal, Vol. 2 No. 2, pp. 26-31, 1996



- Fim -