

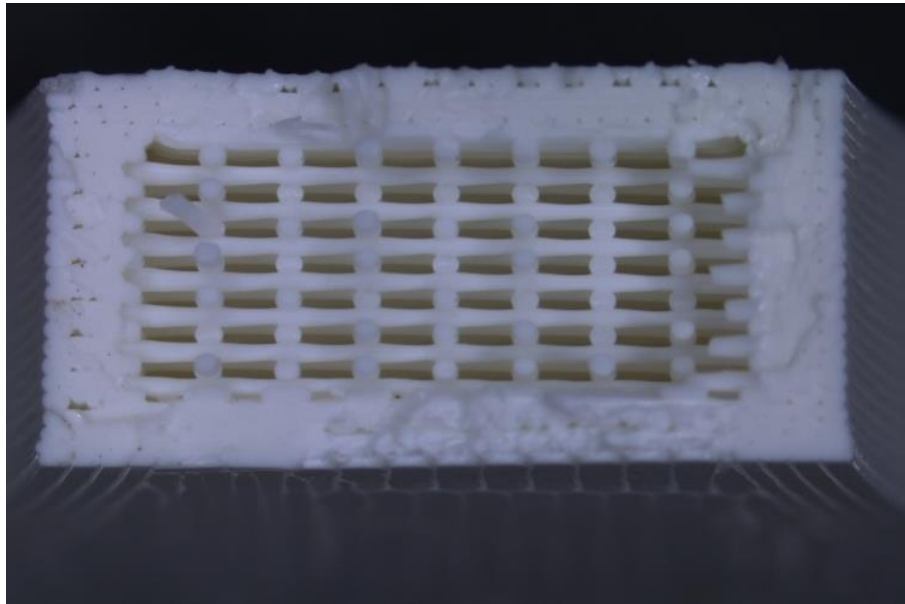


ISEL
INSTITUTO SUPERIOR DE
ENGENHARIA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica

ISEL



Estudo do efeito dos parâmetros de impressão 3D na resistência mecânica de peças impressas

ANDRÉ LARANJEIRA PEREIRA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Doutora Teresa Moura e Silva

Júri:

Presidente: Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão

Vogais:

Doutora Maria Leopoldina Mendes Ribeiro de Sousa Alves
Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Dezembro 2022

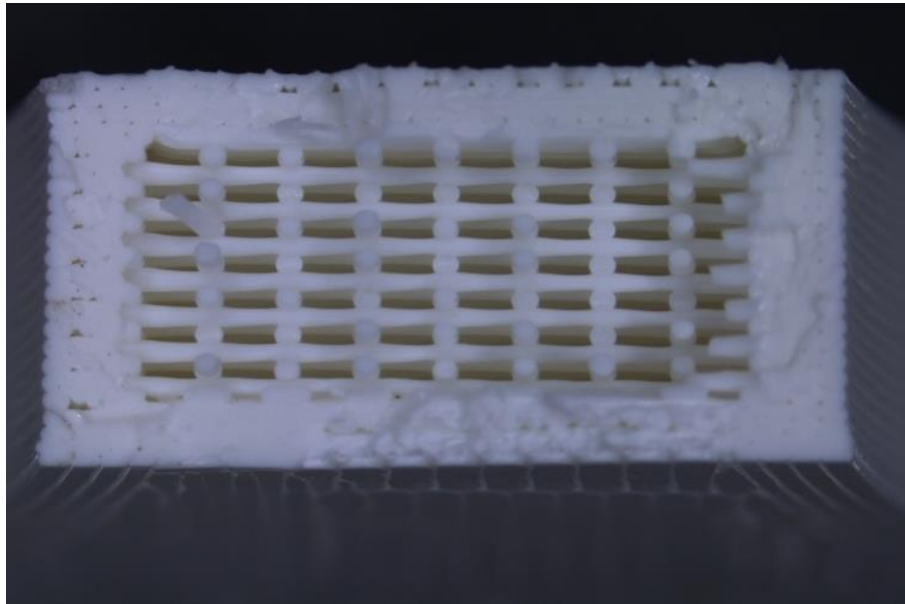


ISEL
INSTITUTO SUPERIOR DE
ENGENHARIA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica

ISEL



Estudo do efeito dos parâmetros de impressão 3D na resistência mecânica de peças impressas

ANDRÉ LARANJEIRA PEREIRA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Doutora Teresa Moura e Silva

Júri:

Presidente: Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão

Vogais:

Doutora Maria Leopoldina Mendes Ribeiro de Sousa Alves
Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Dezembro 2022

Agradecimentos

Ao longo do meu percurso universitário, assim como no desenvolvimento deste trabalho muitas foram as pessoas que me apoiaram e a quem muito devo pela orientação que me forneceram e que resultou no meu desenvolvimento pessoal e intelectual.

Queria em primeiro lugar agradecer aos meus orientadores Professor Mário Mendes e Professora Teresa Moura e Silva, por todo o apoio, empenho e conhecimento disponibilizado durante todo o período em que o trabalho foi desenvolvido.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer ao Professor Tiago Charters de Azevedo e à Oficina Digital do ISEL, porque disponibilizaram todo o apoio, equipamentos e conhecimento neste trabalho.

Gostaria de agradecer a todas instituições e representantes que me ajudaram ao longo da realização deste trabalho, nomeadamente ao Laboratório Precious Plastic da UDIP Marvila, Centro de Promoção Social da Prodac da SCML, na ajuda do ciclo de reciclagem do material e ao *Corrosion Science and Surface Engineering* do centro de Química Estrutural do Instituto Superior Técnico, na execução dos tratamentos térmicos e das observações em microscópio digital.

Gostaria de agradecer aos colegas e amigos que acompanharam esta nova etapa da minha vida e contribuíram com todo o seu conhecimento, apoio e esforço, em especial ao Hugo Santos e Miguel Francisco.

Por último, deixo o meu agradecimento especial à minha família, pai, mãe e avós por ao longo da minha vida académica terem sido os meus principais pilares de apoio e aos quais devo por grande parte daquilo que hoje sou e alcancei.

Resumo

Esta dissertação teve como objetivos principais o estudo da influência de alguns parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas das peças impressas em PLA (*Polyactic Acid*), bem como a avaliação do efeito que a reciclagem do material impresso e diferentes tratamentos térmicos induzem no comportamento mecânico dos componentes impressos.

Na primeira parte do trabalho procedeu-se ao estudo e definição de alguns parâmetros de impressão - densidade de enchimento, altura de camada e a orientação de enchimento - com o objetivo de majorar a resistência mecânica das peças impressas.

Numa segunda fase desta dissertação estava previsto a realização de pelo menos um ciclo de reciclagem aos provetes utilizados nos ensaios de tração, com o intuito de obter um filamento reciclado para impressão, e verificar possíveis alterações nas propriedades mecânicas. Infelizmente não foi possível realizar estes ciclos de reciclagem devido a limitações da máquina de extrusão disponível, pelo que se optou por adquirir um filamento reciclado comercial e avaliar as propriedades do mesmo face a um material virgem.

O trabalho desenvolvido incluiu também um estudo sobre a influência de tratamentos térmicos (usando diferentes tempos e temperaturas) nas propriedades mecânicas das peças impressas em material virgem e reciclado.

Os estudos efetuados permitiram concluir que existe influência de todos os parâmetros de impressão estudados na resistência mecânica das peças impressas, com o maior impacto a ser verificado para a densidade de enchimento. Relativamente ao material reciclado comercial verificou-se que a tensão de cedência e extensão na rotura apresentavam melhores resultados face ao material virgem. Por fim, as aplicações dos tratamentos térmicos evidenciaram melhorias nas tensões máximas para todos os casos de estudo.

Palavras-Chave

Impressão 3D, Propriedades Mecânicas, Parâmetros de Impressão, Reciclagem, Tratamentos Térmicos.

Abstract

The main objectives of this thesis were the study of the influence of some 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA (Polylactic Acid) printed parts, as well as the evaluation of the effect of recycling and thermal treatments on the mechanical behavior of the printed components.

The first part of the work encompasses the study of some 3D printing parameters - infill density, layer thickness, and infill orientation - to select the optimal printing conditions leading to enhanced mechanical resistance of the printed parts.

In the second task of this dissertation, it was planned to carry out at least one recycling cycle of the test specimens used in the tensile tests, to obtain recycled filaments that would be used in new 3D-printed parts and verify possible changes in mechanical properties. Unfortunately, due to limitations in the extrusion equipment, it was not possible to accomplish this strategy. To overcome this, a commercially recycled filament was acquired, and its mechanical properties were evaluated and compared with virgin filament.

The work developed in this thesis also included a study on the influence of heat treatments (using different times and temperatures) on the mechanical properties of parts printed on virgin and commercially recycled materials.

It was concluded that there is an influence of all the studied 3D printing parameters on the mechanical resistance of the printed parts, with the greatest impact being verified on the infill density. Regarding the commercial recycled material, it was found that the yield stress and the extension at break presented better results than the virgin material. Finally, the application of the heat treatments showed improvements in the maximum stresses for all the study cases.

Keywords

3D Printing, Mechanical Properties, Printing Parameters, Recycling, Heat Treatments.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract.....	vi
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos.....	xiv
Nomenclatura.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura do documento.....	3
2. Estado da arte.....	5
2.1. Enquadramento histórico	5
2.2. Etapas gerais do processo de impressão 3D	7
2.3. Fused Deposition Modelling	10
2.3.1. Princípios de funcionamento.....	10
2.3.2. Materiais utilizados	11
2.3.3. Parâmetros de impressão.....	13
2.4. Influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas	22
2.5. Reciclagem na impressão 3D	25
2.5.1. A importância da reciclagem na impressão 3D.....	25
2.5.2. Ciclo de reciclagem.....	26
2.5.3. Influência da reciclagem nas propriedades mecânicas.....	28
2.6. Tratamento térmico em peças impressas 3D	29
3. Procedimento experimental	34
3.1. Equipamento de impressão.....	34
3.2. Seleção do material.....	35
3.3. Ensaio de tração uniaxial.....	36
3.3.1. Equipamento de ensaios	38
3.3.2. Geometria dos provetes	39
3.4. Provetes em PLA 3D850	41

3.4.1.	Seleção dos parâmetros a analisar	41
3.4.2.	Seleção dos parâmetros fixos	43
3.5.	Ciclo de reciclagem	45
3.5.1.	Trituração	45
3.5.2.	Extrusão.....	47
3.6.	Provetes em EasyFil™ PLA e ReForm™ rPLA	48
3.6.1.	Seleção dos parâmetros a analisar	48
3.6.2.	Seleção dos parâmetros fixos	49
3.7.	Tratamento térmico.....	50
3.7.1.	Seleção dos parâmetros do tratamento térmico.....	50
3.8.	Observação em microscópio digital	51
4.	Resultados experimentais	53
4.1.	Ensaaios aos provetes em PLA 3D850.....	53
4.1.1.	Influência da densidade de enchimento	53
4.1.2.	Influência da altura de camada.....	54
4.1.3.	Influência da orientação de enchimento.....	56
4.2.	Ciclo de reciclagem	57
4.3.	Ensaaios aos provetes em EasyFil™ PLA	60
4.3.1.	Influência da densidade de enchimento	61
4.3.2.	Influência da altura de camada.....	62
4.3.3.	Influência da orientação de enchimento.....	64
4.4.	Comparação entre o material virgem e reciclado	67
4.5.	Tratamento térmico aos provetes EasyFil™ PLA.....	68
4.6.	Tratamento térmico aos provetes ReForm™ rPLA.....	69
5.	Discussão de resultados	72
5.1.	Provetes em PLA 3D850	72
5.1.1.	Densidade de enchimento.....	72
5.1.2.	Altura de camada.....	73
5.1.3.	Orientação de enchimento.....	73
5.2.	Provetes em EasyFil™ PLA.....	74
5.2.1.	Densidade de enchimento.....	74
5.2.2.	Altura de camada.....	75
5.2.3.	Orientação de construção	75
5.3.	Comparação entre material virgem e reciclado	76

5.4. Tratamentos térmicos	77
6. Conclusões.....	80
6.1. Trabalhos futuros	81
Referências	83
Apêndice A: Desenhos técnicos dos provetes	89
Apêndice B: Resultados experimentais	91
Anexo A: Material PLA 3D850.....	93
Anexo B: Material EasyFil™ PLA	95
Anexo C: Material ReForm™ rPLA	96

Índice de Figuras

Figura 1 - Previsão para o valor de mercado da impressão 3D, adaptado de [1].	1
Figura 2 - Impressão 3D vs Fabricação tradicional [4].	5
Figura 3 - Exemplo de conversão do modelo 3D para STL [12].	8
Figura 4 - Esquema ilustrativo da tecnologia FDM [14].	11
Figura 5 - Materiais mais utilizados na impressão FDM [16].	12
Figura 6 - Algumas propriedades dos materiais para impressão FDM [16].	13
Figura 7 - Orientação da peça na plataforma de construção, adaptado de [18].	14
Figura 8 - Representação da altura de camada de impressão [19].	14
Figura 9 - Ângulo de deposição de material [21].	15
Figura 10 - Densidade de enchimento variando de 20% (esquerda), 50% (meio) e 75% (direita) [24].	16
Figura 11 - Representação gráfica do Air Gap [25].	17
Figura 12 - Exemplos de padrões de enchimento, adaptado de [22].	17
Figura 13 - Representação gráfica da largura do cordão, adaptado de [29].	19
Figura 14 - Representação dos contornos de uma peça impressa, adaptado de [24].	20
Figura 15 - Exemplo de saliências e “pontes” na impressão das letras Y, H e T [30].	21
Figura 16 - Estruturas de suporte são necessárias quando o ângulo excede os 45° da vertical [30].	22
Figura 17 - Resultado final da impressão das letras Y, H e T [30].	22
Figura 18 - Representação da carga de tração aplicada (a) segundo a direção normal às camadas e (b) segundo a direção paralela às camadas [28].	23
Figura 19 - Propriedades mecânicas em função da densidade de enchimento, onde E é o módulo de elasticidade, S_y é a tensão de cedência e T_s é a Tensão máxima [37].	24
Figura 20 - Ciclo de produção e caracterização do material de impressão, adaptado de [43].	27
Figura 21 - Exemplo de linha de produção de filamento, adaptado de [45].	27
Figura 22 – Comparação da resistência à tração de acordo com o número de ciclos de reciclagem [47].	29
Figura 23 – Representação de estruturas moleculares das cadeias poliméricas, adaptado de [50].	30
Figura 24 – Diferenças entre um material cristalino e um amorfo, adaptado de [49].	31
Figura 25 – Exemplos de mudanças dimensionais após o recozimento [48].	32

Figura 26 – Resultados verificados após o recozimento, adaptado de [49].	33
Figura 27 – Influência do recozimento no valor médio de resistência à tração, adaptado de [51].	33
Figura 28 – Impressora FDM Hello Bee Prusa.	34
Figura 29 – Observação ao microscópio digital de um provete feito de PLA natural. ..	36
Figura 3– - Exemplo de um gráfico Tensão Extensão obtido num dos ensaios.	37
Figura 3– - Máquina de testes Shimadzu® AG-IS (esquerda); Software Trapezium 2™ (direita).	39
Figura 3– - Geometria dos provetes selecionados [53].	40
Figura 33 - Representação da orientação do provete na base de construção.	44
Figura 34 - Trituradora Basic (esquerda); Granulado resultante da trituração (direita). 46	
Figura 35 - Extrusora Filastruder v1.6.	48
Figura 36 - Estufa Memmert UNF 500.	50
Figura 37 - Microscópio digital Leica DMS300.	52
Figura 38 - Influência da densidade de enchimento nos provetes em PLA 3D850 na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.	54
Figura 39 - Influência da altura de camada nos provetes em PLA 3D850 na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura... 55	
Figura 40 - Influência da orientação do enchimento nos provetes em PLA 3D850 na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.	56
Figura 41 - Tentativa de impressão com filamento reciclado de aproximadamente 1,2 mm de diâmetro.	58
Figura 42 - Comparação da secção transversal de um provete em (esquerda) PLA 3D850 e (direita) EasyFil™ PLA.	60
Figura 43 - Influência da orientação de enchimento nos provetes EasyFil™ PLA na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.	61
Figura 44 - Comparação entre densidade de enchimento de (esquerda) 30% e (direita) 90%.	62
Figura 45 - Influência da altura de camada nos provetes EasyFil™ PLA na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura... 63	

Figura 46 - Comparação entre alturas de camada estudadas para uma densidade de 30%, onde (a) 0,1 mm, (b) 0,2 mm e (c) 0,3 mm.	64
Figura 47 - Influência da orientação de enchimento nos provetes EasyFil™ PLA na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.....	65
Figura 48 - Comparação entre as orientações de enchimento (esquerda) 45°/-45° e (direita) 0°/90°.....	66
Figura 49 - Observação da zona de fratura de um provete com orientação de enchimento 45°/-45° e densidade de enchimento de 50 %.....	66
Figura 50 - Comparação entre material virgem e reciclado na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.	67
Figura 51 - Influência dos tratamentos térmicos nos provetes EasyFil™ PLA na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura... ..	68
Figura 52 - Influência dos tratamentos térmicos nos provetes ReForm™ rPLA na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.....	70
Figura 53 - Comparação entre perfis de deposição com a variação da altura de camada [39].	75
Figura 54 - Secção de fratura lateral de um provete com 0,1 mm de altura de camada, orientação de enchimento de 45°/-45° e densidade de enchimento de 50%.....	76
Figura 55 - Comparação entre provete (esquerda) não tratado termicamente e (direita) provete tratado termicamente.	77
Figura 56 - Comparação entre provete tratado termicamente (baixo) e não tratado termicamente (cima).....	78

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação de tecnologias de fabrico aditivo segundo ASTM 52900 [2]... 7	
Tabela 2 – Propriedades mecânicas à tração de amostras impressas em PLA virgem e PLA reciclado [41]. 28	
Tabela 3 – Temperaturas de transição vítrea e de impressão para materiais comuns na impressão [49]. 31	
Tabela 4 - Dimensões selecionadas para os provetes. 40	
Tabela 5 - Parâmetros a analisar e respetivos níveis com material PLA 3D850. 42	
Tabela 6 - Experiências realizadas e parâmetros selecionados com material PLA 3D850. 42	
Tabela 7 - Parâmetros fixos introduzidos no Cura. 45	
Tabela 8 - Parâmetros a analisar e respetivos níveis com material EasyFil™ PLA. 49	
Tabela 9 - Experiências realizadas e parâmetros selecionado. 49	
Tabela 10 - Parâmetros selecionados nos tratamentos térmicos realizados aos provetes de material virgem. 51	
Tabela 11 - Parâmetros selecionados nos tratamentos térmicos realizados aos provetes de material reciclado. 51	
Tabela 12 - Parâmetros iniciais de extrusão. 58	
Tabela 13 - Dimensões da seção do provete antes e após o recozimento 71	
Tabela 14 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com provetes em PLA 3D850 91	
Tabela 15 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com provetes em EasyFil™ PLA. 92	
Tabela 16 - Resultados experimentais dos ensaios realizados aos provetes tratados termicamente 92	

Lista de Acrónimos

3D	Tridimensional
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASA	<i>Acrylonitrile Styrene Acrylate</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
IST	Instituto Superior Técnico
ODI	Oficina Digital do ISEL
PA	<i>Polyamide</i>
PC	<i>Polycarbonate</i>
PEEK	<i>Polyether Ether Ketone</i>
PEI	<i>Polyetherimide</i>
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i>
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>
PLA	<i>Polyactic Acid</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	<i>Standard Triangle Language ou Standard Tessellation Language</i>
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i>

Nomenclatura

T_g	Temperatura de transição vítrea [°C]
σ	Tensão nominal [MPa]
F	Força nominal [N]
S_0	Secção ou área inicial [mm ²]
ε	Extensão nominal [mm]
Δl	Variação do comprimento do provete [mm]
l_0	Comprimento inicial [mm]
E	Módulo de elasticidade ou de Young [MPa]
σ_{ced}	Tensão de cedência [MPa]
σ_{max}	Tensão máxima ou tensão de rotura à tração [MPa]
F_{max}	Força máxima aplicada sobre o provete [N]
ε_{rot}	Extensão na rotura [%]
l_f	Comprimento final do provete na fratura [mm]
W	Largura da zona de teste do provete [mm]
L	Comprimento da zona de testes do provete [mm]
WO	Largura total do provete [mm]
LO	Comprimento total do provete [mm]
D	Distância entre amarras [mm]
R	Raio de concordância do provete [mm]
T	Espessura da zona de teste do provete [mm]

1. Introdução

A impressão 3D ou fabricação aditiva é um processo tecnológico para fabricar um objeto físico a partir de um modelo digital tridimensional, normalmente adicionando camadas sucessivas de um material.

Nos últimos anos, a impressão 3D deixou de ser um processo exclusivamente industrial de prototipagem e tornou-se mais acessível a pequenas empresas e até mesmo a particulares. Acredita-se que a impressão 3D tem um grande potencial para se tornar numa das principais tecnologias de fabricação, podendo mesmo vir a acabar com alguns métodos de produção tradicionais. As previsões para o mercado relacionado com a impressão 3D, continuam a apresentar uma tendência crescente e espera-se que até 2030 representem uma indústria avaliada em cerca de 51 bilhões de dólares [1].

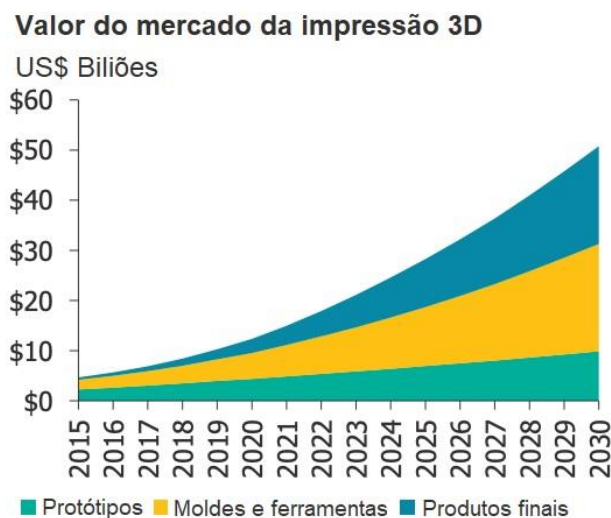


Figura 1 - Previsão para o valor de mercado da impressão 3D, adaptado de [1].

O número de trabalhos e estudos realizados na área da impressão tridimensional aumenta de dia para dia e o número de matérias-primas a ser utilizado por estas tecnologias segue o mesmo caminho. É por isso fundamental conhecer o comportamento das peças fabricadas quando sujeitas a esforços mecânicos. Para se obterem as melhores propriedades possíveis, não basta apenas uma correta seleção dos parâmetros de impressão, embora possa ajudar bastante, é também importante uma avaliação prévia das condições a que a peça vai estar sujeita. Por exemplo, a correta seleção do material pode

ser fundamental se um objeto estiver exposto a temperaturas mais elevadas ou caso este esteja em contacto com produtos químicos. Da mesma forma, os custos de fabrico, as solicitações mecânicas, todas as condições envolvidas em torno da construção de uma peça vão ter influência no seu comportamento. As soluções que buscam promover uma reutilização e melhoramento do comportamento das peças e objetos, são por isso também um importante alvo de estudo, na melhoria contínua dos processos de impressão 3D.

1.1. Motivação

Dada a crescente utilização dos processos de impressão 3D, não só na indústria, mas também por particulares, cada vez mais objetos estão a ser desenvolvidos através destas soluções. Embora para o utilizador comum possa não ser importante conhecer o efeito que os parâmetros de impressão têm no produto final, desejando apenas um aspeto aceitável, do ponto de vista da Engenharia torna-se fundamental conhecer o comportamento dos objetos criados e a influência que cada parâmetro tem na resistência mecânica.

Evidentemente que com o aumento da utilização destas tecnologias, como meio de desenvolvimento e fabrico, surgem cada vez mais desperdícios que, sem outro fim à vista, acabam por seguir diretamente para o lixo. Sendo esta uma tecnologia que tem como uma das principais vantagens o desperdício mínimo de material na produção de objetos, ainda assim existem desperdícios. Estes podem adquirir uma segunda vida através da reciclagem e ser novamente convertidos em matérias-primas para impressão. O comportamento das peças criadas a partir de impressão de materiais reciclados ainda não é muito conhecido e torna-se por isso importante avaliar as suas propriedades.

Apesar do conhecimento da influência dos parâmetros de impressão 3D ser cada vez mais aprofundado, de forma a obter os melhores resultados possíveis, é fundamental continuar a procurar por soluções que promovam a melhoria das propriedades das peças impressas. Neste sentido, métodos de pós processamento, como os tratamentos térmicos, podem ter um papel importante a desempenhar quando é desejada uma melhoria nas propriedades mecânicas.

1.2. Objetivos

Os principais objetivos definidos para esta dissertação são a avaliação do comportamento mecânico de peças impressas usando filamento virgem e reciclado e o estudo da influência da aplicação de tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas.

Para se atingirem estes objetivos considerou-se importante começar por definir as condições ótimas (em termos de resistência mecânica) de impressão. Para tal foram impressos provetes normalizados variando os parâmetros de impressão relativos à densidade de enchimento, altura de camada e orientação de enchimento.

Uma vez selecionadas as condições ótimas e seguindo-se uma abordagem de desperdício zero, os provetes testados nos ensaios mecânicos seriam sujeitos a pelo menos um ciclo de reciclagem, onde os mesmos seriam convertidos novamente em filamento e posteriormente impressos. Após a impressão de provetes de material reciclado, estes seriam sujeitos a uma avaliação das suas propriedades mecânicas e comparados com os provetes impressos com material virgem, para avaliar a influência da reciclagem no comportamento do material. Contudo, como apresentado no subcapítulo 4.2, devido a limitações dos equipamentos disponíveis esta abordagem não teve sucesso pelo que se optou por adquirir material reciclado comercial para testagem.

Finalmente, neste trabalho pretendeu-se estudar a influência dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas das peças impressas, em material virgem e material reciclado (comercial) e verificar se este é um método passível de melhorar o desempenho mecânico dos objetos impressos.

1.3. Estrutura do documento

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos. O primeiro, e presente capítulo, tem um carácter introdutório incluindo assim um primeiro enquadramento e justificação do tema, bem como os objetivos principais do trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica, sendo primeiramente referida a evolução histórica da impressão 3D, seguindo-se as etapas gerais de um processo de impressão 3D e uma introdução aos princípios de funcionamento e parâmetros de impressão mais relevante da tecnologia *Fused Deposition Modelling*

(FDM). No final deste capítulo encontramos uma revisão dos estudos realizados até ao momento, sobre a influência que os parâmetros de impressão e a reciclagem têm sobre as propriedades mecânicas das peças produzidas através da impressão FDM.

No terceiro capítulo é descrita toda metodologia experimental, identificando-se os equipamentos, parâmetros e todos os procedimentos experimentais realizados.

No quarto capítulo é feita a apresentação dos resultados experimentais e no quinto capítulo é realizada a sua análise e discussão, onde se procura justificar os resultados obtidos.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões do estudo realizado bem como algumas propostas para trabalhos a realizar no futuro.

2. Estado da arte

A impressão 3D ou, como é geralmente identificada em inglês, *Additive Manufacturing*, são termos normalmente usados para descrever o processo fabricação de objetos, a partir de dados de um modelo 3D, através da sobreposição de camadas de um material [2].

Os métodos de fabricação tradicional, como por exemplo a maquinação CNC (*Computer Numerical Control*), tendem a ser processos em os componentes são produzidos a partir da subtração de material de um bloco, com dimensões superiores às do produto final. Esta subtração de material pode resultar em desperdícios que podem chegar até aos 90% do material do bloco original (Figura 2). Em contraste, a impressão 3D é um processo para criar objetos diretamente, adicionando material camada por camada de várias maneiras, dependendo da tecnologia [3].

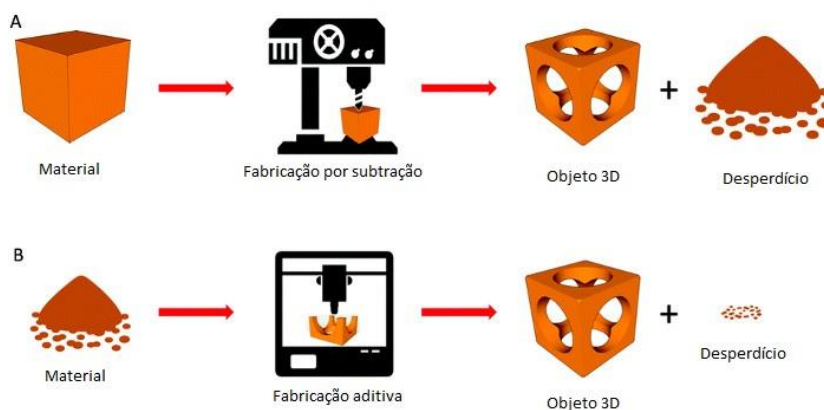


Figura 2 - Impressão 3D vs Fabricação tradicional [4].

2.1. Enquadramento histórico

Os primeiros estudos na criação de objetos tridimensionais através de técnicas experimentais utilizando foto-polímeros, ocorreram nos anos sessenta no *Battelle Memorial Institute* no Ohio. O objetivo desta experiência era polimerizar resina através da interseção de dois feixes laser com diferentes comprimentos de onda [5].

Em 1980, no Instituto Municipal de Pesquisa Industrial de Nagoya, no Japão, Hideo Kodama foi um dos primeiros a desenvolver uma solução de prototipagem rápida

utilizando um único feixe de laser [6]. Em 1981, Kodama publica um artigo [7] relacionado com as suas experiências para o desenvolvimento de métodos de fabricação automática de modelos tridimensionais usando raios ultravioleta e resinas líquidas fotossensíveis.

Chuck Hull, inventa a *Stereolithography* (SLA) e em 1986 é publicada a patente, na qual descreve todo o processo. Neste, o polímero líquido polimeriza através da aplicação de um feixe de luz ultravioleta, para formar as seções de objeto tridimensional. Este método utiliza dados digitais e um feixe de luz controlado por computador, para a criação de uma camada de material em cima de outra [8]. Dois anos mais tarde Hull cria a 3D Systems®, uma empresa dedicada à produção e venda de maquinaria de fabricação 3D [9].

No final dos anos 80, Carl Deckard, ainda estudante na universidade do Texas, desenvolveu o processo que seria conhecido como *Selective Laser Sintering* (SLS), que consistia na fusão de partículas através da aplicação um feixe laser [9].

Em 1989, S. Scott e Lisa Crump fundaram a *Stratasys*® e emitiram uma patente para uma forma de prototipagem rápida, denominada por *Fused Deposition Modelling*, na qual um filamento de um material plástico ou metálico é aquecido e extrudido através de um bico. A deposição do material era guiada por um computador e baseada num modelo previamente estabelecido [6].

No mesmo ano, na Europa, é fundada a EOS® GmbH por Hans Langer. Esta empresa focou-se no desenvolvimento das tecnologias de sinterização a laser. Atualmente, os sistemas da EOS® são reconhecidos pela produção de qualidade para prototipagem industrial e aplicações de produção através de impressão 3D. O processo de *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) resultou de um projeto inicial com uma divisão da *Electrolux*® da Finlândia que mais tarde foi adquirida pela EOS® [3].

Com o número crescente de tecnologias de impressão 3D a surgirem tornou-se importante classificar as mesmas de acordo com o seu processo de formação das camadas de material. Em 2009, a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), formou um comité para promover o estímulo à pesquisa e implementação da tecnologia através do desenvolvimento de normalização para a indústria [10]. A tabela 1 classifica os processos de fabrico aditivo segundo uma das normas resultantes do comité formado pela ASTM.

Tabela 1 - Classificação de tecnologias de fabrico aditivo segundo ASTM 52900 [2].

Processo	Descrição
Jato de aglutinante (<i>Binder Jetting</i>)	Processo no qual um agente de ligação líquido é seletivamente depositado como agente de união de materiais em pó.
Deposição direta de energia (<i>Directed Energy Deposition</i>)	Processo em que a energia térmica é focada para fundir materiais à medida que vão sendo depositados.
Extrusão de material (<i>Material extrusion</i>)	Processo pelo qual o material é seletivamente depositado (a impressão FDM é baseada neste processo).
Jato de material (<i>Material Jetting</i>)	Processo no qual partículas de material são seletivamente depositadas.
Fusão de camada de pó (<i>Powder Bed Fusion</i>)	Processo no qual energia térmica funde seletivamente regiões de uma camada de pó.
Laminação (<i>Sheet Lamination</i>)	Processo no qual folhas de material são unidas de forma a criar uma peça.
Foto-polimerização em cuba (<i>Vat photopolymerization</i>)	Processo no qual um foto-polímero líquido é seletivamente curado por polimerização ativada por um feixe de luz.

2.2. Etapas gerais do processo de impressão 3D

Cada processo de desenvolvimento de produto, envolvendo uma impressora 3D, necessita que o operador realize uma sequência definida de tarefas. As etapas seguintes descrevem de forma simplificada as etapas gerais pelas quais um operador tem de passar para obter o produto final, resultante de um método de fabricação aditiva.

Etapa 1 - *Computer Aided Design* (CAD)

O primeiro passo no desenvolvimento de qualquer produto, deve ser uma ideia de como este se parece e qual a sua função. Esta descrição pode ser feita através de um esboço, um texto descritivo ou um modelo representativo. Para que as tecnologias de impressão 3D possam ser utilizadas é obrigatório que exista uma representação digital, que permita que um modelo físico possa ser construído.

A impressão 3D não existiria se não fosse a modelação tridimensional. Pois só após dominar a habilidade de representar os objetos sólidos em computador é que foi possível desenvolver as tecnologias para reproduzir tais objetos.

Desta forma, entende-se que qualquer processo de fabricação aditiva deve começar com a representação em CAD 3D. Existe uma variedade de formas de como os dados 3D podem ser criados. A representação 3D pode ser criada por um projetista através de interface de utilizador, por um *software* a correr um algoritmo de otimização automatizado, por um scanner de um objeto existente ou pela combinação de todos estes. No fundo, pode ser utilizado qualquer tipo de *software* CAD, desde que o resultado seja a representação tridimensional do objeto ou superfície [11].

Etapa 2 – Conversão para *Standard Triangle Language* (STL)

Praticamente todos os *softwares* de laminação, também conhecidos como *slicer*, aceitam o formato de ficheiro STL, o qual se tornou o standard nos dias de hoje. Além disso já é possível que o *software* CAD em que se faz a representação do objeto, consiga converter o ficheiro neste formato. Este ficheiro descreve as superfícies da peça modelada e fornece a base para o cálculo das seções da peça. A conversão para STL remove os dados de construção da peça, o histórico de modelação etc., e aproxima as superfícies do modelo através de uma malha composta por triângulos (Figura 3) [11].

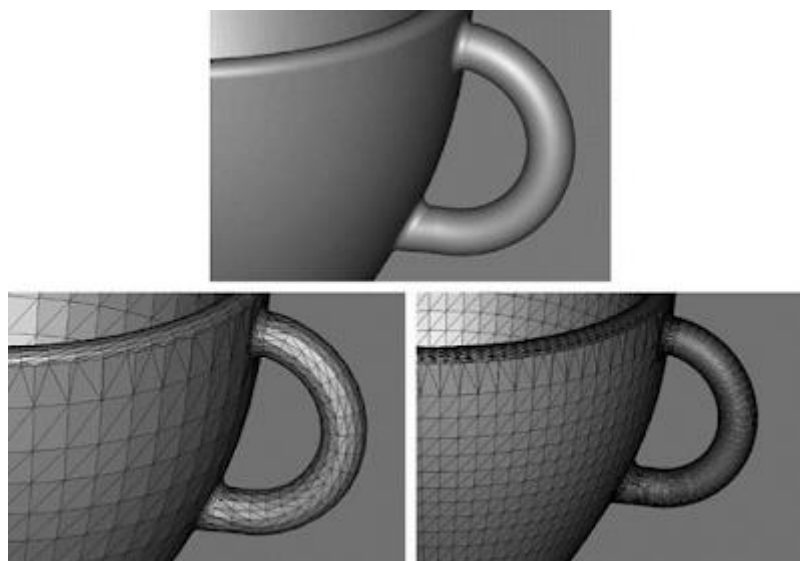


Figura 3 - Exemplo de conversão do modelo 3D para STL [12].

O ficheiro STL gerado por esta malha contém informação relativa ao posicionamento dos vértices de cada triângulo e de um vetor normal à superfície de cada triângulo. O tamanho dos triângulos gerados pode ser definido no *software*, sendo que um tamanho sucessivamente mais pequeno de triângulos irá traduzir-se numa melhor aproximação à realidade, isto é um objeto com maior definição [13].

Etapa 3 – Software de Laminação (*Slicer*)

Após a conversão do ficheiro para STL, este deve passar por um *software* de laminação. Neste *software* são definidos os parâmetros de impressão e processamento, tais como a altura das camadas, a velocidade de impressão, temperatura da cabeça de extrusão entre outros. Desta laminação resulta um ficheiro de código G, que é uma linguagem de programação que comanda o movimento da máquina [11].

Etapa 4 - Impressão

A impressão da peça é uma etapa autónoma que a impressora realiza sem necessidade intervenção.

Etapa 5 – Remoção da peça

Após o término da impressão há que remover a peça do equipamento de impressão. No caso de a impressora possuir um ambiente de trabalho fechado, este só poderá ser acedido assim que se verifiquem que as condições de segurança estão reunidas, como por exemplo, que a temperatura dos componentes de impressão seja baixa, a fim de não causar queimaduras e que não existe qualquer tipo de movimento por parte do equipamento [11].

Etapa 6 – Pós-processamento

O pós-processamento refere-se às fases de acabamentos das peças antes de estas serem colocados ao uso. Isto pode envolver um acabamento abrasivo como um polimento ou a aplicação de algum tipo de revestimento. Outras aplicações podem exigir um

tratamento químico ou térmico das peças para alcançar as propriedades finais pretendidas[11].

2.3. Fused Deposition Modelling

O processo de fabricação através de deposição de material fundido (ou FDM) é um dos mais conhecidos e utilizados em todo o mundo. A maior contribuição para este facto vem dos custos associados à aquisição do equipamento de impressão e das matérias-primas, que são relativamente baixos. Assim como também a simplicidade de todo o processo relativo à impressão.

Pelas razões apresentadas acima e pelo facto de ser um equipamento disponível no ISEL, os estudos realizados nesta dissertação foram realizados utilizando este processo de impressão e, por esse motivo, este é o único método que se encontra detalhado neste trabalho.

2.3.1. Princípios de funcionamento

A tecnologia FDM é um método de fabricação aditiva onde linhas de material extrudido são unidas por fusão. Embora possam existir algumas diferenças entre impressoras e a complexidade do processo de impressão, a figura abaixo ilustra os princípios básicos do funcionamento desta tecnologia.

No caso indicado, e conforme se pode observar na figura 4, a impressão ocorre sobre uma base (1) assente sobre a plataforma de construção (2). Os materiais utilizados são geralmente filamentos termoplásticos alimentados através de bobines (4, 6) para a cabeça de extrusão da impressora (10). A peça impressa (3) é construída utilizando o material de construção (4) sobre estruturas de suporte (5) criadas com o filamento proveniente da bobine do material de suporte (6). Os filamentos de construção são alimentados para a cabeça de extrusão (7, 8) através da ação de rolos motrizes (9) e são aquecidos por uma resistência elétrica (11) até à temperatura desejada. Depois de aquecido o material é depositado através dos bicos (12) da cabeça de extrusão (10) [14].

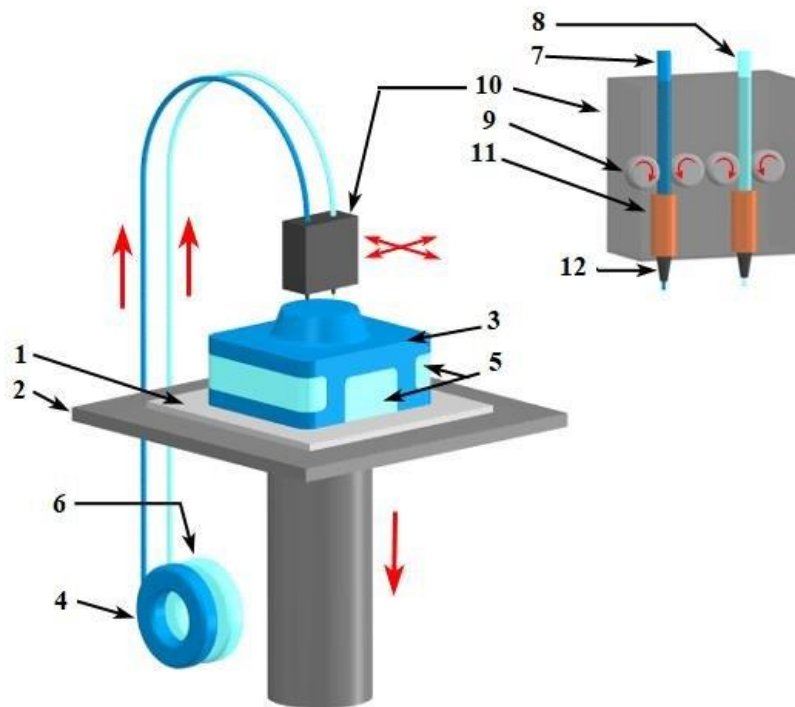


Figura 4 - Esquema ilustrativo da tecnologia FDM [14].

A cabeça de extrusão movimenta-se num eixo cartesiano de coordenadas, com o auxílio de sistemas mecânicos. A forma como a cabeça de extrusão se move para produzir uma camada da peça, encontra-se programada no ficheiro de impressão que contém as coordenadas para onde a cabeça se deve movimentar.

2.3.2. Materiais utilizados

Uma das muitas vantagens da tecnologia FDM é a variedade de materiais que podem ser utilizados. Como já foi referido são utilizados materiais termoplásticos sobre a forma de filamento com a espessura normalizada de 1,75 mm ou 2,85 mm. Os termoplásticos são materiais poliméricos que podem ser fundidos e reprocessados quase indefinidamente. Estes quando aquecidos fundem e quando arrefecidos endurecem. No entanto, antes de atingir o estado líquido, estes passam por uma transição vítrea, altura em que não são sólidos e apresentam uma viscosidade que permite que sejam moldados [15].

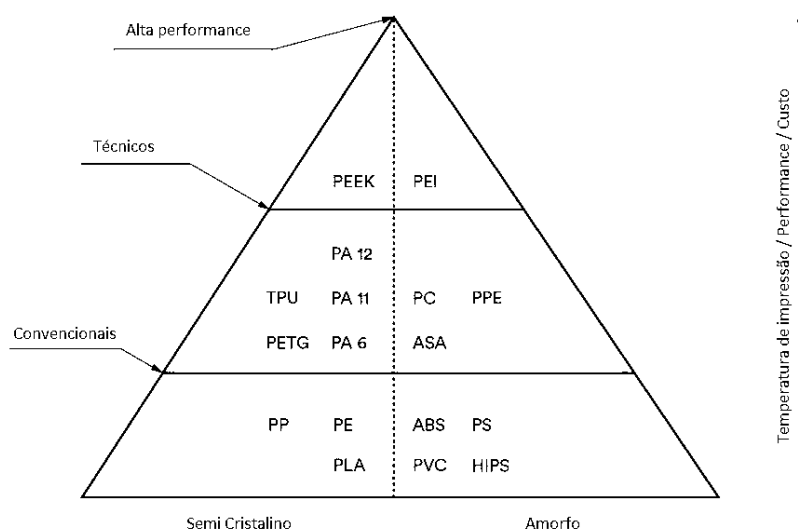


Figura 5 - Materiais mais utilizados na impressão FDM [16].

De entre os materiais mais utilizados destacam-se os termoplásticos convencionais como o ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) e o PLA (*Polyacetic Acid*). Em aplicações mais especiais podem ser utilizados materiais técnicos como por exemplo o TPU (*Thermoplastic Polyurethane*) que é um material bastante flexível e também termoplásticos de alto desempenho como o PEEK (*Polyether Ether Ketone*) e o PEI (*Polyetherimide*), que apresentam propriedades mecânicas, térmicas e químicas melhoradas. Contudo, conforme a figura 5, estes tendem a ser mais dispendiosos e também mais difíceis de imprimir [16].

Conforme visível na figura 6, os materiais apresentam diferentes propriedades [16], havendo por isso a necessidade de se verificar as condições a que o objeto estará sujeito, seja de temperaturas elevadas ou de esforços mecânicos de forma a fazer a escolha correta do material.

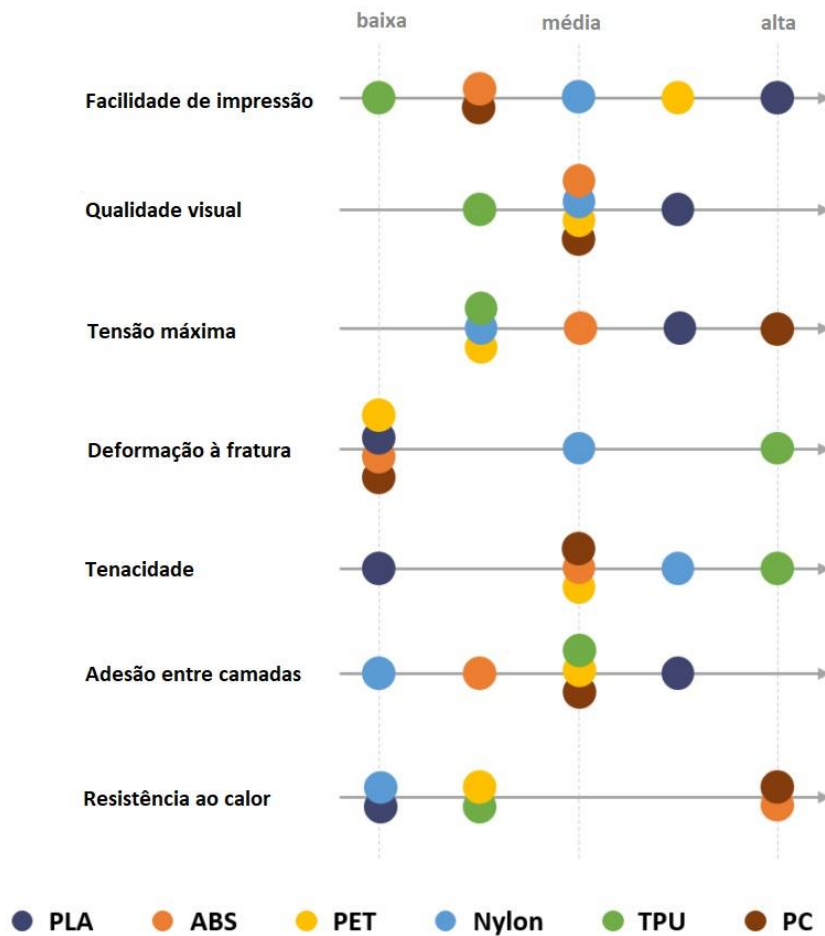


Figura 6 - Algumas propriedades dos materiais para impressão FDM [16].

2.3.3. Parâmetros de impressão

A maioria dos sistemas FDM permite a alteração de inúmeros parâmetros que podem ter influência no acabamento e na resistência mecânica das peças obtidas. Dependendo das funcionalidades de cada impressora e do *software* de laminação, o utilizador pode parametrizar a mesma, de forma a ir de encontro às suas necessidades.

Orientação de construção

Um dos primeiros passos antes de definir qualquer outro parâmetro, é determinar qual a posição em que a peça deve ser impressa. A orientação da peça ou objeto descreve a maneira pela qual a mesma é impressa na plataforma de construção relativamente aos

eixos X, Y e Z. A figura 7, ilustra as posições mais comuns de orientação de um objeto de modo a otimizar a sua impressão [17].

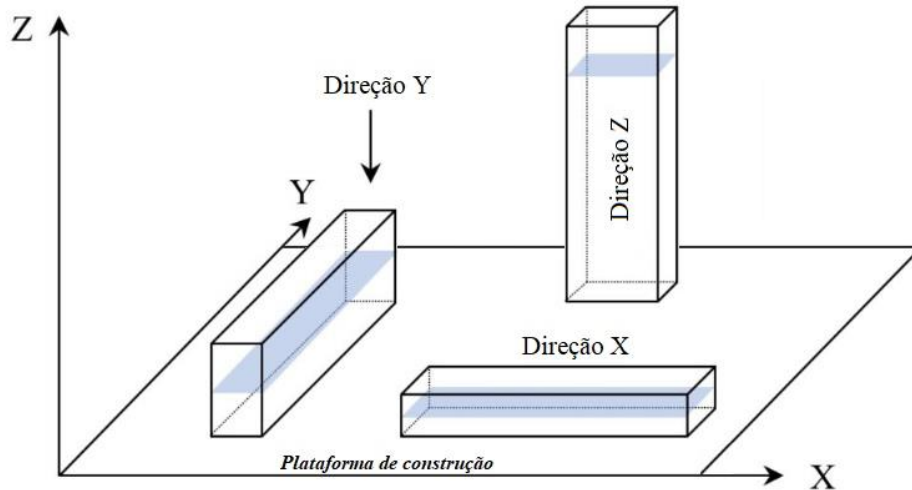


Figura 7 - Orientação da peça na plataforma de construção, adaptado de [18].

A construção do objeto dá-se a partir da plataforma de construção e as camadas vão sendo depositadas em incrementos iguais ao da altura de camada definida no eixo Z.

Altura da camada

Este é um parâmetro que se encontra diretamente relacionado com a dimensão do bico de extrusão, visto que as alturas de camada do material depositado deverão ser sempre menores que o diâmetro do bocal de extrusão [17].

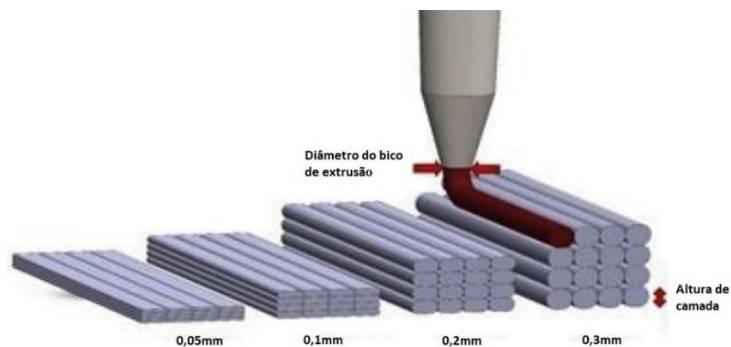


Figura 8 - Representação da altura de camada de impressão [19].

Uma altura de camada menor produz peças com um melhor acabamento superficial enquanto a utilização de uma altura de camada maior aumenta a rapidez da produção, visto que o número de camadas será necessariamente inferior [20].

Ângulo de deposição de material

Em qualquer peça, a deposição de material inicia-se normalmente pelo contorno exterior, isto é, a primeira linha a ser depositada irá corresponder ao perímetro da peça a ser construída. Após a deposição dos contornos exteriores e de forma a criar uma face sólida, o interior desse perímetro necessita de ser preenchido. O ângulo de deposição do material pode variar dependendo do desejado pelo utilizador. Conforme ilustrado na figura 9, esse ângulo é medido em relação ao eixo x da impressora. Este ângulo pode ser diferente das camadas ímpares para as camadas pares, isto é, caso se verifique que o objeto contém contornos superiores e inferiores que não sejam compostos apenas por uma camada, podemos alternar a sua orientação e ter deste modo por exemplo as camadas ímpares orientadas a 45° e as camadas pares a -45° .

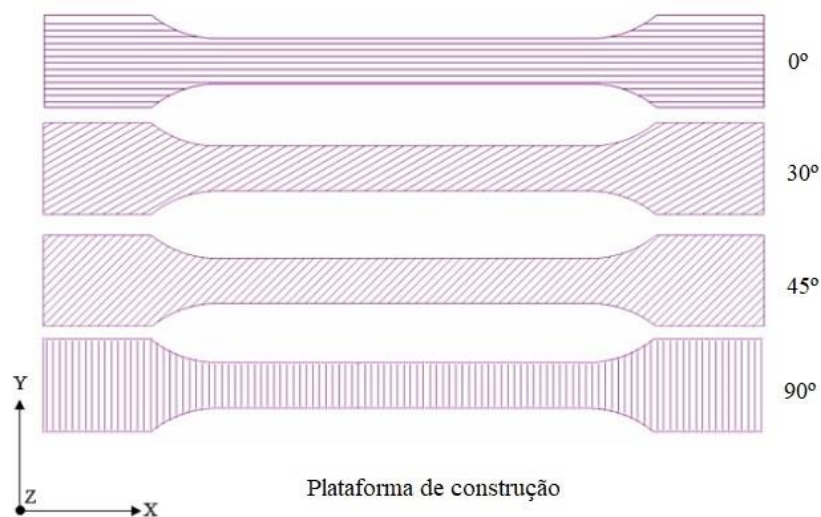


Figura 9 - Ângulo de deposição de material [21].

Esta orientação tem especial relevância no contorno superior e inferior da peça, pois irá determinar o aspeto visual da peça, uma vez que as linhas de material depositado serão depositadas da forma escolhida.

Velocidade de impressão

A velocidade de impressão indica o valor de velocidade, normalmente expresso em mm/s, com que a cabeça de extrusão se move sobre a plataforma de impressão. Este é um dos parâmetros que tem muita influência no tempo de impressão. Este é também um dos principais parâmetros que afeta a deformação das peças, isto porque são criadas tensões residuais resultantes da deposição mais rápida de material [17]. Além disso, este é um parâmetro que está diretamente relacionado com a temperatura da cabeça de extrusão. Dado que uma velocidade de impressão mais elevada irá traduzir-se num fornecimento de material mais rápido e portanto é necessário que temperatura da cabeça de extrusão seja ligeiramente mais elevada [22].

A fim de melhorar o acabamento superficial das peças impressas muitas vezes são utilizadas velocidades de impressão mais lentas em certas zonas da peça impressa. Por exemplo, normalmente as paredes exteriores do objeto impresso são impressas a metade da velocidade de impressão de zonas como o enchimento.

Densidade de enchimento

As camadas externas ou contornos de impressão de um objeto 3D impresso são por norma sólidas. No entanto, a estrutura interna que fica oculta pelas camadas externas pode ter diferentes formas e padrões. A densidade de enchimento é entendida como sendo a percentagem de volume que o material ocupa no interior da peça (Figura 10) [23].



Figura 10 - Densidade de enchimento variando de 20% (esquerda), 50% (meio) e 75% (direita) [24].

Em vez da densidade de enchimento pode ser antes definido o *Air Gap*. Este representa a distância entre a deposição de duas linhas adjacentes de material. Conforme representado na figura 11, o *Air Gap* pode ser nulo, positivo ou negativo. Quando um *Air Gap* é positivo isto significa que a densidade de enchimento é sempre inferior a 100%. O *Air Gap* negativo é utilizado quando queremos obter uma boa adesão entre camadas adjacentes e um objeto mais denso [17].

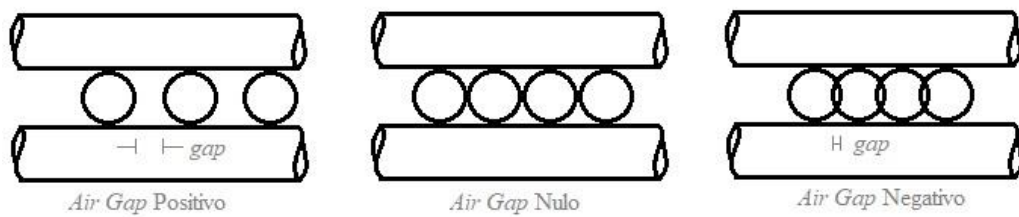


Figura 11 - Representação gráfica do Air Gap [25].

Orientação/Padrão de enchimento

É a geometria ou o padrão utilizado para a impressão da estrutura interna do objeto. Diferentes tipos de padrões podem ser utilizados no preenchimento das peças, apresentando-se na figura 12 exemplos dos padrões de enchimento mais comuns [17].

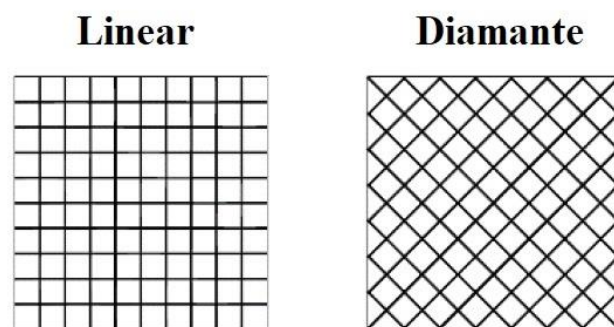


Figura 12 - Exemplos de padrões de enchimento, adaptado de [22].

Um padrão de enchimento linear significa que teremos as camadas ímpares com uma orientação a 0° em relação ao eixo x e as camadas pares com uma orientação a 90° , sendo tipicamente designado por enchimento com orientação $[0^\circ/90^\circ]$. De forma semelhante, o

padrão em diamante terá as camadas ímpares construídas com linhas depositadas a 45° com o eixo x e camadas pares com a deposição a ser efetuada a -45°.

Outros tipos de padrões podem ser utilizados no enchimento de peças que não são caracterizadas por uma orientação de linhas de material, como por exemplo um padrão em giroide, cúbico, concêntrico, espiral entre outros.

Temperatura de extrusão

A temperatura mantida no interior da cabeça de extrusão, antes do material ser extrudido, designada de temperatura de extrusão, é um parâmetro que está diretamente relacionado com o tipo de material utilizado na impressão [26]. Por exemplo, no caso do PLA a temperatura do bico de impressão varia entre os 180°C e 230°C, já para o ABS a temperatura terá de ser superior e varia entre os 210°C e 250°C [27].

A correta seleção da temperatura é muito importante, pois afeta a viscosidade do material, podendo assim aumentar ou diminuir a fluidez do material do filamento, que por sua vez pode afetar o componente a ser impresso [17].

Bico de impressão ou *noozle*

O bico de impressão tem impacto considerável na largura do cordão, isto porque o diâmetro do bico de impressão influencia a pressão aplicada sobre a linha de material impresso. Este é também um parâmetro que terá influência considerável no tempo de fabricação de uma peça, mas à custa da perda qualidade superficial. Efetivamente, a utilização de bicos de impressão de maior diâmetro leva a que o fluxo de material seja mais elevado e, conseqüentemente, menos linhas de material terão de ser utilizadas na impressão [17].

Largura do cordão

Este parâmetro corresponde ao diâmetro com que a linha de material é extrudida e este diâmetro é determinado por um conjunto de fatores. Varia em função do diâmetro do bico de extrusão, com o caudal de material à saída, com a viscosidade do material, com a

tensão superficial, com as condições de convecção e até com a interação com o bico de extrusão (Figura 13) [28]. O nivelamento de toda a área da plataforma de construção relativamente ao bico de impressão também é um aspeto que pode afetar a largura do cordão. Na medida que quanto maior a proximidade entre o bico de impressão e a plataforma de construção, maior é a pressão sobre o material depositado aumentando desta forma a largura do cordão. Pelo contrário, o afastamento do bico de impressão diminui a largura do cordão, e no extremo pode ocorrer que o material não adira á plataforma, devido a pressão insuficiente sobre o mesmo.

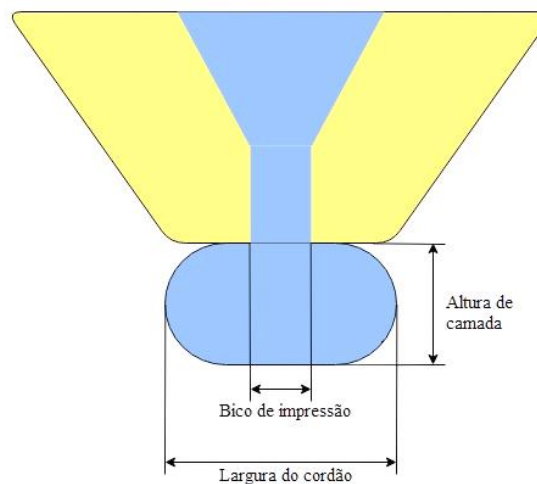


Figura 13 - Representação gráfica da largura do cordão, adaptado de [29].

Contornos de impressão

Um objeto criado a partir de uma impressão FDM pode ser dividido em quatro secções (Figura 14):

- Contornos/paredes: As paredes da impressão que estão expostas ao exterior do objeto.
- Camadas inferiores: Estas também são um contorno, mas estas são as paredes exteriores do modelo que estão voltadas para a plataforma de construção.
- Camadas superiores: Da mesma forma que as camadas inferiores, estas também são um contorno, mas são as paredes exteriores do modelo que estão voltadas para o bico de impressão, sendo estas as últimas a ser impressas.
- Enchimento: A estrutura interna da impressão [24].

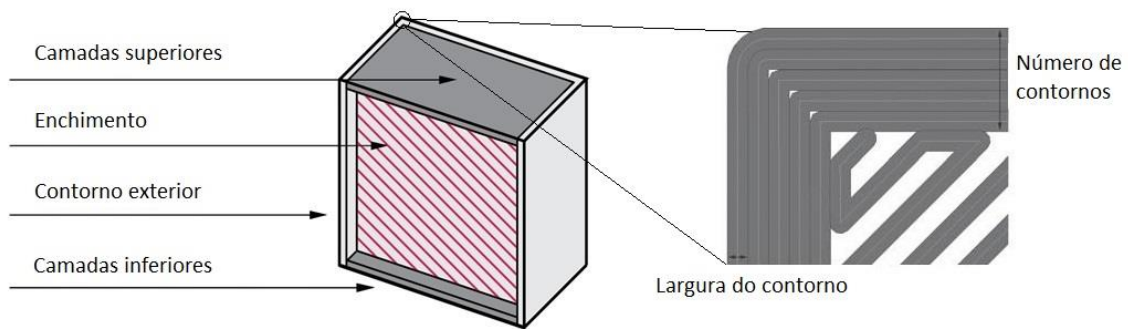


Figura 14 - Representação dos contornos de uma peça impressa, adaptado de [24].

De notar que os contornos da peça são sempre as primeiras zonas por camada a ser impressa, só posteriormente é que se imprime o enchimento. Para além disso, as camadas exteriores podem ser configuradas para ser impressas a uma velocidade mais baixa, de forma a melhorar o acabamento superficial.

Temperatura da plataforma/mesa de construção

Este é um parâmetro que pode não ser configurável para todo o tipo de impressoras, visto que é necessário que a mesma venha equipada com uma plataforma de construção aquecida. No entanto, esta é uma melhoria bastante conveniente, pois ajuda na adesão da primeira camada de material de construção. Para além disso, evita muitas vezes que as peças deformem nas extremidades, algo bastante comum quando a impressão é realizada em ABS e que por isso deve ser realizada, preferencialmente, com uma impressora com a área de trabalho fechada e com uma temperatura da plataforma de construção entre os 80°C e os 110°C. Já no caso do PLA, o uso de uma plataforma aquecida não é indispensável, embora seja aconselhável uma temperatura da plataforma a rondar os 60°C, para garantir uma boa adesão da primeira camada de material [27].

Velocidade da ventoinha de arrefecimento

A variação deste parâmetro tem influência na rapidez com que o material extrudido passa ao estado sólido. Por norma a ventoinha de arrefecimento encontra-se desligada na aplicação da primeira camada, para ajudar na adesão da mesma à área de trabalho.

Tamanho/volume de construção

O tamanho de construção está diretamente relacionado com o tipo de impressora utilizada. Normalmente, impressoras domésticas têm um volume de construção à volta de 200x200x200 mm o que impõe limitações no que diz respeito às peças que podem ser construídas [20].

Estruturas de suporte

Uma impressora 3D FDM funciona depositando camada sobre camada de um material termoplástico para criar um objeto 3D. Por isso, cada nova camada deve ser suportada pela camada abaixo dela. Se o objeto tiver uma saliência ou uma “ponte” (Figura 15) que não é suportada por nada abaixo, existe uma probabilidade elevada que a estrutura colapse sobre si mesma. Desta forma, será necessário colocar estruturas que suportem essas zonas para garantir uma correta impressão [30].

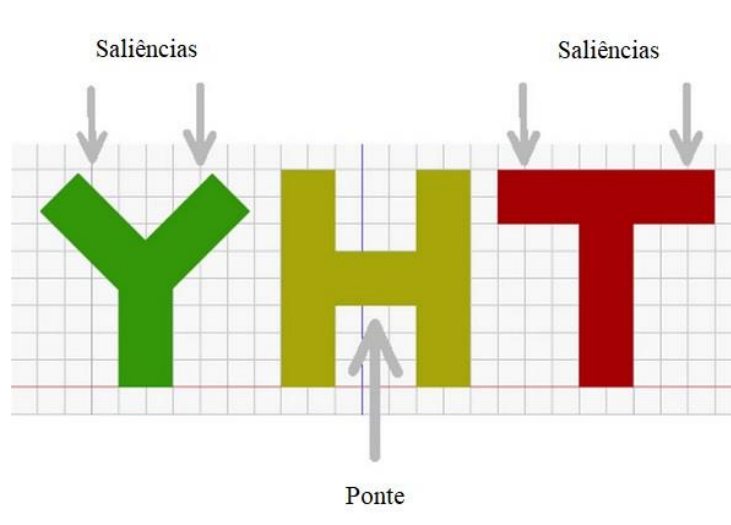


Figura 15 - Exemplo de saliências e “pontes” na impressão das letras Y, H e T [30].

No entanto, nem todas as saliências necessitam de suporte. A regra geral é que se a saliência se inclinar a um ângulo inferior a 45° da vertical (Figura 16) a peça pode ser impressa sem estruturas de suporte.

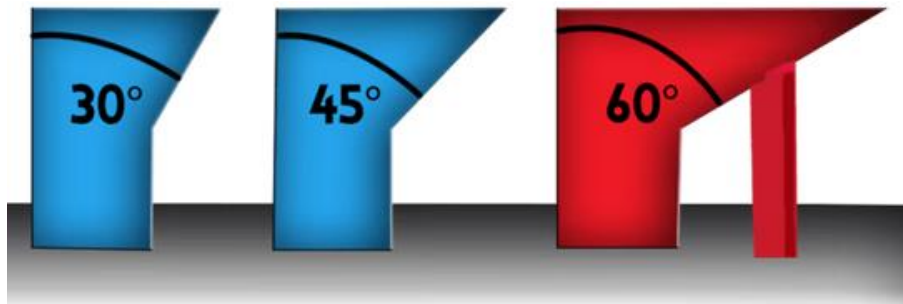


Figura 16 - Estruturas de suporte são necessárias quando o ângulo excede os 45° da vertical [30].



Figura 17 - Resultado final da impressão das letras Y, H e T [30].

No caso de um sistema simples de impressão FDM é provável que este só tenha uma cabeça de extrusão e neste caso, o material no qual serão fabricados os suportes será o mesmo que o constituinte da peça. No caso de sistemas mais complexos, em que existem duas cabeças de extrusão, podemos ter uma que está dedicada à impressão do objeto enquanto a outra está dedicada à impressão das estruturas de suporte. Estas estruturas, por sua vez, podem ser de um material diferente, muitas vezes solúvel, para facilitar a sua remoção no fim do processo de impressão [11].

2.4. Influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas

Existem cada vez mais estudos relacionados com a influência que determinado parâmetro tem na qualidade das peças produzidas através das tecnologias de impressão 3D. Por norma, os estudos apresentados focam-se em parâmetros concretos e sempre associados a um destes métodos de impressão, ou no material que foi utilizado na impressão. No entanto, fazendo uma avaliação destes estudos, pode-se observar que as

conclusões a que chegam não são muitas vezes claras, nem convergem todas no mesmo sentido. Contudo, é normalmente aceite na literatura que, os parâmetros de impressão que têm uma maior influência nas propriedades mecânicas são a orientação de construção, o ângulo de enchimento, a altura de camada e a densidade de enchimento [31].

A orientação de construção, o ângulo de deposição de material e a orientação do enchimento têm influência na anisotropia das peças produzidas e, deste modo, influência na sua resistência mecânica. Estudos efetuados indicam que orientações de construção e enchimento paralelas à direção da aplicação da força traduzem-se numa maior resistência mecânica [28], [31]. Da mesma forma, um ângulo de deposição de material baixo, desde que orientado com a direção do carregamento, irá melhorar a resistência mecânica à tração das peças impressas [32], [33].

Conforme visível na figura 18, caso a carga aplicada seja paralela às camadas esta irá ser suportada pelas linhas de material extrudido (Figura 18b). Pelo contrário, a resistência dos objetos a uma carga aplicada, normal às camadas, irá ser dependente da qualidade da adesão entre as camadas de material (Figura 18a). Ainda assim, existem autores que não chegam à mesma conclusão, quando analisadas as mesmas orientações de enchimento. Em dois casos de estudo verifica-se isso mesmo, para as orientações de enchimento de $0/90^\circ$ e $-45/45^\circ$ [28], [34].

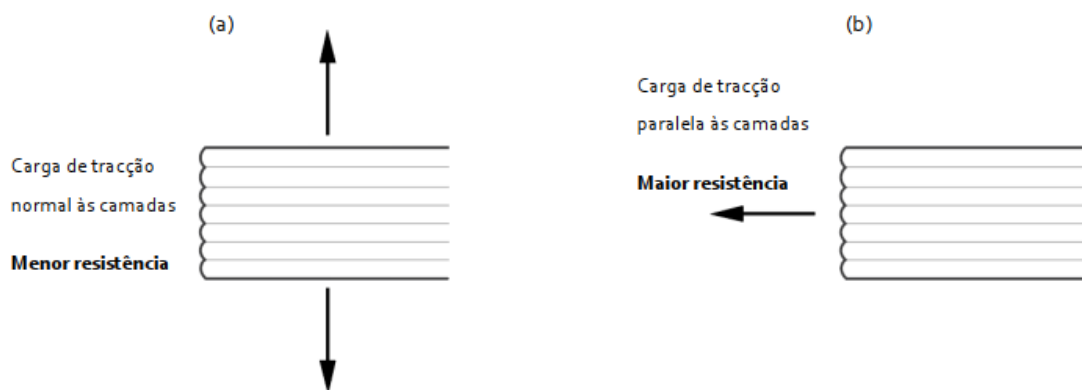


Figura 18 - Representação da carga de tração aplicada (a) segundo a direção normal às camadas e (b) segundo a direção paralela às camadas [28].

Os *Air Gaps* e densidades de enchimento determinam as áreas de contacto entre linhas e camadas de material, ditando a adesão entre as mesmas e, desta forma, a resistência mecânica dos objetos. Estudos nestas áreas indicam que o *Air Gap* deve ser

negativo, para reduzir o espaço entre cordões e aumentar a área de contato. No entanto, é de notar que um *Air Gap* negativo pode também originar irregularidades entre linhas de material adjacente, uma vez que estamos a sobrepor cordões de material um sobre outro e dificultar a dissipação de calor, causando a acumulação de tensões residuais [25], [28], [33].

A maioria dos estudos realizados, em função da densidade de enchimento, sugerem uma relação direta entre a resistência mecânica e o aumento da densidade de enchimento, sendo que para uma densidade de 100% é esperado que o objeto seja totalmente sólido e o mais denso possível, resultando assim no objeto que se comporta melhor a suportar esforços mecânicos (Figura 19). Por outro lado, isto significa que mais material terá que ser utilizado e o tempo de produção será mais elevado, o que se traduzirá num maior custo do processo [28], [34]–[37].

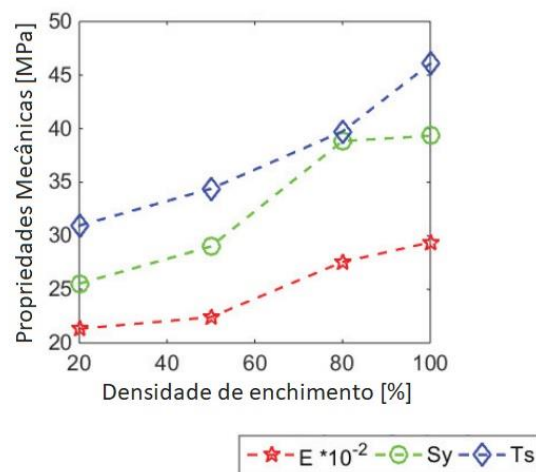


Figura 19 - Propriedades mecânicas em função da densidade de enchimento, onde E é o módulo de elasticidade, S_y é a tensão de cedência e T_s é a Tensão máxima [37].

Por norma, uma peça com uma percentagem de enchimento de 50% quando comparada com uma de 25 % é cerca de 25% mais resistente. Já uma percentagem de enchimento de 75% quando comparada com uma densidade de enchimento de 50% é apenas cerca de 10% mais resistente [25].

A altura de camada é um dos parâmetros que também tem influência nas propriedades mecânicas nas peças impressas. Um dos estudos publicados em 2009 [33], concluiu que um número de camadas superior, isto é, uma altura de camada baixa, resulta num elevado

gradiente térmico em direção à base de impressão, resultante do número elevado de ciclos de aquecimento e arrefecimento, causando desta forma a acumulação de tensões residuais. Por sua vez, estas tensões residuais podem resultar em distorção, delaminação e falhas na produção, diminuindo assim a resistência da peça fabricada. Dos ensaios realizados nesse estudo [33], verificou-se para três valores de altura de camada (0,1270 mm, 0,1780 mm e 0,2540 mm) que o provete que apresentava as piores propriedades mecânicas à tração era o obtido com a altura de camada intermédia e que o mais resistente mecanicamente era o impresso com a maior altura de camada. Outro dos estudos realizados [37] também apresenta resultados em que uma altura de camada superior (neste caso 0,3 mm) apresenta melhores propriedades mecânicas que uma altura de camada inferior (0,1 mm).

Desta forma, a altura de camada será talvez o parâmetro mais difícil de relacionar com a resistência mecânica visto que é possível encontrar outros autores que defendem que uma altura de camada menor tem um efeito benéfico nas propriedades mecânicas, devido ao aumento das áreas de adesão entre camadas e à diminuição dos espaços livres [31], [32], [34], [36], [38], [39].

2.5. Reciclagem na impressão 3D

Devido às melhorias nos métodos de impressão e às velocidades de produção superiores espera-se que a variedade de materiais utilizados continue a aumentar. Contudo, uma quantidade considerável de desperdícios ainda é criada pela impressão FDM, como impressões falhadas, protótipos dispensáveis e estruturas de suporte [40]. Por esta razão a reciclagem tem vindo a assumir um papel mais relevante, na tentativa de eliminar os desperdícios gerados pela produção.

2.5.1. A importância da reciclagem na impressão 3D

Materiais como o PLA e o ABS são usados comumente como materiais de impressão. Como se sabe o PLA é um polímero biodegradável produzido a partir de matérias-primas renováveis, como o amido de milho ou cana-de-açúcar. Além disso, o desperdício gerado por este material pode ser gerido de diferentes formas, como reciclagem, combustão, compostagem ou deposição em aterros. Do ponto de vista do

impacto ambiental, a reciclagem é de longe a melhor alternativa, enquanto a compostagem não é considerada uma solução realista como consequência do tempo de degradação necessário e das condições específicas do processo. Quando comparado com os plásticos à base de petróleo, como o ABS, o PLA apresenta um impacto ambiental significativamente menor [40].

Apesar do PLA ser um material biodegradável, existem já muitos pontos de recolha e programas de reciclagem espalhados um pouco por todo o mundo. A função destes pontos de recolha é reaproveitar os desperdícios de materiais poliméricos e tentar convertê-los em objetos e produtos do quotidiano, dando-lhes nova vida e evitando a sua dispersão no meio ambiente. Para combater o desperdício de material, várias empresas já começaram a comercializar filamento reciclado, produzido a partir de resíduos dos consumidores. Outra alternativa apresentada pelas empresas são extrusoras de filamento domésticas, que permitem que os indivíduos reciclem os seus materiais usando um sistema de bancada, fabricando o seu próprio filamento em casa [41].

2.5.2. Ciclo de reciclagem

Os filamentos utilizados na impressão FDM, são geralmente obtidos a partir de um processo de extrusão. Os materiais começam a sua vida como um granulado ou pó e são colocados dentro de uma extrusora, onde, pela ação da temperatura, são transformados num material homogéneo na forma de um filamento e com parâmetros definidos (diâmetro normalizado) [42].

O ciclo de reciclagem em si começa com as peças ou desperdícios de material resultantes de falhas de impressão, ensaios ou protótipos que, depois de selecionados, seguem para a trituração. Após a trituração, o material processado deve ser seco, de forma a remover a humidade presente e só posteriormente extrudido. Um ciclo comum para processamento de materiais para impressão encontra-se ilustrado na figura 20 [43].

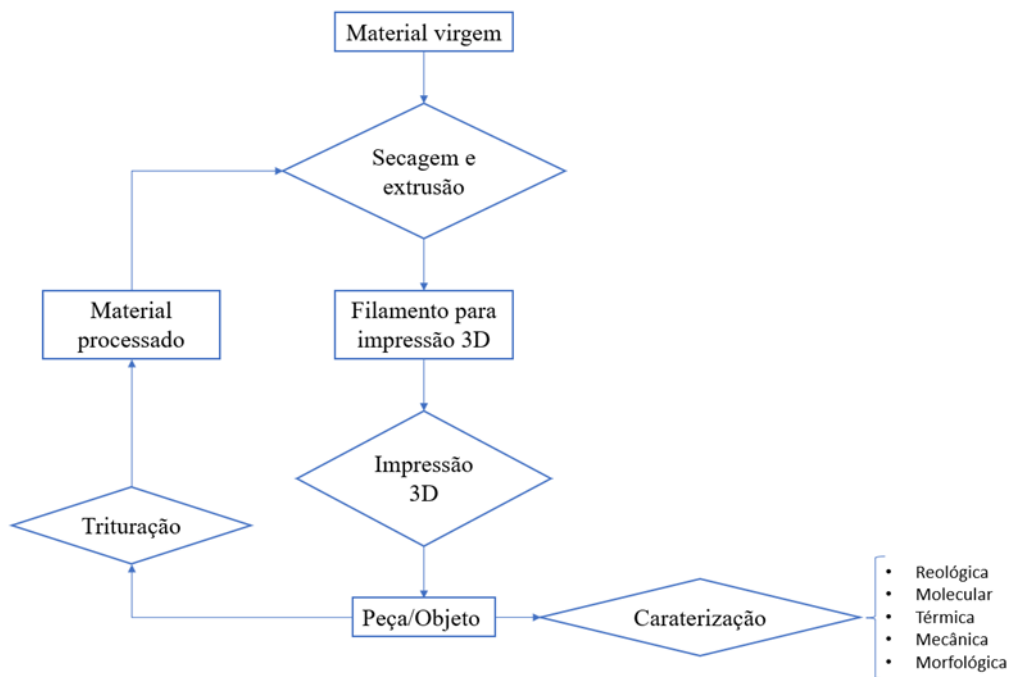


Figura 20 - Ciclo de produção e caracterização do material de impressão, adaptado de [43].

Para a obtenção de um filamento com as dimensões e as propriedades desejadas, os produtores de filamento utilizam equipamentos após a extrusora para manter as tolerâncias desejadas. Na figura 21 é possível observar um exemplo de uma linha de produção de filamento industrial que, para além da extrusora, utiliza dois tanques de água para arrefecimento do material extrudido, um puxador de fio com um laser de medição e secador integrados, um medidor automático de filamento, seguindo-se outro secador e por fim uma máquina de enrolamento automático [44], [45].

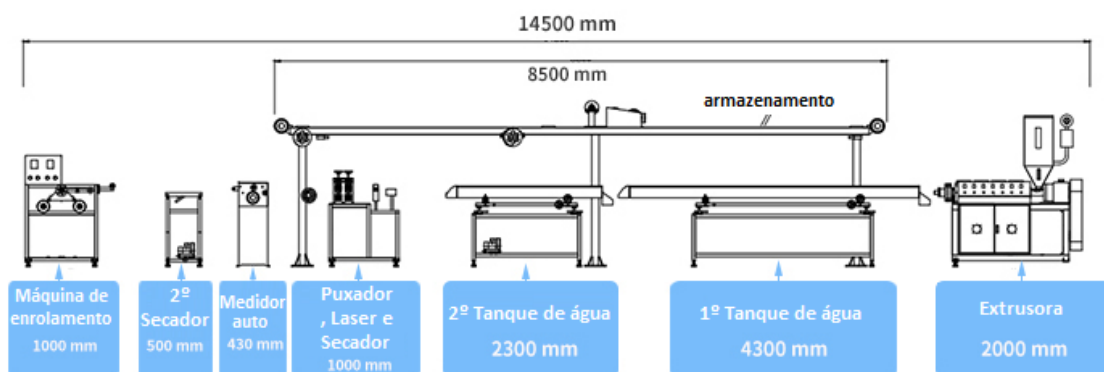


Figura 21 - Exemplo de linha de produção de filamento, adaptado de [45].

2.5.3. Influência da reciclagem nas propriedades mecânicas

Têm começado a surgir estudos nos últimos anos relativamente ao comportamento mecânico de filamentos reciclados, em particular, estudos relacionados com o comportamento do PLA reciclado.

Um dos estudos [46], realizado em 2007, concluiu que o reprocessamento do PLA induz um aumento da cristalização durante o arrefecimento que será progressivamente maior com o aumento do número de ciclos. Desta forma, foi observado que, ao fim de 7 ciclos, o módulo de elasticidade do PLA se mantinha aproximadamente constante, enquanto a tensão máxima diminuiu de 66 MPa para 25 MPa. Este decréscimo foi atribuído a uma menor coesão do material resultante de um menor emaranhamento entre as cadeias poliméricas. Também foi observada uma diminuição na extensão na rotura, passando esta de 6% para 0,8%. Esta redução pode ser justificada com o aumento da cristalinidade do PLA, fator que favorece a propagação de fissuras acima do limite elástico. Outros parâmetros avaliados neste estudo foram as propriedades térmicas, a dureza, a viscosidade e o peso molecular. Tendo-se concluído que os ciclos de reciclagem têm uma grande influência na variação destes parâmetros.

Num outro estudo [41], publicado em 2017, foram utilizados provetes produzidos através de uma impressora 3D FDM, para estudar as propriedades mecânicas de PLA virgem comparativamente com PLA reciclado. Conforme a tabela 2, concluiu-se que a tensão de cedência diminuiu de 40,43 MPa, no material virgem para 35,85 MPa no material reciclado e que o módulo de elasticidade diminuiu de 4258 MPa para 4032 MPa.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas à tração de amostras impressas em PLA virgem e PLA reciclado [41].

	PLA virgem	PLA Reciclado
Número de amostras	25	25
Tensão de cedência média (MPa)	40,43	35,85
Desvio padrão	1,849	3,348
Módulo de elasticidade médio (MPa)	4258	4032
Desvio padrão	260	498

Um dos estudos [47] mais recentes, publicado em 2020, veio comprovar que as propriedades mecânicas à tração sofrem uma degradação com o aumento do número de ciclos de reciclagem. Conforme ilustrado, na figura 22, verificou-se que a resistência à tração diminuiu 36,9%, 39,1% e 69% para o primeiro, segundo e terceiro ciclos de reciclagem respectivamente.

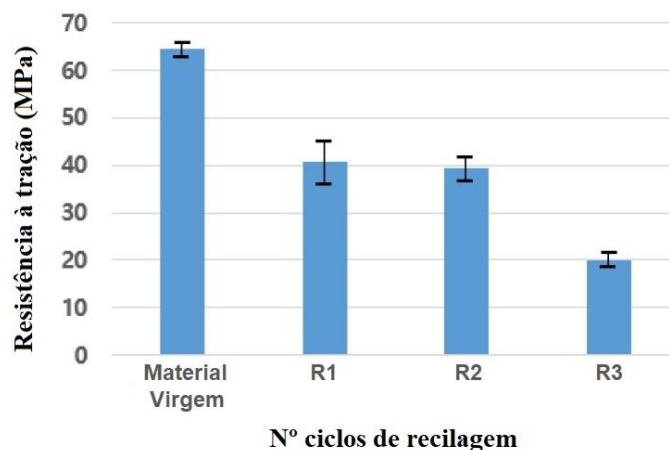


Figura 22 – Comparação da resistência à tração de acordo com o número de ciclos de reciclagem [47].

2.6. Tratamento térmico em peças impressas 3D

Um dos processos utilizados na etapa de pós-processamento de objetos fabricados por impressão 3D são os tratamentos térmicos. Efetivamente, tratamentos térmicos como o recozimento (*annealing*) são vulgarmente utilizados em metais e ligas metálicas com a finalidade de aumentar a sua ductilidade e maleabilidade, pelo que é expectável que este tipo de tratamentos conduza também à modificação das propriedades do material impresso, tanto mecanicamente como quimicamente [48].

Esta temperatura, em que o material inicia tais alterações, é denominada de temperatura de transição vítrea (T_g), definida como a temperatura à qual um material amorfo se transforma reversivelmente dum estado duro e relativamente rígido para um estado “borrachoso” (equivalente a um líquido ultra-viscoso). Assim, a esta temperatura um objeto impresso mantém a sua forma, mas é amolecido e existem mudanças ao nível da estrutura atômica [49].

A maioria dos materiais utilizados na impressão 3D são polímeros, ou seja, cadeias moleculares longas e repetitivas, resultantes da união de muitas unidades de moléculas pequenas (monómeros). Os polímeros podem apresentar dois tipos de estruturas moleculares: serem amorfos, caso em que apresentam estruturas moleculares desorganizadas, ou semicristalinos e cristalinos com as estruturas moleculares parcialmente ou totalmente organizadas (Figura 23). Por norma, as estruturas totalmente cristalinas, como por exemplo o diamante, são mais duras e rígidas, enquanto estruturas amorfas ou semicristalinas, como a generalidade dos polímeros, tendem a ser mais elásticas e flexíveis [49].

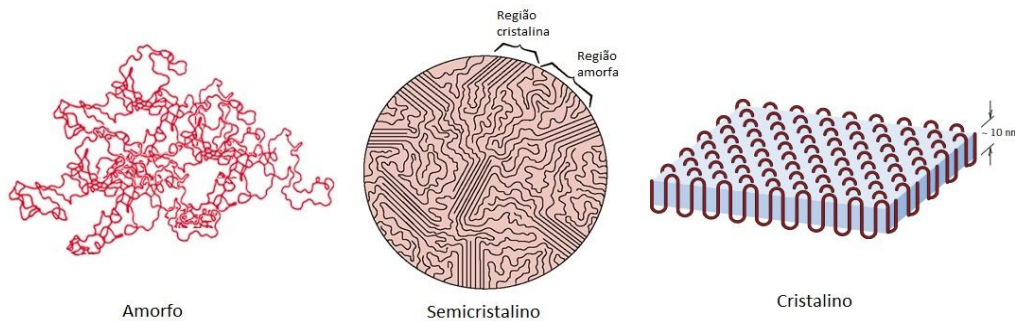


Figura 23 – Representação de estruturas moleculares das cadeias poliméricas, adaptado de [50].

Para melhorar as propriedades mecânicas é assim necessário reorganizar as suas cadeias moleculares para as tornar mais organizadas e semelhantes aos materiais cristalinos. A temperatura a que o aquecimento é realizado tem influência na reorganização. Esta deve ser superior à temperatura de transição vítrea, mas inferior à temperatura de fusão. De notar que, quando se aquecem materiais cristalinos estes, chegando a uma determinada temperatura, liquefazem, atingindo o ponto de fusão, altura em que a estrutura molecular é quebrada e as suas moléculas se movem livremente (Figura 24). Pelo contrário, no caso de materiais amorfos, não existe um ponto de fusão exato, verificando-se um amolecimento gradual em vez de passarem ao estado líquido imediatamente [49].

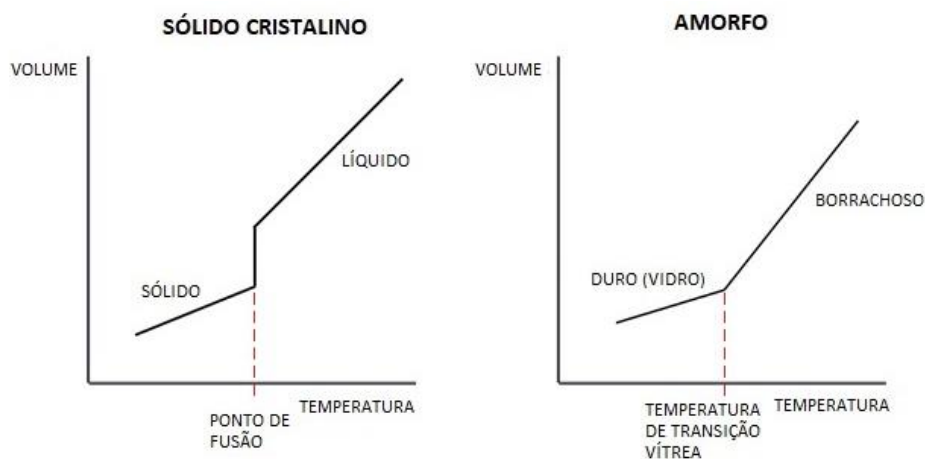


Figura 24 – Diferenças entre um material cristalino e um amorfo, adaptado de [49].

Tipicamente, conforme a tabela 3, o PLA inicia a sua transição vítrea aos 65 ° C e, à medida que a temperatura vai sendo aumentada, o material torna-se mais pastoso. Assim sendo, quanto maior a temperatura, mais camadas individuais se fundem aumentando posteriormente a resistência do objeto. No entanto, há que ter em consideração que ao ser aquecido o material pode deformar, com redução das suas dimensões e, para temperaturas suficientemente elevadas, o desenvolvimento do estado “borrachoso” pode mesmo conduzir ao colapso do objeto impresso [49].

Tabela 3 – Temperaturas de transição vítrea e de impressão para materiais comuns na impressão [49].

Material	Temperatura de transição vítrea (T_g)	Temperatura de impressão (próxima de fusão)
PLA	65 °C	215 °C
PETG	75 °C	230 °C
ABS	105 °C	255 °C

Portanto, a escolha da temperatura ideal para um tratamento térmico é de extrema importância, tendo de se estabelecer um compromisso entre obter as melhores propriedades mecânicas e melhor precisão dimensional. A título de exemplo, apresenta-se na figura 25 o efeito da temperatura de recozimento nas características dimensionais de diferentes polímeros [48].



Figura 25 – Exemplos de mudanças dimensionais após o recozimento [48].

Influência do tratamento térmico nas propriedades mecânicas

Ainda foram poucos os estudos realizados nesta área, em particular quando associada à impressão 3D, principalmente devido à grande desvantagem que este método de pós-processamento induz: a variação dimensional.

Ainda assim, os estudos convergem nos resultados e verifica-se, principalmente para o PLA, que um recozimento aumenta de forma significativa a tensão que o material consegue suportar antes de fraturar.

Como é possível observar, no estudo realizado na figura 26 [49], onde se representa a carga máxima à tração que diferentes polímeros suportam antes da fratura, o PLA é o material para o qual a melhoria das propriedades com o recozimento é mais significativa, verificando-se um aumento da força máxima a partir dos 70 °C. O PETG foi o segundo melhor, melhorando para temperaturas superiores a 110 °C, embora o recozimento a 70-90 °C tivesse tido efeito oposto, degradante. Comportamento semelhante também pode ser observado para o ABS, embora a carga máxima seja cerca de 300 N menor. O ASA (*Acrylonitrile Styrene Acrylate*) sem tratamento térmico tem valores semelhantes ao PETG, embora, ao contrário do PETG, o ASA praticamente não apresente melhoria com o aumento das temperaturas de recozimento.

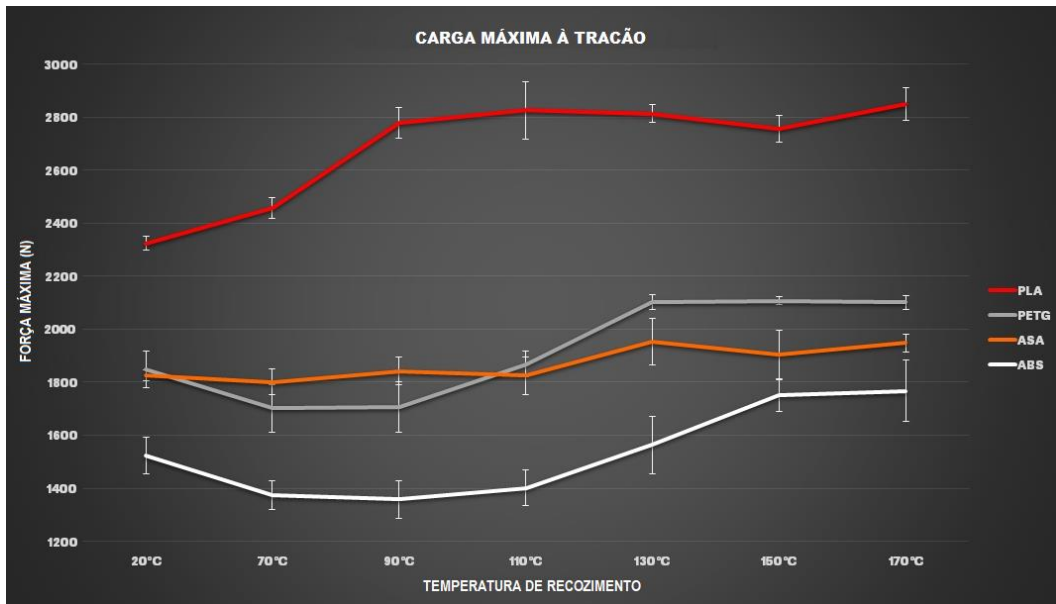


Figura 26 – Resultados verificados após o recozimento, adaptado de [49].

Da mesma forma, no estudo realizado na figura 27 [51], concluiu-se que a resistência à tração do PLA melhora com o aumento da temperatura e tempo de recozimento, até aos 100 °C, sofrendo um ligeiro decréscimo nos testes realizados a 120 °C.



Figura 27 – Influência do recozimento no valor médio de resistência à tração, adaptado de [51].

3. Procedimento experimental

Como referido anteriormente, os objetivos principais deste trabalho são o estudo da influência dos ciclos de reciclagem e dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas de peças impressas. A forma mais direta de calcular essas propriedades é através da realização de ensaios à tração, com provetes normalizados. Ao longo deste capítulo são apresentados os equipamentos e procedimentos utilizados, nos estudos realizados.

3.1. Equipamento de impressão

Em primeiro lugar, foi necessário definir qual o equipamento de impressão a ser utilizado, tendo-se optado pela impressora Hello Bee Prusa, pertencente à Oficina Digital (ODI) do ISEL. Na figura 28 é apresentada uma fotografia da mesma. Esta impressora, possui duas cabeças de extrusão, das quais apenas uma foi utilizada, uma área de trabalho aquecida e um volume de impressão de 185x200x190 mm. O bico de impressão instalado na impressora tem um orifício de 0,4 mm, o qual foi utilizado na impressão dos provetes.

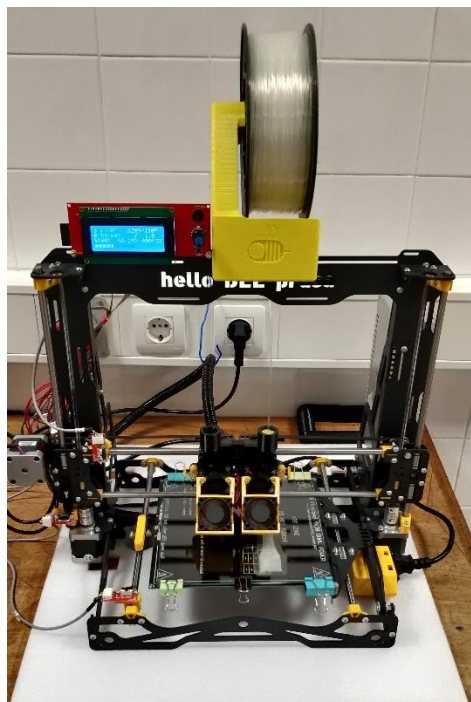


Figura 28 – Impressora FDM Hello Bee Prusa.

Como *software* de laminação foi utilizado o Ultimaker® Cura v.4.13, um dos *softwares* recomendados pelo fabricante da impressora e também um dos mais utilizados em todo o mundo.

3.2. Seleção do material

Neste estudo, e na seleção do material para FDM, as principais características consideradas foram os custos de aquisição do material e a facilidade de impressão. Desta forma optou-se pelo PLA, dado que, a par com o ABS, este é um dos materiais mais acessíveis para aquisição, e é mais fácil de imprimir, não sendo obrigatório, mas recomendada uma mesa aquecida para evitar deformações. Adicionalmente, a impressão do PLA exige uma temperatura mais baixa que o ABS, necessitando assim de menor energia para a impressão e é um material produzido a partir de matérias-primas renováveis, como amido de milho e cana-de-açúcar, sendo também por isso biodegradável [27].

Assim sendo, o material selecionado para os primeiros testes foi PLA 3D850 da Tucab®, na cor natural. Na seleção deste material foi considerada a ausência de corantes, para não alterar as propriedades mecânicas e o facto de o fabricante indicar que este é um material adequado para ser sujeito a um tratamento térmico. A ficha com as especificações técnicas do fabricante pode ser encontrada no Anexo A.

Posteriormente, foi utilizado na produção de novos provetes o EasyFil™ PLA da FormFutura®, na cor branca. Os motivos que levaram a esta seleção foram o facto de a cor natural não estar disponível, bem como o facto de que quando observados ao microscópico digital, as linhas de filamento depositadas e a união entre as mesmas eram pouco perceptíveis nos objetos de cor natural (Figura 29).

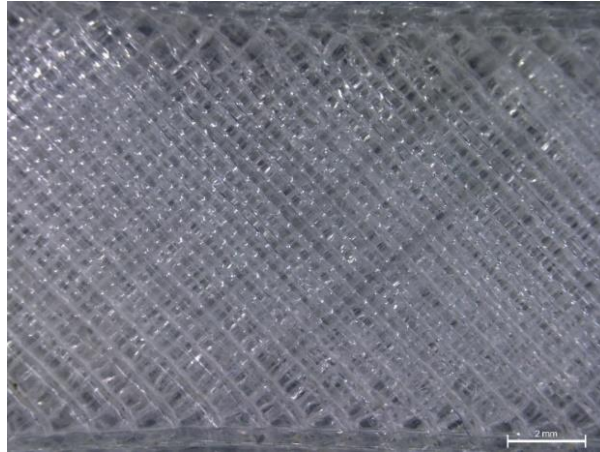


Figura 29 – Observação ao microscópio digital de um provete feito de PLA natural.

Para além disso, esta marca apresentava um filamento reciclado, feito a partir deste mesmo filamento, dos desperdícios gerados na produção. Este novo filamento, ReForm™ rPLA da FormFutura®, foi utilizado como exemplo do que seria um filamento reciclado e foi submetido aos mesmos testes que o material virgem. As fichas com as especificações técnicas do fabricante podem ser encontradas nos Anexos B e C.

3.3. Ensaio de tração uniaxial

Conforme o nome indica, o ensaio de tração uniaxial consiste na aplicação de uma força de tração numa única direção sobre um provete ou um corpo de prova padrão. Por norma, o equipamento possui duas amarras, uma fixa e uma móvel, onde são fixados os provetes, movendo-se a uma velocidade constante. Desta forma, promove-se a deformação do material na direção do esforço alongando-o até à fratura.

Durante a realização do ensaio, o equipamento vai recolhendo os valores da força aplicada sobre o provete (F) e o valor da deslocação da amarra (Δl). Os valores de tensão (σ) e extensão (ε) nominais são calculados através das equações 1 e 2 respetivamente:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

onde S_0 representa a área da secção inicial, l_0 representa o comprimento inicial do provete e Δl representa a variação final no comprimento do provete.

Na figura 30, apresenta-se uma curva Tensão-Extensão típica de materiais dúcteis [52] a partir da qual se podem determinar as principais propriedades mecânicas dos materiais. Conforme é possível observar o gráfico apresenta uma zona inicial, onde o andamento σ vs. E é linear. Nesta zona o provete encontra-se no regime elástico, onde as deformações são reversíveis, e dela é possível calcular o Módulo de Elasticidade ou Young através da equação 3, também conhecida como lei de Hooke:

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

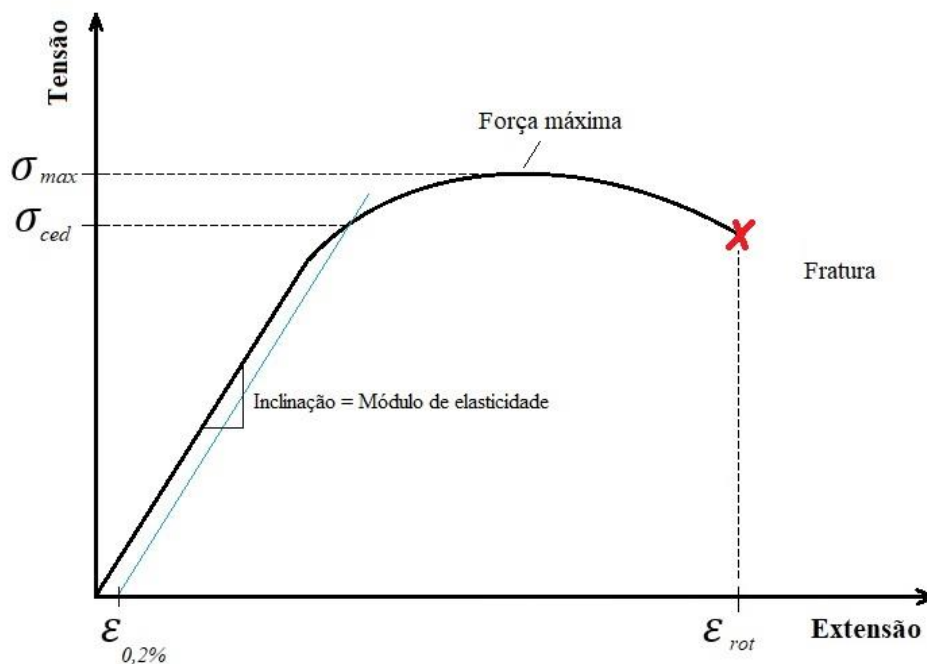


Figura 30 - Exemplo de um gráfico Tensão Extensão obtido num dos ensaios.

Já a tensão de cedência (σ_{ced}), valor que corresponde à transição entre o domínio elástico e plástico, é definida como o valor de tensão para o qual já ocorreu uma deformação plástica de 0,2%. A tensão de cedência é assim determinada através da

interceção de uma reta paralela à região elástica, passando pelo ponto correspondente à extensão de 0,2%, com a linha do gráfico (Figura 30).

Finalmente, do diagrama tensão nominal-extensão nominal, é possível também determinar o valor da tensão máxima (σ_{max}) também conhecida como tensão de rotura à tração que corresponde ao ponto máximo da curva, onde é registada a força máxima (F_{max}) suportada pelo provete e é calculada através da equação 4:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (4)$$

A extensão na rotura (ϵ_{rot}) foi obtida para o ponto do gráfico em que se regista a fratura do provete e onde se observa o valor máximo que o provete alongou (Figura 30). Este fator é importante quando se pretende analisar o alongamento que o provete pode suportar antes de ocorrer a falha e desta forma classificar qual a ductilidade do material,

$$\epsilon_{rot} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (5)$$

onde l_f representa o comprimento final do provete imediatamente antes da rotura.

3.3.1. Equipamento de ensaios

Os ensaios de tração uniaxial foram realizados numa máquina de testes universal Shimadzu® AG-IS. O *software* de comunicação entre máquina e computador foi o Trapezium 2™, no qual foram definidos parâmetros como o tipo de ensaio, as unidades, as dimensões do provete (comprimento, espessura e largura da secção transversal), velocidade de ensaio, taxa de amostragem e as propriedades que desejamos obter. O equipamento de ensaio e a interface de utilização do *software* são apresentados na figura 31.



Figura 31 - Máquina de testes Shimadzu® AG-IS (esquerda); Software Trapezium 2™ (direita).

Nos ensaios realizados foi necessário definir que o teste seria um ensaio à tração, seriam utilizadas unidades do Sistema Internacional (SI), a polaridade da força seria *Standard* e a direção da força seria para cima, visto que a amarra superior era a que se movia.

As características da célula de carga já se encontravam carregadas, tendo esta um limite de carga até 10 kN. Definiu-se a velocidade de ensaio como 5 mm/min, conforme indicado pela norma ASTM D368-14: *Standard Test Method for Tensile Plastics Properties*, capítulo 8 [53]. A taxa de recolha de dados pelo equipamento foi definida para a cada meio segundo registar o valor da força e do deslocamento observado. As propriedades mecânicas que foram consideradas relevantes para estudo foram a tensão máxima, a tensão de cedência, o módulo de elasticidade e a extensão na rotura.

Antes do teste se iniciar foi também necessário definir a geometria dos provetes a ensaiar, a qual se encontra descrita no subcapítulo seguinte.

3.3.2. Geometria dos provetes

A geometria dos provetes impressos foi baseada no capítulo 6 da norma ASTM D368-14, já referenciada anteriormente, e indica que para materiais plásticos rígidos e

semirrígidos os provetes devem seguir a geometria do tipo 1 (Figura 32), com as dimensões apresentada na tabela 4.

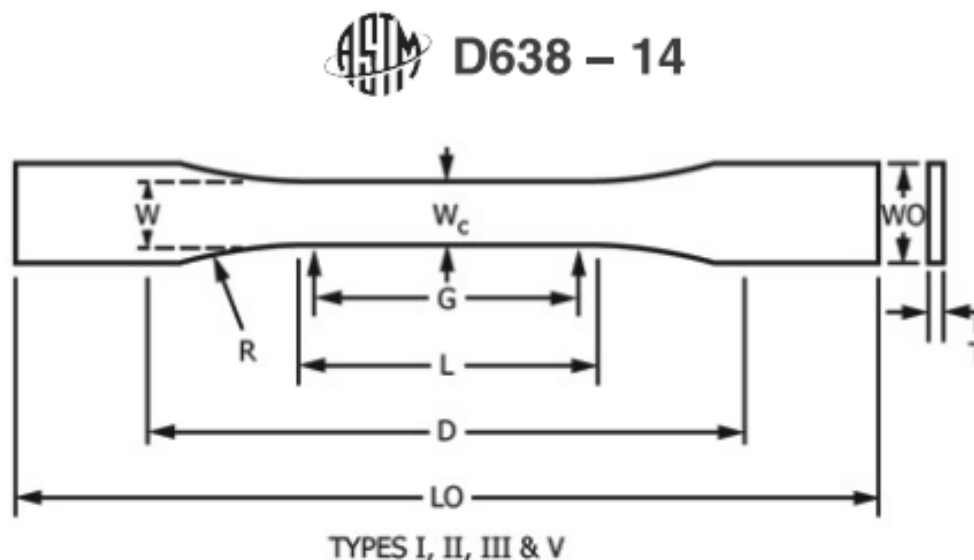


Figura 32 - Geometria dos provetes selecionados [53].

Tabela 4 - Dimensões selecionadas para os provetes.

	Tipo I (Norma)	Tolerâncias (mm)	Dimensões selecionadas (mm)
W (mm)	13	±0,5	13
L (mm)	57	±0,5	57
WO (mm)	19	+6,4	24,5
LO (mm)	165	sem máximo	165
D (mm)	115	±5	115
R (mm)	76	±1	76
T (mm)	3,2 a 7	±0,4	3,2 e 7

Os modelos tridimensionais dos provetes foram construídos no *software* de modelação 3D SolidWorks® Student Edition 2022, com a geometria e as dimensões indicadas na figura 32 e tabela 4 respetivamente. Estes foram guardados como ficheiros no formato STL, a partir do qual o *software* de laminação Cura já faz a leitura.

As dimensões indicadas acima, nomeadamente a largura (W), a espessura (T) e o comprimento da área de teste (L), foram também introduzidas no *software* do equipamento de ensaios, para permitir o cálculo dos valores de tensão (eq. 1) e extensão

(eq. 2) e determinar as propriedades mecânicas requeridas. Os desenhos técnicos dos provetes utilizados são apresentados no apêndice A.

3.4. Provetes em PLA 3D850

Os testes iniciais foram realizados a partir de um provete com uma espessura (T) de 3,2 mm e no material PLA 3D850 da Tucab® sem pigmento. Optou-se por selecionar a menor espessura possível para os provetes, de acordo com a norma, com o intuito de minorar os tempos de impressão bem como o gasto de material. O principal objetivo destes testes foi perceber quais seriam os parâmetros ótimos para impressão que conduzissem ao objeto impresso mais resistente mecanicamente.

3.4.1. Seleção dos parâmetros a analisar

Os parâmetros de impressão 3D analisados neste trabalho foram selecionados com base na revisão bibliográfica apresentada no subcapítulo 2.4, tendo em conta os seguintes aspetos: verificar a sua influência nas propriedades mecânicas do objeto impresso, otimizando o processo de impressão; corroborar alguns dados da literatura que não são consensuais, tendo, mesmo em certos casos, sido obtidas conclusões contraditórias pelos vários autores. Como tal foram escolhidos três parâmetros que são considerados ter relevância nas propriedades mecânicas de peças impressas.

Em primeiro lugar definiu-se a densidade de enchimento como uns dos parâmetros a analisar. Conforme indicado na revisão bibliográfica, vários autores demonstraram que a densidade de enchimento é um dos parâmetros que mais influência tem na resistência mecânica de componentes impressos. Regra geral, quanto maior é a densidade de enchimento melhor é a resistência mecânica.

Em segundo lugar selecionou-se a altura de camada. Este parâmetro, para além de influenciar as propriedades mecânicas, é também um dos parâmetros que mais afeta a qualidade superficial das peças fabricadas. Para além disso, as conclusões dos estudos realizados à data parecem não ser consensuais tornando-se por isso importante clarificar o papel deste parâmetro. Por último selecionou-se a orientação de enchimento como

parâmetro a analisar, dado que os dois principais estudos referenciados na revisão bibliográfica chegaram a conclusões contraditórias para os mesmos valores.

Contudo é importante notar que, tendo esta dissertação um caráter experimental, existiram algumas limitações aos estudos realizados. Com efeito, o tempo de impressão dos provetes, a quantidade de material disponível, os ensaios de todos os provetes, as tentativas do ciclo de reciclagem e os tratamentos térmicos limitaram o número de experiências que se podiam realizar. Assim, como se pode observar na tabela 5, optou-se por analisar os seguintes níveis, para os parâmetros acima indicados.

Tabela 5 - Parâmetros a analisar e respetivos níveis com material PLA 3D850.

		Níveis						
		40	50	60	70	80	90	100
Fatores	Densidade de enchimento (%)	40	50	60	70	80	90	100
	Altura de camada (mm)	0,1	0,2	0,3				
	Orientação de enchimento (°)	0/90	-45/45					

Para facilitar a interpretação dos fatores e respetivos níveis, foi criada a seguinte matriz (Tabela 6) onde são visíveis todas as combinações do caso de estudo.

Tabela 6 - Experiências realizadas e parâmetros selecionados com material PLA 3D850.

Experiência	Densidade de enchimento (%)	Altura de camada (mm)	Orientação de enchimento (°)
1	40	0,1	0/90
2	40	0,1	45/-45
3	40	0,2	0/90
4	40	0,2	45/-45
5	40	0,3	0/90
6	40	0,3	45/-45
7	50	0,1	0/90
8	50	0,1	45/-45
9	50	0,2	0/90
10	50	0,2	45/-45
11	50	0,3	0/90
12	50	0,3	45/-45
13	60	0,1	0/90

Experiência	Densidade de enchimento (%)	Altura de camada (mm)	Orientação de enchimento (°)
14	60	0,1	45/-45
15	60	0,2	0/90
16	60	0,2	45/-45
17	60	0,3	0/90
18	60	0,3	45/-45
19	70	0,1	0/90
20	70	0,1	45/-45
21	70	0,2	0/90
22	70	0,2	45/-45
23	70	0,3	0/90
24	70	0,3	45/-45
25	80	0,1	0/90
26	80	0,1	45/-45
27	80	0,2	0/90
28	80	0,2	45/-45
29	80	0,3	0/90
30	80	0,3	45/-45
31	90	0,1	0/90
32	90	0,1	45/-45
33	90	0,2	0/90
34	90	0,2	45/-45
35	90	0,3	0/90
36	90	0,3	45/-45
37	100	0,1	0/90
38	100	0,1	45/-45
39	100	0,2	0/90
40	100	0,2	45/-45
41	100	0,3	0/90
42	100	0,3	45/-45

3.4.2. Seleção dos parâmetros fixos

Os parâmetros acima indicados são apenas um pequeno número de um conjunto muito extenso de fatores que podem ser alterados no *software* de laminação Cura. No entanto, de forma a minimizar a influência de outros fatores externos, estes serão os únicos parâmetros a variar, enquanto todos os restantes parâmetros no *software* serão fixos. A seleção dos parâmetros fixos, foi baseada em valores recomendados pelo

software para a impressora utilizada, uma vez que este reconhece todas as características da impressora.

A tabela 7 resume os principais parâmetros fixos e que foram referidos no subcapítulo 2.3.3., mas também outros que foram considerados relevantes como a “Retração de filamento”, que recolhe filamento entre movimentos da cabeça de extrusão quando esta não está a imprimir, para evitar que este escorra do bico de impressão. As estruturas de suporte foram desativadas, pois o provete foi impresso numa orientação (Figura 33) que dispensa a sua utilização. As velocidades de impressão encontram-se divididas nas várias partes que constituem a peça, sendo mais baixas nas zonas expostas ao exterior, de forma a se obter um melhor acabamento superficial.

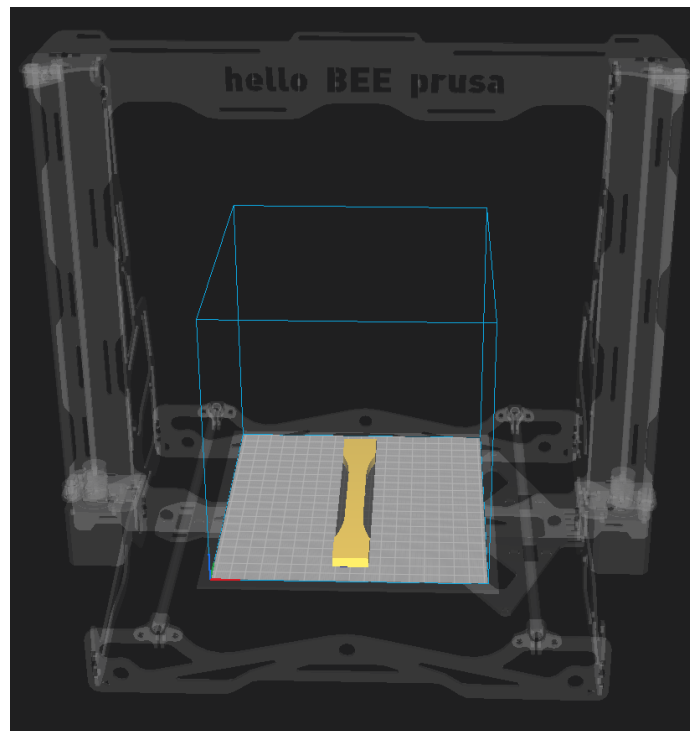


Figura 33 - Representação da orientação do provete na base de construção.

Tabela 7 - Parâmetros fixos introduzidos no Cura.

Espessura da camada inicial (mm)	Igual à altura de camada
Ângulo de deposição de material (°)	Igual à orientação de enchimento
Orientação de construção	Na direção x
Bico de impressão (mm)	0,4
Largura do cordão (mm)	0,4
Espessura dos contornos/paredes (mm)	1,2
Espessura dos contornos superiores e inferiores (mm)	1,2
Velocidade da primeira camada (mm/s)	30
Velocidade da última camada (contorno superior) (mm/s)	30
Velocidade dos contornos/paredes exteriores (mm/s)	30
Velocidade de enchimento (mm/s)	60
Velocidade dos contornos/paredes interiores (mm/s)	60
Temperatura de extrusão (°C)	210
Temperatura da plataforma de construção (°C)	60
Retração de filamento	Sim
Distância de retração de filamento (mm)	5
Retração de filamento na mudança de camada	Sim
Velocidade de retração (mm/s)	70
Ventoinha de arrefecimento desligada na 1ª camada	Sim
Estruturas de suporte	Não

3.5. Ciclo de reciclagem

Terminados os ensaios acima descritos, existia uma grande quantidade de provetes que após o seu uso seriam descartados como desperdício. Deste modo, decidiu-se adotar uma mentalidade de desperdício zero e reaproveitar o material utilizado na fabricação dos provetes e convertê-lo em filamento reciclado com o qual seriam impressos novos provetes. Este processo incluiu os seguintes passos:

3.5.1. Trituração

O processo de reciclagem selecionado começa com a trituração dos provetes fraturados nos ensaios de tração uniaxial, para obtenção de um granulado, com qual a extrusora consiga trabalhar. Caso a granulometria fosse inadequada, com fragmentos de

grandes dimensões, a extrusora teria dificuldade em fundir os mesmos e possivelmente não conseguiria alimentar-se, causando um congestionamento.

A trituradora utilizada neste trabalho foi a versão Basic do projeto Precious Plastic (Figura 34), pertencente ao Laboratório Precious Plastic da UDIP Marvila, Centro de Promoção Social da Prodac da SCML. O resultado obtido da trituração dos provetes é visível na figura 34 e será este mesmo que é fornecido à extrusora.



Figura 34 - Trituradora Basic (esquerda); Granulado resultante da trituração (direita).

Esta trituradora apresenta laminas de corte com uma espessura de 5 mm e uma peneira inferior, com orifícios de 5 mm de diâmetro, que permite separar os fragmentos de menor granulometria. Dada a dimensão dos provetes foi necessário numa primeira fase triturar o material sem a peneira, de forma a evitar congestionamentos entre a peneira e as laminas. Para além disso, e devido à baixa temperatura de transição vítrea do PLA, foi também necessário arrefecer a zona das laminas com uma ventoinha, uma vez que a temperatura gerada pela fricção da rotação das laminas em contato com o material, fazia com que este se unisse causando um aglomerado o qual causava o encravamento da máquina.

Após a última trituração e de forma a se manter a humidade baixa do granulado obtido na trituração, este foi armazenado dentro de um contentor plástico com gel de sílica, até ao processo de extrusão.

3.5.2. Extrusão

Com o material resultante da trituração, queremos que o granulado passe a um filamento capaz de ser utilizado na impressão FDM. Neste caso em concreto um filamento com uma espessura constante de $1,75 \pm 0,05$ mm. Este processo é executado recorrendo a uma máquina denominada de extrusora. A extrusora utilizada neste trabalho foi uma Filastruder v1.6 pertencente à Oficina Digital do ISEL, ilustrada na figura 35.

De forma simplificada esta extrusora é composta por um motor elétrico ligado a uma caixa redutora que, por sua vez se encontra conectado a um fuso. O fuso trabalha dentro de uma tubagem de metal. O material em forma de grãos é alimentado através de um funil de alimentação, o qual através de um corte no tubo permite que o mesmo entre para dentro do fuso. Através da ação rotativa do fuso o material é empurrado até à extremidade da tubagem onde se encontra uma resistência elétrica. Esta resistência é controlada por um controlador de temperatura PID (*Proportional Integral Derivative*) que, por meio de um termopar localizado junto da resistência obtém informação da temperatura, permitindo assim manter a temperatura desejada. No final da tubagem encontra-se uma matriz, neste caso com um orifício circular, de modo que o resultado de todo este processo seja a extrusão de um filamento. Ainda é possível observar que a extrusora contém uma ventoinha para ajudar no arrefecimento do filamento recém extrudido, fazendo com que este mantenha a forma. O filamento extrudido é direcionado para o chão e desta forma, o próprio peso irá executar uma força de tração que irá puxar o mesmo à saída da matriz.



Figura 35 - Extrusora Filastruder v1.6.

Pode verificar-se, na figura 35, que a extrusora utilizada à saída do bocal apresenta uma espiral de fio enrolado. Este foi colocado com o intuito de direcionar o filamento em direção ao solo e longe da ventoinha.

3.6. Provetes em EasyFil™ PLA e ReForm™ rPLA

Da mesma forma que nos testes aos provetes do material PLA 3D850, os testes aos materiais EasyFil™ PLA e ReForm™ rPLA foram realizados com um provete de geometria normalizada (ASTM D368-14), mas neste caso com uma espessura (T) de 7 mm.

3.6.1. Seleção dos parâmetros a analisar

À semelhança dos testes com os provetes em PLA 3D850, mas mais restringidos pelo tempo, optou-se por estudar os mesmos parâmetros. No entanto, a abordagem foi diferente e os níveis analisados foram os seguintes:

Tabela 8 - Parâmetros a analisar e respectivos níveis com material EasyFil™ PLA.

Fatores	Níveis				
	Densidade de enchimento (%)	10	30	50	70
	Altura de camada (mm)	0,1	0,2	0,3	
	Orientação de enchimento (°)	0/90	-45/45		

De notar que nestes ensaios foram analisados dois níveis de densidades de enchimento inferiores (10% e 30%) às testadas nos ensaios aos provetes em PLA 3D850, pois queria-se visualizar uma maior relevância da densidade de enchimento nos resultados. Os níveis de densidades de enchimento mais elevados não foram considerados pois estes eram mais morosos a imprimir e de maior dificuldade de observação ao microscópio digital.

Tabela 9 - Experiências realizadas e parâmetros selecionado.

Experiência	Altura de camada (mm)	Orientação de impressão (°)	Densidade de enchimento (%)
43	0,1	45/-45	10
44	0,2	45/-45	10
45	0,3	45/-45	10
46	0,1	45/-45	30
47	0,2	45/-45	30
48	0,3	45/-45	30
49	0,1	45/-45	50
50	0,2	45/-45	50
51	0,3	45/-45	50
52	0,1	45/-45	70
53	0,2	45/-45	70
54	0,3	45/-45	70
55 ^(*)	0,1	0/90	30
56 ^(*)	0,2	0/90	30
57 ^(*)	0,3	0/90	30
R1 ^(*)	0,3	0/90	30

(*) A seleção das condições usadas nestes ensaios encontra-se justificada no final do subcapítulo 4.3.3.

3.6.2. Seleção dos parâmetros fixos

Os parâmetros fixos de impressão selecionados são iguais aos dos provetes iniciais apresentados no subcapítulo 3.4.2., na tabela 7.

3.7. Tratamento térmico

Os tratamentos térmicos a que os provetes foram sujeitos foram realizados numa estufa Memmert UNF 500, pertencente ao grupo “*Corrosion Science and Surface Engineering*” do Centro de Química Estrutural do Instituto Superior Técnico, identificada da figura 36. Na escolha deste tipo de equipamentos foram tidos em consideração os patamares de temperatura a que os tratamentos térmicos iriam ser realizados e a estabilidade na manutenção da temperatura.



Figura 36 - Estufa Memmert UNF 500.

Os provetes foram inseridos na mufla após um período de estabilização da temperatura, sobre um vidro semelhante ao utilizado como mesa de impressão.

3.7.1. Seleção dos parâmetros do tratamento térmico

Os fatores principais a ter em consideração num tratamento térmico, nomeadamente num recozimento, são a temperatura e tempo de exposição. Com base nos estudos realizados nesta área e previamente referidos no subcapítulo 2.6, e de forma a tentar maximizar o incremento nas propriedades mecânicas, foram selecionados os seguintes parâmetros, para a realização dos tratamentos térmicos.

Tabela 10 - Parâmetros selecionados nos tratamentos térmicos realizados aos provetes de material virgem.

Experiência	Temperatura de recozimento (°C)	Tempo de exposição (min)
57	0	0
TT_1	70	60
TT_2	70	120
TT_3	80	60
TT_4	80	120

Conforme se pode observar na tabela 11, também foram realizados ensaios térmicos a provetes fabricados a partir do material reciclado, de forma a avaliar o seu comportamento nestes casos.

Tabela 11 - Parâmetros selecionados nos tratamentos térmicos realizados aos provetes de material reciclado.

Experiência	Temperatura de recozimento (°C)	Tempo de exposição (min)
R1	0	0
TT_R1	70	60
TT_R2	70	120
TT_R3	80	60
TT_R4	80	120

3.8. Observação em microscópio digital

As observações foram realizadas recorrendo a um microscópio ótico digital Leica DMS 300, pertencente ao grupo “*Corrosion Science and Surface Engineering*” do Centro de Química Estrutural do Instituto Superior Técnico, ilustrado na figura 37.

As áreas observadas correspondem à secção transversal onde os provetes fraturaram e procurou-se observar maioritariamente a adesão entre linhas de material adjacente.

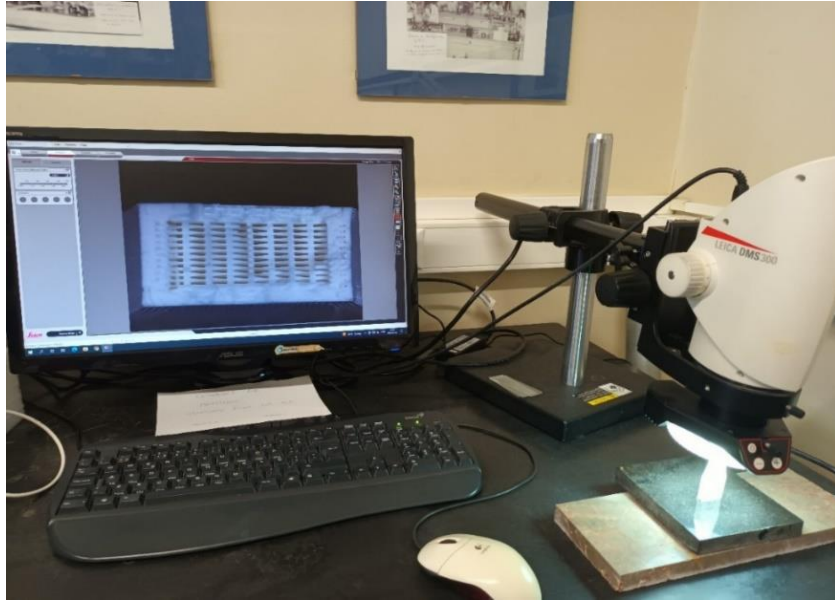


Figura 37 - Microscópio digital Leica DMS300.

4. Resultados experimentais

4.1. Ensaaios aos provetes em PLA 3D850

Conforme já foi referido anteriormente, os primeiros ensaios realizados recorreram a provetes com as dimensões e geometria de acordo com a norma ASTM D638-14, com uma espessura de 3,2 mm e estes foram fabricados no material PLA 3D850 da Tucab, de cor natural. Os dados dos ensaios, utilizados para a construção dos gráficos do subcapítulo 4.1 encontram-se apresentados no apêndice B, na tabela 14.

4.1.1. Influência da densidade de enchimento

Neste subcapítulo apresenta-se a variação das propriedades mecânicas, determinadas através dos ensaios de tração uniaxial, com a densidade de enchimento. Para a construção dos gráficos foi realizada a média para cada nível de densidade de enchimento analisado, onde se incluem todas as variações de altura de camada e orientações de enchimento, para existir uma maior amostragem. Na figura 38 apresentam-se a variação da tensão máxima, tensão de cedência, módulo de elasticidade e extensão na rotura em função a densidade de enchimento.

Como se pode observar na figura 38a, a tensão máxima aumenta à medida que a densidade de enchimento aumenta. O valor das tensões máximas mantém-se praticamente constantes para as densidades de 60% para 70%, com uma variação média de apenas 0,02 MPa e de 80% para 90%, com uma variação média de 0,36 MPa.

Uma evolução diferente pode, contudo, ser observada na figura 38b, onde se apresenta a variação da tensão de cedência com a densidade de enchimento. Embora a tensão de cedência seja mais baixa para a menor densidade de enchimento (40%) e mais elevada os provetes sólidos (100%), obtiveram-se valores para a densidade de 60% que não estão de acordo com o esperado, que seria uma tendência crescente à medida que a densidade de enchimento aumenta. Verifica-se ainda que existe a manutenção do desempenho ao passar dos 80% para os 90%, com uma variação média de 0,1 MPa.

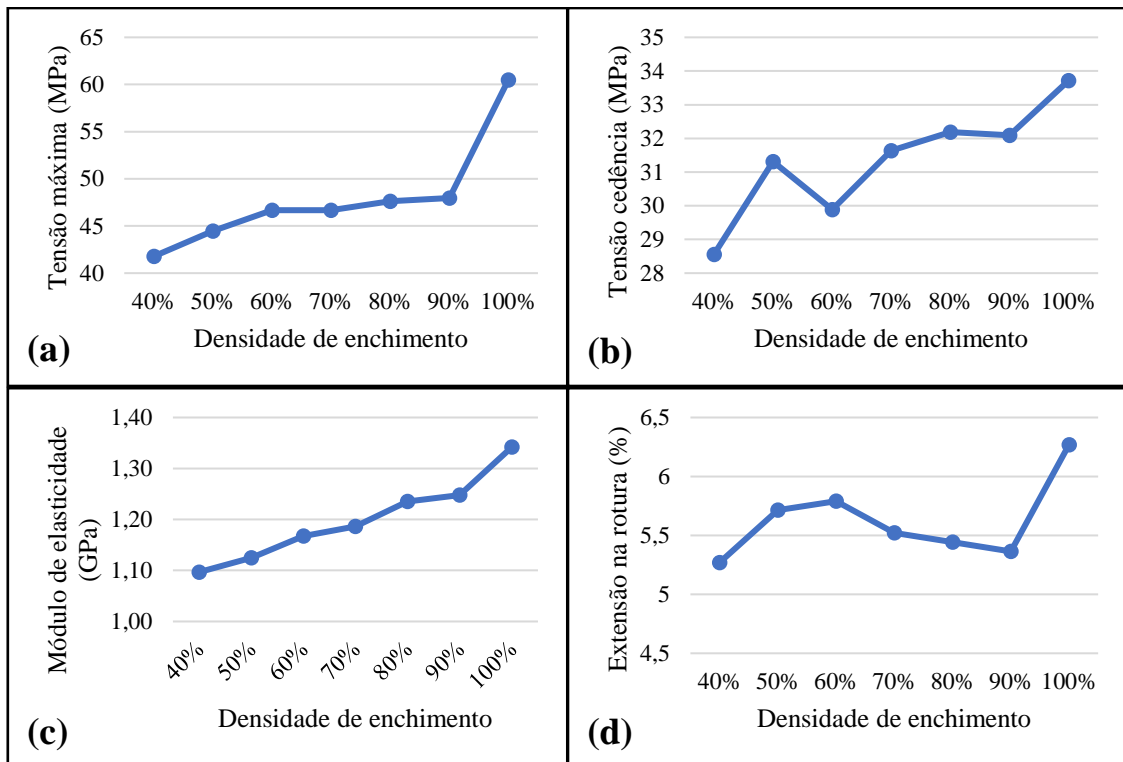


Figura 38 - Influência da densidade de enchimento nos provetes em PLA 3D850 na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.

Na figura 38c verifica-se um aumento quase linear do módulo de elasticidade com a densidade de enchimento, embora haja um maior incremento dos 90% para os 100% de densidade de enchimento, indicando que maiores densidades de enchimento produzem provetes mais rígidos.

Finalmente, na figura 38d, apresenta-se a influência da densidade de enchimento na ductilidade do material, avaliada pela extensão na rotura. Como se pode observar, o menor valor da extensão na rotura é obtido para 40% e o mais elevado para 100% de densidade de enchimento.

4.1.2. Influência da altura de camada

De forma semelhante ao realizado para a densidade de enchimento, neste subcapítulo avalia-se o efeito da altura de camada na resistência mecânica. Também neste caso para a construção dos gráficos foi realizada a média de cada nível de altura de camada analisado, onde se incluem todas as densidades de enchimento e orientações de enchimento analisadas. A influência da altura de camada na tensão máxima, tensão de

cedência, extensão na rotura e módulo de elasticidade pode ser observada nos gráficos apresentados na figura 39.

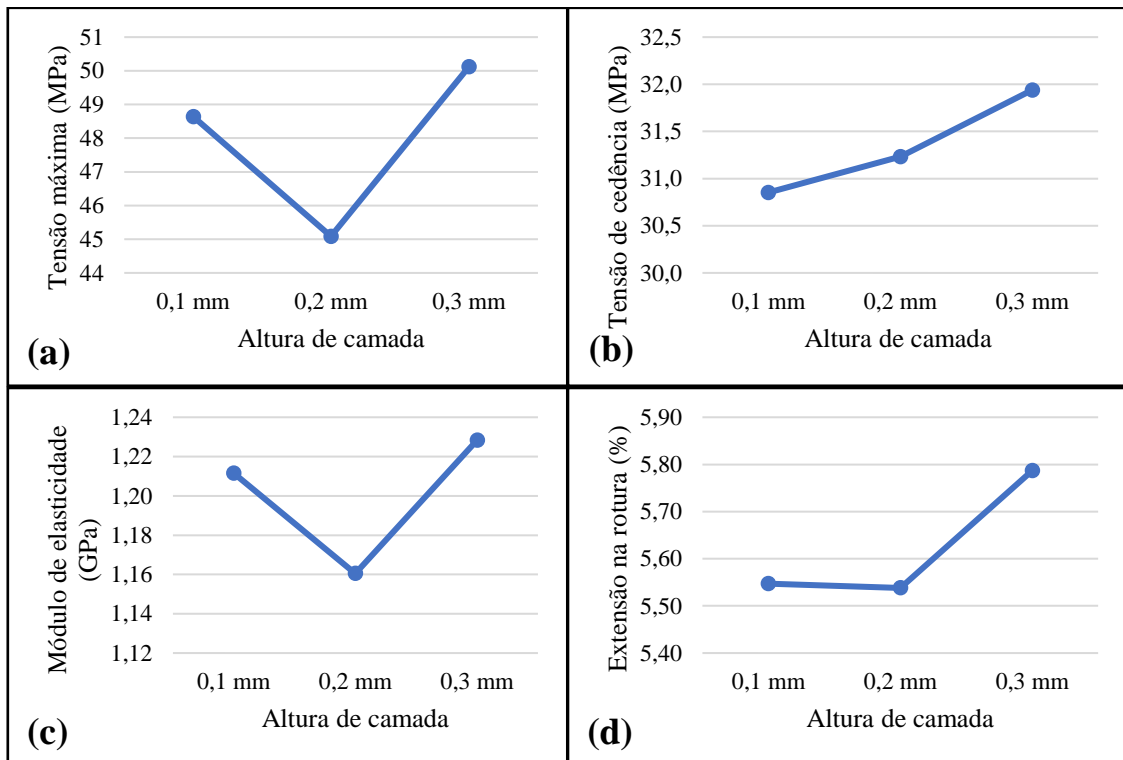


Figura 39 - Influência da altura de camada nos provetes em PLA 3D850 na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.

Através da figura 39a, onde se representa a tensão máxima em função da altura de camada usada na impressão do provete, constata-se que o valor da tensão máxima é mais elevado para uma altura de camada de 0,3 mm e mínimo para uma altura de camada de 0,2 mm, existindo uma variação média de 1,48 MPa entre a altura de camada de 0,3 mm e 0,1 mm.

Quanto à tensão de cedência verifica-se um aumento deste parâmetro com o aumento da altura de camada (Figura 39b). Através do gráfico verifica-se que a diferença entre os valores médios para as tensões de cedência, nas alturas de camadas estudadas, encontram-se dentro de um intervalo de cerca de 1,1 MPa.

Tal como o que acontece com a tensão máxima, constata-se na figura 39c (E vs. altura de camada), que o módulo de elasticidade é mais baixo quando os provetes são construídos com uma altura de camada de 0,2 mm. Para 0,3 mm de altura de camada os

provetes apresentam o valor mais elevado do módulo de elasticidade, embora este seja em média apenas 0,02 GPa superior ao observado com uma altura de camada de 0,2 mm.

Finalmente, é possível verificar a partir da figura 39d, que o valor mais baixo da extensão na rotura é obtido para as alturas de camada de 0,2 mm e 0,1 mm sendo o valor mais elevado da extensão observado para uma altura de camada de 0,3 mm, com uma diferença média de 0,43 %, para o valor mais baixo registado (0,2 mm de altura de camada).

4.1.3. Influência da orientação de enchimento

Para o cálculo da influência da orientação de enchimento nas propriedades mecânicas dos provetes, foram reunidos os ensaios com todas as alturas de camada e densidades de enchimento e efetuada a respetiva média. A figura 40, apresenta a variação da tensão máxima, tensão de cedência, módulo de elasticidade e extensão na rotura em relação às duas orientações de enchimento estudadas.

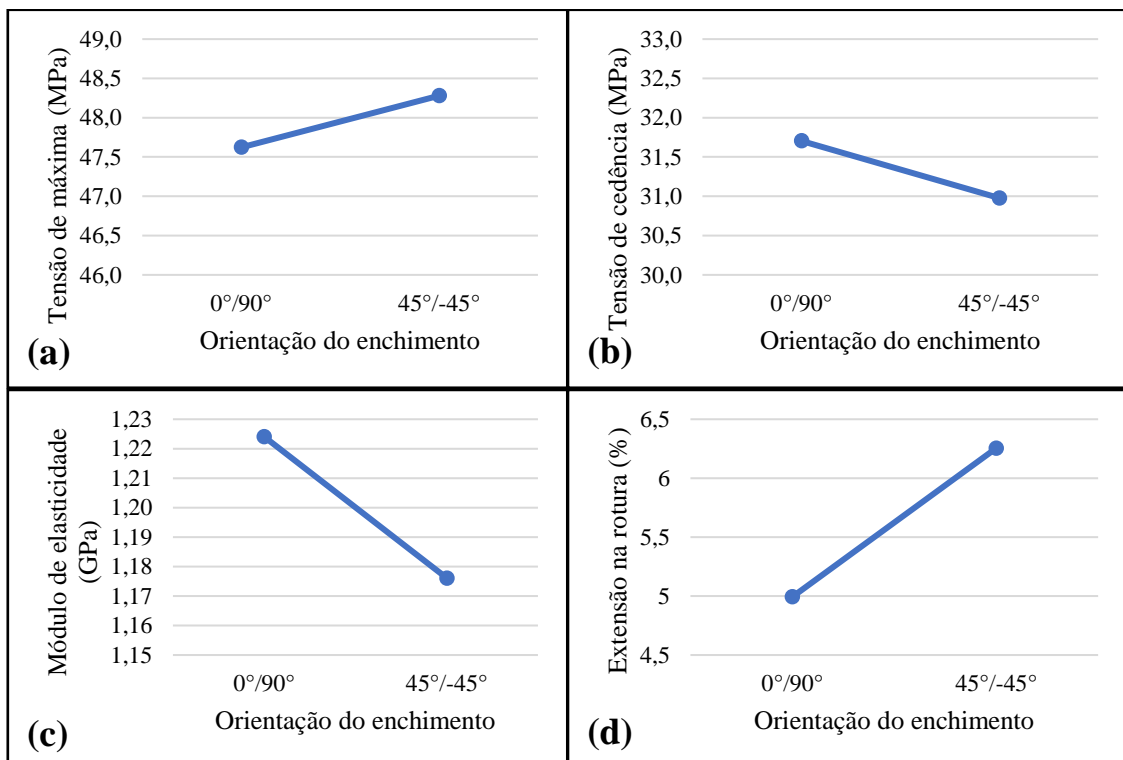


Figura 40 - Influência da orientação do enchimento nos provetes em PLA 3D850 na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.

Verifica-se através da figura 40a, que o valor da tensão máxima é superior para uma orientação de enchimento de $45^\circ/-45^\circ$ face a uma orientação de $0^\circ/90^\circ$, o que representa um aumento de cerca de $\sim 1,4\%$.

Por outro lado, constata-se que a tensão de cedência é superior para uma orientação de enchimento de $0^\circ/90^\circ$, com uma diferença média de 0,73 MPa para a orientação $45^\circ/-45^\circ$ (Figura 40b).

De igual modo à tensão de cedência, verifica-se que o valor do módulo de elasticidade é superior para provetes com uma orientação de enchimento de $0^\circ/90^\circ$, quando comparados com provetes com uma orientação de enchimento de $45^\circ/-45^\circ$, com uma diferença média entre ambos de aproximadamente 0,04 GPa (Figura 40c).

Relativamente à extensão na rotura observa-se uma melhoria no seu valor quando os provetes são impressos segundo uma orientação de $45^\circ/-45^\circ$, quando comparados com os impressos a $0^\circ/90^\circ$ (Figura 40d).

4.2. Ciclo de reciclagem

Tal como referido anteriormente, após os ensaios mecânicos os provetes fraturados foram sujeitos a um ciclo de reciclagem com a finalidade de se obter um filamento reciclado e avaliar eventuais modificações na resistência mecânica de provetes impressos com esse filamento.

De forma a obter um filamento com um diâmetro constante é fundamental que exista um controlo de todos os parâmetros envolvidos na sua produção. Um dos mais importantes é a temperatura de operação, que depende do material em estudo. Assim que o material ultrapassa a temperatura de transição vítrea, passa do estado sólido a um estado “borrachoso” e à medida que a temperatura aumenta este vai-se tornando cada vez mais viscoso até que há uma altura em que passa ao estado líquido. Irá ser nesta gama de temperaturas que as extrusoras operam.

Uma vez que o sistema utilizado era unicamente composto por uma trituradora e extrusora, não existia equipamento disponível que permitisse controlar de forma instantânea o diâmetro de saída do filamento. Assim, a obtenção de um fio com o diâmetro

desejado foi um processo iterativo em que os parâmetros foram ajustados em função dos resultados.

No equipamento utilizado neste trabalho os parâmetros que se podem controlar são a temperatura da resistência de aquecimento, a altura da matriz de extrusão ao solo e o diâmetro da matriz de extrusão. Os parâmetros iniciais encontram-se apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros iniciais de extrusão.

Matriz de extrusão (mm)	1.57 (1/16")
Temperatura da resistência (°C)	175
Altura da matriz ao solo (cm)	93

Com estes parâmetros foi possível obter cerca de 7 metros de filamento com um diâmetro a variar entre os 1,1 mm e 1,2 mm. Embora o filamento apresente alguma consistência no diâmetro, esta não é suficiente para garantir um adequado funcionamento da impressora. Apesar disso, este filamento foi testado à impressão, alterando as suas dimensões no *software* de laminação. No entanto, o facto do diâmetro ser inferior ao recomendado fez com que este o filamento reciclado não conseguisse ser puxado pelo motor que alimenta o fio para a cabeça de extrusão, tendo resultado na interrupção da impressão (resultado apresentado na figura 41).

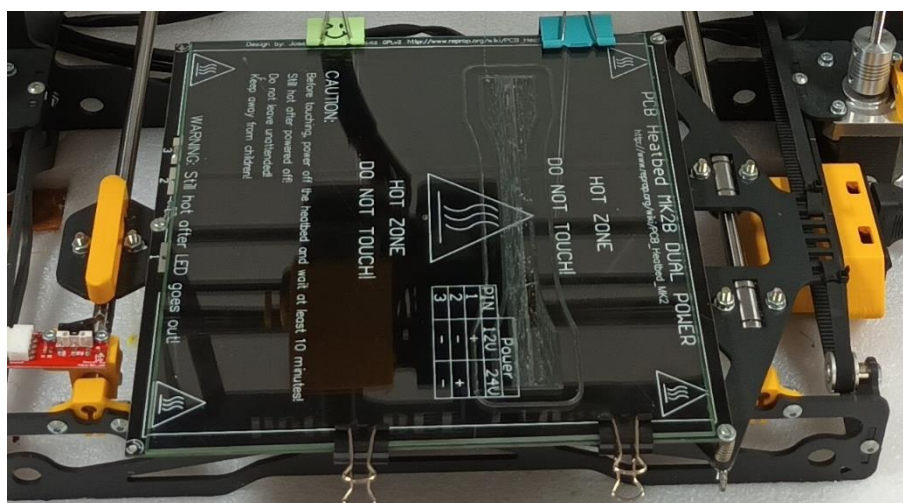


Figura 41 - Tentativa de impressão com filamento reciclado de aproximadamente 1,2 mm de diâmetro.

Numa tentativa de resolver esta limitação, os parâmetros iniciais foram alterados. Assim, numa segunda iteração, optou-se por ir baixando a temperatura de operação, de forma a baixar a viscosidade do material e desta forma abrandar o fluxo de saída. No entanto verificou-se que quando a temperatura atingia o valor de aproximadamente $\sim 165^{\circ}\text{C}$ a extrusora tinha dificuldade em manter o fuso em rotação, parando até algumas vezes. O resultado da interrupção da extrusora significava que o fio, que estava a ser puxado por ação do filamento extrudido, alongava de tal forma que por vezes o filamento partia, devido à redução do material extrudido. Foi também observado que, à medida que a temperatura foi diminuindo, o filamento começava a apresentar irregularidades, possivelmente devido a material que não foi totalmente fundido dentro da extrusora.

Uma vez que a temperatura a que o filamento era extrudido afetava a operação da máquina e a qualidade perceptível do filamento, optou-se por manter a temperatura próxima do valor inicialmente fixado, isto é $\sim 170^{\circ}\text{C}$. Assim, como segunda estratégia para aumentar o diâmetro do filamento extrudido optou-se por diminuir a força exercida sobre este. Para tal foram testadas diferentes alturas da matriz ao solo, a forma mais direta de alterar este parâmetro na extrusora utilizada. Contudo, esta estratégia também não teve resultados positivos já que não foi possível obter um filamento regular e com as dimensões desejadas. A título de exemplo, a utilização de uma altura da matriz ao solo de cerca de 50 cm levou a que o filamento fosse empurrado (ao chegar ao solo) na direção da matriz causando um congestionamento à saída, em vez de exercer uma força de tração uniforme para manter o diâmetro constante.

Por último, e de forma a descartar todas as opções possíveis, optou-se por mudar a matriz da extrusora. Em vez de utilizar a matriz original, de 1,57 mm, conseguiu-se arranjar uma matriz com um diâmetro de 1,8 mm. Ainda assim, não foi possível obter um filamento com um diâmetro constante e próximo do desejado. No entanto, o diâmetro obtido continuava a não ser constante e andava na casa dos 1,1 mm a 1,3 mm, muito devido à força que o peso do material exercia sobre o filamento acabado de extrudir.

Deste modo, e devido a limitações de tempo, optou-se por redirecionar a abordagem e adquirir filamento reciclado e virgem, provenientes do mesmo fabricante. O filamento reciclado, segundo o fabricante é produzido a partir de resíduos de extrusão do filamento virgem. As fichas técnicas do material virgem, EasyFil™ PLA e do material reciclado ReForm™ rPLA encontram-se no anexo B e C respetivamente.

4.3. Ensaio aos provetes em EasyFil™ PLA

Tal como nos ensaios realizados com os provetes em PLA 3D850, nos ensaios ao EasyFil™ PLA de cor branca foram também utilizados provetes com a geometria e dimensões de acordo com a norma indicada, mas com uma espessura de 7 mm.

O motivo que levou à seleção de uma espessura mais elevada, foi o facto de ser possível obter uma secção transversal na qual a zona de enchimento tivesse maior expressão, refletindo-se nos resultados dos ensaios mecânicos. Efetivamente, com a geometria utilizada nos provetes do material PLA 3D850, apenas ~20% da área da secção transversal eram ocupados por enchimento e o restante correspondia aos contornos ou paredes da peça, o que tirava representatividade aos resultados obtidos.

Na figura 42 pode observar-se que a mudança de espessura de 3,2 mm para 7 mm, se traduz num incremento da área de enchimento em cerca de 33%, passando assim a densidade de enchimento a representar cerca de 53% da área da secção transversal do provete. Para além disso, também é possível verificar que a utilização de uma cor opaca, torna mais perceptível a união dos filamentos depositados nas observações realizadas no microscópio ótico digital.

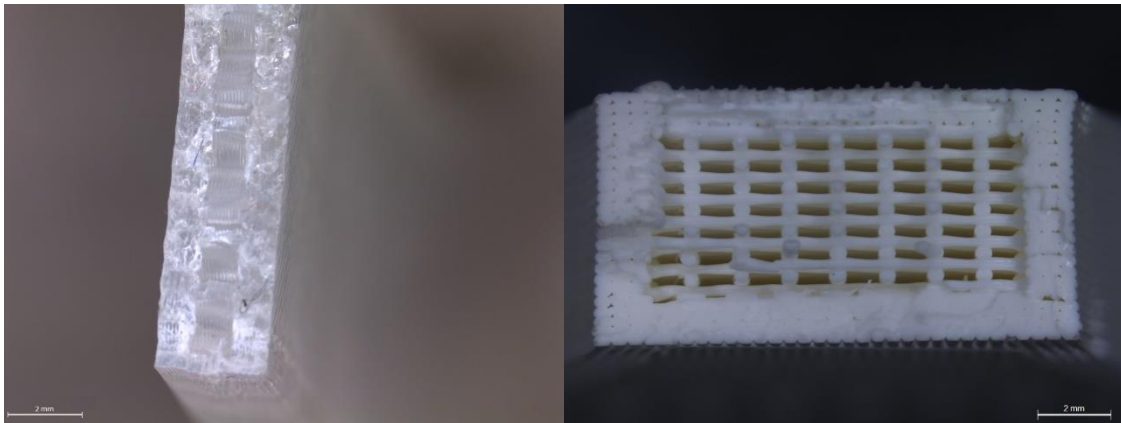


Figura 42 - Comparação da secção transversal de um provete em (esquerda) PLA 3D850 e (direita) EasyFil™ PLA.

Os dados resultantes dos ensaios de tração, utilizados para a construção dos gráficos em todo o subcapítulo 4.3 encontram-se agrupados no apêndice B, tabela 15.

4.3.1. Influência da densidade de enchimento

Para a construção dos gráficos apresentados na figura 43, foram utilizados os dados relativos às experiências 43 a 54. Estes são indicativos da influência da densidade de enchimento para as alturas de camada estudadas (0,1 mm, 0,2 mm e 0,3mm), através da sua média, mas apenas para a orientação de 45°/-45°.

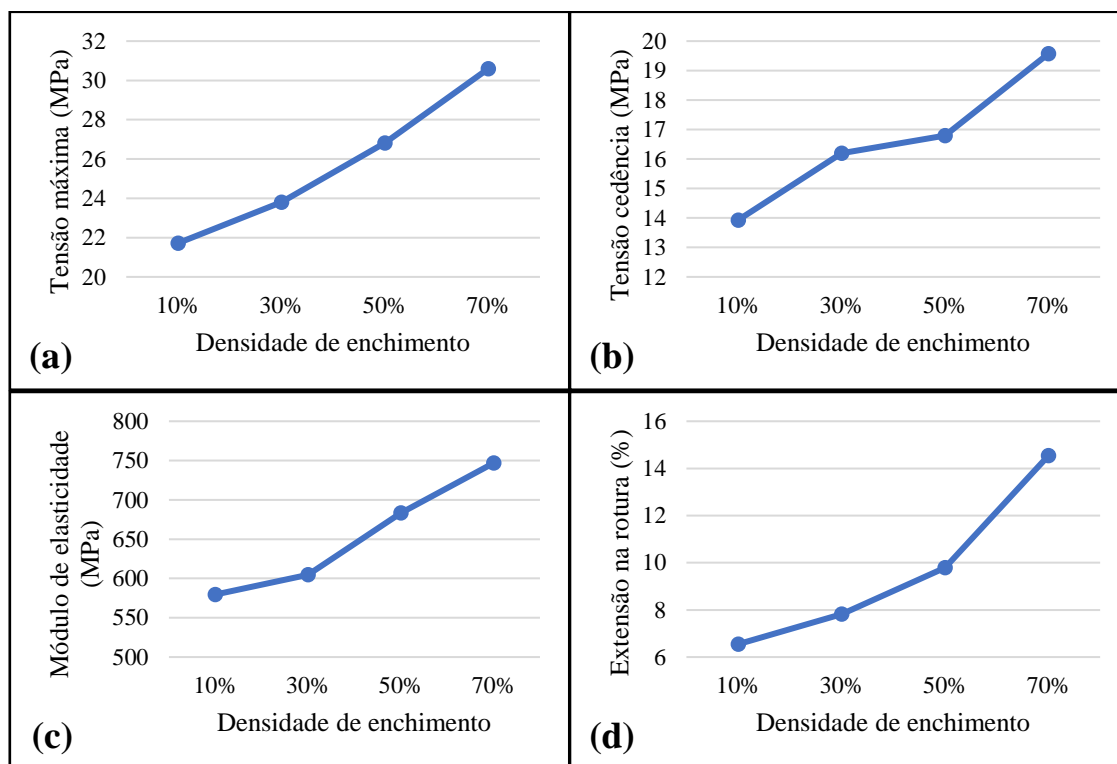


Figura 43 - Influência da orientação de enchimento nos provetes EasyFil™ PLA na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.

De forma semelhante ao verificado nos ensaios realizados com provetes em PLA 3D850, podemos observar que a tensão máxima e o módulo de elasticidade aumentam com o incremento da densidade de enchimento (Figura 43a e 43c respetivamente).

Por sua vez, constata-se através dos gráficos representados pelas figuras 43b e 43d que existe também um aumento da tensão de cedência e da extensão na rotura, com a elevação da densidade de enchimento, algo que não foi verificado para os provetes em PLA 3D850, e que muito provavelmente está relacionado com o menor peso do enchimento na secção transversal desses provetes.

Embora as propriedades mecânicas melhorem, a utilização de uma densidade de enchimento mais elevada, traduz-se não só numa maior percentagem de material utilizado

na impressão, como também num maior tempo de impressão requerido (Figura 44), levando assim a um maior gasto de material e de energia necessária para a produção. Por exemplo, um provete impresso com uma altura de camada de 0,2 mm, com a orientação de enchimento a 0°/90° demora cerca de 1 hora e 17 minutos a imprimir e gasta cerca de 17 g de material com 30% de densidade de enchimento. Já com 90% de densidade de enchimento, nas mesmas condições indicadas, este demora cerca de 1 hora e 42 minutos a imprimir e gasta cerca de 25 g de material.

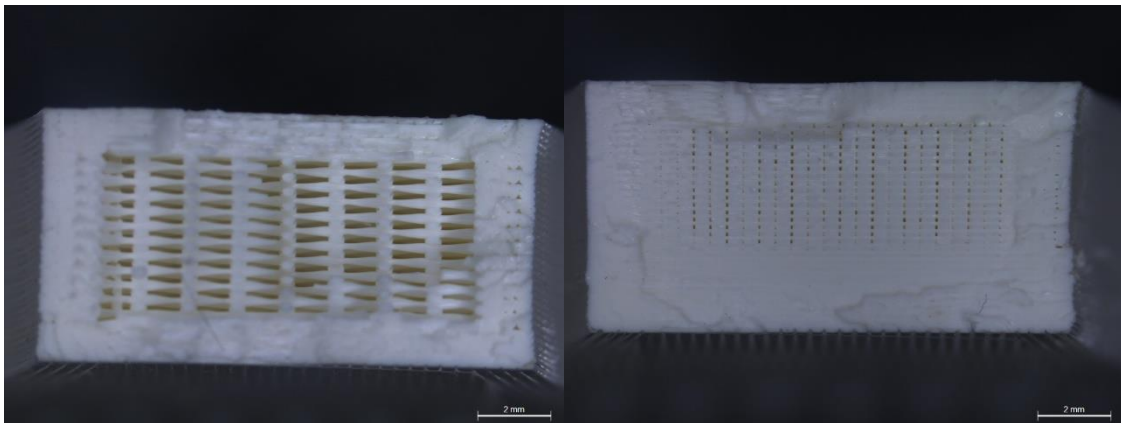


Figura 44 - Comparação entre densidade de enchimento de (esquerda) 30% e (direita) 90%.

4.3.2. Influência da altura de camada

De igual forma à densidade de enchimento, os dados utilizados para a construção dos gráficos a respeito da influência da altura de camada, nas propriedades mecânicas, foram obtidos a partir das experiências número 43 a 54 e apenas relativos à orientação de enchimento 45°/-45°. A influência da altura de camada na tensão máxima, tensão de cedência, módulo de elasticidade e extensão na rotura, pode ser observada nos gráficos apresentados na figura 45.

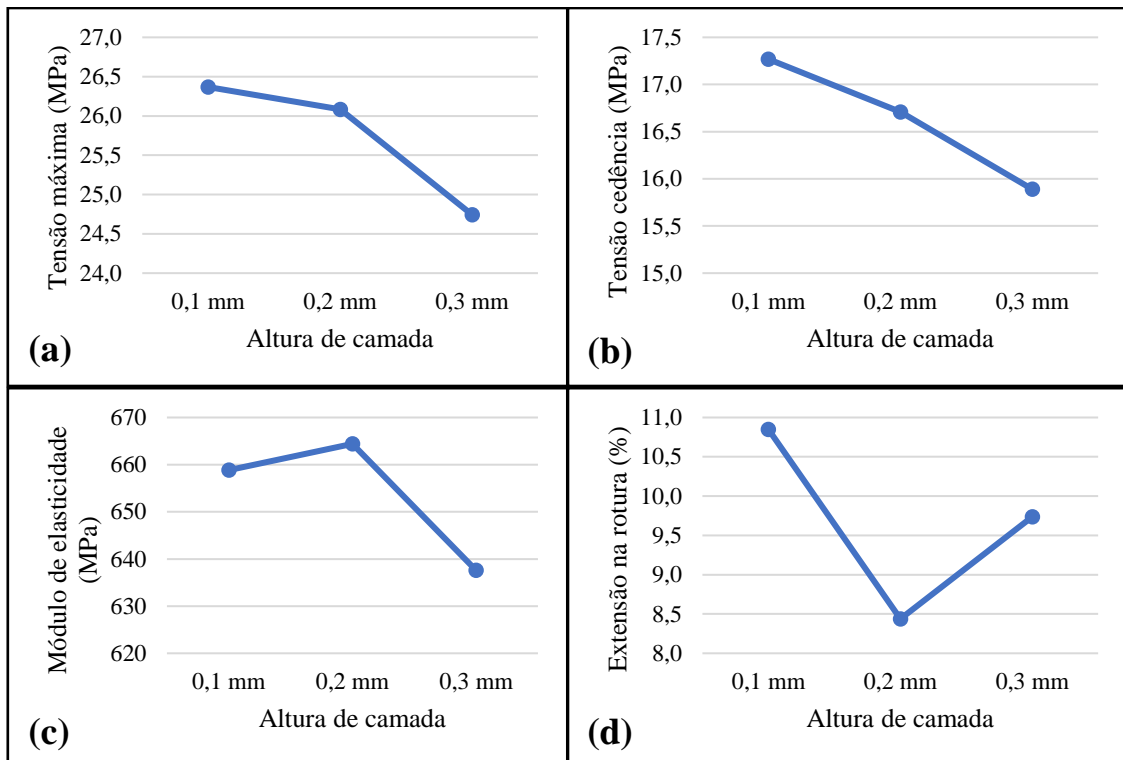


Figura 45 - Influência da altura de camada nos provetes EasyFil™ PLA na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.

Observa-se através da figura 45a e 45b, que os valores da tensão máxima e tensão de cedência decrescem com o aumento da altura de camada. Ainda assim, tanto os valores da tensão máxima como tensão de cedência, em média, não variam mais de 1,7 MPa.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, através da figura 45c, constata-se que é maior para uma altura de camada de 0,2 mm e o menor para uma altura de camada de 0,3 mm, com uma diferença média de 26,83 MPa.

Contrariamente ao módulo de elasticidade, a extensão na rotura é mais baixa para a altura de camada de 0,2 mm e mais elevada para a altura de camada de 0,1mm (Figura 45d).

Tal como referido para a densidade de enchimento, também a altura de camada influencia o tempo de impressão de uma peça, na medida em que quanto menor a altura de camada mais demorada é a impressão.

A figura 46, é um exemplo da zona de enchimento quando observada para alturas de camada sucessivamente maiores. Neste caso, os provetes apresentados têm uma densidade de enchimento de 30% e uma orientação de enchimento a 45°/-45° e, neste

caso, o provete com 0,1 mm de altura de camada demorou cerca de 2 hora e 30 minutos a imprimir, o provete com 0,2 mm de altura de camada demorou 1 hora e 17 minutos a imprimir e o provete com 0,3 mm de altura de camada demorou apenas cerca de 53 minutos a imprimir.

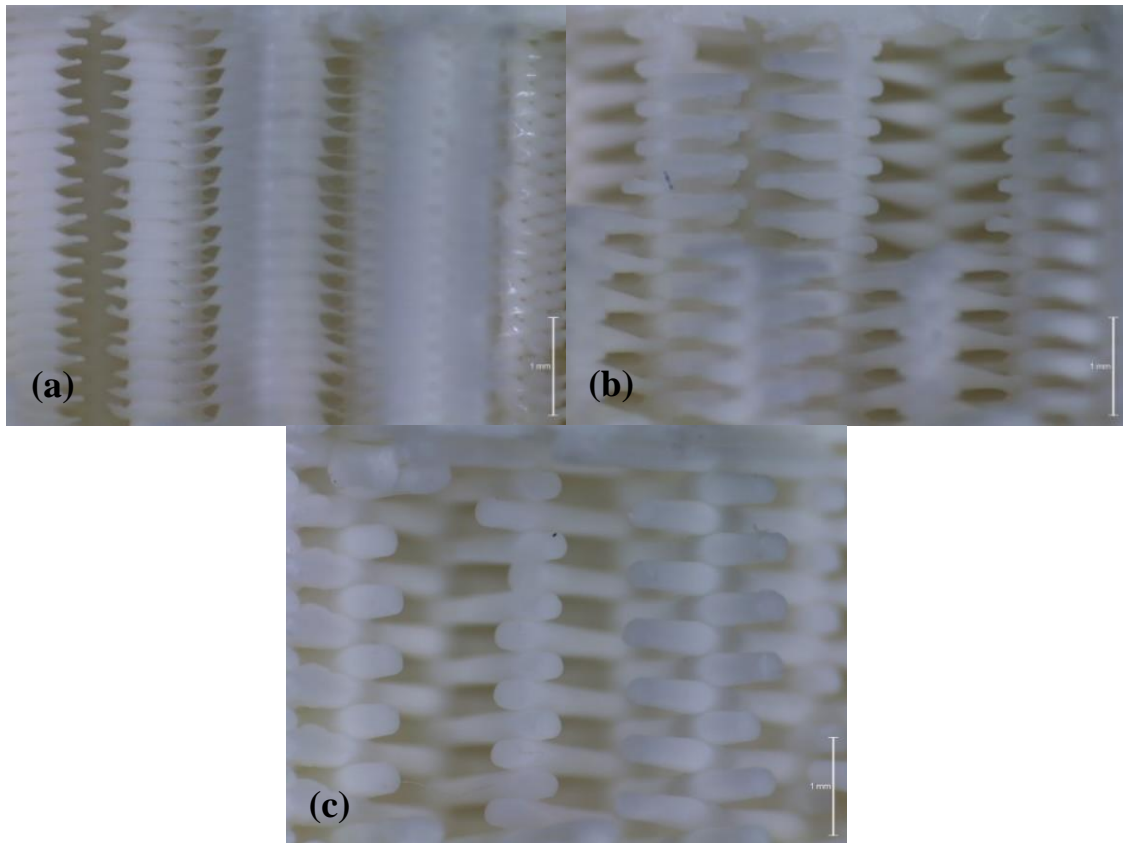


Figura 46 - Comparação entre alturas de camada estudadas para uma densidade de 30%, onde (a) 0,1 mm, (b) 0,2 mm e (c) 0,3 mm.

4.3.3. Influência da orientação de enchimento

A influência da orientação de enchimento, conforme indicado no procedimento experimental foi obtida apenas com recurso a provetes com uma densidade de enchimento de 30% (experiências 46 a 48 e 55 a 57, tabela 9 subcapítulo 3.6.1.). A razão para tal deveu-se ao facto desta densidade de enchimento facilitar a observação microscópica do espaço entre as linhas pertencentes ao enchimento do provete, coisa que não seria tão fácil com densidades superiores.

Na figura 47 é possível observar a influência da orientação de enchimento na tensão de máxima, tensão de cedência, módulo de elasticidade e extensão na rotura.

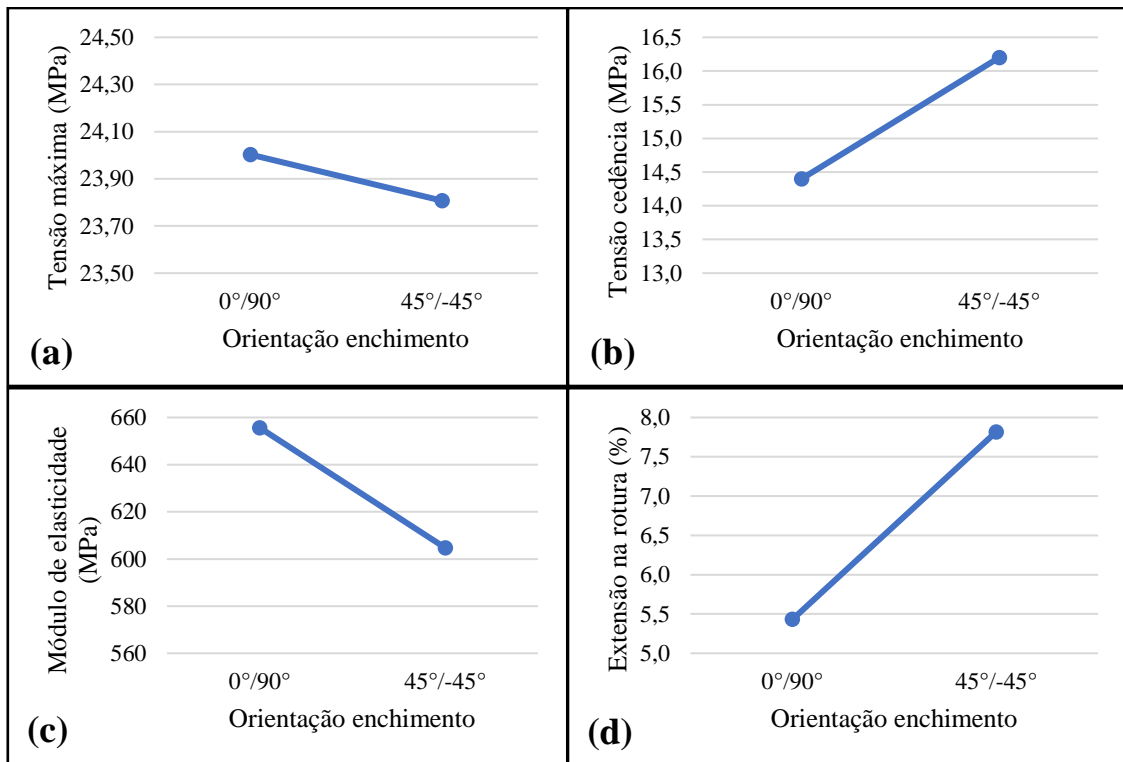


Figura 47 - Influência da orientação de enchimento nos provetes EasyFil™ PLA na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.

Constata-se através do gráfico da figura 47a e 47c que a tensão máxima e módulo de elasticidade são superiores para uma orientação de enchimento de 0°/90°, existindo apenas uma ligeira diferença média de 0,2 MPa na tensão máxima.

As restantes propriedades mecânicas, tensão de cedência e extensão na rotura apresentam um melhor comportamento quando o material é depositado numa orientação de 45°/-45°, conforme visível na figura 47b e 47d.

As diferenças na observação das seções transversais de dois provetes com a mesma altura de camada e orientações de enchimento, podem ser observadas na figura 48, onde verificamos uma maior facilidade em observar a adesão entre filamentos orientados a 0° e a 90°.

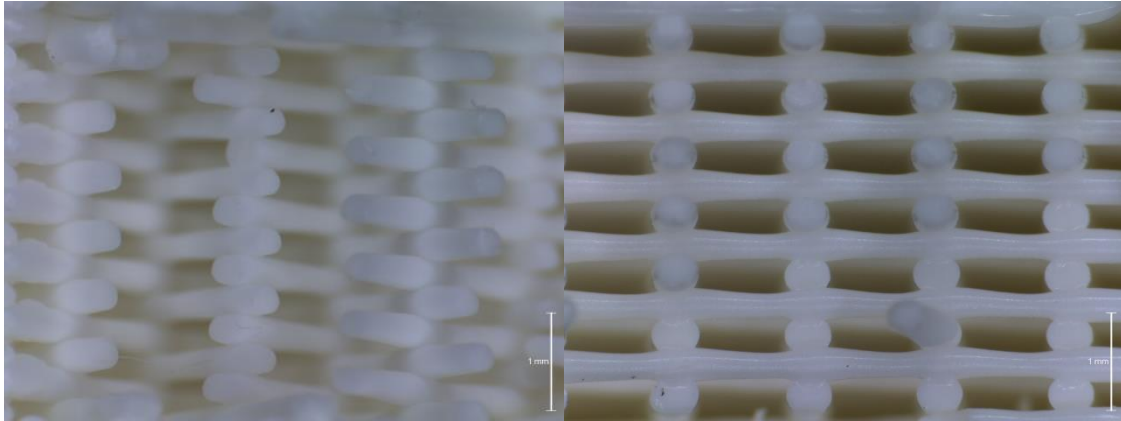


Figura 48 - Comparação entre as orientações de enchimento (esquerda) 45°/-45° e (direita) 0°/90°.

Dado que o microscópio digital só conseguia focar as imagens numa altura específica, tornava-se difícil a observação de secções que não tivessem fraturado num plano paralelo à câmara de observação. Tal foi evidenciado quando se realizaram as observações aos provetes com orientações a 45°/-45° e com densidades de 50 % (Figura 49) e 70%, os quais fraturaram segundo um plano a 45° com a direção de aplicação da força.

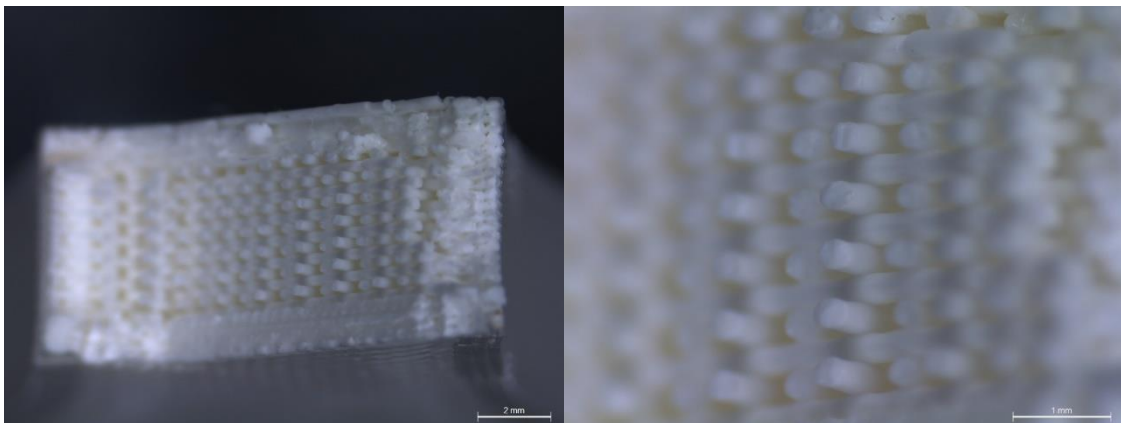


Figura 49 - Observação da zona de fratura de um provete com orientação de enchimento 45°/-45° e densidade de enchimento de 50 %.

Os resultados apresentados conduziram à seleção das condições para impressão dos provetes a utilizar na realização dos ensaios relativos à comparação entre material virgem e reciclado e influência do tratamento térmico nas propriedades mecânicas. Assim, selecionou-se 0,3 mm de altura de camada, uma orientação de enchimento de 0°/90° e 30% de densidade de enchimento, já que os provetes obtidos com estas condições

apresentavam mais espaço entre camadas, eram mais rápidos de imprimir e a orientação do material depositado permitia uma melhor focagem ao microscópico, pois a área da fratura apresentava uma imagem mais nítida para observação.

4.4. Comparação entre o material virgem e reciclado

Conforme as indicações do fabricante o material reciclado (ReForm™ rPLA) é obtido a partir do reaproveitamento dos desperdícios da produção do material virgem (EasyFil™ PLA). Deste modo, quando se olha atentamente para a ficha técnica de ambos os materiais pode verificar-se que ambos apresentam as mesmas propriedades sejam elas mecânicas, físicas ou térmicas. Ainda assim, segundo alguns estudos, enunciados no subcapítulo 2.5 deste trabalho, seria natural que as propriedades decrescessem ligeiramente após ciclos sucessivos de reciclagem. A figura 50, representa os resultados obtidos para um provete fabricado em material virgem (experiência 57) e material reciclado (experiência R1).

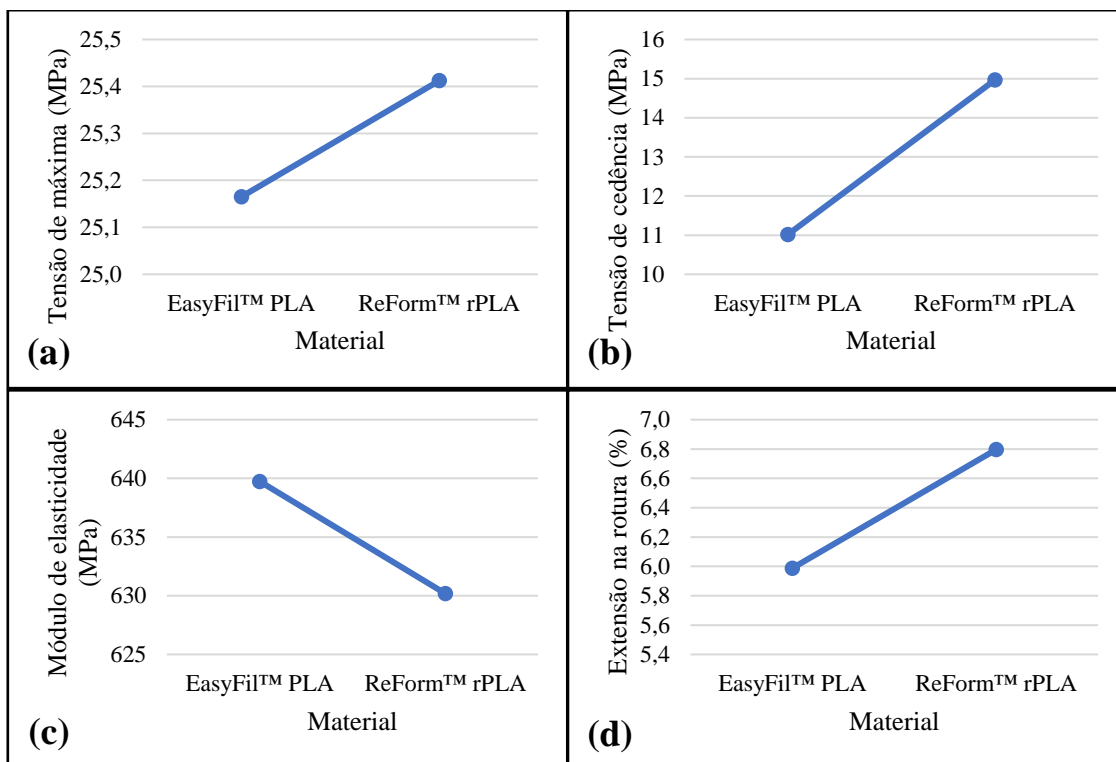


Figura 50 - Comparação entre material virgem e reciclado na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.

Conforme se pode verificar na figura 50a, 50b e 50d, a tensão máxima, a tensão de cedência e a extensão na rotura, apresentam melhores resultados para o material reciclado (ReForm™ rPLA), embora a variação na tensão máxima seja praticamente desprezável.

O contrário verifica-se para o módulo de elasticidade, em que apresenta um maior valor para o material virgem face ao material reciclado. No entanto, e de forma semelhante à tensão máxima, o módulo de elasticidade só varia cerca de 9,55 MPa (~1,5%), o que representa também uma melhoria praticamente desprezável.

4.5. Tratamento térmico aos provetes EasyFil™ PLA

Neste subcapítulo apresenta-se a variação das propriedades mecânicas, com a aplicação de tratamentos térmicos em provetes fabricados a partir do material EasyFil™ PLA. Na figura 51 apresentam-se a variação da tensão máxima, tensão de cedência, módulo de elasticidade e extensão na rotura em função das temperaturas e tempos de exposição, dos tratamentos térmicos. Os valores utilizados para a construção encontram-se no apêndice B, tabela 16, onde o provete de referência é identificado pela experiência 57.

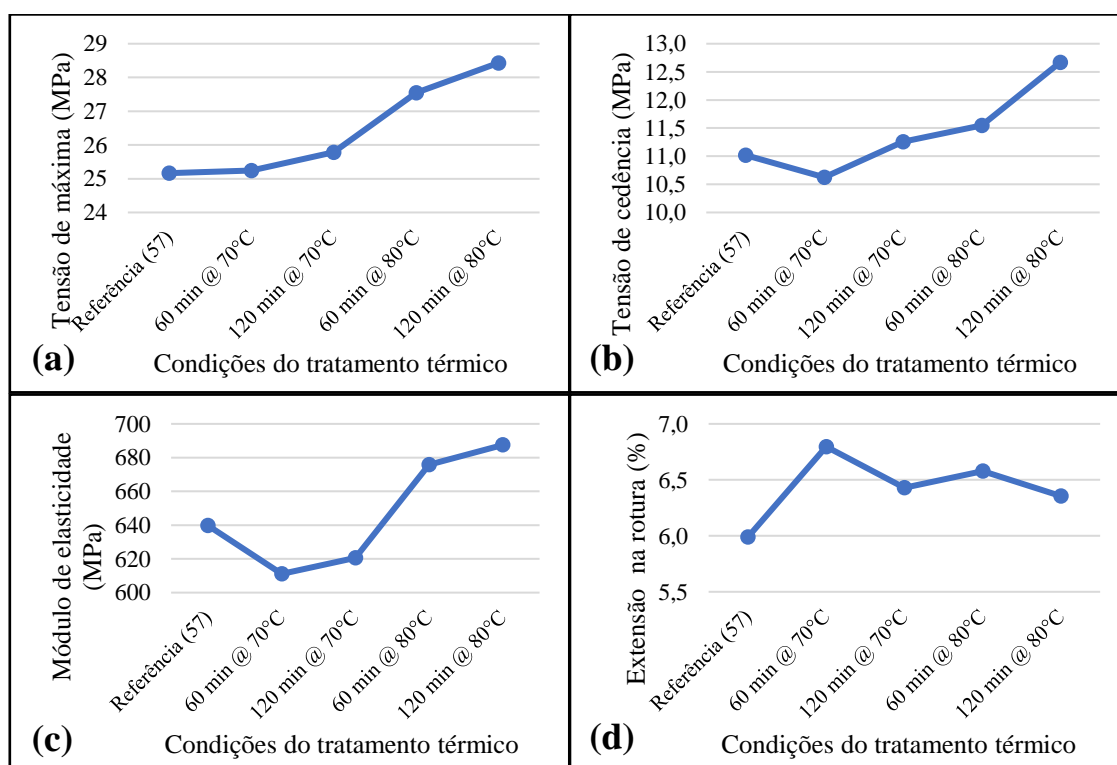


Figura 51 - Influência dos tratamentos térmicos nos provetes EasyFil™ PLA na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.

De acordo com o gráfico da figura 51a, pode verificar-se que os tratamentos térmicos ao material EasyFil™ PLA aumentaram a tensão máxima, independentemente das condições utilizadas. No entanto, não se identificou uma grande diferença do provete de referência (sem tratamento térmico, experiência 57) face às primeiras condições de ensaio -tempo de exposição de 60 minutos a uma temperatura de 70 °C.

Verifica-se na figura 51b, que a tensão de cedência teve um decréscimo para as primeiras condições utilizadas no tratamento térmico (60 minutos a 70 °C). Ainda assim, para todas as restantes condições os valores da tensão de cedência aumentaram face ao provete não sujeito ao tratamento térmico.

O módulo de elasticidade, conforme visível no gráfico da figura 51c, apresenta valores inferiores à referência para os tratamentos térmicos efetuados a 70 °C. Porém para os ensaios realizados a 80 °C o módulo de elasticidade apresenta-se superior ao do provete sem tratamento térmico.

Apesar de não se verificar nenhuma tendência, todos os valores da extensão na rotura nos provetes sujeitos a tratamento térmico apresentaram valores superiores à referência, de acordo com a figura 51d.

4.6. Tratamento térmico aos provetes ReForm™ rPLA

Da mesma forma que no subcapítulo anterior, neste apresenta-se a variação das propriedades mecânicas, determinadas através dos ensaios de tração uniaxial, com a aplicação de tratamentos térmicos em provetes fabricados a partir do material ReForm™ rPLA (material reciclado). A variação da tensão máxima, tensão de cedência, módulo de elasticidade e extensão na rotura em função das temperaturas e tempos de exposição, dos tratamentos térmicos, pode ser observada na figura 52. Os dados dos ensaios realizados podem ser observados no apêndice B tabela 16, sendo neste caso o provete de referência referente ao ensaio experimental R1.

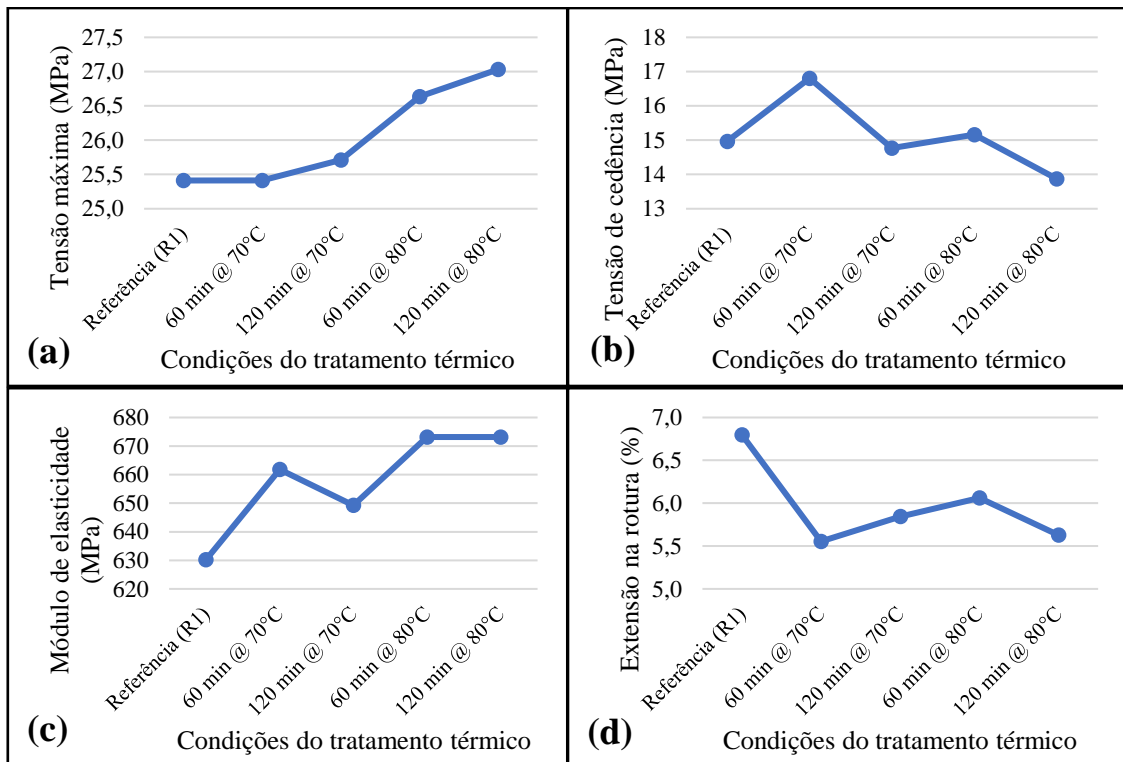


Figura 52 - Influência dos tratamentos térmicos nos provetes ReForm™ rPLA na (a) tensão máxima, (b) tensão de cedência, (c) módulo de elasticidade e (d) extensão na rotura.

A maior influência do tratamento térmico, é mais uma vez verificada para os valores da tensão máxima, dos provetes reciclados. Observa-se um aumento da tensão máxima (Figura 52a) após os provetes terem sido sujeitos a tratamentos térmicos, com a exceção do tratamento realizado a 70 °C durante 60 minutos cuja tensão máxima se manteve praticamente constante (diferença de 0,01 MPa).

Observa-se na figura 52b, que a tensão de cedência não apresenta um andamento correlacionável com as condições usadas nos tratamentos térmicos, apresentando valores superiores face à referência nos tratamentos realizados durante 60 minutos, ainda que no tratamento realizado a 80°C este seja apenas 0,2 MPa superior. Por sua vez os restantes ensaios apresentam valores inferiores face à referência, sendo que o provete sujeito a um tratamento térmico durante 120 minutos a 70 °C, apresenta apenas uma diminuição de 0,19MPa face à referência.

O módulo de elasticidade apresenta valores sempre superiores à referência, mas este mantém-se constante para os tratamentos térmicos realizados a 80 °C, conforme visível na figura 52c. Nos tratamentos térmicos realizados a 70 °C, verifica-se que o módulo de elasticidade é inferior no caso em que este esteve exposto durante um maior período.

Pelo contrário, da observação da Figura 52d, pode concluir-se que, qualquer que sejam as condições utilizadas, o tratamento térmico tem um efeito negativo na ductilidade do material. Efetivamente, pode ser constatado que a extensão na rotura, sofre um decréscimo para todos os provetes sujeitos a tratamento térmico em relação ao provete de referência (R1).

Efeito do tratamento térmico nas dimensões dos provetes

Um outro tipo de medição efetuada foi a relativa ao efeito do tratamento de recozimento nas características dimensionais dos provetes (Tabela 13).

Tabela 13 - Dimensões da seção do provete antes e após o recozimento

Experiência	Antes do tratamento térmico		Após o tratamento térmico	
	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
TT_1	13,11	6,87	13,00	7,01
TT_2	13,12	6,80	12,99	6,96
TT_3	13,15	6,86	13,00	7,04
TT_4	13,15	6,82	13,02	6,99
TT_R1	13,12	6,73	13,01	6,83
TT_R2	13,11	6,70	12,91	6,86
TT_R3	13,15	6,73	13,00	6,90
TT_R4	13,11	6,73	12,94	6,94
Média	13,13	6,78	12,98	6,94

Contata-se que os provetes ensaiados termicamente, sofreram uma redução da dimensão direção x, isto é, no comprimento total do provete, até um valor máximo de aproximadamente 5 mm. Já nas dimensões afetas à secção de ensaio verifica-se que a largura dos provetes baixa em média 0,14 mm e a espessura aumenta em média 0,16 mm.

5. Discussão de resultados

5.1. Provetes em PLA 3D850

5.1.1. Densidade de enchimento

A densidade de enchimento é um dos parâmetros que, de acordo com a bibliografia, mais influência tem nas propriedades mecânicas de uma peça impressa. Conforme se pode constatar nos ensaios realizados, existe sempre um aumento da rigidez (módulo de elasticidade) e da tensão máxima suportada por cada provete à medida que se aumenta a densidade de enchimento. Algo que também seria expectável acontecer para a tensão de cedência, porque ao aumentar a densidade de enchimento está-se a aumentar a quantidade de material depositado em cada provete, tornando-o mais denso e conseqüentemente mais resistente mecanicamente. Embora os resultados obtidos não revelem uma tendência clara da ductilidade, avaliada pela extensão na rotura, com a densidade de enchimento, verifica-se que o pior resultado ocorre para a densidade mais baixa e o melhor resultado para a densidade mais elevada. De notar também, e de acordo com o esperado, que apesar de algumas variações no andamento das propriedades medidas com o parâmetro em estudo, os melhores resultados em termos de resistência mecânica do material impresso foram sempre obtidos para uma densidade de enchimento de 100%, correspondente ao provete sólido.

De notar que, durante a realização dos testes, se observou que a maioria dos esforços a que o provete estava sujeito eram suportados pelos contornos. Estes encontravam-se alinhados com a direção da força e, como tal, estavam sujeitos apenas a esforços de tração. Assim, os resultados pouco uniformes da tensão de cedência podem estar relacionados com o facto da densidade de enchimento do provete representar menos de um terço da área da seção transversal, o que fazia com que a área composta pelo enchimento tivesse menos preponderância no suportar da carga. Este foi um dos fatores que levou a que a espessura para os provetes utilizados nos ensaios seguintes fosse de 7 mm (máximo admissível pela norma para a geometria do provete selecionado).

5.1.2. Altura de camada

Os resultados obtidos para os provetes fabricados em PLA 3D850 apresentam as melhores propriedades mecânicas quando construídos numa altura de camada de 0,3 mm. No entanto, à exceção da tensão de cedência, a altura de camada intermédia, de 0,2 mm apresenta os piores valores para tensão máxima, extensão na rotura e módulo de elasticidade.

Conforme já referido no subcapítulo 2.4, a diminuição da altura de camada traduz-se num aumento do número de camadas que constituem o provete e conseqüentemente no aumento do tempo de impressão. Dado que para uma altura de camada baixa as camadas se encontram-se mais próximas umas das outras, as camadas inferiores às depositadas vão sofrer mais ciclos de aquecimento e arrefecimento, quando comparadas com alturas de camada superiores. Como resultado da repetição de ciclos de aquecimento e arrefecimento há um aumento do gradiente térmico e a conseqüente acumulação de tensões residuais. Estas tensões residuais podem resultar em distorções, delaminação e falhas na produção, resultando assim na diminuição da resistência mecânica do material impresso, o que justificaria os valores inferiores obtidos para as propriedades mecânicas, tal como nos trabalhos [33], [37]. Neste caso, verifica-se que os melhores resultados foram obtidos para uma altura de camada de 0,3 mm, podendo indicar que para o provete em questão, os efeitos adversos da acumulação de tensões residuais possam ter levado aos resultados inferiores para alturas de camada mais baixas.

5.1.3. Orientação de enchimento

Observando os resultados obtidos constata-se que o maior valor da tensão máxima é registado para uma orientação de enchimento de 45°/-45° e o maior valor da tensão de cedência é registado para uma orientação de 0°/90°. No entanto, tanto o valor da tensão máxima como o valor da tensão de cedência encontram-se muito próximos, em ambas as orientações, não variando mais de 0,8 MPa.

Regra geral, a maioria dos estudos [31]–[33] concorda que quanto maior for o alinhamento das linhas de material depositado, com a direção do carregamento, mais resistente é a peça. Isto é de facto verdade se se considerar apenas o ângulo de deposição do material no sentido da direção do carregamento. No entanto, ao considerar uma

orientação $0^\circ/90^\circ$ significa que, à exceção dos contornos das peças, metade do objeto irá conter os cordões de material depositados numa direção e a outra metade na outra [28]. Pressupondo que uma das orientações está alinhada com a direção do carregamento, isto traduz-se na situação em que apenas metade da peça estará a suportar a maioria do esforço, sendo praticamente desprezável a força de adesão entre camadas adjacentes.

Por sua vez, uma peça com as camadas orientadas a $45^\circ/-45^\circ$ terá todas as camadas a suportar as cargas aplicadas e estarão sujeitas tanto tensões normais como tensões corte. Nesta situação os cordões de material terão tendência para se orientar na direção do carregamento e por isso, tal como observado, é expectável que este provete deforme mais (extensão na rotura superior) face ao orientado a $0^\circ/90^\circ$. Esta situação também afeta o módulo de elasticidade, que para uma orientação a $0^\circ/90^\circ$ aparenta ser uma estrutura mais rígida e menos suscetível a deformar-se.

5.2. Provetes em EasyFil™ PLA

5.2.1. Densidade de enchimento

Pelos resultados obtidos é possível verificar que nestes ensaios, efetuados com um provete de maior área de secção transversal, a densidade de enchimento está diretamente relacionada com a resistência do provete à tração, clarificando resultados de estudos anteriores. Com o aumento da densidade de enchimento observa-se uma melhoria de todas as propriedades mecânicas em análise, conforme os estudos apresentados [28], [34]–[37]. A razão para este resultado está muito provavelmente relacionada com a quantidade de material utilizado na construção de cada provete que é maior com o aumento da densidade de enchimento.

Outro dos motivos para a visualização da tendência crescente das propriedades mecânicas com o aumento da densidade de enchimento, pode estar relacionado com a maior espessura do provete utilizado, que se traduziu num maior efeito do material de enchimento na resistência mecânica, em oposição aos provetes com menor espessura, nos quais os esforços de tração eram fundamentalmente suportados pelo contorno da peça.

5.2.2. Altura de camada

No que diz respeito à altura de camada, e ao contrário do verificado nos ensaios ao material PLA 3D850, nestes ensaios foi possível observar que a altura de camada de 0,1 mm apresenta os melhores resultados para a tensão máxima, tensão de cedência e extensão na rotura. Neste caso poder-se-á concluir que o maior preenchimento dos interstícios e a melhoria da adesão entre camadas, devido à maior área de contacto entre as mesmas, sobrepõe-se ao efeito negativo das tensões residuais causadas pelo gradiente térmico. Estes resultados estão em acordo com os trabalhos [31], [32], [34], [36], [38], [39] onde também se verificou um aumento da resistência mecânica com a diminuição da altura de camada atribuído maioritariamente à maior adesão entre camadas (Figura 53).

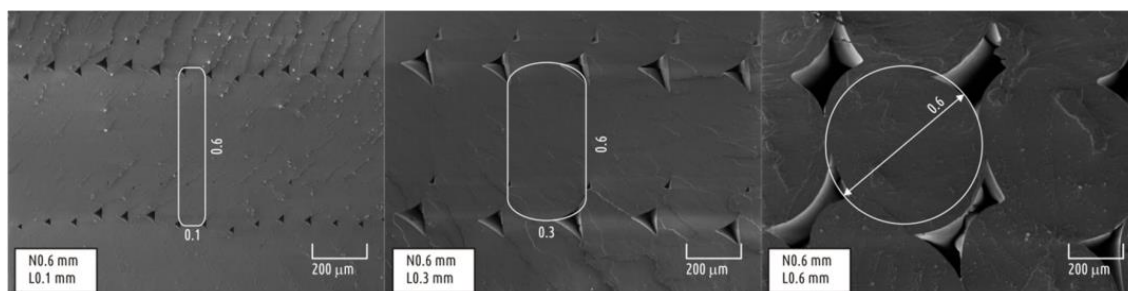


Figura 53 - Comparação entre perfis de deposição com a variação da altura de camada [39].

5.2.3. Orientação de construção

Tendo em consideração que apenas foram comparados provetes com densidades de enchimento de 30%, obteve-se um maior valor da tensão máxima para a orientação de 0°/90°. No entanto este valor apenas superou o da orientação 45°/-45° por 0,2 MPa, representando uma melhoria pouco significativa na ordem dos 0,82%. Por sua vez a tensão de cedência e a extensão na rotura são superiores para a orientação de 45°/-45°. O aumento da ductilidade para a orientação da construção 45°/-45° resulta do reordenamento das fibras na direção do carregamento. Verificou-se esta situação durante a realização dos ensaios, com os provetes com densidades de enchimento superiores a 50%, em que os mesmos sofreram alongamento mesmo após a fratura das paredes laterais dos provetes tal como ilustrado na figura 54.

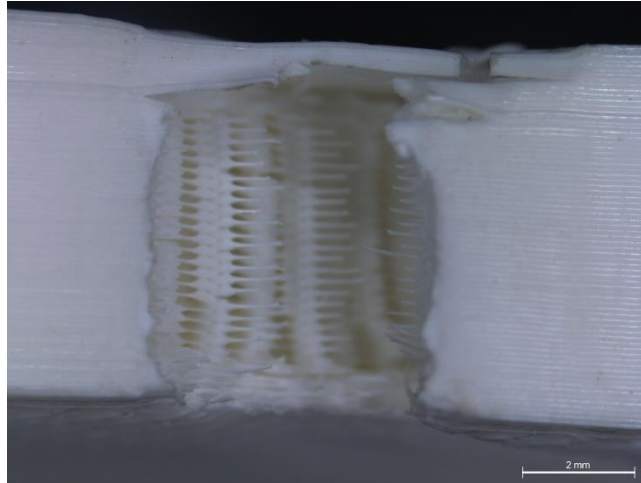


Figura 54 - Secção de fratura lateral de um provete com 0,1 mm de altura de camada, orientação de enchimento de 45°/-45° e densidade de enchimento de 50%.

5.3. Comparação entre material virgem e reciclado

Com base na revisão bibliográfica efetuada e apresentada no subcapítulo 2.5, era previsível que existisse um decréscimo nas propriedades mecânicas quando o material era reciclado. Contudo, ao analisar as fichas técnicas dos materiais aqui estudados (Anexos B e C), verifica-se que o fabricante assegura que o material reciclado tem propriedades iguais ao material virgem.

Olhando para os resultados verifica-se que as tensões máximas são praticamente idênticas, variando apenas 0,25 MPa. Uma diferença maior verifica-se na tensão de cedência, cerca de 3,95 MPa com o melhor resultado a pertencer ao material reciclado. O valor do módulo de elasticidade também mantém valores próximos com uma variação percentual de 1,49 %.

Quanto à extensão na rotura, esta foi superior para os provetes fabricados com o material reciclado, com uma diferença de 0,81%, o que não era espetável dado o verificado no estudo [46].

Um dos aspetos a ter em consideração nesta análise, e conforme já referido anteriormente, é que o material utilizado (ReForm™ rPLA) provém de um fabricante que produz o filamento a partir dos desperdícios gerados na produção do material EasyFil™ PLA, não estando por isso sujeito a um típico ciclo de reciclagem onde material que já foi impresso é reciclado. A ausência da etapa da impressão, pode afetar o comportamento

mecânico e por esse motivo pode-se observar um comportamento ligeiramente melhorado face ao virgem.

5.4. Tratamentos térmicos

Quando analisados os resultados obtidos para a tensão máxima, tanto nos provetes de material virgem como de material reciclado, observa-se um aumento gradual à medida que a temperatura e o tempo de exposição vão aumentando o que está em acordo com os resultados apresentado no estudo [51].

Este aumento do valor da tensão máxima pode ser justificado através das observações realizadas (Figuras 55 e 56), onde é nítido a menor porosidade do material tratado termicamente. Maiores temperaturas facilitam a difusão do material entre linhas de adjacentes, deixando de existir uma divisão clara entre os filamentos depositado o que se traduz numa maior uniformidade nas ligações entre cordões adjacentes.

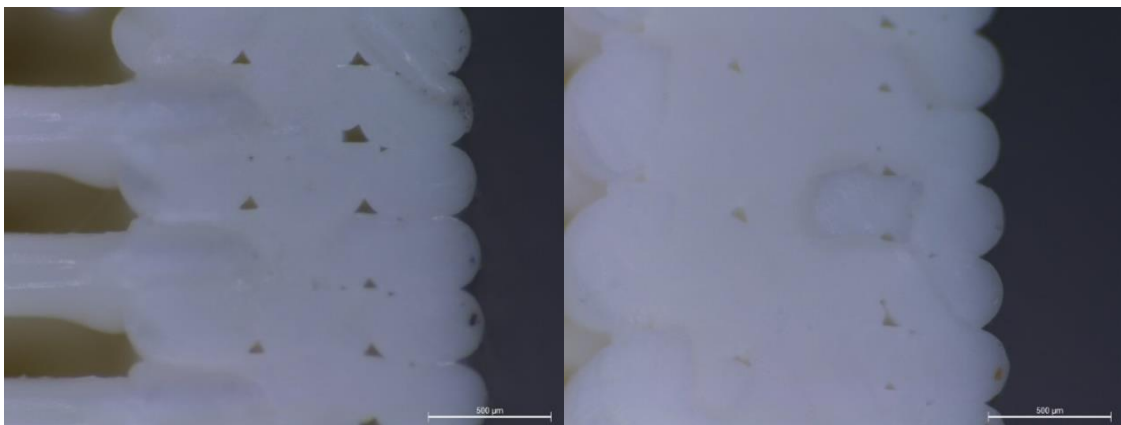


Figura 55 - Comparação entre provete (esquerda) não tratado termicamente e (direita) provete tratado termicamente.

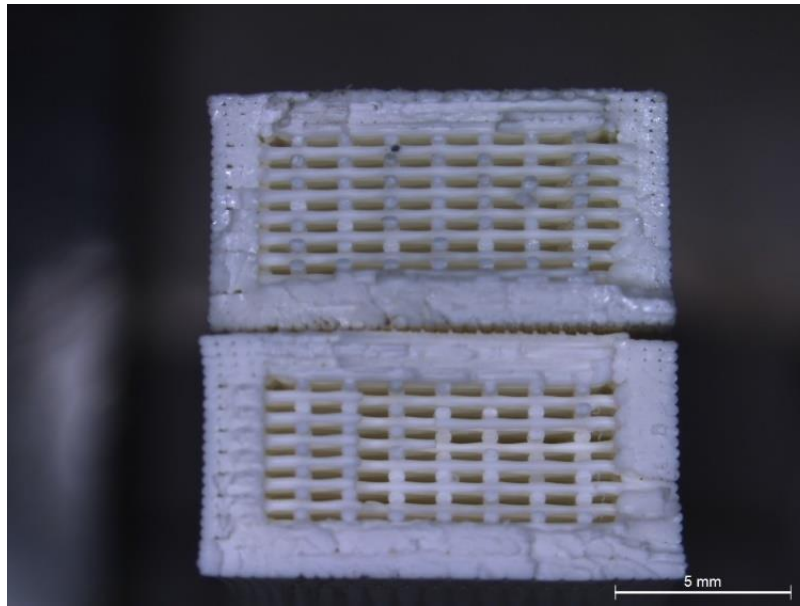


Figura 56 - Comparação entre provete tratado termicamente (baixo) e não tratado termicamente (cima).

No entanto, quando analisadas as restantes propriedades mecânicas não é possível (com clareza) identificar uma tendência nos resultados. Repare-se que a tensão de cedência para o material virgem aumenta para todos os tratamentos térmicos realizados, à exceção do realizado nas condições de 70 °C durante 60 minutos. No entanto, ao observar o material reciclado verifica-se exatamente o oposto, com o melhor resultado a ser obtido nessas condições e o pior nas condições de exposição a 80°C durante 120 minutos.

Algo que também se verifica nos resultados com tratamento térmico é que o valor da extensão na rotura, para os provetes de material virgem, é sempre superior à do provete não sujeito a tratamento térmico, ao contrário do material reciclado, em que o provete que não foi submetido a tratamento térmico obtém a maior extensão na rotura.

Já para o módulo de elasticidade verifica-se que é sempre superior quando os provetes são tratados termicamente, nos provetes fabricados a partir de material reciclado. Ainda assim, ao observar o módulo de elasticidade dos provetes fabricados em material virgem, constata-se que os tratamentos térmicos realizados a 70°C diminuem o módulo de elasticidade do mesmo.

As dimensões dos provetes sujeitos aos tratamentos variaram pouco na seção de ensaio do provete, verificando-se um aumento ligeiro da espessura do provete e um

decréscimo também ligeiro na largura do provete. O comprimento total do provete foi o que mais variou, observando-se contração do provete até cerca de 5 mm.

6. Conclusões

Um dos objetivos deste trabalho era o estudo da influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas de peças impressas. De acordo com os resultados obtidos foi possível concluir que a densidade de enchimento é um dos parâmetros com maior relevância no que diz respeito à melhoria das propriedades mecânicas dos componentes construídos por impressão 3D, seguindo-se a premissa que uma maior densidade de enchimento se traduzirá numa maior resistência mecânica.

O aumento da espessura dos provetes fabricados em PLA 3D850, de 3,2 mm para 7 mm nos provetes em EasyFil™ PLA, revelou-se fundamental para a correta avaliação do efeito deste parâmetro pois nos ensaios realizados com os provetes em EasyFil™ PLA verificou-se um aumento da tensão máxima, tensão de cedência, módulo de elasticidade e extensão na rotura com a densidade de enchimento.

Nos estudos realizados com os materiais PLA 3D850 e EasyFil™ PLA, os resultados para a variação da altura de camada chegaram a conclusões distintas, mas ambas válidas. Nos provetes em PLA 3D850 (com espessura de 3,2 mm), observou-se que uma altura de camada superior se traduzia numa melhor resistência mecânica. Este facto é justificável devido ao menor número de ciclos de aquecimento e arrefecimento, que tem influência nas tensões residuais geradas durante a impressão das peças. Pelo contrário, nos provetes em EasyFil™ PLA (com uma espessura de 7 mm), os melhores resultados foram obtidos para uma altura de camada de 0,1 mm e conclui-se que a adesão adicional entre camadas e a redução dos espaços vazios, derivada da altura de camada mais baixa, era benéfica para o aumento da resistência mecânica. Portanto, para provetes com uma maior espessura e uma menor altura de camada, verificou-se que o efeito positivo da melhor adesão entre camadas supera o efeito negativo gerado pela acumulação de tensões residuais.

A orientação de enchimento, nos dois casos estudados, comprovou que a orientação a 45°/-45° tem uma maior predisposição à deformação, isto porque os cordões de filamento, à medida que o ensaio é realizado, tentam orientar-se na direção da força aplicada. Isto foi confirmado durante os ensaios realizados ao observar-se que os provetes com orientação a 45°/-45°, e com densidades superiores a 50%, depois de fraturarem as paredes exteriores continuavam a alongar, sendo a força suportada pelas fibras internas. Quanto à orientação de 0°/90° constata-se que esta é mais rígida, pois apresenta um

módulo de elasticidade superior, devido à orientação dos cordões depositados a 0°, que coincidem com a direção de aplicação de força no ensaio à tração.

Quanto à comparação entre material reciclado e material virgem, no caso em estudo, não é possível comparar com outros estudos, visto que não foi possível realizar o ciclo de reciclagem.

Contudo, a abordagem de comparação entre o material EasyFil™ PLA (material virgem) e o ReForm™ rPLA (reciclado) concluiu que a diferença de um material para o outro, no que diz respeito à tensão máxima, não é relevante, indo de encontro ao afirmado pelo fabricante. No entanto, tanto a tensão de cedência como a extensão e rotura apresentaram valores ligeiramente superiores quando utilizado o material reciclado, sugerindo que a ausência do ciclo de impressão no material reciclado poderá ter influência na resistência mecânica.

Verificou-se também que os tratamentos térmicos, apesar de induzirem algum erro dimensional, parecem ser uma opção viável para o aumento da tensão máxima em objetos produzidos através da tecnologia FDM. Ainda assim, o parâmetro da extensão na rotura apresentou dois comportamentos distintos em cada um dos materiais analisados, obtendo-se uma melhoria da extensão nos provetes tratados termicamente, para o material virgem, mas um decréscimo da extensão na rotura nos provetes tratados termicamente para o material reciclado.

De salientar que os resultados obtidos são meramente indicativos de uma amostragem pequena, não podendo deste modo ser considerados uma generalização. Podem existir fatores associados aos ensaios realizados, que alterem os resultados mesmo quando executados nas mesmas condições. Portanto não é possível afirmar que, para um número de ensaios superior, não se poderia ter obtido resultados diferentes dos aqui enunciados. As conclusões chegadas neste estudo são indicativas dos parâmetros e respetivos níveis estudados nas condições indicadas.

6.1. Trabalhos futuros

Em primeiro lugar, como continuação dos estudos realizados, seria de extrema importância conseguir a reciclagem do material, para a avaliação posterior das suas propriedades mecânicas, coisa que não foi possível verificar neste trabalho.

Posteriormente, seria interessante continuar com os estudos realizados neste trabalho não só aumentando o número de amostras, para se obter uma visão mais fidedigna da influência de cada parâmetro em particular, mas também para outros valores aqui não referenciados. Um dos parâmetros que seria interessante estudar a sua influência nas propriedades mecânicas seria o número de contornos dos provetes, pois estes independentemente do provete contêm uma parte da seção em que as fibras estão orientadas com as condições do carregamento.

Para além de se continuar com o estudo da influência do recozimento noutros valores, seria interessante realizar um estudo mais aprofundado da influência que o tratamento térmico induz nas dimensões das peças impressas e tentar encontrar uma forma de prever qual será essa variação, com a finalidade de obtermos peças mais resistentes e ao mesmo tempo precisas. Este estudo iria ajudar a que os fabricantes conseguissem obter peças mais resistentes sem abdicar das tolerâncias dimensionais.

Referências

- [1] T. Uslu, M. Holman, X. Zhong, and A. Zhong, Xiao; Schiavo, “Will 3D Printing Replace Conventional Manufacturing?,” 2021.
- [2] “ISO/ASTM 52900:2015(en), Additive manufacturing — General principles — Terminology.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>. [Accessed: 18-Nov-2021].
- [3] “The Free Beginner’s Guide - 3D Printing Industry.” [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>. [Accessed: 10-Jan-2022].
- [4] “Impressão 3D X Usinagem CNC: Qual é O Melhor Para Prototipagem? | EngiPrinters Engenharia E Impressão 3D.” [Online]. Available: <https://engiprinters.com.br/impressao-3d-x-usinagem-cnc-qual-e-o-melhor-para-prototipagem/>. [Accessed: 04-Jan-2022].
- [5] W. K. Swainson, “Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product (US4041476),” no. 19, 1971.
- [6] A. Su and S. J. Al’Aref, *History of 3D printing*. Elsevier Inc., 2018.
- [7] H. Kodama, “Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 52, no. 11, pp. 1770–1773, 1981.
- [8] C. W. Hull, “Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects By Stereothography,” *Patent*, no. 19, p. 16, 1984.
- [9] A. Savini and G. G. Savini, “A short history of 3D printing, a technological revolution just started,” *Proc. 2015 ICOHTEC/IEEE Int. Hist. High-Technologies their Socio-Cultural Context. Conf. HISTELCON 2015 4th IEEE Reg. 8 Conf. Hist. Electrotechnol.*, 2015.
- [10] “Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies - Scope.” [Online]. Available: <https://www.astm.org/COMMIT/SCOPES/F42.htm>. [Accessed: 18-Nov-2021].
- [11] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies - Rapid*

Prototyping. 2010.

- [12] “ADDITIVE MANUFACTURING/ 3D-PRINTING: THINK BEYOND THE POSSIBILITIES.: CAD CONVERSION AND STL FILE IN ADDITIVE MANUFACTURING.” [Online]. Available: <https://additivemanufacturingindia.blogspot.com/2018/04/cad-conversion-and-stl-file-in-additive.html>. [Accessed: 27-Apr-2022].
- [13] K. V. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [14] C. Carausu, A. Mazurchevici, C. Ciofu, and S. Mazurchevici, “The 3D printing modelling of biodegradable material,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 400, no. 4, 2018.
- [15] “Thermoplastics • Plastics Europe.” [Online]. Available: <https://plasticseurope.org/plastics-explained/a-large-family/thermoplastics/>. [Accessed: 19-Nov-2021].
- [16] “FDM 3D printing materials compared | Hubs.” [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>. [Accessed: 18-Nov-2021].
- [17] I. J. Solomon, P. Sevel, and J. Gunasekaran, “A review on the various processing parameters in FDM,” *Mater. Today Proc.*, vol. 37, no. Part 2, pp. 509–514, 2020.
- [18] G. Rasiya *et al.*, “Triangulatica Software,” *Econ.*, vol. 47, no. July, pp. 6896–6901, 2021.
- [19] N. Ayrilmis, “Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament,” *Polym. Test.*, vol. 71, no. July, pp. 163–166, 2018.
- [20] “Introduction to FDM 3D printing | Hubs.” [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/#what>. [Accessed: 18-Nov-2021].
- [21] C. Dudescu and L. Racz, “Effects of Raster Orientation, Infill Rate and Infill Pattern on the Mechanical Properties of 3D Printed Materials,” *ACTA Univ. Cibiniensis*, vol. 69, no. 1, pp. 23–30, 2017.

- [22] “Dúvidas habituais sobre a temperatura e a velocidade de impressão do PLA e ABS.” [Online]. Available: https://filament2print.com/pt/blog/9_duvidas-temperatura-velocidade-pla-abs.html. [Accessed: 23-Nov-2021].
- [23] A. Dey and N. Yodo, “A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 3, no. 3, 2019.
- [24] P. Cain, “Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D printing | Hubs.” [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing/#3d-print-layout>. [Accessed: 19-Nov-2021].
- [25] F. Rayegani and G. C. Onwubolu, “Fused deposition modelling (fdm) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (gmdh) and differential evolution (de),” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, no. 1–4, pp. 509–519, 2014.
- [26] “Best PLA Bed & Print Temperature Settings | All3DP.” [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/the-best-pla-print-temperature-how-to-achieve-it/>. [Accessed: 22-Nov-2021].
- [27] “ABS vs PLA: comparando filamentos de impressão 3D | All3DP.” [Online]. Available: <https://all3dp.com/pt/2/pla-vs-abs-filamento-impressao-3d/>. [Accessed: 23-Nov-2021].
- [28] T. Martins, “Influência dos parâmetros de fabrico nas propriedades mecânicas de peças obtidas por impressão 3D com um único material,” 2017.
- [29] P. Carrier, “3D Print Speed: How to find the optimal speed for reliable and constant print quality.” [Online]. Available: <https://dyzedesign.com/2018/07/3d-print-speed-calculation-find-optimal-speed/>. [Accessed: 04-Jan-2022].
- [30] D. Chakravorty, “3D Printing Supports – The Ultimate Guide | All3DP.” [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>. [Accessed: 09-Dec-2021].
- [31] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baciu, and R. Marinescu, “FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A

- review,” *Polym. Test.*, vol. 69, pp. 157–166, 2018.
- [32] S. R. Rajpurohit and H. K. Dave, “Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 24, no. 8, pp. 1317–1324, 2018.
- [33] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, “Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 287–295, 2010.
- [34] J. F. M. Fernandes, “Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA,” Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2016.
- [35] C. Abeykoon, P. Sri-Amphorn, and A. Fernando, “Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures,” *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 3, no. 3, pp. 284–297, 2020.
- [36] T. J. Suteja and A. Soesanti, “Mechanical Properties of 3D Printed Polylactic Acid Product for Various Infill Design Parameters: A Review,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1569, no. 4, 2020.
- [37] A. Alafaghani, A. Qattawi, B. Alrawi, and A. Guzman, “Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach,” *Procedia Manuf.*, vol. 10, pp. 791–803, 2017.
- [38] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, and P. J. Núñez, “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,” *Mater. Des.*, vol. 124, pp. 143–157, 2017.
- [39] V. E. Kuznetsov, A. N. Solonin, O. D. Urzhumtsev, R. Schilling, and A. G. Tavitov, “Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process,” *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 3, Mar. 2018.
- [40] A. Lanzotti, M. Martorelli, S. Maietta, S. Gerbino, F. Penta, and A. Gloria, “A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA,” *Procedia CIRP*, vol. 79, pp. 143–146, 2019.
- [41] I. Anderson, “Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid,” *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 4, no. 2, pp. 110–115,

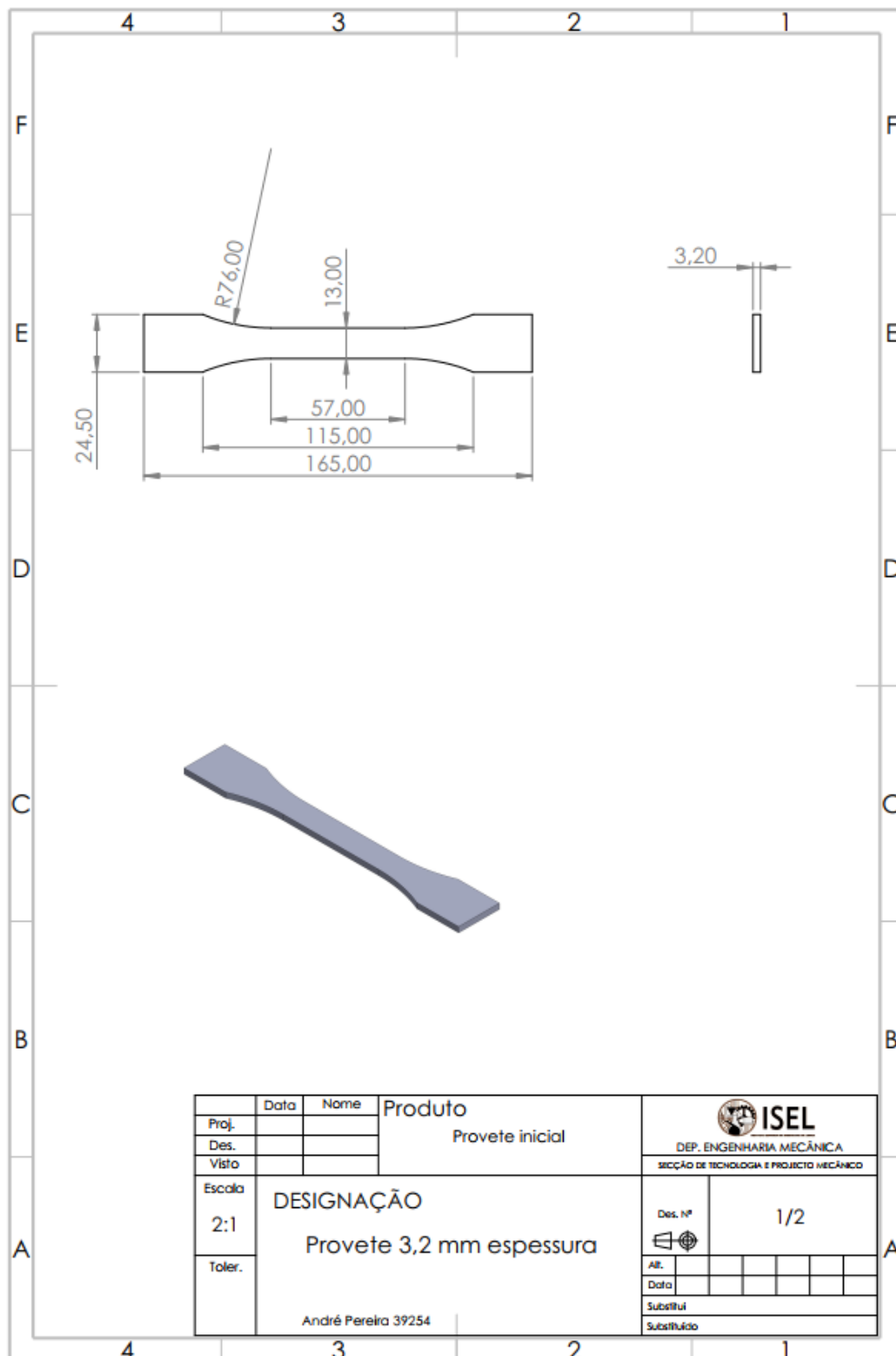
2017.

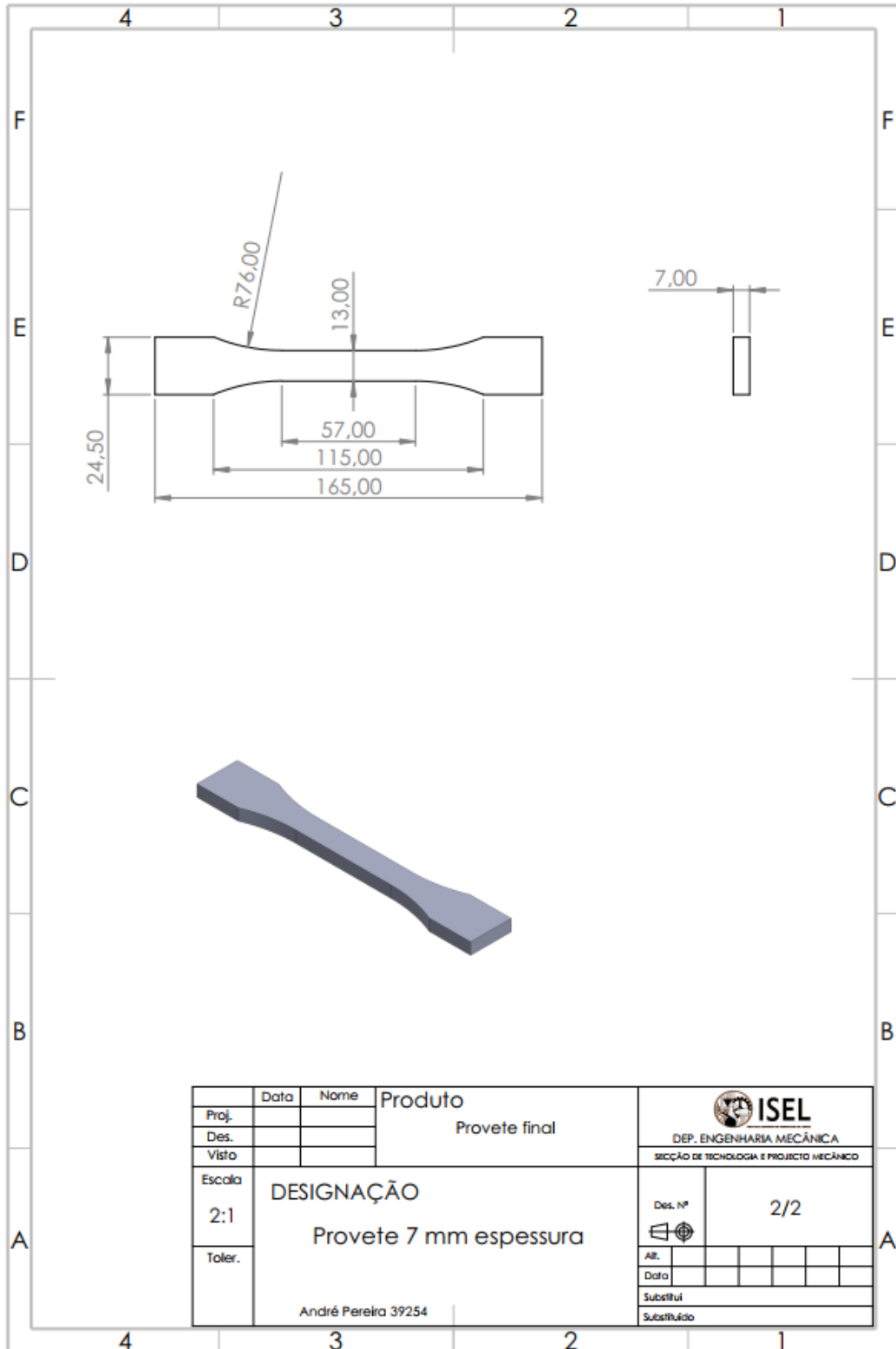
- [42] K. Mikula *et al.*, “3D printing filament as a second life of waste plastics—a review,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 10, pp. 12321–12333, 2021.
- [43] P. Zhao, C. Rao, F. Gu, N. Sharmin, and J. Fu, “Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 197, pp. 1046–1055, 2018.
- [44] “How It Is Made: 3D Printing Filament | Make:” [Online]. Available: <https://makezine.com/article/digital-fabrication/3d-printing-workshop/how-it-is-made-3d-printing-filament/>. [Accessed: 19-Nov-2021].
- [45] “3D Printer Filament Extruder Machine 3D Filament Extrusion Line.” [Online]. Available: <https://www.songhu3dprint.com/product/3d-filament-extrusion-line.html>. [Accessed: 19-Nov-2021].
- [46] I. Pillin, N. Montrelay, A. Bourmaud, and Y. Grohens, “Effect of thermo-mechanical cycles on the physico-chemical properties of poly(lactic acid),” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 93, no. 2, pp. 321–328, 2008.
- [47] J. H. Hong, T. Yu, S. J. Park, and Y. H. Kim, “Repetitive recycling of 3D printing PLA filament as renewable resources on mechanical and thermal loads,” *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 34, no. 22–24, pp. 1–5, 2020.
- [48] “Annealing PLA for Stronger 3D Prints: 2 Easy Ways | All3DP.” [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/annealing-pla-prints-for-strength-easy-ways/>. [Accessed: 29-Nov-2021].
- [49] “How to improve your 3D prints with annealing - Original Prusa 3D Printers.” [Online]. Available: https://blog.prusa3d.com/how-to-improve-your-3d-prints-with-annealing_31088/. [Accessed: 29-Nov-2021].
- [50] W. Jr, Callister, D. and D. G. Rethwisch, *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*, 6th Editio. Wiley.
- [51] N. Jayanth, K. Jaswanthraj, S. Sandeep, N. H. Mallaya, and S. R. Siddharth, “Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 123, no. June, p. 104764, 2021.


[52] ASM International, "Introduction to Tensile Testing." pp. 1–12, 2004.

[53] "ASTM D368-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics."

Apêndice A: Desenhos técnicos dos provetes





	Data	Nome	Produto	 ISEL DEP. ENGENHARIA MECÂNICA SECÇÃO DE TECNOLOGIA E PROJECTO MECÂNICO																								
Proj.			Provete final																									
Des.																												
Visto																												
Escola	DESIGNAÇÃO Provete 7 mm espessura			Des. Nº																								
2:1				2/2																								
Toler.	André Pereira 39254			Alt. <table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table> Data <table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table> Substituído <table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table> Substituído <table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>																								

Apêndice B: Resultados experimentais

Tabela 14 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com provetes em PLA 3D850

Experiência	Densidade de enchimento (%)	Altura de camada (mm)	Orientação de enchimento (°)	σ_{ced} (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{rot} (%)	E (GPa)
1	40	0,1	0/90	30,34	40,79	4,23	1,12
2	40	0,1	45/-45	26,88	42,57	6,35	1,05
3	40	0,2	0/90	28,17	38,61	4,60	1,07
4	40	0,2	45/-45	29,17	38,63	6,10	1,01
5	40	0,3	0/90	28,86	48,18	5,22	1,21
6	40	0,3	45/-45	27,91	41,91	5,12	1,12
7	50	0,1	0/90	31,62	45,05	4,75	1,20
8	50	0,1	45/-45	28,57	44,47	6,72	1,09
9	50	0,2	0/90	32,11	40,57	4,97	1,06
10	50	0,2	45/-45	30,75	40,81	6,10	1,04
11	50	0,3	0/90	32,25	49,15	5,11	1,21
12	50	0,3	45/-45	32,61	46,72	6,65	1,15
13	60	0,1	0/90	25,36	46,83	4,97	1,18
14	60	0,1	45/-45	29,49	47,33	6,21	1,15
15	60	0,2	0/90	32,47	42,73	4,75	1,14
16	60	0,2	45/-45	25,87	45,63	6,50	1,10
17	60	0,3	0/90	34,14	50,16	5,15	1,27
18	60	0,3	45/-45	31,97	47,31	7,16	1,17
19	70	0,1	0/90	32,16	46,98	4,67	1,22
20	70	0,1	45/-45	31,26	47,52	5,99	1,15
21	70	0,2	0/90	28,76	42,94	5,11	1,15
22	70	0,2	45/-45	30,36	43,28	5,88	1,13
23	70	0,3	0/90	34,66	50,60	5,07	1,29
24	70	0,3	45/-45	32,62	48,76	6,39	1,18
25	80	0,1	0/90	32,11	48,41	4,75	1,32
26	80	0,1	45/-45	31,70	48,49	5,77	1,24
27	80	0,2	0/90	34,08	43,73	4,53	1,20
28	80	0,2	45/-45	30,95	43,06	5,92	1,16
29	80	0,3	0/90	30,94	51,35	5,11	1,30
30	80	0,3	45/-45	33,34	50,62	6,58	1,19
31	90	0,1	0/90	31,06	46,38	4,82	1,26
32	90	0,1	45/-45	31,72	48,02	5,41	1,25
33	90	0,2	0/90	34,94	43,79	4,97	1,26
34	90	0,2	45/-45	32,20	46,62	5,66	1,21
35	90	0,3	0/90	30,47	51,28	5,48	1,25
36	90	0,3	45/-45	32,15	51,71	5,85	1,24
37	100	0,1	0/90	33,94	63,84	5,84	1,36
38	100	0,1	45/-45	35,72	64,31	7,19	1,38

Experiência	Densidade de enchimento (%)	Altura de camada (mm)	Orientação de enchimento (°)	σ_{ced} (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{rot} (%)	E (GPa)
39	100	0,2	0/90	35,00	54,78	5,29	1,37
40	100	0,2	45/-45	32,40	66,04	7,16	1,34
41	100	0,3	0/90	32,33	53,90	5,48	1,27
42	100	0,3	45/-45	32,90	60,05	6,64	1,33

Tabela 15 - Resultados experimentais dos ensaios realizados com provetes em EasyFil™ PLA

Experiência	Densidade de enchimento (%)	Altura de camada (mm)	Orientação de enchimento (°)	σ_{ced} (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{rot} (%)	E (MPa)
43	10	0,1	45/-45	14,88	21,69	6,13	577,68
44	10	0,2	45/-45	13,24	21,65	6,79	611,10
45	10	0,3	45/-45	13,67	21,82	6,72	549,94
46	30	0,1	45/-45	15,53	23,19	7,74	592,00
47	30	0,2	45/-45	18,97	24,41	7,01	611,10
48	30	0,3	45/-45	14,10	23,82	8,69	611,10
49	50	0,1	45/-45	18,31	26,94	15,35	677,94
50	50	0,2	45/-45	16,64	27,93	6,94	703,74
51	50	0,3	45/-45	15,42	25,56	7,08	668,39
52	70	0,1	45/-45	20,36	33,65	14,17	787,74
53	70	0,2	45/-45	17,99	30,35	13,01	731,70
54	70	0,3	45/-45	20,37	27,79	16,44	720,90
55	30	0,1	0/90	14,38	22,78	5,26	634,97
56	30	0,2	0/90	17,80	24,07	5,04	692,26
57	30	0,3	0/90	11,02	25,16	5,99	639,74
R1 (reciclado)	30	0,3	0/90	14,96	25,41	6,80	630,19

Tabela 16 - Resultados experimentais dos ensaios realizados aos provetes tratados termicamente

Experiência	Temperatura (°C)	Tempo exposição (min)	σ_{ced} (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{rot} (%)	E (MPa)
57 (referência)	0	0	11,02	25,16	5,99	639,74
TT_1	70	60	10,63	25,24	6,80	611,10
TT_2	70	120	11,26	25,78	6,43	620,65
TT_3	80	60	11,55	27,55	6,58	675,78
TT_4	80	120	12,67	28,43	6,35	687,48
R1 (referência)	0	0	14,96	25,41	6,80	630,19
TT_R1	70	60	16,81	25,42	5,55	661,79
TT_R2	70	120	14,77	25,71	5,84	649,29
TT_R3	80	60	15,16	26,63	6,06	673,16
TT_R4	80	120	13,88	27,03	5,63	673,16

Anexo A: Material PLA 3D850



Fil3D
PLA 3D850



Tucab
IMPRESSÃO 3D E MATERIAIS



Impressão 3D

FICHA TÉCNICA

Matéria Prima- PLA 3D850		
Propriedade	Norma	Valores Típicos
Índice de Fluidéz (210°C /2.16kg)	D1238	7-9 g/10min
Resistência na Deformação	D882	65.5 MPa
Alongamento na Tração	D882	4.3%
Densidade	D792	1,24 g/cc

- Elevada precisão
- Não deforma
- Boa resistência mecânica e térmica
- Fácil manuseamento
- Elevada Rigidez
- Boa Adesão
- Baixa Probabilidade de *Stringing*
- Pode ser submetido a um processo de *Annealing* para aumentar a sua resistência
- Matéria Prima de acordo com Regulamentação FDA
- Matéria Prima de Acordo com Regulamento (UE) N.º 10/2011 da Comissão (relativo aos materiais e objetos de matéria plástica destinados a entrar em contacto com os alimentos)

Diâmetro do Filmento (mm)	Gama de tolerância (mm)
1,75	1,67 a 1,83
2,85	2,77 a 2,93

 geral@tucab.pt

 tucab.pt

 +351 244 613 079

 Estrada Nacional 109, km 162,1,
2415-001 Regueira de Pontes



PLA 3D850



APLICAÇÃO	COR	EMBALAGEM
Filamentos para Impressão 3D	Opacas: Amarelo, Rosa, Violeta, Laranja, Vermelho, Azul, Verde, Cinza, Ouro, Prata, Cobre, Pérola, Branco, Natural, Preto, Preto 100% Mate, Preto 15% Matte, Preto Metálico Glitter: Violeta, Vermelho, Ouro, Preto Translúcidas: Violeta Glitter Outras Cores Sob Consulta.	Para Bobines de 1Kg Embalado em saco de vácuo com sílica e colocado numa Caixa de Cartão. Para Bobines de 3Kg Embalado em Manga com sílica

CONSELHOS DE UTILIZAÇÃO

Aconselha-se a utilização do sistema de ventilação moderadamente, no decorrer do processo de impressão. Não utilizar temperaturas de extrusão superiores a 230°C, devido à possibilidade de queima do material. Os valores apresentados, são valores típicos que podem variar de acordo com tipo de impressora 3D.

Propriedade de Impressão	Valores Típicos
Temperatura de Impressão	210±20°C
Mesa (Não Necessita)	60±10°C (Se aplicável)
Temperatura de <i>Annealing</i>	80 a 130°C
Temperatura de Fundição	210°C

Maurício

(Sónia Maurício)

Responsável da Qualidade

Data de atualização: 28/04/2021

✉ geral@tucab.pt

🌐 tucab.pt

☎ +351 244 613 079

📍 Estrada Nacional 109, km 162,1,
2415-001 Regueira de Pontes

Anexo B: Material EasyFil™ PLA

Technical Data Sheet



Product name: EasyFil™ PLA

Date of issue: 29 October 2015
Version: v2

EasyFil™ PLA is an "easy to use" high-end PLA (Poly-Lactic Acid) type of 3D printer filament. With retaining the typical PLA features, EasyFil™ PLA is slightly modified with an impact modifier, making the filament tougher, less rigid, slightly softer and therefore "easy to print" at relatively low temperatures. By being slightly modified, EasyFil™ PLA is much longer preservable than normal PLA.

Another great advantage of EasyFil™ PLA - compared to regular PLA - is EasyFil™'s low shrinkage factor, which makes EasyFil™ PLA nearly warp-free and therefore EasyFil™ PLA will not deform after cooling.

Properties	Typical value	Test Method	Test condition
Physical			
Specific gravity	1.24 g/cc	ASTM D1505	-
Melt flow rate	6.0 g/10min	-	-
Water absorption	-	-	-
Moisture absorption	-	-	-
Mechanical			
Impact strength	7.5 KJ/m ²	-	-
Tensile strength	110 Mpa (MD)	ASTM D882	-
Tensile modulus	3310 Mpa (MD)	ASTM D882	-
Elongation at break	160% (MD)	ASTM D882	-
Flexural strength	± 55.2 Mpa	-	-
Flexural modulus	± 2392.5 Mpa	-	-
Hardness	-	-	-
Thermal			
Print temperature	± 180 - 220° C	-	-
Melting temperature	± 210 ± 10° C	-	-
Viscat softening temp.	± 60° C	ISO 306	-
Optical			
Haze	2.1%	ASTM D1003	-
Transmittance	-	-	-
Gloss	90	ASTM D1003	Gloss, 20°

Product details, certifications and compliance		Diameter	Tolerance	Roundness
HS Code	39169090	1.75mm	± 0.05mm	≥ 95%
REACH compliant	Yes	2.85mm	± 0.10mm	≥ 95%
RoHS certified	Yes			
FDA compliant	Yes			

Formfutura VOF	CoC: 55502105	Tel: +31 (0)85 002 0881
Groenestraat 215	VAT: NL851741083B01	Email: info@formfutura.com
6531 HH Nijmegen	EORI: NL851741083	Website: www.formfutura.com
The Netherlands		

All information supplied by or on behalf of Formfutura in relation to its products, whether in the nature of data, recommendations or otherwise, is supported by research and, in good faith, believed reliable, but Formfutura assumes no liability and makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, those of title, merchantability, fitness for a particular purpose or non-infringement or any warranty arising from a course of dealing, usage, or trade practice whatsoever in respect of application, processing or use made of the aforementioned information or product. The user assumes all responsibility for the use of all information provided and shall verify quality and other properties or any consequence from the use of all such information. Typical values are indicative only and are not to be construed as being binding specifications.

Anexo C: Material ReForm™ rPLA

Technical Data Sheet

Product name: ReForm™ - rPLA

ReForm is a sustainable initiative within Formfutura to efficiently manage residual extrusion waste streams and re-use them into high-end upcycled filaments. The ideology behind ReForm is to make 3D printing more sustainable – without having to make compromises on material properties – and yet keep it affordable.

ReForm rPLA is based on exactly the same unique formulation as our EasyFil PLA range, but is made out of residual extrusion waste streams which are re-compounded and homogenized into a high-end and easy to print upcycled PLA filament with significant less environmental impact.

Properties	Typical value	Test Method	Test condition
Physical			
Specific gravity	1.24 g/cc	ASTM D1505	-
Melt flow rate	6.0 g/10min	-	-
Water absorption	-	-	-
Moisture absorption	-	-	-
Mechanical			
Impact strength	7.5 KJ/m ²	-	-
Tensile strength	110 Mpa (MD)	ASTM D882	-
Tensile modulus	3310 Mpa (MD)	ASTM D882	-
Elongation at break	160% (MD)	ASTM D882	-
Flexural strength	± 55.2 Mpa	-	-
Flexural modulus	± 2392.5 Mpa	-	-
Hardness	-	-	-
Thermal			
Print temperature	± 180 - 220° C	-	-
Melting temperature	± 210 ± 10° C	-	-
Viscat softening temp.	± 60° C	ISO 306	-
Optical			
Haze	2.1%	ASTM D1003	-
Transmittance	-	-	-
Gloss	90	ASTM D1003	Gloss, 20°

Product details, certifications and compliance		Diameter	Tolerance	Roundness
HS Code	39169090	1.75mm	± 0.05mm	≥ 95%
REACH compliant	Yes	2.85mm	± 0.10mm	≥ 95%
RoHS certified	Yes			

All information supplied by or on behalf of Formfutura in relation to its products, whether in the nature of data, recommendations or otherwise, is supported by research and, in good faith, believed reliable, but Formfutura assumes no liability and makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, those of title, merchantability, fitness for a particular purpose or non-infringement or any warranty arising from a course of dealing, usage, or trade practice whatsoever in respect of application, processing or use made of the forementioned information or product. The user assumes all responsibility for the use of all information provided and shall verify quality and other properties or any consequence from the use of all such information. Typical values are indicative only and are not to be construed as being binding specifications.

Formfutura BV • Tarweg 3 • 6534 AM • Nijmegen • Netherlands • T: +31 (0)85 743 4000 • E: info@formfutura.com
 Dutch Business Registration No: 69099502 • VAT No: NL857733709B01 • EORI No: NL857733709 • D-U-N-S: 490546732
 - www.formfutura.com -