

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ENSAIOS MANUFATURADOS POR ADIÇÃO DE POLÍMERO COM DIFERENTES DENSIDADES E FORMATOS DE PREENCHIMENTO

Gabriel Lucas Mirasol Campina

Marcos Vinicius Alves de Oliveira

Resumo

A manufatura aditiva ou impressão 3D tem se mostrado como a mais promissora forma de prototipagem industrial, devido sua possibilidade de fabricação de peças de geometrias complexas. Diante da importância desse tipo de fabricação para o desenvolvimento da sociedade, se faz necessário o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais dos objetos gerados pela manufatura aditiva. O presente projeto visa realizar um estudo sobre a influência da variação dos parâmetros de densidade e preenchimento em sua resistência mecânica, gerando dessa forma uma relação de "Gasto de material por Resistência mecânica" o que por sua vez possibilitará obter a melhor relação de custo por resistência. Os resultados obtidos serão divulgados para comunidade científica e o estudo será utilizado como base para o desenvolvimento de futuros projetos do Instituto visando obter uma maior economia no gasto de material.

Palavras-chave: Ensaio de Tração. Manufatura aditiva. Termoplástico PLA. Caracterização Mecânica. Tensão de ruptura.

1. Introdução

Atualmente os processos de manufatura aditiva ou impressão 3D tem se mostrado como a mais promissora forma de prototipagem industrial. Por ser uma tecnologia com alta flexibilidade e que permite a fabricação de peças de geometrias complexas, tem sido constatado um forte crescimento da utilização desse tipo de tecnologia nos mais diversos âmbitos do mercado nacional e internacional. Dentre as áreas de aplicações das tecnologias da manufatura aditiva, Marques (2014) destaca sua utilização nos setores automotivos, aeroespacial e no projeto de implantes odontológicos.

Segundo Neri Volpato (2017), a manufatura aditiva consiste no processo de produção de objetos a partir da deposição de variados materiais em camadas que correspondem a seções transversais sucessivas de um modelo computacional 3D. Através de um processo computacional é possível configurar alguns parâmetros de construção do objeto a ser impresso, como a densidade e formato de preenchimento, parâmetros esses que refletem diretamente nas características mecânicas do objeto.

A caracterização mecânica de um material consiste no estudo responsável por prever ou elucidar sobre o comportamento mecânico característico de um determinado material em diferentes condições, tal estudo é realizado através do emprego de diversos ensaios mecânicos, como ensaios de tração, flexão, dureza, impacto e fadiga. Para Ângelo Padilha (2000), a sociedade foi se desenvolvendo ao passo que obtinham um maior conhecimento a respeito dos materiais comumente utilizados em cada época. Possibilitando a escolha dos melhores materiais para cada demanda da sociedade, como a construção de máquinas, estruturas, equipamentos e produtos.

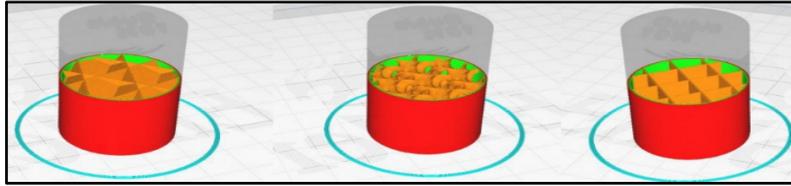
A partir dessa breve introdução sobre manufatura aditiva e sobre caracterização mecânica, pretende-se com o presente projeto desenvolver ensaios manufaturados em polímeros e realizar um estudo sobre a influência da variação dos parâmetros de densidade e preenchimento em sua resistência mecânica. Com o desenvolvimento desses ensaios e do estudo proposto, planeja-se utilizar os resultados como base para futuros projetos no laboratório Maker do IFSP campus Guarulhos visando obter uma maior economia no gasto de material.

2. Materiais e Métodos

Inicialmente foram escolhidos os três principais tipos de preenchimento utilizados em impressões 3D (Line, Gyroid e Cubic) e dez valores de densidade de preenchimento. Foram então, fabricados cinco corpos de prova para cada tipo de preenchimento, com variação na porcentagem de densidade de preenchimento: 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100%. Para facilitar a identificação, cada corpo de prova recebeu uma letra seguida de um número de identificação, sendo a primeira letra referente ao tipo de preenchimento, sendo L para Line, G para Gyroid e C para Cubic e o número a porcentagem de preenchimento. Por exemplo, o corpo de prova L10 indica que se trata do tipo de preenchimento Line com 10% de densidade de preenchimento e o corpo de prova G100 trata-se de um Gyroid com 100% de densidade de preenchimento.

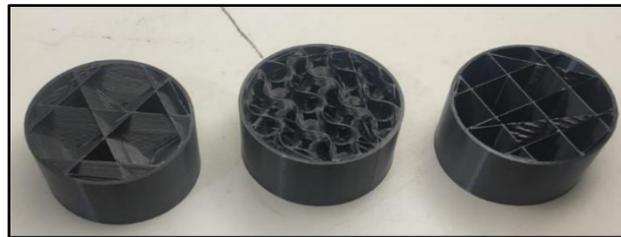
Foi utilizada a norma *ASTM-D638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics1)* para o desenvolvimento do corpo de prova. A norma especifica as dimensões e as condições necessárias para se realizar o ensaio.

Na *Figura 1* está representado em 3D pelo software de fatiamento CURA, as formas de preenchimento com os três tipos propostos no trabalho.

Figura 1 - Tipos de preenchimento (Cubic, Gyroid e Lines)

Fonte: o autor

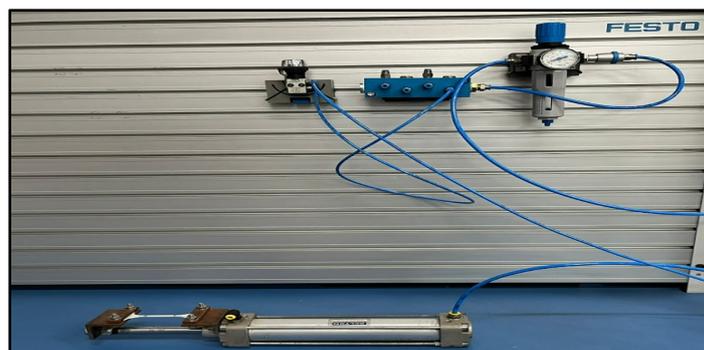
Na **Figura 2** é possível visualizar os modelos de preenchimento impressos em um corpo cilíndrico com 20% de preenchimento, fabricados na cor preta para facilitar a visualização.

Figura 2 - Impressão com visualização dos tipos de preenchimento (Cubic, Gyroid e Lines)

Fonte: o autor

a. Equipamento de ensaio

No início do projeto, havia a intenção de realizar o ensaio em uma máquina de ensaio de tração e compressão em um laboratório de mecânica. Entretanto, conforme o projeto avançou, não foi possível contar com a disponibilidade desse equipamento. Por isso, foi necessário buscar uma alternativa viável para realizar os ensaios. Foi utilizado um atuador pneumático com um suporte usinado acoplado ao seu eixo, sendo necessário então uma linha de ar comprimido, e uma unidade de conservação de ar com um manômetro para conferir a força/pressão aplicada em cada corpo de prova, os quais foram disponibilizados pelo próprio instituto.

Figura 3 - Sistema de ensaio com atuador pneumático

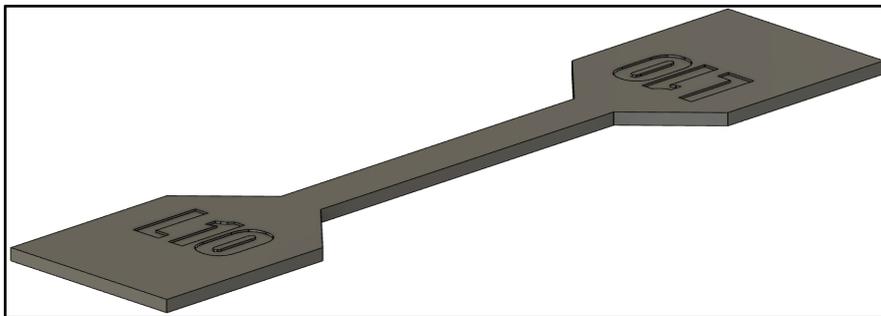
Fonte: o autor

b. Corpo de Prova

Para fabricação do corpo de prova utilizado no ensaio, foi seguida a norma *ASTM-D638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1)*, a qual estabelece as dimensões e as condições necessárias para a realização do ensaio. Inicialmente, o corpo de ensaio Type III foi escolhido, porém, devido à mudança para um atuador pneumático para realizar o ensaio, foi necessário reduzir o tamanho do corpo de prova para que a tensão de ruptura estivesse de acordo com a capacidade do atuador. Nesse caso, o atuador era o limitante do sistema. Foi utilizado então as dimensões do ensaio Type V - C.

Na **Figura 4** é possível ver a modelagem 3D do corpo de prova feita no software Autodesk Fusion 360.

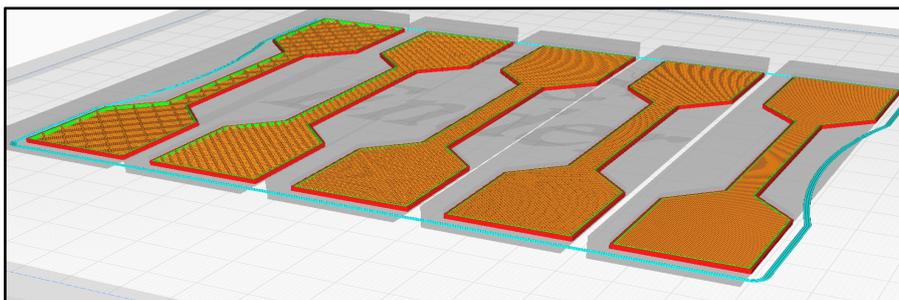
Figura 4 - CAD do corpo de prova



Fonte: o autor

Após a modelagem, foi utilizado um software de fatiamento que converteu o modelo de extensão “.stl” em “.gcode”, ou seja, transformou um arquivo Standard Triangle Language em um código G que pudesse ser lido pela impressora 3D. O software de fatiamento utilizado foi o Ultimaker CURA. Na **Figura 5** é possível ver as diferentes densidades de preenchimento sendo aplicadas no mesmo Gcode, possibilitando variar as características de impressão em um mesmo arquivo.

Figura 5 - Visualização da densidade de preenchimento dos corpos de prova no CURA



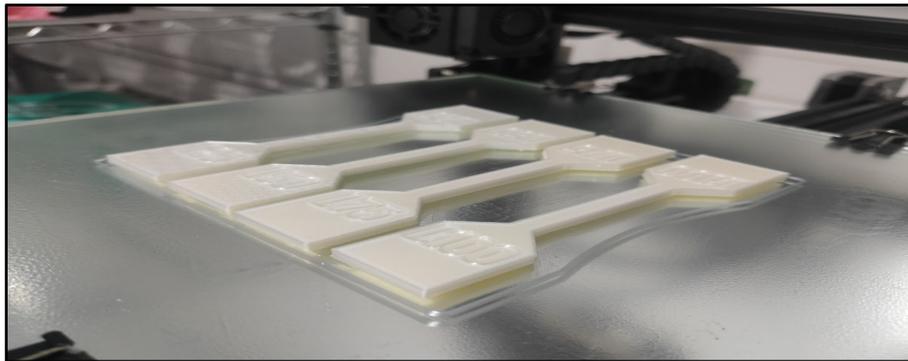
Fonte: o autor

c. Configurações de Impressão

Após todo o processo de preparação do arquivo até chegar no arquivo fatiado (Gcode), as peças foram impressas na impressora 3D modelo **Ender 3 - PRO**, utilizando as seguintes configurações de impressão (A impressão finalizada pode ser vista na **Figura 6**):

- **Altura de camada:** 0,2 mm
- **Velocidade de impressão:** 40mm/s
- **Temperatura do bico de impressão:** 200°C
- **Temperatura da mesa de impressão:** 60°C
- **Top e bottom layers:** 1 camada
- **Mesa:** Vidro
- **Infill:** Variável de acordo com cada corpo de prova.

Figura 6 - Corpo de prova impresso em PLA



Fonte: o autor

d. Método de Ensaio

O método de ensaio para avaliação das propriedades mecânicas dos corpos de prova foi realizado em seis etapas, conforme descrito abaixo:

1ª Etapa: Seleção de um corpo de prova de acordo com as especificações da norma ASTM-D638. (Vide **Figura 7**).

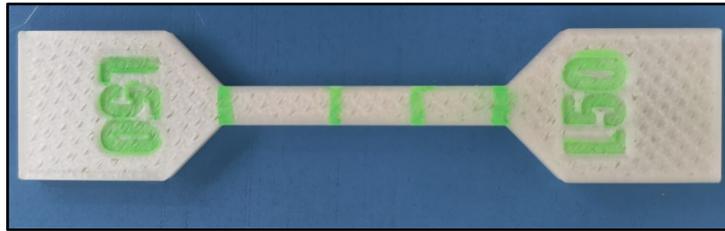
Figura 7 - Corpo de prova impresso em PLA (L50)



Fonte: o autor

2ª Etapa: Utilização de um paquímetro e um canetão para apontar demarcações no corpo de prova, garantindo a distância igual entre elas. (Vide **Figura 8**).

Figura 8 - Demarcação no corpo de prova



Fonte: o autor

3ª Etapa: Medição da distância entre as demarcações nas extremidades do corpo de prova.

4ª Etapa: Fixação do corpo de prova no atuador no local demarcado. (Vide **Figura 9**).

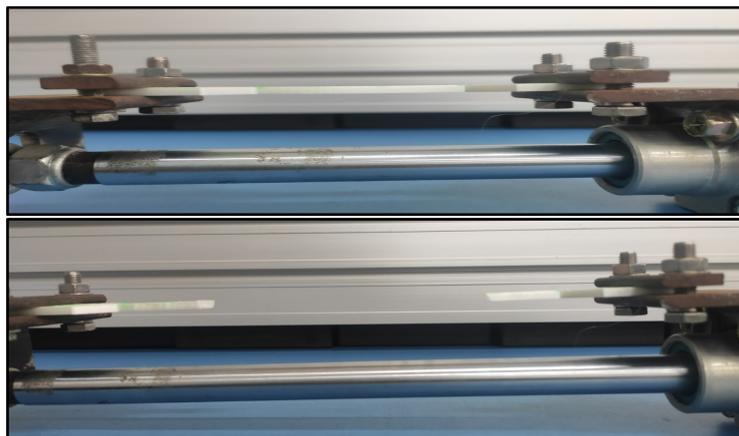
Figura 9 - Fixação do corpo de prova na base usinada do atuador



Fonte: o autor

5ª Etapa: Aumento da pressão de forma constante até a ruptura do corpo de prova. Na **Figura 10** é possível ver o corpo logo após o instante de ruptura.

Figura 10 - Corpo de após ruptura



Fonte: o autor

Com o aumento contínuo da pressão, em determinado momento o corpo de prova se rompe e nesse instante não é mais adicionado pressão ao sistema. Após o

instante de ruptura é coletado o valor de pressão no sistema através do manômetro da unidade de conservação de ar, como pode ser visto na **Figura 11**.

Figura 11 - Pressão no sistema no momento de ruptura



Fonte: o autor

6ª Etapa: Retirada do corpo de prova da base do atuador, junção de suas partes e medição da distância entre as demarcações das extremidades. (Vide **Figura 12**)

Figura 12 - Medição da distância final



Fonte: o autor

7ª Etapa: Anotação das distâncias iniciais e finais obtidas e pressão do sistema no momento de ruptura.

3. Resultados e Discussão

Organizando os dados obtidos e analisando-os podemos tirar conclusões interessantes sobre o PLA. Primeiro é possível notar que a qualidade de impressão aumenta conforme aumenta a porcentagem de preenchimento, sendo 10% de preenchimento uma peça com mal acabamento, com sua superfície aberta em certos pontos.

Figura 13 – Qualidade de impressão



Fonte: o autor

Através da Tabela 1 é possível identificar que o PLA em temperatura ambiente se comportou como um material frágil, pois seu alongamento foi de aproximadamente zero. O resultado pode ser comprovado quando visualizamos o ponto de ruptura que não apresenta estrição (Vide *Figura 13*).

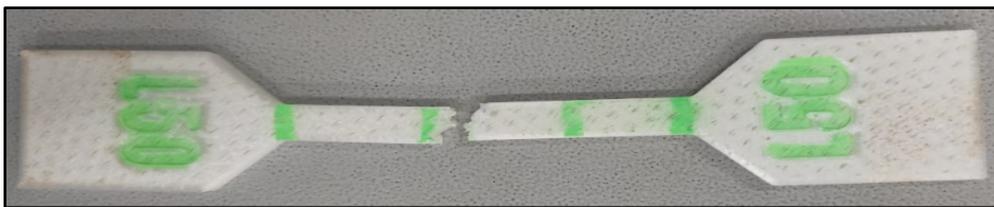
Tabela 1 - Alongamento do PLA

Corpo de prova	Medição [mm]		Alongamento
	inicial	Final	
L10	47,42	47,43	0,000210881
G50	47,92	48,76	0,017529215
C70	47,31	48,42	0,02346227
L20	47,37	48,6	0,025965801
100	47,67	49,59	0,040276904

Fonte: o autor

A tabela comprova uma das características interessantes do PLA, que é ser um material frágil a temperatura ambiente, por se tratar de um termoplástico teria alongamento considerável em temperatura próxima a 60°C (Ponto de transição vítrea do PLA).

Figura 15 - Corpo de prova rompido



Fonte: o autor

Com os dados de pressão do sistema no instante de ruptura e sabendo que o diâmetro do êmbolo do atuador tem 35mm e que a secção transversal do corpo de prova tem 20,32mm², foi calculado a força no atuador e posteriormente a tensão de ruptura do material, seguindo o seguinte cálculo:

$$\begin{aligned}
 \text{Força no atuador} &= \text{Pressão no instante de ruptura} * 17,5^2 * \pi \\
 \text{Tensão de ruptura do material} &= \frac{\text{Força no atuador}}{\text{Secção transversal do corpo de prova}}
 \end{aligned}$$

$$\text{Força no atuador} = \text{Pressão no instante de ruptura} * (17,5^2) * \pi$$

$$\text{Tensão de ruptura do material} = \text{Força no atuador} / \text{secção transversal do corpo de prova}$$

Na *Tabela 2* está apresentado os valores de tensão de ruptura para o preenchimento do tipo Cubic.

Tabela 2 - Tensão de ruptura Cubic [MPa]

Corpo de prova	Densidade de preenchimento	Pressão sistema (Instante de ruptura) [Bar]	Tensão de ruptura (N/mm ²)	Força do atuador [N]	Tensão de ruptura do material (MPa)	Resistência Mecânica
C10	10%	1	0,1	92,94	4,57	22,73%
C20	20%	1,65	0,165	153,35	7,55	37,50%
C30	30%	1,98	0,198	184,02	9,06	45,00%
C40	40%	2,5	0,25	232,35	11,43	56,82%
C50	50%	2,6	0,26	241,65	11,89	59,09%
C60	60%	2,78	0,278	258,38	12,72	63,18%
C70	70%	3,07	0,307	285,33	14,04	69,77%
C80	80%	3,58	0,358	332,73	16,37	81,36%
C90	90%	3,61	0,361	335,52	16,51	82,05%
100	100%	4,4	0,44	408,94	20,12	100,00%

Fonte: o autor

Na *Tabela 3* está apresentado os valores de tensão de ruptura para o preenchimento do tipo Linear.

Tabela 3 - Tensão de ruptura Linear [MPa]

Corpo de prova	Densidade de preenchimento	Pressão sistema (Instante de ruptura) [Bar]	Tensão de ruptura (N/mm ²)	Força do atuador [N]	Tensão de ruptura do material (MPa)	Resistência Mecânica
L10	10%	1,02	0,102	94,80	4,67	23,18%
L20	20%	1,6	0,16	148,71	7,32	36,36%
L30	30%	2	0,2	185,88	9,15	45,45%
L40	40%	2,38	0,238	221,20	10,89	54,09%
L50	50%	2,42	0,242	224,92	11,07	55,00%
L60	60%	3,2	0,32	297,41	14,64	72,73%
L70	70%	3,2	0,32	297,41	14,64	72,73%
L80	80%	3,66	0,366	340,16	16,74	83,18%
L90	90%	3,8	0,38	353,18	17,38	86,36%
100	100%	4,4	0,44	408,94	20,12	100,00%

Fonte: o autor

Na *Tabela 4* está apresentado os valores de tensão de ruptura para o preenchimento do tipo Gyroid.

Tabela 4 - Tensão de ruptura Gyroid [MPa]

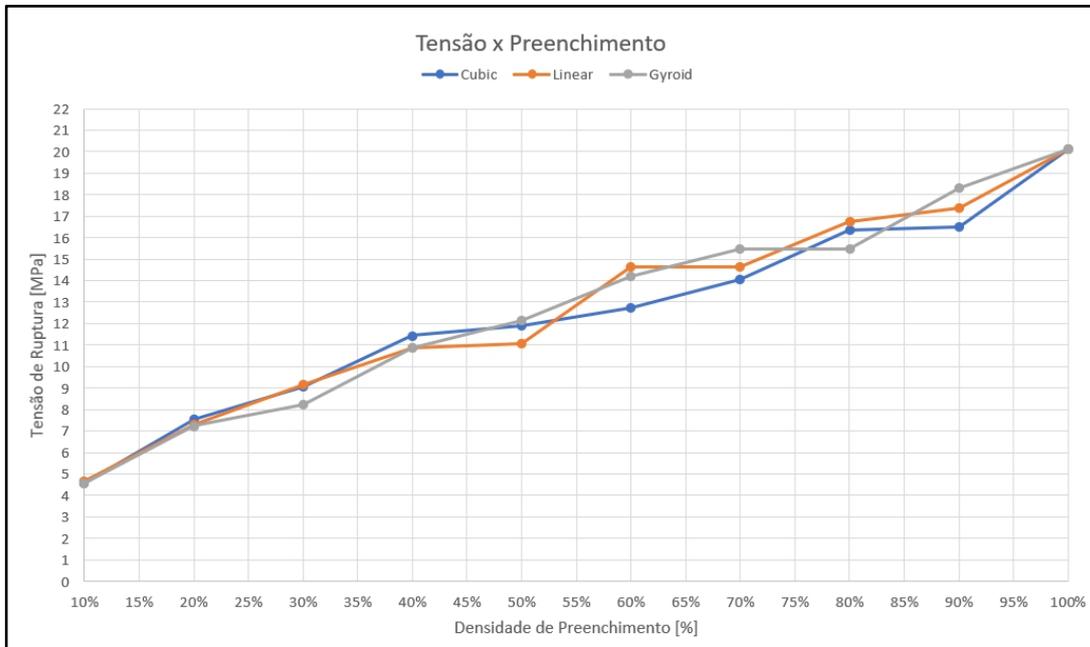
Corpo de prova	Densidade de preenchimento	Pressão sistema (Instante de ruptura) [Bar]	Tensão de ruptura (N/mm ²)	Força do atuador [N]	Tensão de ruptura do material (MPa)	Resistência Mecânica
G10	10%	1	0,1	92,94	4,57	22,73%
G20	20%	1,58	0,158	146,85	7,23	35,91%
G30	30%	1,8	0,18	167,29	8,23	40,91%
G40	40%	2,38	0,238	221,20	10,89	54,09%
G50	50%	2,66	0,266	247,22	12,17	60,45%
G60	60%	3,1	0,31	288,12	14,18	70,45%
G70	70%	3,38	0,338	314,14	15,46	76,82%
G80	80%	3,38	0,338	314,14	15,46	76,82%
G90	90%	4	0,4	371,76	18,30	90,91%
100	100%	4,4	0,44	408,94	20,12	100,00%

Fonte: o autor

Com os dados apresentados nas tabelas, foram construídos gráficos que relacionam tensão e preenchimento para cada tipo de preenchimento.

No **Gráfico 1** está apresentada a relação da tensão de ruptura com a porcentagem de preenchimento para o tipo Cubic, Linear e Gyroid e suas respectivas equações lineares.

Gráfico 1 - Tensão de ruptura x Densidade de preenchimento todos preenchimentos

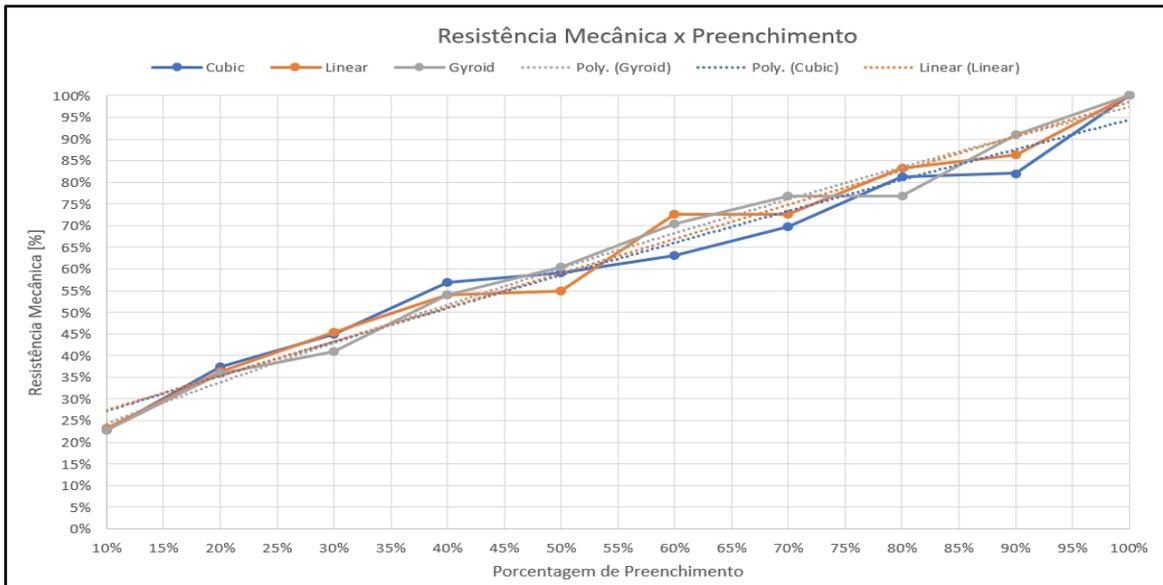


Fonte: o autor

Transformando os valores de tensão de ruptura em porcentagem, podemos dizer que a peça em questão tem sua máxima tensão de ruptura quando sua resistência mecânica está em 100%. Logo, seguindo o experimento realizado, a resistência mecânica é máxima quando sua densidade de preenchimento também é máxima.

Por tanto, foi gerado o **Gráfico 5**, que relaciona Resistência Mecânica com Densidade de preenchimento e o mesmo pode ser aplicado para diferentes peças.

Gráfico 5 - Resistência x Porcentagem de preenchimento [%]



Fonte: o autor

Com base nesse gráfico, podemos observar que os três tipos de preenchimento apresentam semelhanças notáveis, uma vez que todos se comportam de forma linear. O tipo Cubic apresenta uma resistência mecânica ligeiramente inferior aos demais. Dessa forma, podemos concluir que não há grandes diferenças entre a utilização dos diferentes tipos de preenchimento no que se refere ao aumento da tensão de ruptura.

O material utilizado para os experimentos, foi o PLA Branco da 3D FILA lote 462. Por meio da relação entre o preço por quilograma e o custo por hora de impressão, foi possível calcular o valor de cada impressão, como demonstrado na **Tabela 5**.

Tabela 5: Tabela de padrão de custos

Preço p/ g (PLA 3D Fila)		
Peso	Preço	Custo Hora Impressão
1kg	R\$ 134,90	R\$ 0,22
1g	R\$ 0,13	

Fonte: o autor

Na **Tabela 6** está apresentado os custos calculados pelos parâmetros de tempo de impressão e peso da peça final. O custo do tempo de impressão é calculado multiplicando o tempo de impressão em minutos por 0,22 que representa o gasto energético do equipamento.

Tabela 6: Tabela de custos Corpo Linear

Corpo de prova	Peso [g]	Filamento utilizado [m]	Tempo de impressão [min]	Custo [R\$]	Custo [%]
L10	2,2	0,74	20	R\$ 0,36	39,90%
L20	2,6	0,88	23	R\$ 0,42	46,89%
L30	3	1,01	25	R\$ 0,48	53,48%
L40	3,4	1,15	28	R\$ 0,54	60,47%
L50	3,9	1,29	30	R\$ 0,62	68,50%
L60	4,3	1,43	32	R\$ 0,68	75,09%
L70	4,7	1,53	34	R\$ 0,74	81,68%
L80	5,1	1,71	36	R\$ 0,80	88,27%
L90	5,5	1,85	38	R\$ 0,85	94,86%
L100	5,8	1,95	40	R\$ 0,90	100,00%

Fonte: o autor

Na **Tabela 7** está apresentado os custos para o corpo de prova do tipo Gyroid.

Tabela 7: Tabela de custos Corpo Gyroid

Corpo de prova	Peso [g]	Filamento utilizado [m]	Tempo de impressão [min]	Custo [R\$]	Custo [%]
G10	2,2	0,74	20	R\$ 0,36	36,35%
G20	2,6	0,89	24	R\$ 0,43	43,09%
G30	3,1	1,03	29	R\$ 0,51	51,52%
G40	3,4	1,15	31	R\$ 0,56	56,20%
G50	3,8	1,28	38	R\$ 0,63	64,06%
G60	4,4	1,46	46	R\$ 0,74	74,92%
G70	4,6	1,55	49	R\$ 0,78	78,66%
G80	5	1,68	53	R\$ 0,84	85,40%
G90	5,6	1,87	61	R\$ 0,95	96,26%
G100	5,8	1,95	64	R\$ 0,99	100,00%

Fonte: o autor

Na **Tabela 8** está apresentado os custos para o corpo de prova do tipo Cubic.

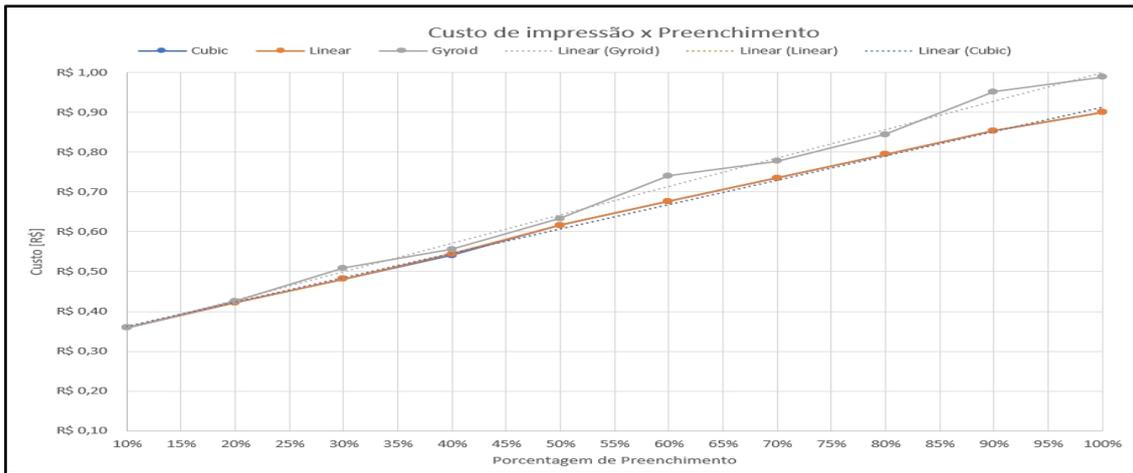
Tabela 8: Tabela de custos Corpo Cubic

Corpo de prova	Peso [g]	Filamento utilizado [m]	Tempo de impressão [min]	Custo [R\$]	Custo [%]
C10	2,2	0,73	20	R\$ 0,36	39,90%
C20	2,6	0,87	23	R\$ 0,42	46,89%
C30	3	1,01	25	R\$ 0,48	53,48%
C40	3,4	1,15	27	R\$ 0,54	60,07%
C50	3,9	1,29	30	R\$ 0,62	68,50%
C60	4,3	1,43	32	R\$ 0,68	75,09%
C70	4,7	1,57	34	R\$ 0,74	81,68%
C80	5,1	1,71	36	R\$ 0,80	88,27%
C90	5,5	1,85	38	R\$ 0,85	94,86%
C100	5,8	1,95	40	R\$ 0,90	100,00%

Fonte: o autor

A partir das tabelas geradas, foi possível gerar dois gráficos que relacionam o custo de impressão com a porcentagem de preenchimento e resistência mecânica. Com esses gráficos podemos visualizar melhor as diferenças entre cada tipo de preenchimento.

Gráfico 6: Custo de Impressão x Preenchimento



Fonte: o autor

Analisando o **Gráfico 6**, podemos concluir que o custo de impressão do Gyroid é maior se comparado aos outros tipos de preenchimento.

As equações lineares foram,

para o Gyroid $y=0,7147x + 0,2856$;

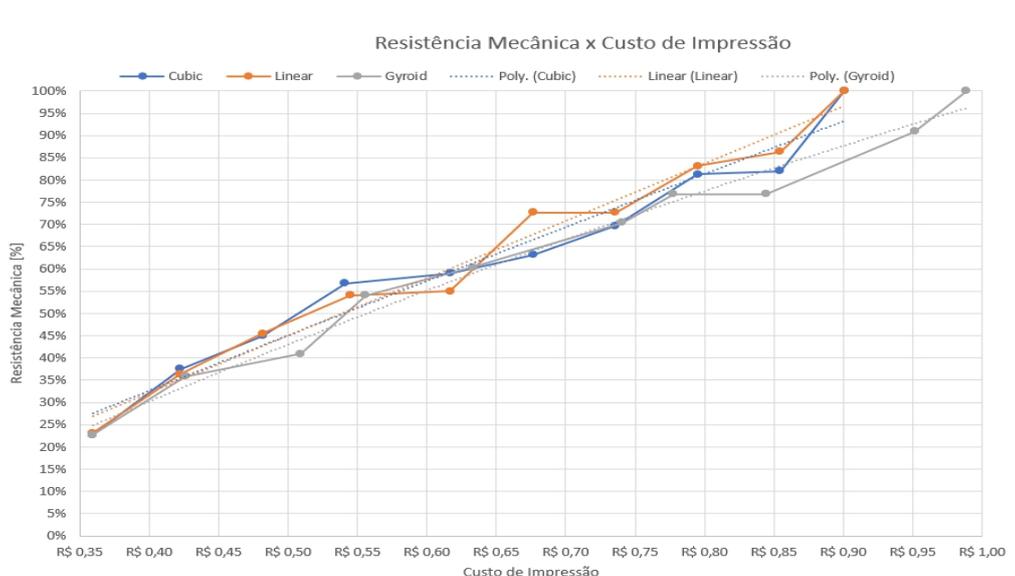
para o Linear $y=0,6118x + 0,3022$;

para o Cubic $y=0,6125x + 0,3015$.

Podemos ver que o coeficiente angular do Gyroid é maior e por tanto o custo tende a crescer mais em função do preenchimento.

Também é possível verificar que para Linear e Cubic a relação custo preenchimento é praticamente a mesma e isso já era esperado, visto que os preenchimentos se assemelham muito entre si (vide **Figura 2**).

Gráfico 7: Resistência Mecânica X Custo de Impressão



Fonte: o autor

Como visto no **Gráfico 5**, a resistência mecânica é proporcional ao preenchimento para todos os casos. Com o **Gráfico 6**, vimos que o custo por preenchimento do Gyroid foi maior em relação aos outros e por tanto concluímos com o Gráfico 7, que a relação custo por resistência mecânica para o Gyroid foi pior.

4. Considerações Finais

Com a pesquisa desenvolvida podemos concluir que o PLA em temperatura ambiente se comporta como um material frágil.

A relação entre tensão de ruptura e porcentagem de preenchimento se mostrou linear para os três casos (Cubic, Gyroid e Linear), não havendo diferenças significativas entre os tipos de preenchimento, porém, a relação custo por tensão de ruptura se mostrou pior no preenchimento do tipo Gyroid.

Inicialmente, a expectativa era encontrar resultados que não fossem lineares em função dos diferentes formatos de preenchimento avaliados. No entanto, constatou-se que a tensão de ruptura está diretamente relacionada à porcentagem de preenchimento, a qual, por sua vez, apresenta um aumento proporcional no custo de impressão.

A qualidade de impressão se mostrou inferior no preenchimento de 10%, pois não houve preenchimento suficiente que servisse como suporte para as camadas superiores.

Com isso, podemos concluir que a recomendação é utilizar o tipo de preenchimento Linear ou Cubic, já que esses apresentaram vantagens de custo em relação ao Gyroid. Com relação a quantidade de preenchimento, dependerá do tipo de projeto, quanto maior a porcentagem de preenchimento maior será a tensão de ruptura e o custo do objeto impresso, porém, valores abaixo do 20% apresentam uma perda significativa de qualidade de impressão, sendo dessa forma recomendado imprimir peças com no mínimo 20% de preenchimento.

Para próximos passos, pretende-se realizar novos experimentos com outros tipos de preenchimento e com a utilização de extensômetros, visando dessa forma traçar o gráfico tensão x deformação e ter mais informações sobre o material estudado.

5. Referências

a. Livro

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1^o Edição. São Paulo: Editora Blucher, 2017.

PADILHA, A. **Materiais para engenharia: Microestrutura e propriedades**. 1^o Edição. São Paulo: Editora Hemus, 2000.

b. Normas

ASTM D638-10: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2010.

c. Internet

MARQUES, K. **Manufatura aditiva: o futuro do mercado industrial de fabricação e inovação**. Disponível em: < <https://eesc.usp.br/comunicacao-admin/?p=7564> > Acesso em: 09 out. 2022