
Fabricação e Estudo de Meta-Materiais Por Fabricação Aditiva

Gustavo Ferreira Brazil nº51050

Projeto Final de Licenciatura
Licenciatura em Engenharia Física Aplicada

Orientador: Prof. Tiago Charters de Azevedo

Julho de 2025

RESUMO

A fabricação aditiva, em especial a impressão 3D, permite a criação de geometrias complexas com estruturas internas personalizadas, abrindo caminho para a otimização de propriedades mecânicas por métodos não convencionais. Motivado pela hipótese de Adrian Bowyer, de que alterações geométricas internas, como cavidades que simulam fibras artificiais, poderiam melhorar o desempenho mecânico, este estudo investiga o efeito dessas modificações em provetes de PLA fabricados por impressão 3D.

A metodologia consistiu, numa primeira fase, na identificação, através de ensaios de tração, da estrutura interna mais fraca entre diferentes tipos de preenchimento e respectivas densidades, tendo sido selecionado o tipo “Linhas” com 20% de densidade como base. Assim, foram impressos provetes com diferentes quantidades de cavidades cilíndricas distribuídas aleatoriamente (de 0 a 1000) e, posteriormente, realizados novamente ensaios de tração. Os dados foram tratados em Python, com recurso a interpolação e regressão linear para determinação de parâmetros como o módulo de Young.

Os resultados mostraram que os provetes com 500 cavidades apresentaram maior módulo de elasticidade, alcançando aproximadamente 1,46 GPa, valor próximo ao obtido com preenchimentos densos, como o giroide a 80% (1,60 GPa). No entanto, a inclusão de cavidades não promoveu ganhos significativos na tensão de rotura e, em alguns casos, reduziu-a, e de igual forma, para com o módulo de Young.

Conclui-se, portanto, que as modificações geométricas internas contribuem para o aumento da rigidez, mas podem comprometer a resistência máxima, dependendo da quantidade e distribuição das cavidades. A abordagem revela-se promissora, mas exige maior controlo e otimização para alcançar melhorias consistentes no desempenho mecânico.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	4
1.1. Fundamento Teórico.....	4
1.2. Motivação e Objetivos.....	5
2. MÉTODOS E APLICAÇÕES.....	7
2.1. Equipamentos e Materiais.....	7
2.2. Provetes: Modelação 3D e Fatiamento.....	9
2.3. Manipulação dos Dados.....	13
3. ESTUDO INTRODUTÓRIO.....	14
3.1. Análise Gráfica e Decisão.....	19
4. ESTUDO PRINCIPAL.....	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
6. CONCLUSÃO.....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias de fabricação, especialmente a fabricação aditiva, também conhecida como impressão 3D, tornou-se possível explorar novos caminhos no design e na customização de peças, otimizando materiais e estruturas.

A fabricação aditiva permite a produção de objetos camada por camada, a partir de modelos tridimensionais digitais, possibilitando a criação de geometrias complexas com maior economia de material e de forma simples. Esta tecnologia tem se revelado especialmente promissora na produção e estudo de meta-materiais, i.e., estruturas artificiais projetadas para apresentar propriedades não encontradas naturalmente, através de padrões geométricos e arquiteturas internas inovadoras.

O presente trabalho insere-se nesse contexto, propondo a análise do comportamento mecânico de provetes fabricados por impressão 3D, variando sua composição em termos de densidade e estrutura.

1.1. Fundamento Teórico [6 & 7]

Consideremos um provete (cilíndrico ou de secção retangular) de comprimento l_0 , com uma secção reta inicial A_0 , submetido a uma força F . A tensão nominal σ é o quociente entre a força de tração uniaxial F aplicada ao provete e a área inicial da secção reta A_0 .

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ (N/m}^2 \text{ ou Pa)} \quad (1)$$

F é a carga instantânea aplicada perpendicularmente à secção reta da amostra em newtons (N) e A_0 é a área da secção reta inicial (antes de qualquer carga ser aplicada) em m^2 . As unidades da tensão nominal são o N/m^2 ou Pa (Pascal).

Consideremos um provete (cilíndrico ou de secção retangular) de comprimento l_0 , com uma secção reta inicial A_0 , submetido a uma força F . A Extensão nominal ε é o quociente entre a deformação Δl imposta ao provete e o seu comprimento inicial l_0 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0} \text{ (adimensional)} \quad (2)$$

Onde l_0 é o comprimento inicial (antes que qualquer carga ser aplicada) e l_i é o comprimento instantâneo. O comprimento $(l_i - l_0)$ é designado por Δl e corresponde à deformação ou variação de comprimento num dado instante, em relação ao comprimento original. A extensão é adimensional e por vezes é expressa como uma percentagem, na qual o valor de deformação é multiplicado por 100.

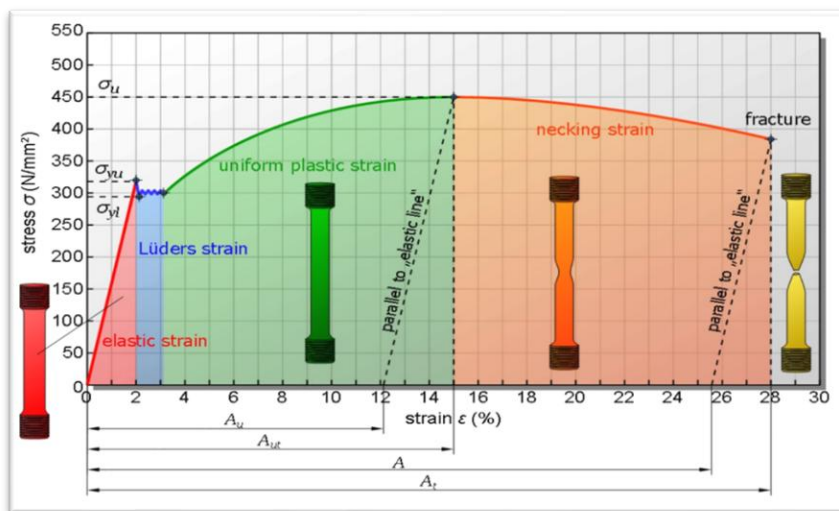


Figura 1: Representação dos diferentes regimes num gráfico tensão-extensão de um ensaio de tração.

Ao analisarmos um gráfico Tensão-Extensão percebem-se regimes com diferentes características (**Figura 1**), como por exemplo o regime elástico, que diz respeito ao regime em que a deformação é revertida quando a força para de atuar (a tensão a variar linearmente com a extensão); e o regime plástico, caracterizado pela deformação permanente imposta no corpo.

Quando um material é solicitado mecanicamente, ele começa por se deformar elasticamente (recupera as dimensões iniciais após remoção da solicitação). Neste regime de comportamento elástico, a tensão e extensão são proporcionais entre si através da relação

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

conhecida como a lei de Hooke e a constante de proporcionalidade E (Pa) é o chamado módulo de elasticidade ou módulo de Young; onde σ (Pa) é a tensão e ε a extensão.

Num gráfico de Tensão (ordenadas) versus Extensão (abscissas) o regime elástico segue uma relação linear, onde o declive desta reta corresponde ao módulo de elasticidade E (**Figura 2**). Este módulo representa a rigidez ou uma resistência do material à deformação elástica. Quanto maior o módulo, mais rígido é o material, ou seja, menor é a deformação elástica que resulta da aplicação de uma dada tensão.

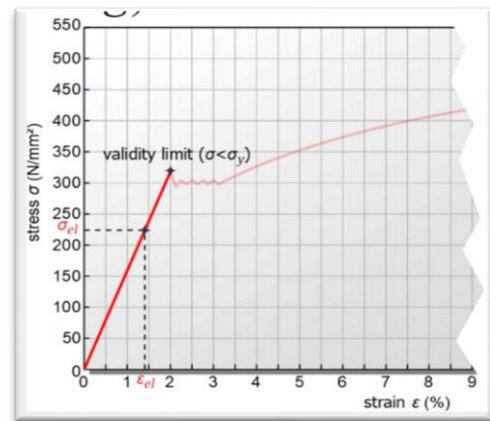


Figura 2: Representação do regime elástico num gráfico tensão-extensão.

1.2. Motivação e Objetivos [1 & 2]

A ideia central do trabalho está inspirada na visão inovadora de Adrian Bowyer, engenheiro e matemático britânico, que criou o projeto RepRap. Bowyer, então professor na Universidade de Bath, idealizou uma impressora 3D de baixo custo capaz de replica parte das suas próprias peças. Um marco no desenvolvimento da manufatura *open-source*.

Bowyer propôs a ideia de que mesmo com modificações internas discretas na peça impressa (**Figura 3**), o comportamento mecânico da mesma também seria alterado, essencialmente para melhor, como por exemplo, aumentando a sua rigidez, ou seja, sua resistência à deformação.

Neste âmbito, Bowyer fez um pequeno experimento para testar o que fora proposto por si, fazendo um ensaio de flexão simplificado em suas impressões (**Figura 4 e 5**).

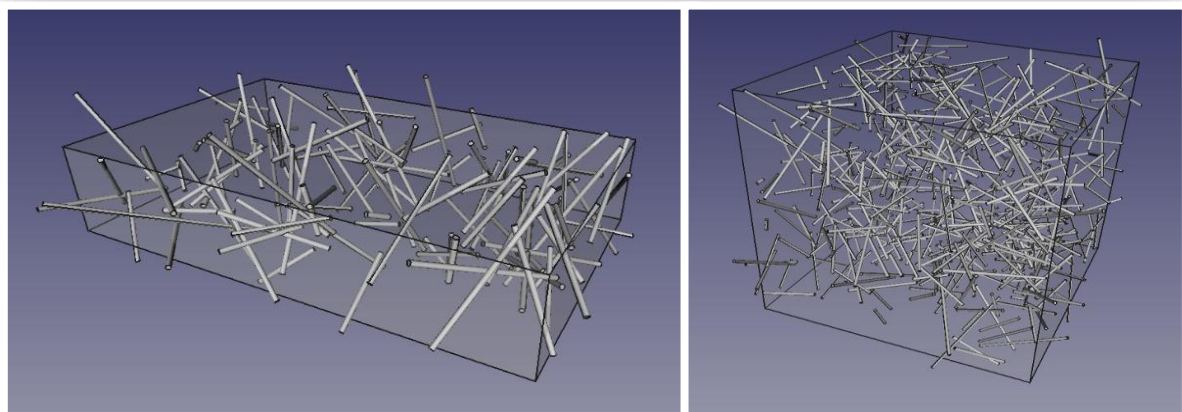


Figura 3: Modelos de criação de cavidades - esquema apresentado por Bowyer.



Figura 4: Ensaio de flexão montado.

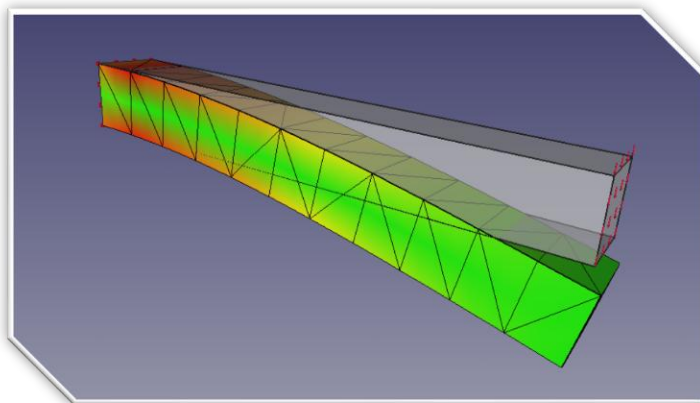


Figura 5: Simulação de modelo fletido.

Assim, tomando os dados, concluiu que sim, a peça impressa com estrutura interna alterada realmente adquiria vantagens face a inalterada (**Figura 6**), e, no seu caso, 54% de aprimoramento, o que mostra o quão promissora e inovadora é sua ideia.

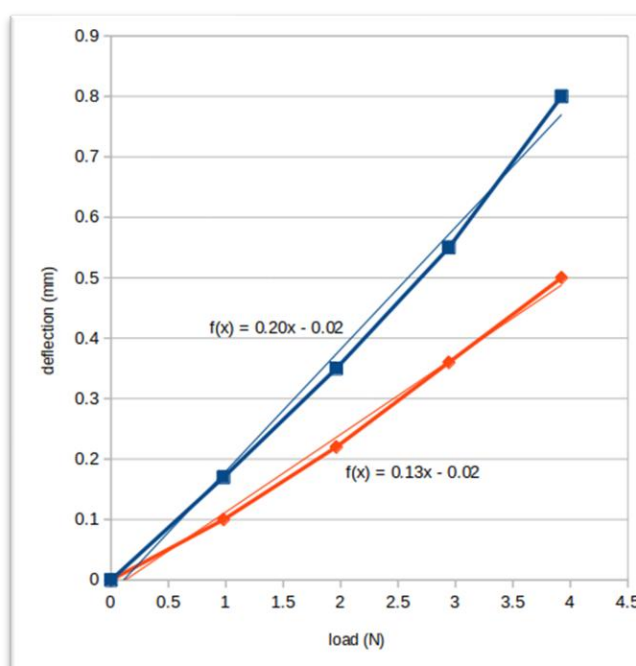


Figura 6: Gráfico Deformação-Força, onde a linha azul representa a o material sem reforços, e a laranja o contrário.

Com base nessa proposta, este trabalho exploratório visa avaliar a hipótese de que pequenas irregularidades geométricas internas, semelhantes a “fibras artificiais”, podem influenciar significativamente as propriedades mecânicas do material. Para explorar isso, o estudo propõe a execução de ensaios de tração em provetes impressos em PLA, comparando unidades com estruturas internas modificadas (com cavidades que simulam fibras) e provetes sólidos.

O objetivo central deste projeto é, portanto, realizar ensaios de tração em provetes produzidos por fabricação aditiva, com o intuito de avaliar e comparar o comportamento mecânico, nomeadamente o módulo de Young (ou de rigidez), tensão máxima e o alongamento até à fratura, entre provetes com estrutura interna convencional e aqueles modificados por cavidades que simulam fibras internas. Com esta abordagem, pretende-se verificar se a

proposta de Bowyer resulta em alterações mensuráveis nas propriedades estruturais, tendo como base apenas a variação geométrica interna.

2. MÉTODOS E APLICAÇÕES

2.1. Equipamentos e Materiais

Para a realização dos ensaios de tração, foi utilizada a máquina de tração Shimadzu AG-IS 20kN (**Figura 7**). Trata-se de um equipamento de ensaios, controlado por computador, com capacidade máxima de 20 kN, capaz de realizar testes em diversos materiais como metais, polímeros e compósitos. A máquina registra dados de força, deslocamento e deformação.



Figura 7: Máquina de tração Shimadzu AG-IS 20kN.

Fora também, para as medidas de comprimento e espessura dos provetes, utilizados paquímetros manuais e digitais.

Para a impressão 3D, foram utilizadas as máquinas Creality Ender S1 PRO (**Figura 8**) e também a Creality Ender 3 NEO (**Figura 9**), impressoras 3D muito conhecidas no mundo da fabricação aditiva.



Figura 8: Creality Ender 3 S1 PRO.



Figura 9: Creality Ender 3 NEO.

Para este trabalho, o material utilizado para os provetes foi o PLA (*Polylactic Acid*) [5], um polímero termoplástico biodegradável derivado de fontes renováveis, como o amido de milho ou a cana-de-açúcar. É amplamente utilizado em impressão 3D devido à sua facilidade de extrusão, boa adesão entre camadas, baixa contração durante o resfriamento e baixa emissão de odores. Apresenta boa rigidez e acabamento superficial, sendo ideal para peças prototípicas e decorativas, porém possui menor resistência térmica e mecânica quando comparado a outros termoplásticos, como o ABS, o que limita seu uso em aplicações estruturais ou em ambientes com temperaturas elevadas.

O PLA utilizado neste trabalho (**Figura 10**) foi transparente, característica totalmente importante, pois, para uma melhor visualização da estrutura interna dos provetes, a transparência serviu perfeitamente e facilitou a percepção das diferentes variações de preenchimento dos provetes.

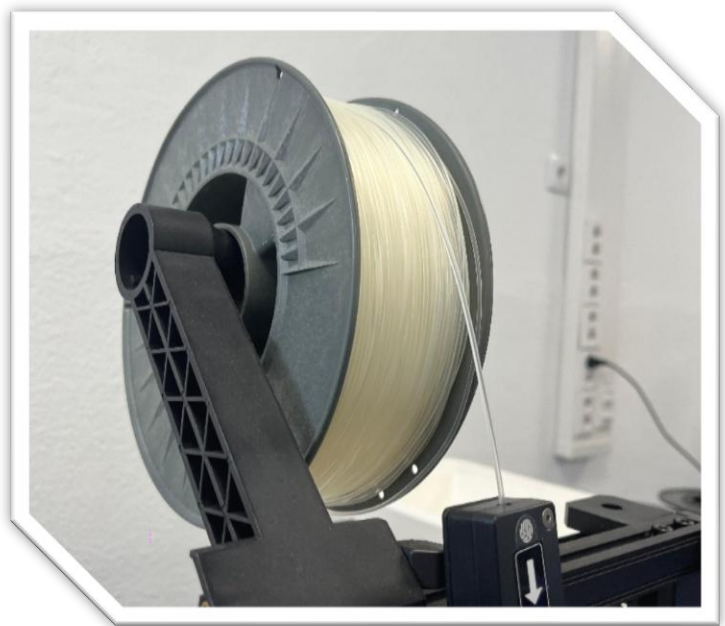


Figura 10: Rolo de PLA transparente.

2.2. Provetes: Modelação 3D e Fatiamento

Para modelação 3D dos provetes fora utilizado o OpenSCAD, um *software* de computador *open-source* em sua totalidade, o que permite completa versatilidade entre os usuários dentro do mesmo.

Além disso, no OpenCAD, os modelos são construídos a base de código, diferentemente de softwares como o SolidWorks, que têm suas próprias ferramentas para suas aplicações específicas. No entanto, os seus comandos não são complicados, principalmente para quem é conhecedor de outras linguagens de programação e está habituado ao ambiente programador.

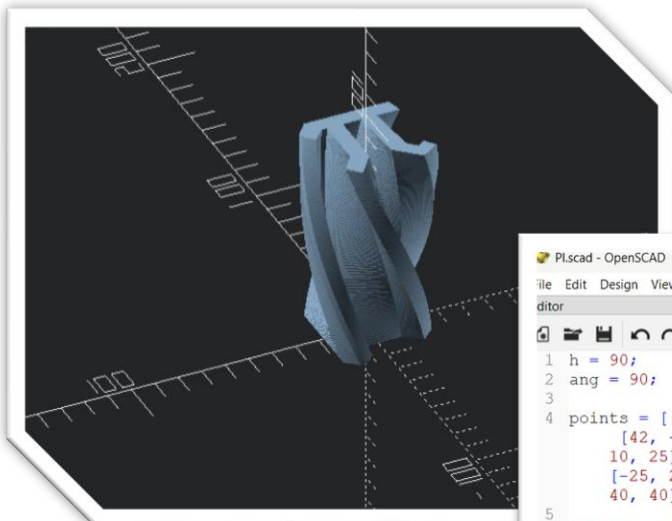


Figura 11: Exemplo de modelo em OpenSCAD.

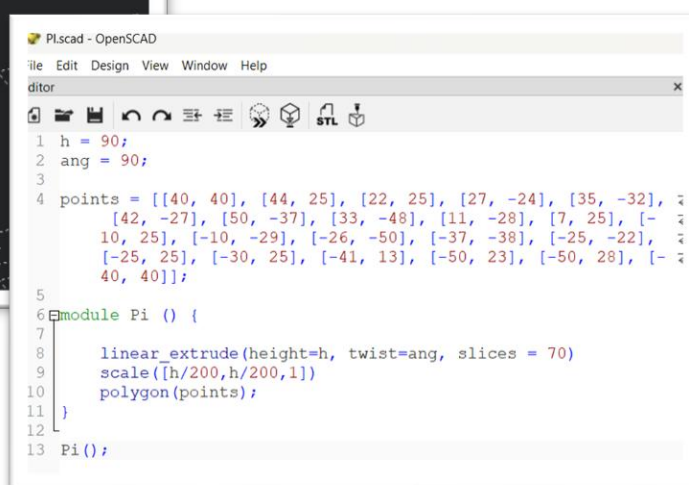


Figura 12: Código em OpenSCAD que gera o modelo da Figura 11.

No âmbito do desenvolvimento dos provetes, levou-se em conta a norma para os mesmos, a ISO 527-2:2012 [3] (Figura 13). Assim, os provetes foram modelados respeitando os requisitos geométricos estabelecidos para ensaios de tração, nomeadamente no que diz respeito às dimensões, ao tipo de extremidades de fixação e à zona de medição do tipo 1B (Figura 14). A adoção desta norma assegura a reprodutibilidade dos ensaios e permite a comparação de resultados a nível mundial.

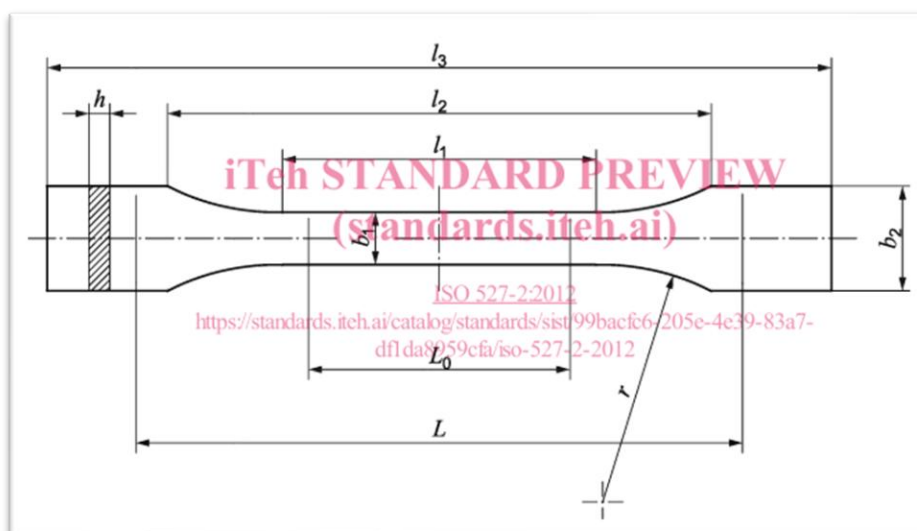


Figura 13: Tipo 1A e 1B de provetes de teste [3].

Dimensions in millimetres			
	Specimen type	1A	1B
l_3	Overall length ^a	170	≥150
l_1	Length of narrow parallel-sided portion	80 ± 2	60,0 ± 0,5
r	Radius	24 ± 1	60 ± 0,5
l_2	Distance between broad parallel-sided portions ^b	109,3 ± 3,2	108 ± 1,6
h_2	Width at ends	20,0 ± 0,2	
h_1	Width at narrow portion	10,0 ± 0,2	
h	Preferred thickness	4,0 ± 0,2	
L_0	Gauge length (preferred)	75,0 ± 0,5	50,0 ± 0,5
	Gauge length (acceptable if required for quality control or when specified)	50,0 ± 0,5	
L	Initial distance between grips	115 ± 1	115 ± 1

^a The recommended overall length of 170 mm of the type 1A is consistent with ISO 294-1 and ISO 10724-1. For some materials, the length of the tabs may need to be extended (e.g. $l_3 = 200$ mm) to prevent breakage or slippage in the jaws of the testing machine.

^b $l_2 = l_1 + [4r(h_2 - h_1) - (h_2 - h_1)^2]^{1/2}$, resulting from l_1 , r , h_1 and h_2 , but within the indicated tolerances.

Figura 14: Dimensões em milímetros para o tipo 1A e 1B de provetes de teste [3].

O código desenvolvido em OpenSCAD (Figura 15), inspirado na proposta do projeto Fibre da RepRap Ltd., tem como objetivo gerar modelos de provetes de tração com diferentes geometrias internas, permitindo a simulação e o estudo de estruturas semelhantes a meta-materiais.

```

10 //translate model
11 pv=[test_specimens[sampleIndex][0][2],test_specimens[sampleIndex][0][6],test_specimens[sampleIndex][0][7]];
12 echo(pv);

13 module erode(r) {
14     difference() {
15         children();
16         minkowski(convexity=3){
17             difference() {
18                 cube(220, center=true);
19                 render()
20                     children();
21                 sphere(r);
22             }
23         }
24     }
25 module randcylinders(v=[1,1,1],h=10,r=.2,n=10){
26     for(i=[0:n]){
27         let (p=rand(0,1,3),a=rand(0,360,3))
28         translate([p[0]*v[0],p[1]*v[1],p[2]*v[2]])
29         #rotate(a)
30         cylinder(h=h,r=r,center=true,$fn=16);
31     }
32 }
33 module eroded(){
34     erode(.8,$fn=12)
35     singletest();
36 }

34 module eroded(){
35     erode(.8,$fn=12)
36     singletest();
37 }
38
39
40
41 v=165*19*3.2;
42 r=.1;//3.2/2;
43 p=.5;
44 n=floor(p*v/(r*3.2*19));

54 module specimen(r,n){
55     // r=.8;
56     // p=.5;
57     if (n==0){
58         singletest();
59     }
60     else{
61         translate(pv/2){
62             difference(){
63                 singletest();
64                 eroded();
65             }
66         }
67     }
68 }

66 difference(){
67     translate(pv/2)
68     eroded();//singletest();
69     randcylinders(v=pv,h=50,r=r,n=n-1);
70 }
71 }
72 }
73 }

74 module dens(r=.8,p=.5){
75     n=floor(p*v/(2*r*3.2*19));
76
77     color([0,1,0,.2])
78     hull()
79     for(i=[0:n-1]){
80         translate([i*2*r,19,3.2/2])
81         cube([r,19,3.2]);
82     }
83 }
84
85 specimen(.4,0);
86

```

Figura 15: Código gerador dos provetes em OpenSCAD.

No código (**Figura 15**) A base geométrica dos provetes é importada do ficheiro externo *TensileTestSpecimenGroup.scad*, que define modelos normalizados. Os dados são acessados dinamicamente pela variável *test_specimens*, permitindo parametrizar facilmente as modificações.

Entre os módulos definidos, destaca-se *erode(r)*, que aplica uma transformação baseada em operadores morfológicos. Na morfologia matemática [4], esses operadores modificam formas com base num elemento estruturante. A erosão reduz a geometria, enquanto a dilatação a expande. Em OpenSCAD, isso é simulado com o operador *minkowski()*, que realiza uma dilatação por convolução com uma esfera. No módulo *erode()*, a operação é aplicada de forma invertida, resultando numa erosão tridimensional que suaviza ou desgasta o modelo.

O módulo *randcylinders()* insere cilindros com posições e orientações aleatórias no interior do provete, simulando fibras ou cavidades internas. Parâmetros como raio (*r*) e quantidade (*n*) controlam a densidade dessas inclusões, permitindo criar estruturas internamente heterogêneas.

A função *specimen(r, n)* automatiza a geração dos modelos: se $n = 0$, o provete é sólido, sem alterações (**Figura 16**); caso contrário, aplica-se a erosão e adicionam-se os *n* inclusões (**Figura 17**). Isso possibilita gerar modelos comparativos para análise experimental.

Por fim, o módulo *dens(r, p)* fornece uma visualização aproximada da densidade volumétrica ocupada pelas inclusões, útil para calibrar a fração volumétrica nos testes.

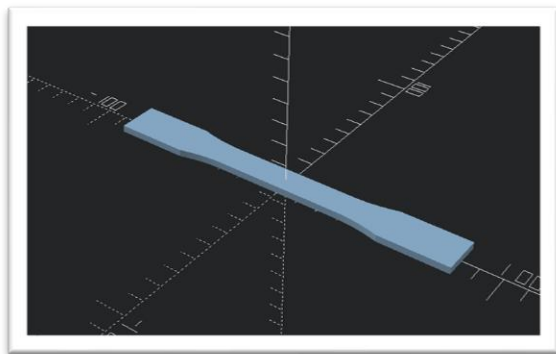


Figura 16: Provette gerado sem alterações.

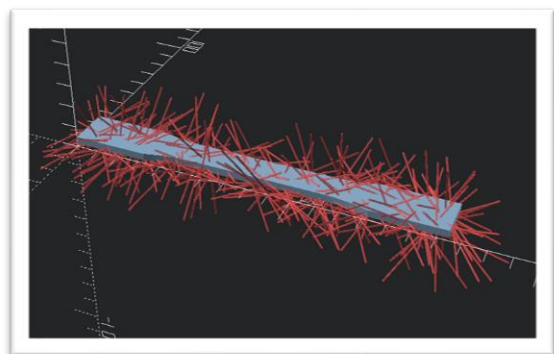


Figura 17: Visualização com 200 furos aleatórios num provete.

Embora o modelo tridimensional possa estar finalizado, é indispensável o uso de um software fatiador (do inglês, *slicer*). Este tipo de programa recebe tal nome devido à sua principal função: dividir o modelo 3D em camadas horizontais, que poderão ser interpretadas pela impressora. O *slicer* converte essas camadas em instruções escritas em G-code, a linguagem utilizada para comunicar-se com a impressora 3D e controlar todos os parâmetros do processo de fabricação, como temperatura, velocidade e movimentação dos eixos.

Neste trabalho, o fatiador utilizado foi o Ultimaker Cura (**Figura 13 e 14**), que de igual forma ao OpenSCAD, também é *open-source*.

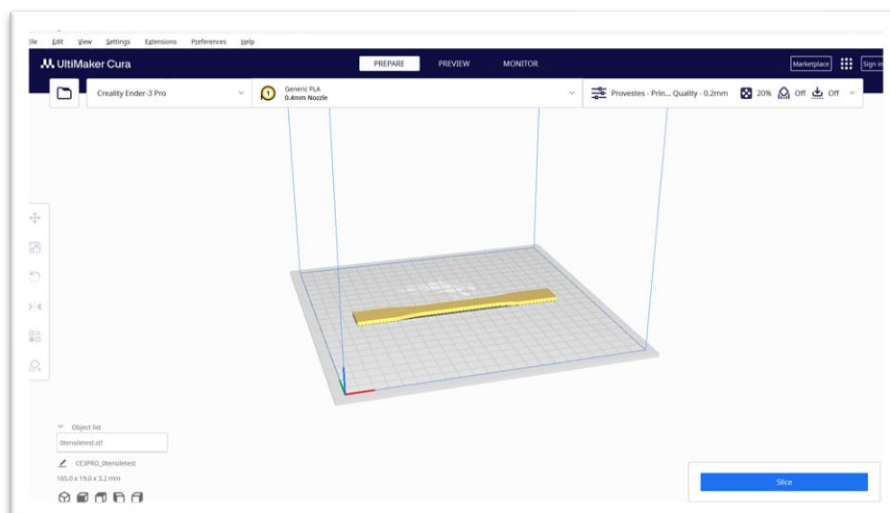


Figura 13: Interface do fatiador Ultimaker Cura.

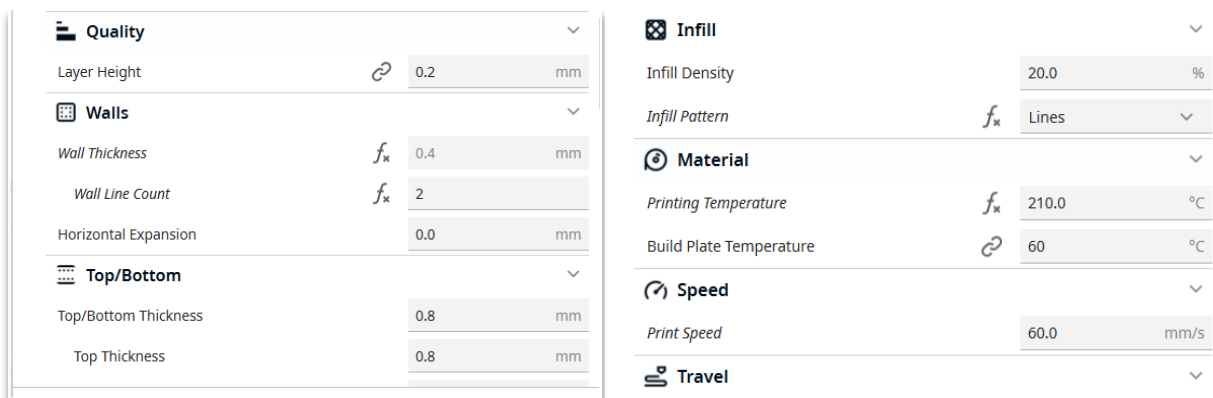


Figura 14: Alguns parâmetros de impressão do Ultimaker Cura.

Um dos parâmetros mais importantes para este trabalho fora o “*Print Sequence*”, mais especificamente o seu modo “*One at a Time*”, estes pertencem aos modos especiais (Figura 15). Neste modo, tendo diversos objetos para imprimir, ao invés da impressora imprimir camada a camada de todos em conjunto, i.e., primeira camada do primeiro objeto, primeira do segundo e assim por diante, com este parâmetro selecionado é possível a impressão de um objeto primeiro, depois de outro, e assim sucessivamente. Destacam-se ainda o *Infill Pattern* (estrutura interna de preenchimento) e *Infill Density* (densidade em percentagem), pois é com estes que, estruturalmente, fora posto à prova a proposta de Bowyer (Figura 16).

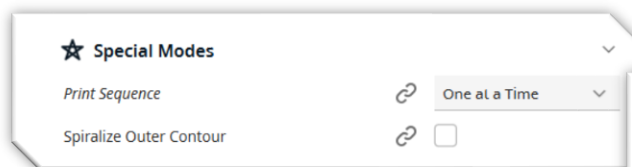


Figura 15: Parâmetro *Print Sequence*, modo *One at a Time*.



Figura 16: Parâmetros de Densidade e Estrutura de Preenchimento.

A importância deste parâmetro está no controlo de condições que este nos dá, i.e., através deste, há uma maior garantia de que os múltiplos objetos são impressos nas mesmas condições, evitando o problema de temperatura por exemplo, onde antes, quando a camada de um poderia já estar arrefecida, a do outro objeto ainda estava a ser impressa, criando extremas diferenças de propriedades.

Uma das principais áreas do Ultimaker Cura é a área de preparação, “*Prepare*” (Figura 17), onde seleciona-se também a impressora que se deseja utilizar, o tipo de filamento, e inicia-se o fatiamento (botão *Slice*).

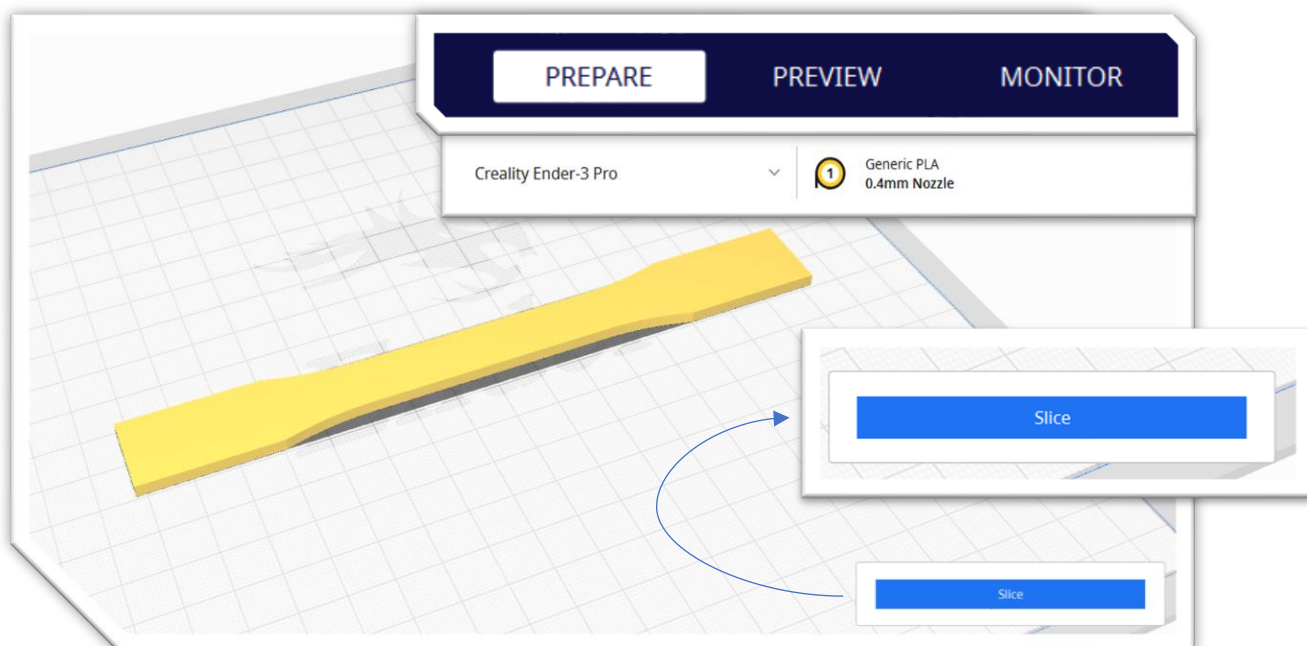


Figura 17: Aba *Prepare*.

Uma outra aba com uma função muito interessante do Ultimaker Cura é a de *Preview* (**Figura 18**), onde é possível ver uma simulação de impressão camada a camada, o que, para este trabalho, fora de extrema importância para a análise da estrutura interna dos provetes, sendo possível também obter uma estimativa do tempo de impressão.

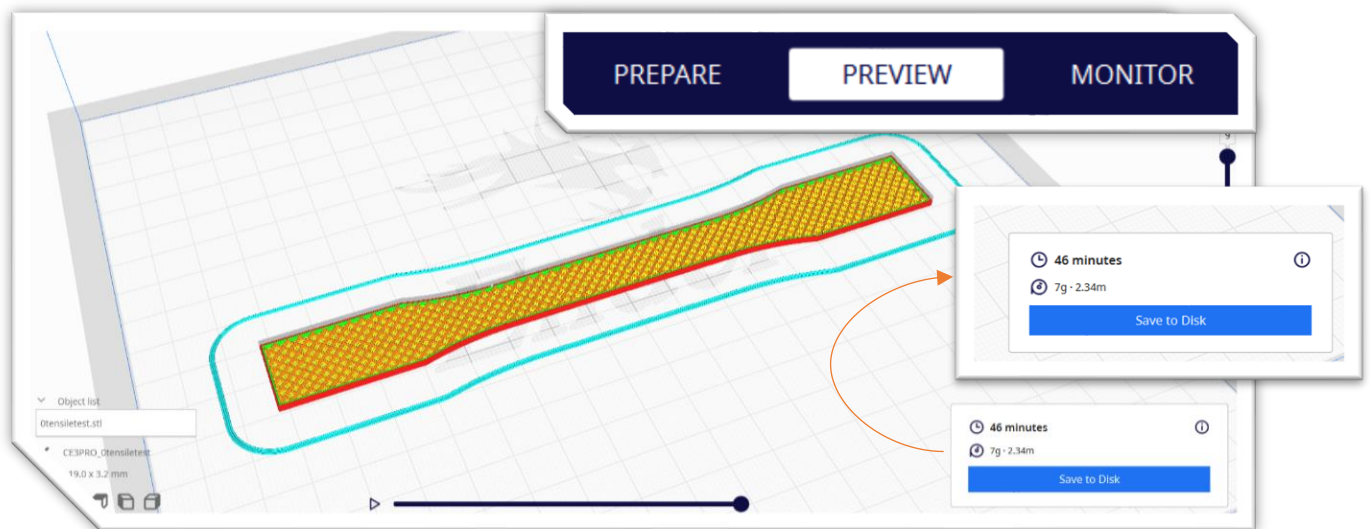


Figura 18: Aba *Preview*.

2.3. Manipulação dos Dados

Para a manipulação de dados, fora utilizado Excel e Python, ambos com objetivos diferentes.

Os dados recebidos da máquina de tração têm formato CSV, e neste caso, para ajustar alguns dos erros que vinham com os dados, como por exemplo, *offsets*, e ainda para otimizar os dados em termos de dimensão de tabelas e dados desprezáveis, utilizou-se o Excel.

Após a preparação dos dados, estes passavam a ser trabalhados em Python, essencialmente para a criação e visualização de gráficos.

Para que fosse possível o sucesso quanto à criação de gráficos, fora necessário a utilização de algumas bibliotecas e classes, como a Pandas, para a leitura dos dados em formato CSV, após o tratamento em Excel; NumPy, para a criação de *arrays*¹; Matplotlib, para a criação de gráficos; a classe *Interp1d* da biblioteca SciPy, que cria interpolações entre valores de um gráfico, tornando possível o ajuste de dimensão entre diferentes tabelas para fins de comparação entre as mesmas; e por fim, a classe *Stats*, também da biblioteca SciPy, responsável pela regressão linear, para que fosse possível a determinação das propriedades mecânicas dos provetes.

Nos capítulos seguintes, a demonstração de cada uma será apresentada.

¹ Estrutura de dados que armazena uma coleção de elementos de tal forma que cada um dos elementos possa ser identificado por, pelo menos, um índice ou uma chave.

3. ESTUDO INTRODUTÓRIO

Neste estudo introdutório, foi feita uma avaliação de qual seria o melhor tipo de estrutura interna de preenchimento e densidade para pôr à prova a proposta de Bowyer.

A ideia era encontrar a estrutura mais fraca, testando-as sem qualquer reforço ou alteração interna, para que realmente fosse possível observar suas propriedades mecânicas e decidir qual seria a estrutura escolhida para o estudo principal com as fibras simuladas.

Assim, foram selecionados alguns tipos de *Infill Pattern*, sendo estes dois tridimensionais e outros dois bidimensionais, o *Cubic* (cúbico), *Gyroid* (giroide), *Lines* (linhas) e *Triangles* (triangular), respectivamente. Para cada tipo de preenchimento, foram escolhidas três densidades, sendo estas 20%, 40% e 80%, percentagens não tão próximas para que pudessem ser o mais diferente possível.

Assim, foram impressos três provetes de cada tipo (**Figura 21 a 25**), para que, os resultados obtidos pudessem ser tratados de forma média, em boa estatística. Todos os provetes foram fabricados na impressora Creality Ender 3 S1 PRO (**Figuras 8 e 26**).

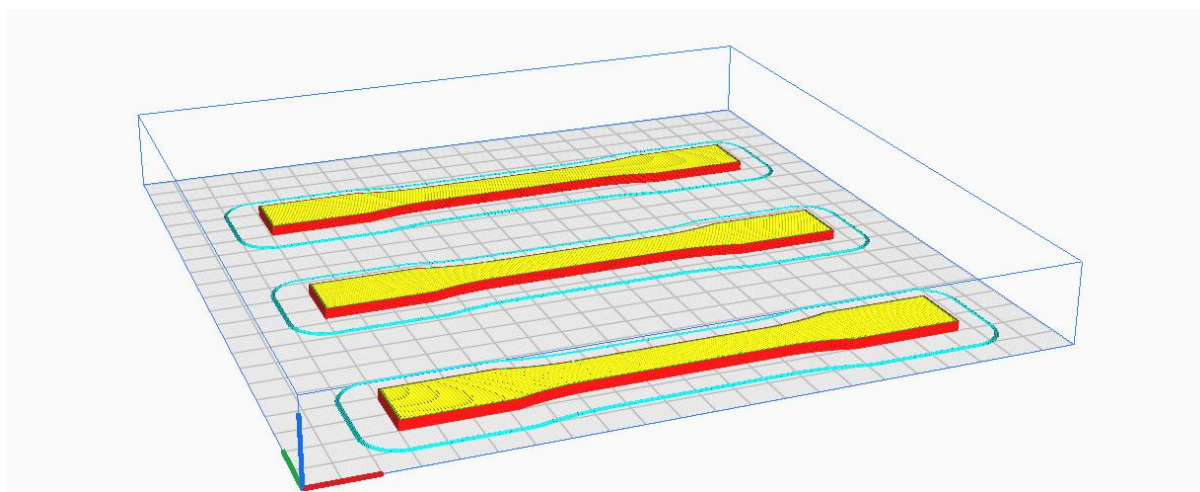


Figura 21: Disposição dos provetes para impressão (*Preview*).

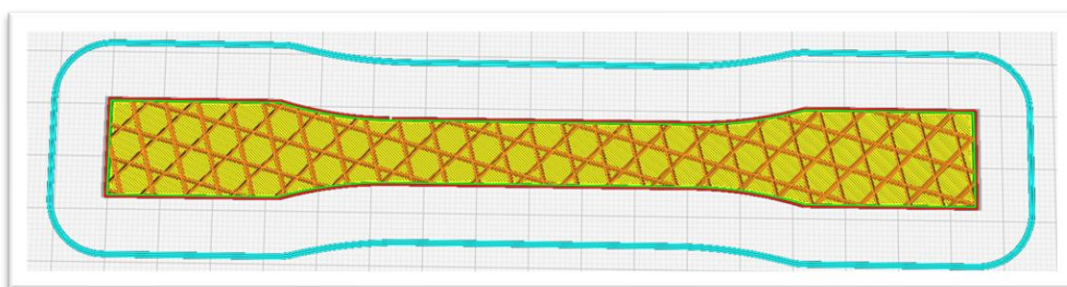


Figura 22: Preenchimento cúbico a 20% (*Preview*).

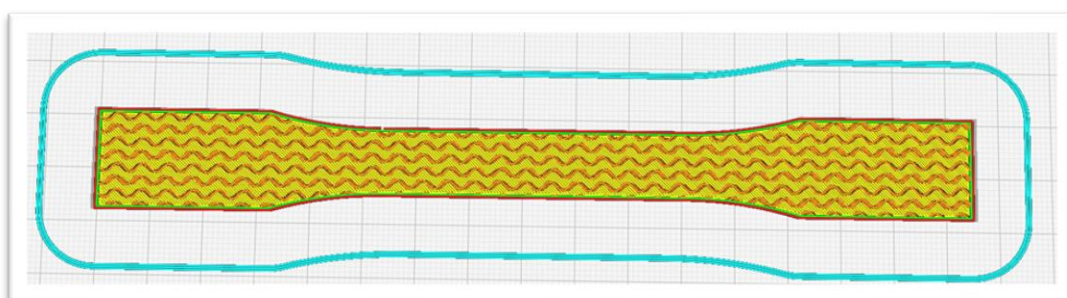


Figura 23: Preenchimento de giroide a 20% (*Preview*).

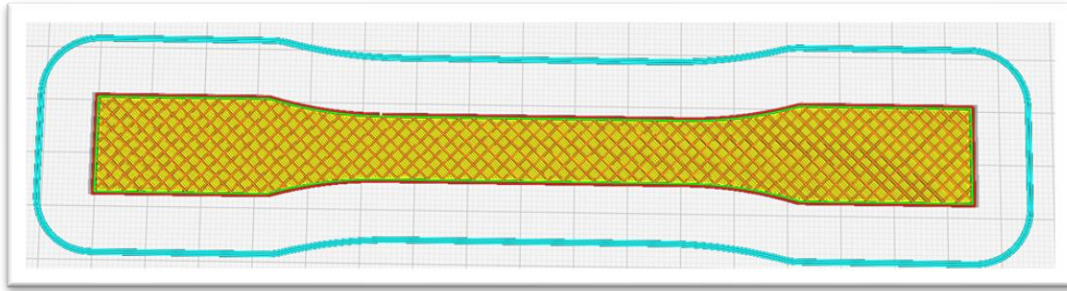


Figura 24: Preenchimento em linhas a 20% (*Preview*).

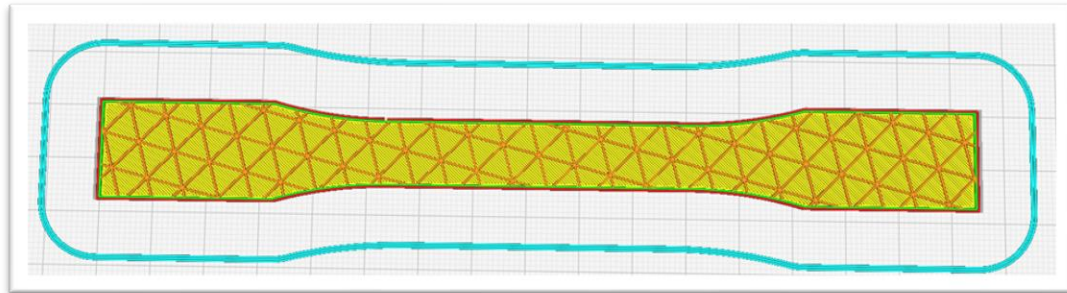


Figura 25: Preenchimento triangular a 20% (*Preview*).

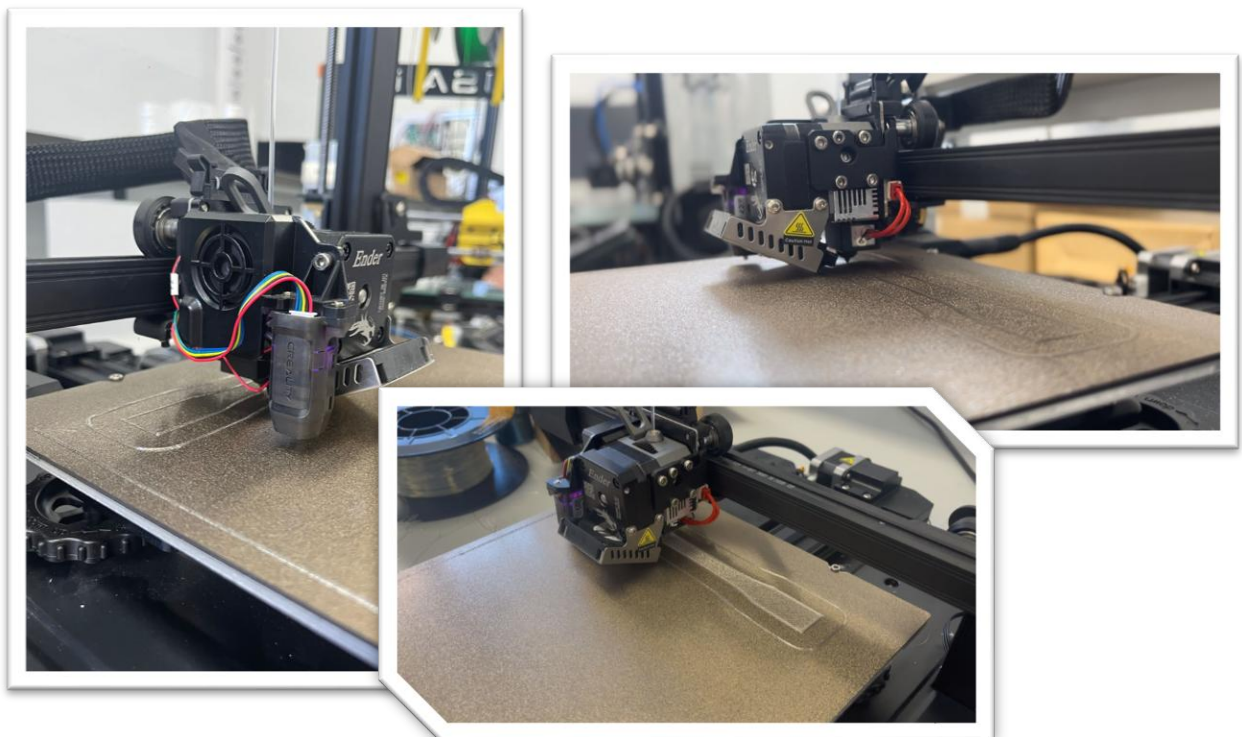


Figura 26: Impressão de provetes, Creality Ender 3 S1 PRO.

Assim, após a impressão de cada provete, foram realizados os ensaios de tração.

Primeiramente, registraram-se os dados iniciais (**Figura 27**) para cada provete, e fora estabelecida uma tabela em Excel para cada provete, separando-os nomeadamente pelas iniciais de seus preenchimentos, a percentagem de suas densidades e número de provete (de 1 a 3), como por exemplo: C20.1 (preenchimento cúbico, densidade a 20%, provete 1); G40.2 (preenchimento de giroide, densidade a 40%, provete 2), e assim por diante.

Cubic					
Tipo	Largura (mm)	Expassura (mm)	Área (mm ²)	l_0 (mm)	
C20.1	13.1	3.1	40.61	87.6	
C20.2	12.9	3.2	41.28	88.4	
C20.3	13.0	3.2	41.6	84.7	
C40.1	12.9	3.2	41.28	74.3	
C40.2	12.8	3.2	40.96	77	
C40.3	13.0	3.1	40.3	71.6	
C80.1	12.9	3.2	41.28	73.4	
C80.2	12.7	3.1	39.37	70.8	
C80.3	12.8	3.2	40.96	75.0	

Lines					
Tipo	Largura (mm)	Expassura (mm)	Área (mm ²)	l_0 (mm)	
L20.1	12.8	3.2	40.96	78.1	
L20.2	12.8	3.2	40.96	70.0	
L20.3	13.0	3.1	40.3	71.5	
L40.1	12.7	3.2	40.64	73.9	
L40.2	13.0	3.2	41.6	75.6	
L40.3	12.9	3.1	39.99	75.9	
L80.1	12.8	3.2	40.96	74.4	
L80.2	12.9	3.2	41.28	72.8	
L80.3	12.8	3.1	39.68	76.6	

Gyroid					
Tipo	Largura (mm)	Expassura (mm)	Área (mm ²)	l_0 (mm)	
G20.1	12.8	3.1	39.68	84.5	
G20.2	13	3.2	41.6	87.2	
G20.3	12.8	3.1	39.68	91.3	
G40.1	12.8	3.0	38.4	87.4	
G40.2	12.7	3.1	39.37	91.1	
G40.3	12.8	3.1	39.68	79.4	
G80.1	12.7	3.1	39.37	82.8	
G80.2	12.7	3.0	38.1	75.4	
G80.3	12.8	3.1	39.68	79.1	

Triangles					
Tipo	Largura (mm)	Expassura (mm)	Área (mm ²)	l_0 (mm)	
T20.1	12.8	3.1	39.68	79.4	
T20.2	12.7	3.2	40.64	80.4	
T20.3	13.0	3.1	40.3	81.3	
T40.1	12.6	3.1	39.06	75.2	
T40.2	12.6	3.2	40.32	73.7	
T40.3	12.8	3.1	39.68	76.5	
T80.1	12.9	3.1	39.99	77.1	
T80.2	12.8	3.1	39.68	78.9	
T80.3	12.9	3.0	38.7	81.8	

Figura 27: Tabelas de dados iniciais tratadas em Excel

*Nota: O comprimento inicial do C40.1, G80.3 e T20.2 foram estimados com base nos provetes dos mesmos tipos, devido à falta de medição.

Após os ensaios de tração na máquina mencionada anteriormente (**Figura 5**), adquiriu-se os dados e foram tratados (**Figuras 28 e 29**) em Excel.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Test Name	Test Mode	Test Type	Control	Test Speed 1	Test Speed 2	Test Speed 3	Change Point 1	Change Point 2	Disp. Origin	Break and Limit Action	Sensitivity	Level
	Single	Tensile	Stroke	5	1	1	Off	Off	Start	Stop	0	0
Title	Sub title	Comment										
Shape:	Batch Size:	SubBatch Size:										
Plate	1	1										
Name:	Thickness	Width	Gauge Length									
Size Unit:	mm	mm	mm									
1 - 1	1,0000	1,0000	100,0000									
Name												
Parameter												
Units												
1 - 1												
1 - 1												
Time	Force	Stroke										
sec	kN	mm										
0,00	.025	0										
0,05	.0253125	.003										
0,10	.0253125	.007										
0,15	.0253125	.011										
0,20	.02625	.015										
0,25	.0296875	.019										
0,30	.0328125	.024										
0,35	.035	.028										

Figura 28: Parte da tabela, sem tratamento.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Força (kN)	Alongamento (mm)	Extensão (adimensional)	Tensão (Pa)			Extensão	Tensão
2	0.025	0	0	0			0	0
3	0.0253125	0.003	3.42466E-05	7695.148978			3.42466E-05	7695.148978
4	0.0253125	0.007	7.99087E-05	7695.148978			7.99087E-05	7695.148978
5	0.0253125	0.011	0.000125571	7695.148978			0.000125571	7695.148978
6	0.02625	0.015	0.000171233	30780.59591			0.000171233	30780.59591
7	0.0296875	0.019	0.000216895	115427.2347			0.000216895	115427.2347
8	0.0328125	0.024	0.000273973	192378.7245			0.000273973	192378.7245
9	0.035	0.028	0.000319635	246244.7673			0.000319635	246244.7673
10	0.03875	0.032	0.000365297	338586.555			0.000365297	338586.555
11	0.04	0.036	0.000410959	369367.1509			0.000410959	369367.1509
12	0.043125	0.04	0.000456621	446318.6407			0.000456621	446318.6407
13	0.04625	0.045	0.000513699	523270.1305			0.000513699	523270.1305
14	0.0484375	0.049	0.000559361	577136.1734			0.000559361	577136.1734
15	0.0515625	0.053	0.000605023	654087.6631			0.000605023	654087.6631
16	0.05375	0.057	0.000650685	707953.706			0.000650685	707953.706
17	0.0553125	0.061	0.000696347	746429.4509			0.000696347	746429.4509
18	0.05875	0.065	0.000742009	831076.0896			0.000742009	831076.0896
19	0.0609375	0.07	0.000799087	884942.1325			0.000799087	884942.1325
20	0.0646875	0.074	0.000844749	977283.9202			0.000844749	977283.9202
21	0.0665625	0.078	0.000890411	1023454.814			0.000890411	1023454.814
22	0.0684375	0.082	0.000936073	1069625.708			0.000936073	1069625.708
23	0.0709375	0.086	0.000981735	1131186.9			0.000981735	1131186.9
24	0.0721875	0.09	0.001027397	1161967.496			0.001027397	1161967.496
25	0.07625	0.095	0.001084475	1262004.432			0.001084475	1262004.432
26	0.078125	0.099	0.001130137	1308175.326			0.001130137	1308175.326

Figura 29: Parte da tabela, com tratamento.

Foi criado um ficheiro Excel para cada tipo de preenchimento, e, como se observa nas abas do Excel na (Figura 29), na parte inferior, foi efetuado este processo de tratamento para cada provete da mesma forma. Assim, efetuadas as conversões para unidade S.I, tendo sido a força passada de kN (quilonewton) para N (newton) e em seguida, dividida pela área, uma vez também convertida de milímetros quadrados (mm^2) para metros quadrados (m^2), obtinha-se a Tensão em Pa (pascal). Uma vez que a deformação (Δl) vinha em milímetros (mm), somente foi necessário dividi-la pelo comprimento inicial do provete em milímetros, para que a fosse obtida a extensão adimensional. Dessa forma, criou-se uma tabela apenas com dados úteis (Tabela mais à direita, Figura 29), visto que, após a fratura, a máquina registava valores negativos para a força (Figura 30), e também, em certos casos, era necessário compensar um *offset*, para que o primeiro valor de deformação e força fossem 0 (Figura 31).

0.680625	2.595	0.029623288	16144422.56
0.2115625	2.599	0.02966895	4594003.94
-0.01	2.603	0.029714612	-861856.6855
-0.0584375	2.607	0.029760274	-2054604.777
-0.040625	2.611	0.029805936	-1615981.285
-0.0171875	2.615	0.029851598	-1038845.112
-0.0009375	2.62	0.029908676	-638697.3652
0.0053125	2.624	0.029954338	-484794.3856

Figura 30: Valores negativos desprezáveis.

	Força (kN)	Alongamento (mm)	Extensão (adimensional)	Tensão (Pa)
2	0.025	0	0	0

Figura 31: *Offset* corrigido.

Corrigidos então os dados e exportadas as novas tabelas para um novo CSV, fez-se a manipulação de dados e criação gráfica em Python.

Para cada provete do mesmo tipo de preenchimento e densidade, fez-se o seguinte processo em Python:

Primeiramente, a importação dos dados no programa, através da biblioteca Pandas mencionada anteriormente com as variáveis identificadoras do *Infill Pattern*, *Infill Density* e número do provete.

```
8  tabela_C20_1 = pd.read_csv(r'C:\\Users\\Gustavo Brazil\\
9  tabela_C20_2 = pd.read_csv(r'C:\\Users\\Gustavo Brazil\\
10 tabela_C20_3 = pd.read_csv(r'C:\\Users\\Gustavo Brazil\\
```

Em seguida, definiu-se variáveis para as colunas de extensão e tensão.

```
12 strain_C20_1 = tabela_C20_1['Extensão (Adimensional)']
13 strain_C20_2 = tabela_C20_2['Extensão (Adimensional)']
14 strain_C20_3 = tabela_C20_3['Extensão (Adimensional)']
15
16 tension_C20_1 = tabela_C20_1['Tensão (Pa)']
17 tension_C20_2 = tabela_C20_2['Tensão (Pa)']
18 tension_C20_3 = tabela_C20_3['Tensão (Pa)']
```

Era imaginável que os provetes de igual tipo de preenchimento e densidade não se iriam partir ao mesmo instante, ou seja, não teriam a mesma dimensão de pontos. E por esse motivo, para que fosse possível fazer média entre os valores de cada provete, fora necessário o uso de interpolação linear², que, de forma congruente, criaria pontos entre os já existentes, mantendo uma quantidade de pontos final N.

Então, observada a dimensão inicial dos dados, define-se uma dimensão maior, para que sejam preenchidos com novos pontos. Assim, definida uma variável N, utiliza-se a classe mencionada anteriormente (Interp1d).

```
20 strain_interp_C20_1 = np.linspace(np.min(strain_C20_1), np.max(strain_C20_1), N)
21 tension_interp_C20_1 = interp1d(strain_C20_1, tension_C20_1)
22
23 strain_interp_C20_2 = np.linspace(np.min(strain_C20_2), np.max(strain_C20_2), N)
24 tension_interp_C20_2 = interp1d(strain_C20_2, tension_C20_2)
25
26 strain_interp_C20_3 = np.linspace(np.min(strain_C20_3), np.max(strain_C20_3), N)
27 tension_interp_C20_3 = interp1d(strain_C20_3, tension_C20_3)
28
```

Desta forma, através da operação com a biblioteca NumPy, *np.linspace*(mín de deformação, máx de deformação, N), cria-se um *array* de dimensão N, para ser um novo eixo das abcissas, assegurando que o mínimo será o menor valor de deformação (0), e o máximo será o maior valor de deformação alcançado pelo provete. Nesta etapa, cria-se também variáveis que tenham em si a função *Interp1d*, que irá assumir os valores originais de tensão e deformação. Porém, quando a variável for chamada da forma, neste exemplo, *tension_interp_C20_3*(variável *array* criada com o *np.linspace*), esta variável irá criar um *array* de dimensão N, com os valores originais e interpolados, tornando assim possível a criação de gráficos comparáveis. Faz-se então a média entre os pontos.

```
29 strain_sum_C20 = (strain_interp_C20_1 + strain_interp_C20_2 + strain_interp_C20_3)/3
30 tension_sum_C20 = (tension_interp_C20_1(strain_interp_C20_1) + tension_interp_C20_2(strain_interp_C20_2) + tension_interp_C20_3(strain_interp_C20_3))/3
```

6 N = 1000

Por fim, cria-se o gráfico médio:

```
32 plt.plot(strain_sum_C20, tension_sum_C20, color='blue', label='C20')
33 plt.legend()
34 plt.ylabel('Tensão (Pa)')
35 plt.xlabel('Extensão (Adimensional)')
36 plt.grid(True)
37 plt.show()
```

² Método matemático simples que estima valores desconhecidos entre dois pontos de dados conhecidos, assumindo uma relação linear entre eles.

3.1. Análise Gráfica e Decisão

Para a comparação, mesclou-se todos os códigos de todos os provetes num só programa, e assim, obtiveram-se os gráficos em conjunto.

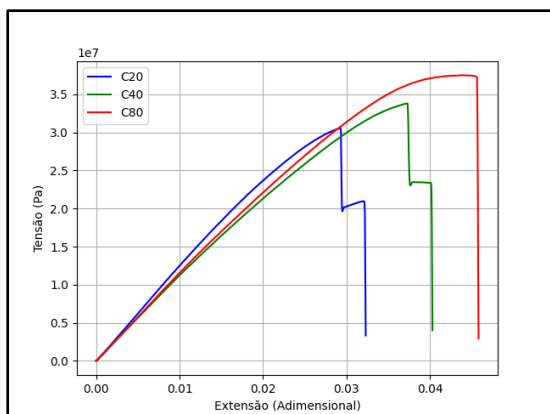


Figura 32: Comparação entre os do tipo cúbico.

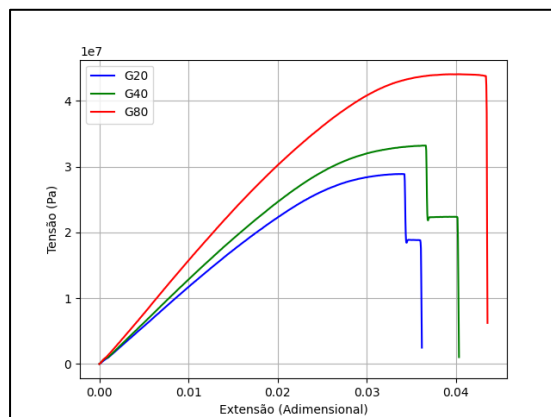


Figura 33: Comparação entre os do tipo giroide.

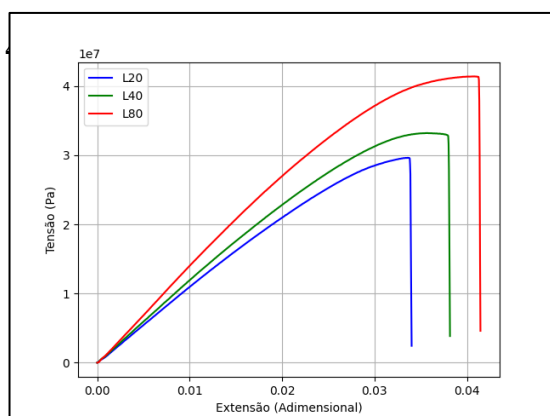


Figura 34: Comparação entre os do tipo linhas.

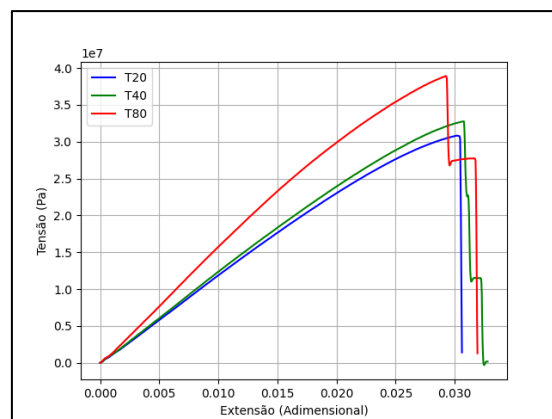


Figura 35: Comparação entre os do tipo triangular.

Sem quantificação de valores, observou-se que os provetes com 20% de densidade apresentaram um declive menor na curva tensão-extensão, o que indica um módulo de Young inferior e, consequentemente, menor rigidez. Isso confirma que são estruturalmente mais fracos em comparação com os demais. Por outro lado, os provetes com 80% de densidade demonstraram maior resistência, como era de se esperar teoricamente, agora comprovado experimentalmente.

Por esta razão, fez-se também a comparação entre os mais fracos, e os mais fortes, relativamente a rigidez.

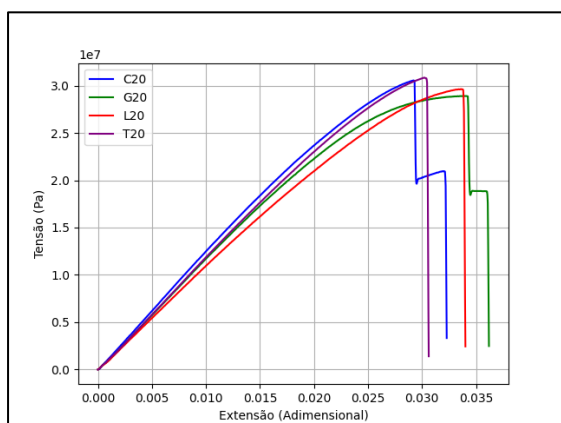


Figura 36: Comparação entre os mais fracos.

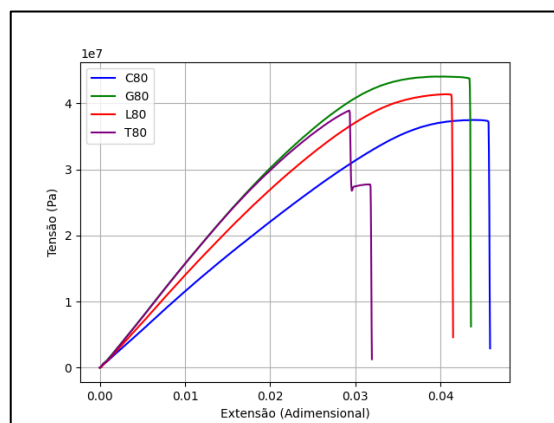


Figura 37: Comparação entre os mais fortes.

Nesta análise não quantitativa, apenas gráfica percebe-se que, em média, os provetes L20 (preenchimento do tipo linhas, densidade a 20%) tendem a ser os mais fracos (**Figura 36**), enquanto os provetes G80 (preenchimento do tipo giroide, densidade a 80%) tendem a ser os mais fortes destes (**Figura 37**).

Sendo assim, para uma melhor avaliação da proposta de Bowyer, foram escolhidos os provetes L20 para terem as suas estruturas reforçadas.

4. ESTUDO PRINCIPAL

Inicialmente, para o estudo principal, foram gerados provetes sem reforços e com reforços, constituídos por 8, 32, 128 e 512 cavidades (**Figura 38**), fazendo, assim como para o estudo introdutório, três provetes cada tipo de reforço, para no fim, ser feita a média. Os provetes também foram impressos na Creality Ender 3 S1 PRO (**Figura 8**).



Figura 38: Provetes ordenados de 0 a 512 cavidades.

*Nota: A letra “F” nos provetes refere-se a “furos”, e o número em sua esquerda à quantidade dos mesmos. O número à direita representa o número do provete (1 a 3).

No entanto, após a realização do ensaio de tração (**Figura 39**) a aplicação do mesmo processo realizado no estudo introdutório para a criação dos gráficos, observou-se que os resultados eram negativos (**Figura 40**).



Figura 39: Ensaio de tração.

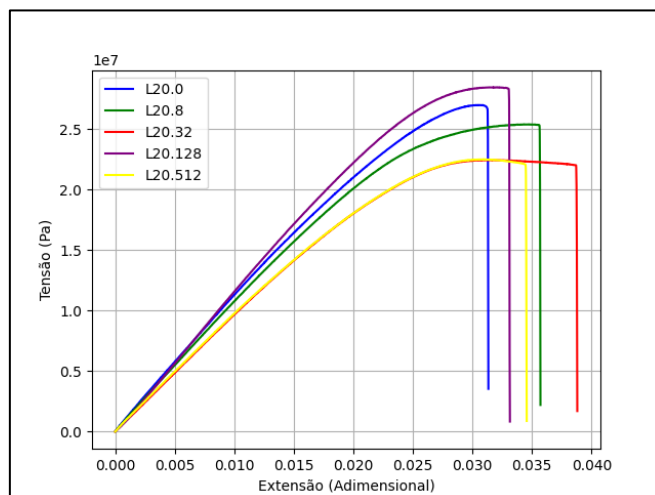


Figura 40: Gráfico tensão-extensão para L20 de 0 a 512 cavidades.

Inesperadamente os resultados não eram os esperados, pois, supostamente, segundo a proposta de Bowyer, quanto mais reforços houvesse, maior seria sua resistência mecânica, porém, não fora observado este comportamento (**Figura 40**).

Ao analisarmos bem, percebe-se que quanto maior o número de cavidades, menor o declive da curva, e, portanto, menor módulo de Young, não fazendo sentido com a ideia de Bowyer e seus resultados, mesmo se tratando de valores médios.

Então, após uma melhor análise, percebeu-se que o resultado realmente não fazia sentido, pois as cavidades eram de diâmetro muito superior do que o que deveria ser (**Figura 41**).

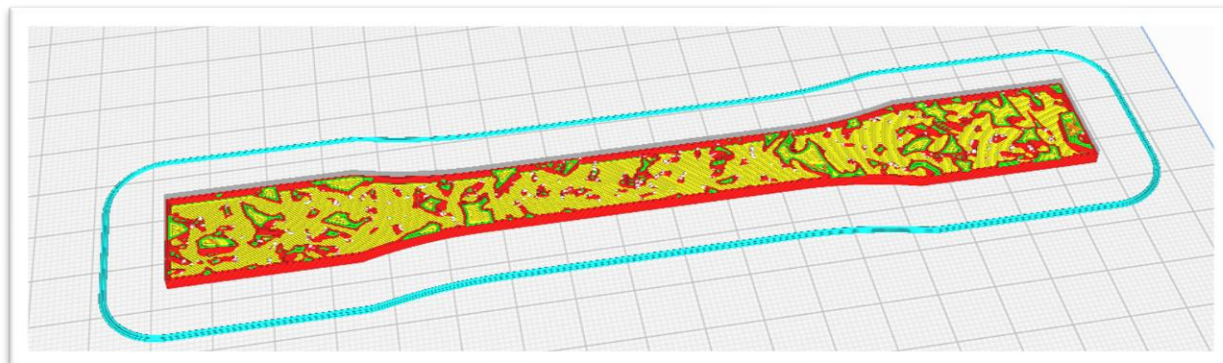


Figura 41: Provete L20 – 512 furos – 2.

Isto, na realidade, fazia com que o fatiador não preenchesse nada na localização das cavidades, e por isso, não havia reforço nestas áreas, resultando numa peça completamente franca, quanto maior fosse o número de cavidades.

Sendo assim, mudou-se de estratégia, e iniciou-se uma nova etapa. Desta vez, com o raio de cada cilindro no código OpenSCAD, sendo igual a 0.4 mm.

*Nota: O código apresentado já apresenta este valor, pois corresponde ao código atualizado.

Então, para este segundo estudo, foram escolhidos novos valores de cavidades, sendo estes 0, 10, 50, 100, 500 e 1000, permitindo uma boa avaliação.

Ao ser feito o fatiamento no Ultimaker Cura para os novos provetes, já se via a diferença (**Figura 42**).

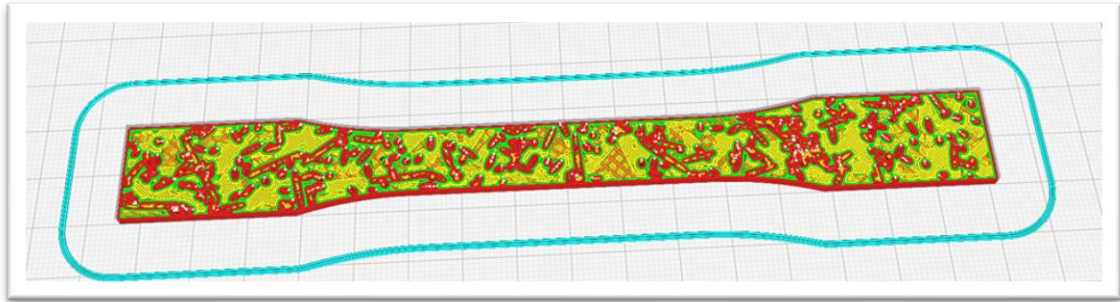


Figura 41: Provete L20 – 500 furos – 2.

Analisando apenas o *Preview* percebe-se uma enorme diferença entre o provete da **Figura 41** e o da **Figura 42**.

Assim, tendo certificado o estado correto dos provetes, iniciava-se a fase de impressão de provetes. Diferentemente dos estudos anteriores, neste, a impressora utilizada fora a Creality Ender 3 Neo (**Figura 42**).

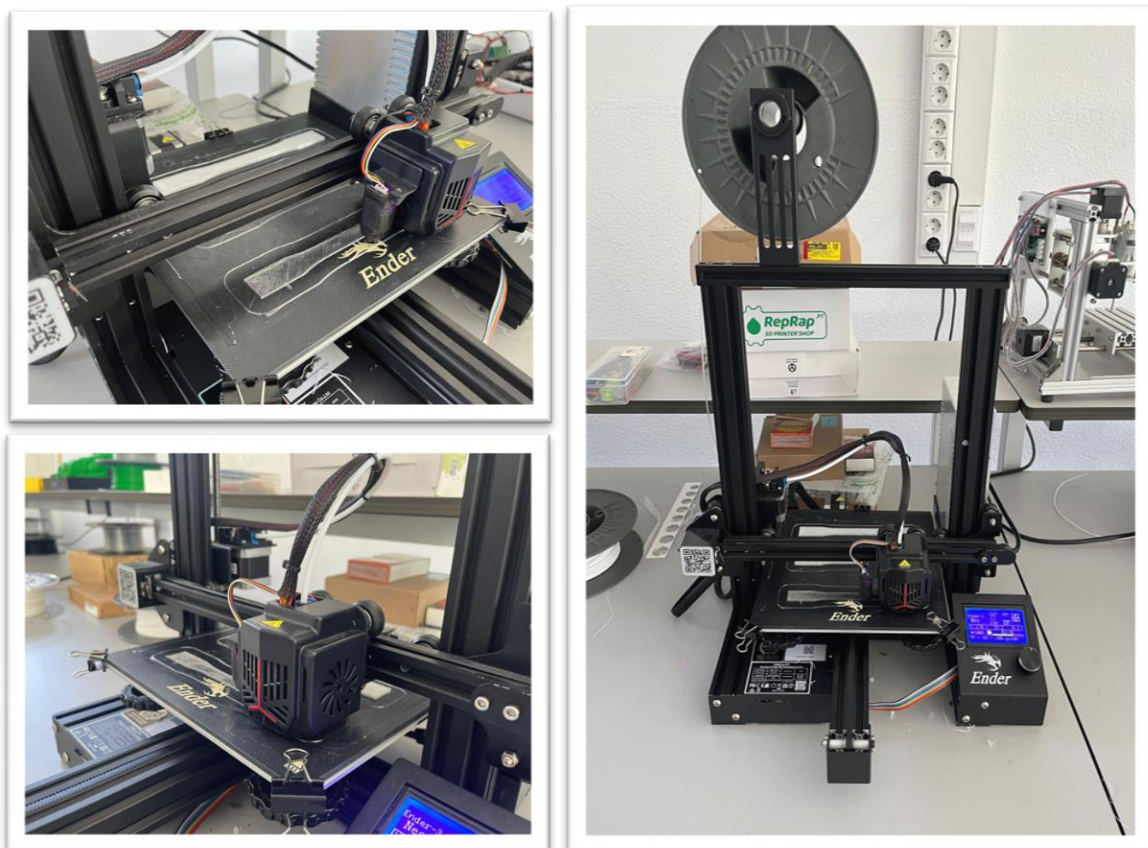


Figura 42: Impressões de provetes, Creality Ender 3 NEO.

Por fim, após a fase de impressões, que neste caso, foram longas, devido aos detalhes de preenchimento agora impostos, mais uma vez efetuou-se os ensaios de tração.



Figura 43: Provetes fraturados.

Efetuada a impressão, segue-se para a manipulação de dados.

Toda a parte de criação gráfica é feita como no estudo introdutório, porém, para que pudesse ser adquirido uma avaliação mais quantitativa, fora feita uma regressão linear para cada gráfico nos primeiros pontos das curvas, de modo a serem determinados os módulos de Young médio de cada provete, sendo este, o declive da reta.

Para isso, utilizou-se a classe Stats da biblioteca SciPy em Python.

Primeiramente, definiu-se uma variável a qual fora nomeada n .

```
8 n = 300
```

Assim, definem-se as variáveis RX e RY (regressão em x e em y), que representam uma “fatia” da curva que será levada em conta para a regressão, capturam informação desde o ponto inicial, até o n -ésimo ponto.

```
34 RY = tension_sum_L20_10[:n]
35 RX = strain_sum_L20_10[:n]
36
37 m, b, r, p, d = stats.linregress(RX, RY)
38
39 x = np.linspace(0, 1, n)
40
41 plt.plot(strain_sum_L20_10, tension_sum_L20_10, color='blue', label='L20.0')
42 plt.plot(x, b + m*x, color='red', label=f'Regressão: y = {m:.2f}·x + {b:.2f}')
43 plt.legend()
44 plt.ylabel('Tensão (Pa)')
45 plt.xlabel('Extensão (Adimensional)')
46 plt.xlim(0, 0.035)
47 plt.ylim(0, 3*10**7)
48 plt.grid(True)
49 plt.show()
50
```


Este valor foi selecionado para n , pois como a dimensão da “amostra” de dados tornou-se 3000, a partir do parâmetro N , escolheu-se 10%, que seriam os valores iniciais e nos daria uma boa aproximação do módulo de Young para estes provetes.

Definem-se então também as variáveis m , b , r , p e d , sendo essas o declive do ajuste, a ordenada na origem, o parâmetro R do ajuste, o p_value e ainda o desvio padrão, respetivamente, porém, o mais importante é o m .

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

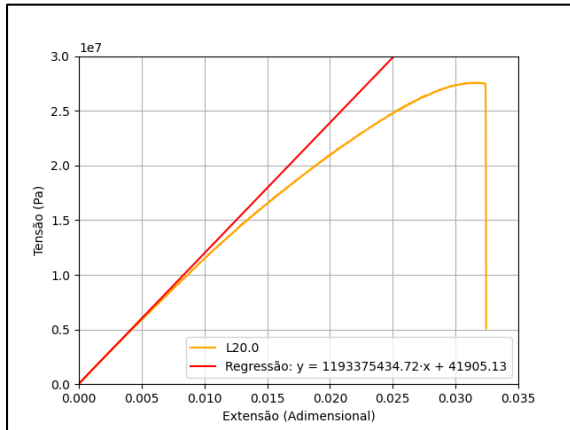


Figura 44: Gráfico tensão-extensão e ajuste linear, L20.0.

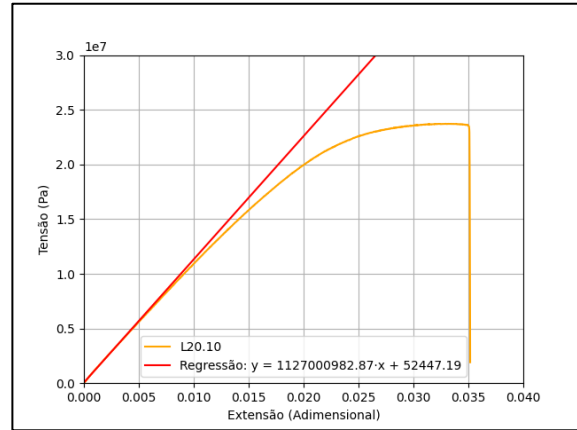


Figura 45: Gráfico tensão-extensão e ajuste linear, L20.10.

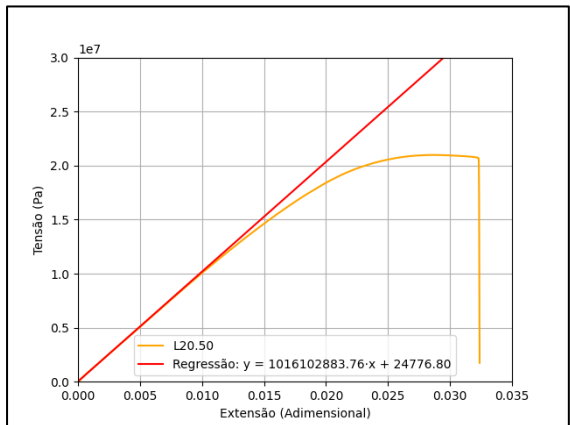


Figura 46: Gráfico tensão-extensão e ajuste linear, L20.50.

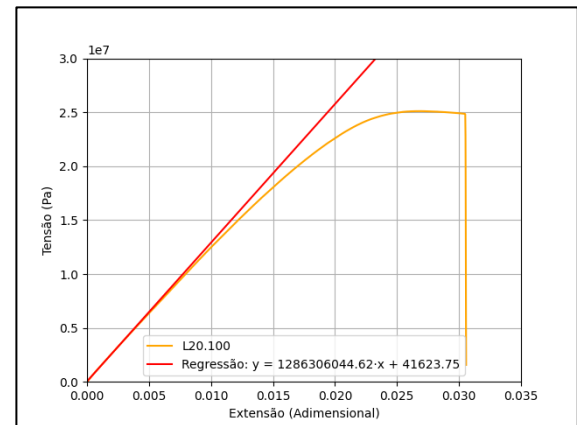


Figura 47: Gráfico tensão-extensão e ajuste linear, L20.100.

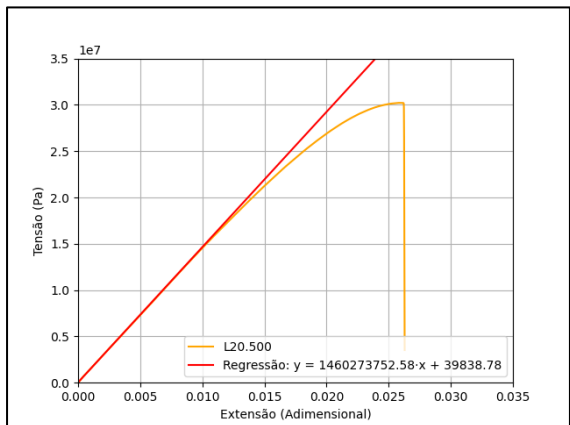


Figura 48: Gráfico tensão-extensão e ajuste linear, L20.500.

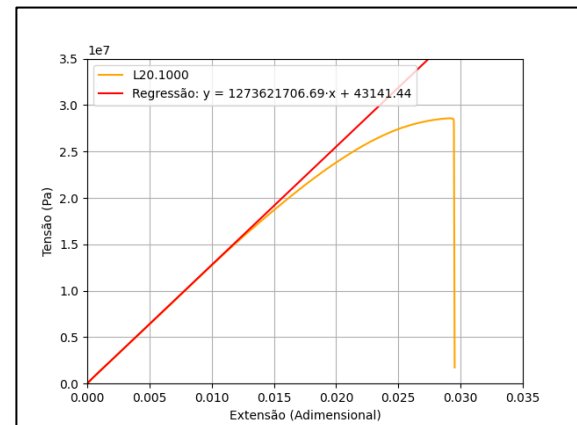


Figura 49: Gráfico tensão-extensão e ajuste linear, L20.1000.

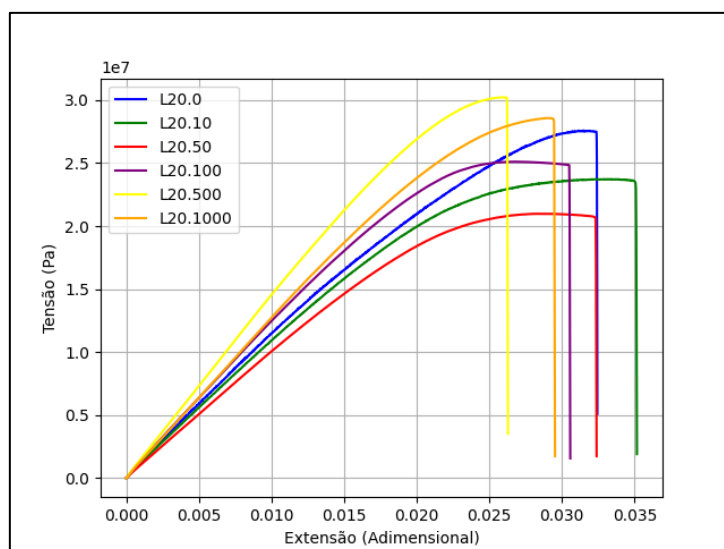


Figura 50: Gráfico tensão-extensão e ajuste linear, todos os provetes.

*Nota: Foram utilizados apenas os dados dos provetes 2 e 3 para a curva média dos 1000 furos, devido à falta de dados do primeiro provete.

Ao analisarmos as **Figuras 44 a 50**, percebe-se que os provetes com melhor desempenho tenham sido os com 500 cavidades.

Ao contrário do imaginado, os provetes com 1000 furos não foram os com maior resistência, e ainda, percebe-se que os provetes sem cavidades, ou seja, sem reforços, também não foram os com menor resistência.

Este resultado experimental dá-nos a entender que a variação de 0 para 50 furos não é significativa, podendo até mesmo trazer um pior resultado. Porém, a partir dos 100 para cima, vê-se a diferença, e talvez aí, a quantidade de furos, nesta escala, já seja significativa para a melhoria de desempenho dos provetes.

Por incrível que pareça, observa-se que o provete sem reforços, embora não seja o mais resistente, apresenta uma tensão de fratura maior que muitos outros, ultrapassando até mesmo o provete com 100 furos.

Analisando os diversos módulos de Young, chamou-nos a atenção o provete de 500 furos (**Figura 48**), que registou 1.46 GPa, sendo este valor, por incrível que pareça, muito aproximadamente o valor do módulo de elasticidade da estrutura mais forte testada neste trabalho (**Figura 51**).

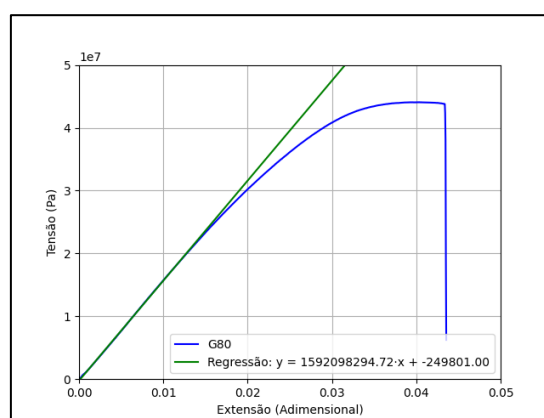


Figura 51: Gráfico tensão-extensão e ajuste linear, G80.

É possível observarmos que o módulo de Young do apresentado G80 (preenchimento de giroide e densidade a 80%) é o mais alto, sendo este aproximadamente 1.60 GPa.

Quando comparados, vemos que em termos de módulo de elasticidade, L20 com 500 furos não se situa tão abaixo (Figura 52). Porém, G80 continua a ser imbatível quanto à sua extensão de fratura e tensão máxima. No entanto, sim, observa-se melhoria para a estrutura L20.

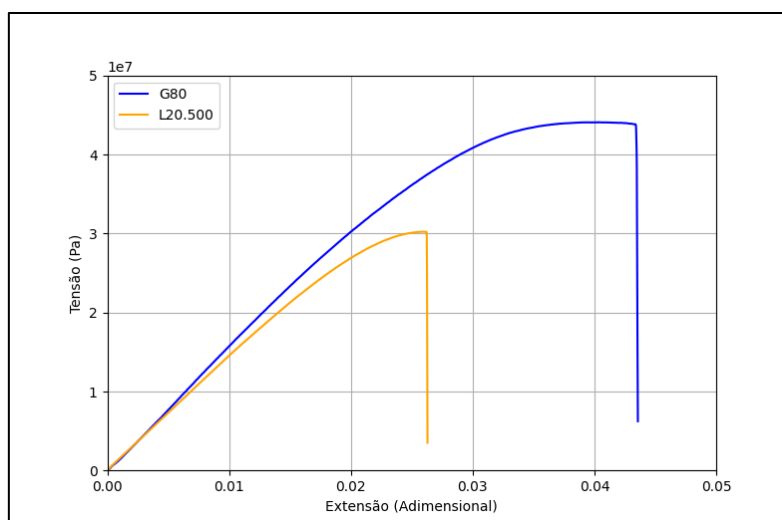


Figura 52: Gráfico tensão-extensão, comparação, L20.500 e G80.

Sendo assim, para esta análise, percebe-se que os reforços aplicados foram sim úteis de certa forma, principalmente nas questões do aumento do módulo de elasticidade, porém, percebe-se que, quanto à tensão máxima, a proposta deixa a desejar, pois por mais que o seu módulo de elasticidade agora seja maior, sua fratura ainda acontece a baixas tensões.

Vê-se também, que os provetes parecem ter um comportamento mais colaborante com a proposta quando o número de furos é alto, na ordem de grandeza de 10^2 , o que mostra que, talvez, para maiores resultados, o número de cavidades tivesse de ser ainda maior.

Por fim, desse destes resultados, pode ser concluído que sim, a proposta sim traz efeito, mas sendo uma variação interna de forma aleatória, pode ser imprevisível o seu comportamento.

6. CONCLUSÃO

Em suma, este trabalho demonstrou que alterações geométricas internas em provetes fabricados por impressão 3D, nomeadamente cavidades aleatórias que simulam fibras, segundo a proposta de Adrian Bowyer, podem influenciar significativamente as propriedades mecânicas dos materiais.

Os resultados obtidos para os provetes com tipo de preenchimento de linhas a 20%, mostraram que há um aumento no módulo de elasticidade à medida que se aumenta o número de cavidades, com o melhor desempenho registado nos provetes com 500 cavidades, que atingiram um valor de 1.46 GPa, valor este bastante próximo ao de estruturas densamente preenchidas como o giroide a 80% (1.60 GPa). Contudo, esse reforço geométrico não se traduziu em melhorias na tensão máxima suportada ou no alongamento até à fratura, onde os provetes sólidos ainda tiveram destaque.

Conclui-se, portanto, que a proposta é válida sob certos aspetos: há um ganho claro em rigidez, porém, a resistência última à fratura ainda é limitada não só pelas características frágeis do PLA, mas também pela natureza aleatória das modificações internas. Fica evidente que a eficácia da técnica depende fortemente da escala, quantidade e distribuição das cavidades, indicando espaço para futuras otimizações mais controladas e direcionadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [Fibre](#). REPRAPLTD
- [2] [About](#). REPRAPLTD
- [3] ISO 527-2:2012. *Plastics – Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. International Organization for Standardization, 2012. (Disponível em PDF na pasta “Referências Bibliográficas” que acompanha este relatório).
- [4] [Mathematical Morphology](#). Wikipedia.
- [5] [Polylactic Acid](#). Wikipedia.
- [6] Ciência e Engenharia dos Materiais – Aula 11. ALMEIDA, Pedro; SILVESTRE, António. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2023. (Apostamentos em PDF incluídos na pasta “Referências Bibliográficas” que acompanha este relatório).
- [7] Física da Deformação e Escoamento. TEIXEIRA, Paulo. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2024. (Sebenta em PDF incluída na pasta “Referências Bibliográficas” que acompanha este relatório).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por esta oportunidade, à minha família por me fazerem ser quem sou hoje, à Raissa Almeida por ser o meu apoio, e a todos os meus colegas de curso: Paulo Rodrigues, Lineu Olszewski, Rafael Alves, Sara Ribeiro, Rodrigo Soares, Francisco Silva, Gonçalo Fernandes, Carolina Bento, João Castelo e Guilherme Fróis.

Gostaria também de agradecer a todos os professores que fizeram parte desta grande jornada, pois sem pessoas como eles, estes três anos teriam sido completamente diferentes: Prof. Pedro Patrício, Prof.^a Catarina Leal, Prof. Tiago Charters de Azevedo, Prof. Nuno Dias, Prof. Ricardo Filipe, Prof.^a Cristina Januário, Prof. Vítor Oliveira, Prof. António Silvestre, Prof. Paulo Teixeira, Prof. Felipe Cal, Prof. António Casaca, Prof. Rui Santos, Pedro Ferreira, Prof. Paulo Semblano, Prof. Manfred Niehus, Prof. José Tavares, Prof. Mário Moreira, Prof.^a Maria Silveira, Prof.^a Lucía Suárez, Prof. Nuno Lopes, Prof.^a Elisabete Alegria, Prof.^a Catarina Sousa, Prof.^a Sandra Aleixo, Prof. António Maçarico e Prof. Ricardo Baptista.

Em especial, gostaria de agradecer ao Prof. Tiago Charters de Azevedo pela orientação e apoio ao longo deste trabalho, e também ao Prof. Pedro Almeida por todo o apoio prestado.

A todos, o meu sincero obrigado.

“Tudo posso naquele que me fortalece.”

Filipenses 4:13