



Análise da viabilidade de reutilização de polímeros em impressão 3D

MANUEL ANTÓNIO ROCHA DA VEIGA ESTEVES

outubro de 2025

Análise da viabilidade de reutilização de polímeros em impressão 3D

Manuel António Rocha da Veiga Esteves

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Materiais e Processos de Fabrico**

Orientador: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Doutor, ISEP

Coorientador: Francisco José Gomes da Silva, Doutor, ISEP

Júri:

Presidente:

António Gonçalves Magalhães, Professor Coordenador, ISEP

Vogais:

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor Coordenador com Agregação, ISEP

Elsa Wellenkamp de Sequeiros, Professor Auxiliar, FEUP

Porto, Setembro 2025

Resumo

Os processos de fabrico aditivo ocupam no mundo atual um lugar bastante importante, que já não se limita apenas ao desenvolvimento de protótipos para grandes empresas, mas que cada vez mais é acessível a pequenos empreendedores e aficionados que pretendem desenvolver os seus próprios projetos de forma sustentável e económica. Tudo isto é possível através dos desenvolvimentos que têm sido feitos por várias empresas com o objetivo de criar equipamentos de impressão 3D cada vez mais acessíveis economicamente e tecnologicamente para o público em geral. As impressoras do tipo FDM (*Fused Deposition Modeling*) têm sido um mercado bastante beneficiado por estas tendências e desenvolvimentos tecnológicos. Uma das principais despesas associada ao fabrico de modelos 3D com recurso a FDM advém da aquisição do material necessário para a produção destes. Atualmente, o PLA (*polylactic acid*) apresenta-se como o material mais comum e económico para impressão 3D do tipo FDM. Outra característica relevante deste processo é a necessidade de realização de purgas do sistema de extrusão do filamento, por exemplo, quando é alterada a cor do filamento. Este aspeto do processo leva a que seja gerada uma quantidade considerável de material desperdiçado ao final de algumas impressões. Para além desta fonte de desperdício existem outras duas associadas à impressão 3D FDM: material de suporte para estruturas complexas e impressões falhadas que são depois descartadas. Estas características do processo abrem a porta à reutilização deste material para a produção de filamento que pode ser novamente utilizado para realizar impressões.

Esta dissertação tem como objetivo estudar a viabilidade da reutilização destes desperdícios de material gerados durante o funcionamento de um equipamento de impressão 3D do tipo FDM para a produção de novo filamento e sua reimpressão, e também perceber qual a influência da temperatura de impressão nas propriedades mecânicas do material reciclado deste modo. O material utilizado no estudo é o PLA. O primeiro passo é a produção de filamento através de desperdícios acumulados de impressões anteriores e o ajuste dos parâmetros de processamento. Posteriormente é realizada uma comparação entre as propriedades mecânicas do PLA virgem impresso a 220°C e PLA reciclado impresso a três temperaturas diferentes 220°C, 237°C e 255°C. Estas impressões produzem provetes normalizados ISO para a realização de ensaios de tração, flexão e Charpy, com uma taxa de preenchimento de 50% de modo a determinar as correspondentes propriedades mecânicas.

Os resultados do estudo permitem concluir que a produção de filamento diretamente a partir de desperdícios de PLA acumulados é possível, no entanto a rigidez e rugosidade superficial deste deixam bastante a desejar em termos de processabilidade e sua utilização para a impressão 3D. As propriedades mecânicas apresentadas pelo material reciclado são superiores em termos de tensão de cedência e módulo de elasticidade face ao PLA novo, no entanto apresenta menor capacidade de deformação plástica do que o último.

Palavras-chave: Impressão 3D, FDM, Reutilização, PLA, Propriedades Mecânicas, Temperatura de impressão.

Abstract

The AM (additive manufacturing) processes have achieved a major position in the current state of the world, which is no longer restricted to the development of prototypes for intelligence and development big tech companies, but it is increasingly more reachable to small businesses and private individuals looking forward to flourishing their projects in a sustainable and economical manner. All of this is only achievable due to the efforts pursued by various companies with the objective of delivering less expensive equipment that retain high quality and are easy enough to operate for non-specialized individuals. A specific segment of 3D printing market has greatly benefited from such endeavors, the FDM printing machines.

One of the main sources of expenditure related to FDM 3d printing is associated with the acquisition costs of the material. Currently PLA presents itself as the most common and economic material for FDM 3d printing. Another fundamental trait from this process is the necessity for regular purges of extruded material for example, when the color of the filament is changed. Such attribute leads to an accumulation of considerable amounts of waste material over a few cycles of production. Another two sources of waste material associated with FDM 3D printing are supporting structures needed for more complex components, and failed prints that are thrown away. These fundamental flaws of the process open the door to the implementation of a recycling project of this waste material, to produce new filament. This study has it as its main objective to study the viability of such a project and to understand which are the best processing temperatures to this recycled filament produced from waste material, for attaining the most favorable mechanical properties. The material used in the experimental procedure is PLA. The first step of the project is the production of filament with waste material accumulated over the course of some months of 3D printing works, and to perfect the process variables to the end of achieving the best possible filament. After this, test pieces shall be produced for mechanical testing through three different tests, tensile testing, flexural testing and Charpy testing, all this according to ISO directives. One set of test specimens shall act as a control and means of comparison to virgin PLA and the other three sets of specimens will be used to evaluate the effects of printing temperature in the mechanical properties of recycled PLA. These three sets shall be printed at 220°C (same as virgin PLA), 237°C and 255°C. No other parameter shall be changed. The results of this study showed that the processing of waste PLA from various sources already referred is possible, however the mechanical properties and processability of such filament is unsatisfactory. The mechanical properties shown by recycled PLA are superior to virgin PLA in terms of Young's Modulus and yield stress, however recycled PLA presents a much lower deformation at rupture.

Keywords: 3D printing, FDM, Reuse, PLA, Mechanical Properties, Printing Temperature.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice.....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xi
Acrónimos e Símbolos.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Polímeros técnicos	3
2.1.1. Tipos de polímeros.....	4
2.1.2. Características e aplicações	6
2.1.3. Determinação de propriedades e normas.....	7
2.2. Fabrico aditivo de polímeros.....	9
2.2.1. Introdução histórica.....	9
2.2.2. Tipos de processos de FA.....	10
2.2.3. Processo <i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM)	16
2.2.4. Variáveis do processo	18
2.2.5. Equipamento de impressão	21
2.2.6. Equipamentos de extrusão de filamento.....	23
2.2.7. Desenvolvimentos recentes/ Estado da arte.....	24
2.3. Sustentabilidade e reciclabilidade em FA	25
2.3.1. Princípios da sustentabilidade	25
2.3.2. Reciclagem de polímeros	28
2.3.3. Propriedades obtidas pela reciclagem.....	31
2.3.4. Fabrico de filamentos reciclados	33
2.3.5. Estado da arte	34
3. Métodos e Procedimentos.....	37
3.1. Máquinas e equipamentos.....	38
3.1.1. Máquina de ensaios de tração e flexão	38
3.1.2. Máquina de ensaio Charpy	38
3.1.3. Extrusora de filamento	39

3.1.4. Impressora 3D	40
3.1.5. Lupa.....	41
3.2. Parâmetros de impressão	42
3.3. Dimensões dos provetes	43
3.4. Procedimento experimental	44
4. Resultados e discussão	47
4.1. Produção do filamento.....	47
4.2. Análise dimensional dos provetes.....	48
4.3. Análise dos resultados do ensaio de tração.....	51
4.3.1. Material novo.....	51
4.3.2. Material reciclado impresso a 220°C	52
4.3.3. Material reciclado impresso a 237°C	53
4.3.4. Material reciclado impresso a 255°C	54
4.3.5. Comparação de todos os ensaios de tração	55
4.4. Análise dos resultados do ensaio de flexão	61
4.4.1. Material novo.....	61
4.4.2. Material reciclado impresso a 220°C	62
4.4.3. Material reciclado impresso a 237°C	63
4.4.4. Material reciclado impresso a 255°C	63
4.4.5. Comparação de todos os ensaios de flexão.....	64
4.5. Análise dos resultados do ensaio Charpy.....	69
4.5.1. Material novo.....	69
4.5.2. Material reciclado impresso a 220°C	70
4.5.3. Material reciclado impresso a 237°C	71
4.5.4. Material reciclado impresso a 255°C	72
4.5.5. Comparação de todos os ensaios Charpy	73
5. Conclusão.....	77
5.1. Conclusões finais	77
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	79
Referências.....	81
Declaração de Integridade	85
Apêndice A	87
Anexo A	91
Anexo B	93

Lista de Figuras

Fig. 1 - Divisão básica dos polímeros quanto à sua origem [5]	4
Fig. 2- a) Representação dos átomos e ligações que formam um monómero de PET; b) representação química de um monómero de PET; c) grupos constituintes de um monómero de PET [12]	7
Fig. 3 - Direções de impacto para a) ensaio Charpy [17] e b) ensaio Izod [18]	9
Fig. 4- Evolução de mercado da FA na América do Norte de 2014 a 2025 [20].....	10
Fig. 5- Divisão dos processos de FA quanto ao estado físico do material utilizado [1]	11
Fig. 6 - Tecnologias de impressão 3D mais utilizadas em 2022 [21]	12
Fig. 7- Componentes e estrutura básica de equipamentos de impressão 3D do tipo FDM [20]	17
Fig. 8- Alguns materiais utilizados em FDM e respetivas temperaturas de processamento [25].....	17
Fig. 9- Exemplo de diferentes taxas de preenchimento para uma estrutura de ninho de abelha [27]	19
Fig. 10 - a) Componentes e etapas necessários para o processo SLS [23]; b) impressora cartesiana com movimento da cabeça em xz [36]; c) impressora cartesiana <i>corexy</i> [36]; d) impressora cartesiana do tipo cantiléver; e) impressora do tipo delta.....	22
Fig. 11 - Linha de extrusão de filamento para impressão 3D [38]	23
Fig. 12 - Três princípios da sustentabilidade [44]	26
Fig. 13- 17 pilares fundamentais estabelecidos pela ONU para o desenvolvimento sustentável [45]	26
Fig. 14- Família dos poliésteres biodegradáveis (ACC- copoliésteres aromáticos alifáticos; PBAT- poli adipato de butileno tereftalato; PBS- poli butilenosuccinato; PBSA- poli succinato adipato de butileno; PCL- policaprolactona; PET- poli tereftalato de etileno; PHB- poli hidroxibutirato; PHH- polihidroxi hexanoato; PHV- poli hidroxi valerato; PLA- poli ácido láctico) [46]	28
Fig. 15 - Gráfico tensão - deformação para ABS virgem e ABS reciclado com diferentes números de ciclo [51]	32
Fig. 16 - Gráfico de tensão - deformação de PET novo e PET reciclado com diferentes percentagens de contaminação por HDPE [53]	33
Fig. 17- a) <i>Setup</i> da máquina para ensaio de tração; b) <i>Setup</i> para ensaio de flexão (3 pontos)	38
Fig. 18- a) Escala em libras pé informações do fabricante; b) Equipamento de ensaios Charpy	39
Fig. 19- Extrusora de filamento Wellzoom [58].	39
Fig. 20- a) Impressora 3D (FDM) Bambu Lab X1-Carbon; b) Base de construção em PEI	40
Fig. 21- a) Lupa Stemi DV4; b) Conjunto Lupa Stemi e câmara Canon utilizado para fotografar zona de rotura dos provetes.....	41
Fig. 22- a) Dimensões dos provetes para ensaio de tração; b) Dimensões dos provetes para ensaio de flexão; c) Dimensões dos provetes para ensaio <i>Charpy</i>	43
Fig. 23- a) Defeitos variados na extrusão do filamento (rugosidade excessiva, secção variável, falta de mistura, falta de flexibilidade); b) Defeito de secção irregular, rugosidade excessiva e falta de flexibilidade	48
Fig. 24- Comparação das larguras de provetes para ensaio de tração	48
Fig. 25- Comparação das espessuras de provetes para ensaio de tração	49
O gráfico da Fig. 25 mostra que não existe uma relação entre a variação da espessura dos provetes, o tipo de material de que são feitos e a temperatura de extrusão, tão clara e demarcada como o que se confirmou relativamente às dimensões da largura dos provetes. Nesta análise verifica-se que todos os provetes, em todas as medições efetuadas, apresentavam espessura superior à teórica de 3,2 mm. Este facto poderá ser justificado pela existência de espaços vazios entre camadas que não são totalmente preenchidos por material e que, assim, elevam a espessura dos provetes. Abaixo pode ser observada a Fig. 26 na qual é feita uma comparação das áreas de secção dos provetes em análise.	50
Fig. 26- Comparação das áreas de secção de provetes para ensaio de tração	50
Fig. 27- Gráfico tensão/ deformação comparativo dos 4 provetes de PLA virgem analisados.....	51
Fig. 28- Gráfico tensão/ deformação comparativo dos 4 provetes de PLA reciclado e impresso a 220°C	52
Fig. 29- Gráfico tensão/ deformação comparativo dos 4 provetes de PLA reciclado e impresso a 237°C	53
Fig. 30- Gráfico tensão/ deformação comparativo dos 4 provetes de PLA reciclado e impresso a 255°C	54

Fig. 31- Gráfico tensão/ deformação comparativo dos vários provetes ensaiados.....	55
Fig. 32- Comparação da tensão máxima média obtida por cada conjunto de provetes	56
Fig. 33- Comparação do módulo de elasticidade médio dos provetes ensaiados e do material em bruto.	57
Fig. 34- Comparação da tensão de cedência média dos provetes ensaiados e do material em bruto.....	58
Fig. 35- a) Superfície de rotura de provete de PLA virgem; b) Superfície de rotura de provete de PLA reciclado impresso a 220°C; c) Superfície de rotura de provete de PLA reciclado impresso a 237°C; d) Superfície de rotura de provete de PLA reciclado impresso a 255°C	59
Fig. 36- a) Provetes de PLA novo após ensaio; b) Provetes de PLA reciclado impresso a 220°C, após ensaio; c) Provetes de PLA reciclado impresso a 237°C, após ensaio; d) Provetes de PLA reciclado impresso a 255°C, após ensaio.....	60
Fig. 37- Gráfico de tensão/ deformação resumo dos provetes produzidos com material novo	61
Fig. 38- Gráfico de tensão/ deformação resumo dos provetes produzidos com material reciclado, extrudido a 220°C.....	62
Fig. 39- Gráfico de tensão/ deformação resumo dos provetes produzidos com material reciclado, extrudido a 237°C.....	63
Fig. 40- Gráfico de tensão/ deformação resumo dos provetes produzidos com material reciclado, extrudido a 255°C.....	64
Fig. 41- Gráfico de tensão/ deformação de comparação entre todos os provetes	65
Fig. 42- Gráfico de comparação de valores médios de tensão máxima à flexão por tipo de material.	65
Fig. 43- Gráfico de comparação de valores médios de módulo de elasticidade à flexão por tipo de material.....	66
Fig. 44- Gráfico de comparação de valores médios de tensão de cedência à flexão por tipo de material.	67
Fig. 45- a) PLA reciclado 220°C; b) PLA reciclado 237°C; c) PLA reciclado 255°C.....	68
Fig. 46- a) Provetes de PLA virgem após ensaio; b) Provetes de PLA reciclado impresso a 220°C, após ensaio; c) Provetes de PLA reciclado impresso a 237°C, após ensaio; d) Provetes de PLA reciclado impresso a 255°C, após ensaio.....	68
Fig. 47- Gráfico de energia absorvida pelos provetes de PLA virgem.	69
Fig. 48- Gráfico de energia absorvida pelos provetes de PLA reciclado impresso a 220 °C.....	70
Fig. 49- Gráfico de energia absorvida pelos provetes de PLA reciclado impresso a 237 °C.....	71
Fig. 50- Gráfico de energia absorvida pelos provetes de PLA reciclado impresso a 255 °C.....	72
Fig. 51- Gráfico de comparação de valores médios por tipo de material a 24,1°C.....	73
Fig. 52- Gráfico de comparação de valores médios por tipo de material a -30,9°C.	74
Fig. 53- Gráfico de comparação de valores médios global.	75
Fig. 54- a) Provetes de material novo após ensaio; b) provetes de PLA reciclado impresso a 220°C após ensaio; c) provetes de PLA reciclado impresso a 237°C após ensaio; d) provetes de PLA reciclado impresso a 255°C após ensaio.....	76
Fig. 55-a)PLA novo 24,1°C; b) PLA novo -30,9°C; c) PLA reciclado impresso a 220°C (24,1°C);d) PLA reciclado impresso a 220°C(-30,9°C);e) PLA reciclado impresso a 237°C (24,1°C); f) PLA reciclado impresso a 237°C(-30,9°C); g) PLA reciclado impresso a 255°C (24,1°C); h) PLA reciclado impresso a 255°C (-30,9°C)	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais materiais utilizados no FA por FDM [1]	3
Tabela 2- Comparação de propriedades mecânicas de PLA (98% L-LA), PLA (94% L-LA), PS biaxial e PET [10]	6
Tabela 3- Variação de propriedades mecânicas de provetes de ABSS impressos com FDM em função da geometria e taxa de preenchimento [33]	20
Tabela 4 - Equipamentos e suas funções numa linha de extrusão de filamento.....	24
Tabela 5 - Desenvolvimentos científicos recentes em diferentes processos de FA	24
Tabela 6 – Adaptada da tabela 4 da norma ISO/TR 18568:2021(E), resumo de simbologia de reciclagem de plásticos em diferentes países [47].	29
Tabela 7- Simbologia e respetivo material reciclado segundo a norma ISO/TR 18568:2021 [47].....	31
Tabela 8- Comparação de propriedades de ABS virgem com ABS com 1, 2 e 3 ciclos de reciclagem [51].....	32
Tabela 9- Comparação de propriedades de PET novo e reciclado [52]	33
Tabela 10- Materiais e respetivos fabricantes de filamento reciclado [54].....	34
Tabela 11 - Desenvolvimentos recentes na reciclagem de polímeros para produção de filamentos de impressão 3D	34
Tabela 12- Sumário dos parâmetros de impressão comuns a todos os provetes	37
Tabela 13- Variáveis estudadas	37
Tabela 14- Parâmetros do equipamento <i>Wellzoom B desktop extruder</i>	39
Tabela 15- Parâmetros de impressão comuns a todos os provetes produzidos	42
Tabela 16- Tabela sumário do número de provetes e variáveis em estudo em cada ensaio	43
Tabela 17- Dados complementares da Fig. 27	49
Tabela 18- Dados complementares da Fig. 28.....	50
Tabela 19- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de tração do PLA virgem	51
Tabela 20- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de tração do PLA reciclado impresso a 220°C.....	52
Tabela 21- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de tração do PLA reciclado impresso a 237°C.....	54
Tabela 22- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de tração do PLA reciclado impresso a 255°C.....	54
Tabela 23- Comparação da tensão máxima média obtida por cada conjunto de provetes.	56
Tabela 24- Comparação do módulo de elasticidade médio dos provetes ensaiados e do material em bruto.	57
Tabela 25- Comparação da tensão de cedência média dos provetes ensaiados e do material em bruto.	58
Tabela 26- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de flexão do PLA virgem	61
Tabela 27- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de flexão do PLA reciclado impresso a 220°C.....	62
Tabela 28- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de flexão do PLA reciclado impresso a 237°C.....	63
Tabela 29- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de flexão do PLA reciclado impresso a 255°C.....	64
Tabela 30- Tabela de comparação valores médios de tensão máxima atingida à flexão.	66
Tabela 31- Tabela de comparação valores médios de módulo de elasticidade à flexão.	66
Tabela 32- Tabela de comparação de valores médios de tensão de cedência à flexão.	67
Tabela 33- Valores médios registados no ensaio Charpy ao PLA virgem.....	70
Tabela 34- Valores médios registados no ensaio Charpy ao PLA reciclado impresso a 220 °C.	70
Tabela 35- Valores médios registados no ensaio Charpy ao PLA reciclado impresso a 237 °C.	71
Tabela 36- Valores médios registados no ensaio Charpy ao PLA reciclado impresso a 255 °C.	72
Tabela 37- Tabela de comparação valores médios para os vários ensaios Charpy realizados a 24.1°C. ..	73
Tabela 38- Tabela de comparação valores médios para os vários ensaios Charpy realizados a-30,9°C...	74
Tabela 39- Tabela de comparação valores médios globais.....	75

Tabela 40- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de tração- material novo T=220°C.....	87
Tabela 41- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de tração- material reciclado T=220°C	87
Tabela 42- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de tração- material reciclado T=237°C	88
Tabela 43- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de tração- material reciclado T=255°C	88
Tabela 44- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de flexão- material novo T=220°C	89
Tabela 45- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de flexão- material reciclado T=220°C.....	89
Tabela 46- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de flexão- material reciclado T=237°C.....	90
Tabela 47 Tabela 48- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de flexão- material reciclado T=255°C.....	90

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>
ASA	<i>Acrilato de acrilonitrila estireno</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
FA	Fabrico aditivo
FDM	<i>Fused deposition modeling</i>
HIPS	<i>Poliestireno de alto impacto</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
PA12	<i>Poliamida 12 (Nylon 12)</i>
PA6	<i>Poliamida 6 (Nylon 6)</i>
PC	<i>Policarbonato</i>
PCL	<i>Policaprolactona</i>
PEEK	<i>Poli éter-éter-cetona (Ketone)</i>
PEI	<i>Polieterimida</i>
PEKK	<i>Poli éter cetona-cetona</i>
PET	<i>Polyethylene terephthalate</i>
PLA	<i>Polylactic acid</i>
PMMA	<i>Polimetilmetacrilato</i>
POM	<i>Polióxido de metileno</i>
PP	<i>Polipropileno</i>
PPS	<i>Polisulfeto de fenileno</i>
PPSU	<i>Polifenilsulfona</i>
PS	<i>Polystyren</i>
PVA	<i>Poli acetato de vinila</i>
PVDF	<i>Fluoreto de polivinilideno</i>
TPU	<i>Poliuretano termoplástico</i>

Lista de Símbolos

m	massa	kg
T	temperatura	°C
€	euros	€

1. Introdução

1.1. Contextualização

Os processos de fabrico aditivo ocupam um lugar cada vez mais importante não só na indústria, mas também no quotidiano. Os desenvolvimentos apresentados pelos fabricantes de equipamentos de impressão 3D têm permitido baixar os custos de aquisição destes e tornar a sua utilização simples o suficiente para que não seja necessária experiência e conhecimentos muito aprofundados para a sua operação correta. As impressoras do tipo FDM são um dos equipamentos que tem adquirido maior popularidade e sucesso entre o público em geral, devido aos fatores referidos. Contudo, o custo de aquisição de material para a realização das impressões ainda é significativo uma vez que as bobines de filamento utilizadas por este processo apresentam, atualmente, um custo na ordem de 20€/kg. Uma característica do processo FDM é a necessidade de realização de purgas por parte do equipamento antes de ser iniciada uma nova impressão e, muitas vezes, entre diferentes passos da mesma impressão. Estas purgas representam ineficiências, perdas de material e custos. Para além deste fator, muitas impressões necessitam da criação de estruturas de suporte para que sejam produzidas com a melhor qualidade. Estas estruturas são depois removidas no final de impressão e descartadas como resíduos. Tendo em conta estas duas fontes de material desperdiçado constata-se que na realidade o custo do material para impressão 3D ainda pode ser superior ao supracitado. Deste modo a reciclagem de desperdícios plásticos criados pela operação de equipamentos de impressão 3D toma um papel especialmente relevante para pequenos negócios, na medida em que representam uma oportunidade de reaproveitamento para a produção de novo filamento e redução de custos.

1.2. Objetivos

Com esta tese tem-se o objetivo de estudar a viabilidade da reutilização de polímeros em impressão 3D de modo a impulsionar a economia circular e contribuir para a preservação do meio ambiente através da redução de desperdícios de plástico e a sua reciclagem sem recorrer a métodos prejudiciais ao ambiente. Pretende-se ainda estudar o comportamento das propriedades mecânicas para material novo e material reciclado e identificar temperaturas de impressão mais apropriadas à aplicação em questão. Deste modo o trabalho vai se debruçar sobre o processo de produção de filamento a partir da “matéria-prima” dos desperdícios criados durante a operação dos equipamentos de impressão 3D, de estruturas de suporte e

impressões falhadas. Uma outra componente será a obtenção de propriedades mecânicas, nomeadamente tensão de cedência e módulo de elasticidade, do material reciclado e perceber como se compara com material virgem. Por fim serão retiradas conclusões acerca da viabilidade deste projeto.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos principais com as respetivas subdivisões.

O capítulo 1 faz uma contextualização do tema da tese, os seus objetivos e os métodos que são utilizados para obtenção de resultados. Ainda no capítulo 1 é apresentada a estrutura do trabalho com pequenos comentários acerca da sua organização e conteúdo de cada capítulo.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica que explora os temas da fabricação aditiva e dá ao leitor uma introdução básica ao tema. Este capítulo é constituído por três subcapítulos pela seguinte ordem: um primeiro dedicado ao papel dos polímeros na fabricação aditiva, no qual são referidos os diferentes tipos de materiais e suas origines e classificações. O segundo subcapítulo faz uma pequena introdução histórica às técnicas de fabrico aditivo, explora os diferentes métodos de fabrico aditivo existentes, com especial ênfase no FDM. As variáveis mais importantes deste tipo de fabrico aditivo também são expostas no subcapítulo 2, assim como os equipamentos de impressão 3D e os equipamentos para produção do filamento utilizado nas impressões. É ainda feito um resumo do estado da arte da fabricação aditiva. E, por fim, o subcapítulo 2.3 explora a temática da sustentabilidade e reciclabilidade em contexto de fabrico aditivo, através de uma apresentação dos princípios de sustentabilidade e de como é possível realizar a reciclagem de polímeros. Neste subcapítulo é também realizada uma comparação entre propriedades mecânicas de polímeros reciclados e polímeros de material virgem e apresentam-se alguns desenvolvimentos recentes na matéria.

No capítulo 3 apresentam-se os equipamentos utilizados, parâmetros de impressão, dimensões dos provetes segundo as normas apropriadas e o procedimento experimental seguido.

O capítulo 4 engloba uma análise dimensional dos provetes para o ensaio de tração após a sua produção e a apresentação dos resultados para cada um dos diferentes conjuntos de provetes utilizados nos ensaios de tração, flexão e *Charpy*. Nesta apresentação de resultados é feita uma análise detalhada para cada ensaio e uma comparação entre as propriedades mecânicas que cada conjunto de provetes exibiu e são apresentadas algumas razões para os dados observados.

O capítulo 5 foca-se nas conclusões do trabalho desenvolvido e realça os resultados mais importantes observados após a análise de resultados. É também feita uma reflexão sobre limitações verificadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho e são deixadas sugestões de trabalhos futuros relevantes para adquirir mais conhecimento acerca das propriedades de PLA reciclado face a PLA virgem e otimização de parâmetros de impressão em função destas.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são expostas as bases teóricas de conhecimento que servem de suporte a todo o trabalho desenvolvido e exposto no âmbito deste relatório, composto por três subcapítulos principais: Polímeros e técnicas, Fabrico aditivo de polímeros, e Sustentabilidade e reciclabilidade em FA, apresentados por estas ordem.

2.1. Polímeros técnicos

Tendo em conta o maior foco deste trabalho no processo de impressão 3D conhecido como FDM (*Fused Deposition Modeling*), apresentam-se apenas polímeros adaptados a esta tecnologia e disponíveis a nível comercial. A Tabela 1 contém uma listagem destes.

Tabela 1 - Principais materiais utilizados no FA por FDM [1]

Processo de FA	Tipo de filamento	Material (quanto à sua cristalinidade)	
FDM	Termoplástico	Semi-cristalino	PEEK- Poli éter-éter-cetona (ketone)
			PVDF- Fluoreto de polivinilideno
			PP- Polipropileno
			PLA- Poliacido láctico
			TPU- Poliuretano termoplástico
			PPS- Polissulfeto de fenileno
			PCL- Policaprolactona
			PA6- Poliamida 6 (Nylon 6)
			PA12- Poliamida 12 (Nylon 12)
			POM- Polióxido de metileno
		PET- Polietileno teraflalato	
		Amorfo	PEI- Polietierimida
			PPSU- Polifenilsulfona
			PC- Policarbonato
			PVA- Poli acetato de vinila
			HIPS- Poliestireno de alto impacto
			PEKK- Polo éter-cetona-cetona
			ASA- Acrilato de acrilonitrila estireno
			ABS- Acrilonitrila butadieno estireno
PMMA- Polimetilmetacrilato			
PS- Poliestireno			

2.1.1. Tipos de polímeros

Os polímeros são macromoléculas constituídas por “unidades base” chamadas de monómeros que se podem combinar com vários outros monómeros iguais ou diferentes o que culmina num polímero diferente em função dos seus constituintes e das suas percentagens [2].

As diferentes propriedades dos polímeros dependem dos mais variados fatores: desde a forma como os átomos que compõem os monómeros estão interligados até à forma de processamento e/ou reação para obtenção do produto final. Por esta razão é possível classificar os polímeros de várias formas diferentes, entre elas, quanto à origem, quanto à estrutura, composição molecular (homopolímeros ou copolímeros), às interações entre os átomos, mecanismos de polimerização, comportamento face à temperatura, modo de preparação e quanto à sua utilização, entre muitos outros fatores [2]. Seguindo a ordem pela qual foram descritas, apresentam-se detalhadamente as classificações que podem ser atribuídas aos polímeros.

Quanto à sua origem, podem-se dividir os polímeros em naturais ou sintéticos. Os de origem natural apresentam estruturas bastante complexas que, até final do século XX/ início do século XXI, não eram bem compreendidas. Alguns exemplos são enzimas, ácidos nucleicos e proteínas indispensáveis à vida como se conhece, mas também existem outros exemplos de visualização mais fácil como o amido, celulose e borracha natural. Polímeros sintéticos são essencialmente produzidos pelo Homem, desenvolvidos desde o início do século XX. Estes apresentam várias famílias diferentes como adesivos, elastómeros, fibras e plásticos [3]. Os grupos dos polímeros naturais e dos polímeros sintéticos podem ainda ser subdivididos em três grupos [4] conforme apresentado na Fig. 1.

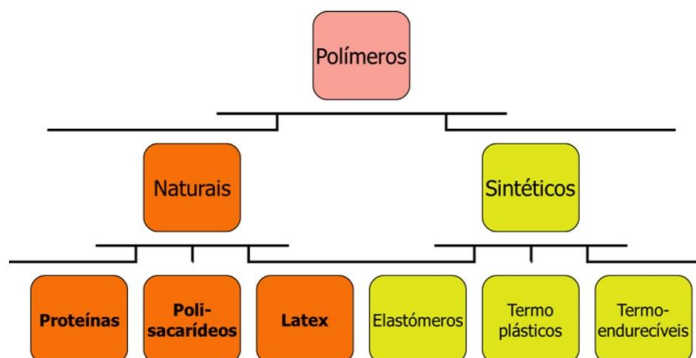


Fig. 1 - Divisão básica dos polímeros quanto à sua origem [5]

Os polímeros naturais oriundos de proteínas têm como constituinte básico amino ácidos, dos quais existem vinte tipos diferentes [3].

Os polissacarídeos são encontrados na natureza principalmente na forma de glicogénio, nos animais e na forma de celulose, amido ou peptidoglicano nas plantas [4].

O látex é uma emulsão viscosa que existe em cerca de 10% das plantas que dão flor, originalmente desenvolvido ao longo da sua evolução como um mecanismo de proteção contra insetos herbívoros [5]. Este polímero é bastante utilizado para embalagem de produtos devido à sua capacidade de praticamente não aderir a outros materiais a não ser a si próprio. O seu

modo de aplicação é maioritariamente por emulsões aquosas, que quando secam permitem a remoção de um filme utilizado para vários propósitos [6].

Relativamente aos polímeros sintéticos, os elastómeros são um grupo de materiais que tem a capacidade de sofrerem grandes deformações quando se encontram sob efeito de tensões e de recuperarem totalmente e de forma rápida a sua forma original quando a força externa é removida. Esta deve-se à existência de uma taxa de reticulação pequena. Contudo o material que dá origem aos elastómeros tem de ser sujeito a um processo, designado por vulcanização para lhe conferir estas propriedades. Existem dois grandes grupos de elastómeros: aqueles à base de silicone e os que provêm de termoplásticos. Como exemplos do primeiro grupo citam-se o polidimetilsiloxano (PDMS) e a silicone elastomérica. Quanto a elastómeros de origem termoplástica são importantes o poliuretano (PU) e blocos de copolímeros como o estireno-butadieno-estireno (SBS) e o estireno-etileno-butadieno-estireno (SEBS) [7].

Por sua vez, os termoplásticos semi-cristalinos ou amorfos são polímeros cuja capacidade de processamento que apresentam se alinha com tecnologias de impressão 3D e de injeção. No caso dos semi-cristalinos, quando lhes é fornecida uma determinada quantidade de calor adequada atingem a sua temperatura de fusão. Os termoplásticos amorfos não têm uma verdadeira temperatura de fusão, dado que apenas adquirem um estado pastoso quando lhes é fornecida energia suficiente para ultrapassarem a chamada T_g (Temperatura de transição vítrea), como é o caso, por exemplo, do ABS e PMMA. Neste estado, este grupo de materiais tem uma boa capacidade de escoamento que facilita o processamento com recurso às duas tecnologias referidas. Quer isto dizer que um termoplástico pode ser sucessivamente derretido e processado para formar diferentes produtos durante um número razoável de ciclos até que as suas propriedades deixem de ser aceitáveis. Tal capacidade abre a porta para a reutilização e reciclagem. No entanto, há a considerar que as suas propriedades mecânicas são bastante inferiores, por exemplo, quando comparadas com o grupo dos termoendurecíveis.

Por fim definem-se os polímeros sintéticos termoendurecíveis como aqueles aos quais também se fornece calor para processamento, adquirindo propriedades bastante maleáveis, procedendo-se depois ao seu arrefecimento já com a forma desejada. No entanto, este tipo de polímero apresenta uma grande desvantagem face aos termoplásticos, que é a impossibilidade de os voltar a utilizar após a sua solidificação. Tal acontece porque os plásticos termoendurecíveis não fundem, de facto, a ação da temperatura apenas os faz amolecer ligeiramente e, quando um determinado ponto é atingido, dá-se a sua degradação, ou seja, as ligações covalentes entre as macromoléculas são quebradas e para além disso dá-se a degradação das próprias por queima.

Relativamente à organização das moléculas no interior do polímero pode ser feita uma classificação quanto ao seu nível de cristalinidade ou amorfia. A percentagem de cristalinidade de um polímero depende da forma como este solidifica. Se aquando da solidificação as moléculas ficarem arrançadas de uma forma ordenada e regular obtém-se um polímero de elevado grau de cristalinidade. Em contraste os polímeros designados por amorfos apenas conseguem ter pequenos grupos de moléculas organizados de forma regular. Teoricamente seria possível obter polímeros totalmente cristalinos (100% cristalinidade), no entanto devido

ao grande comprimento das cadeias de polímeros torna-se praticamente impossível garantir que não existem pequenas imperfeições [2].

2.1.2. Características e aplicações

Neste subcapítulo abordam-se as características e aplicações individuais e mais relevantes do PLA, PET e ABS descritos individualmente de seguida.

Ácido Polilático (PLA)

O PLA, também conhecido por poli(ácido láctico), é um termoplástico derivado de recursos renováveis, como amido de milho, raízes de tapioca e cana-de-açúcar, biodegradável e bioativo. Trata-se de um polímero linear da família dos poliésteres alifáticos, comumente obtido a partir de ácidos hidroxís [8]. Apesar de a sua nomenclatura o indicar como um polieletrolito, a Organização Internacional de Química Pura e Aplicada (*International Union of Pure and Applied Chemistry* ou IUPAC) não o inclui neste grupo, mas sim no dos poliésteres [9]. Apresenta-se a Tabela 2 para comparação de propriedades mecânicas entre diferentes variantes do PLA com o PS e o PET, dependendo da orientação em que foram testados (MD- *machine direction*, ou seja, na direção longitudinal do material no estado de folha/ filme; CD- *cross direction* ou direção transversal à alimentação de folha/ filme na máquina de corte).

Tabela 2- Comparação de propriedades mecânicas de PLA (98% L-LA), PLA (94% L-LA), PS biaxial e PET [10]

	PLA (98%)		PLA (94%)		PS (biaxial)	PET
	MD	CD	MD	CD		
Tensão de cedência (MPa)	72	65	84	74	55-82	275
Módulo de Young (GPa)	2,11	2,54	2,31	2,87	3,2	2,8-4,1

Relativamente à sua reciclabilidade, alguns estudos referem que tanto PLA como PLA orientado podem ser hidrolisados com água a ferver ou vapor, para obtenção de ácido láctico, que pode ser transformado de novo para monómero. Este procedimento permite a reciclagem molecular tanto de restos de material da manufatura como de produtos finais como embalagens já utilizadas e descartadas [10]. É importante notar que, quando aquecido acima de 200°C, o PLA sofre degradação, o que inviabiliza um bom aproveitamento e a sua reciclagem [11].

Teraftalato de polietileno (PET/ PETE)

O PET é um material termoplástico semicristalino. Existem várias designações atribuídas a este material, como por exemplo PETP (*Poly(ethylene terephthalate)*), que é uma abreviatura internacionalmente aceite [49] e que se refere ao mesmo material que PET ou PETE. No entanto, algumas destas designações diferentes devem-se ao facto de existirem variantes do material base, modificadas na forma da sua estrutura ou com a adição de outros componentes. A estrutura molecular do PET pode ser observada na Fig. 2.

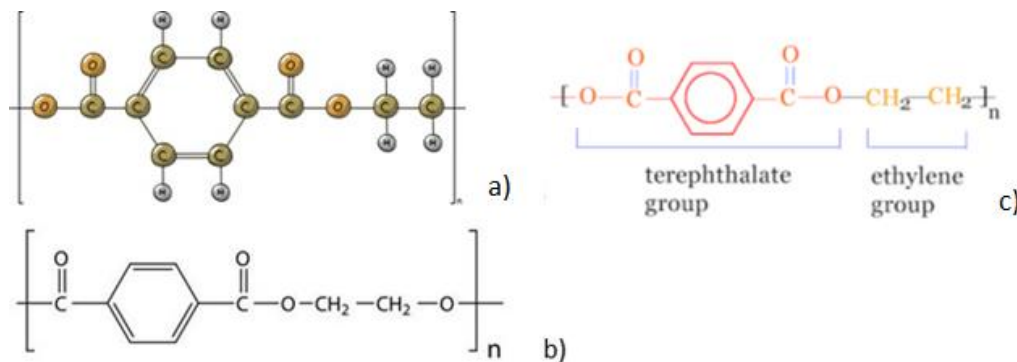


Fig. 2- a) Representação dos átomos e ligações que formam um monómero de PET; b) representação química de um monómero de PET; c) grupos constituintes de um monómero de PET [12]

O PET na sua forma básica pode ser dividido no grupo teraftalato, e no grupo etileno. Algumas das variantes referidas são o OPET, EPET, PETG e PCTG. Enquanto o PET se apresenta como o mais comum no dia a dia e é processado sobretudo através de passo único ou duplo de injeção por sopro, este tem algumas desvantagens relativamente às suas variantes. O OPET, em que o “O” indica que o material é orientado biaxialmente, também é normalmente processado através de injeção por sopro de 2 passos e apresenta uma maior durabilidade, maior nível de claridade ou transparência e também melhores propriedades de barreira. O EPET refere-se a PET de maior peso molecular, apropriado para a extrusão (daí se deve o “E”). Este material tem uma resistência química e transparência muito semelhantes ao PET normal. Relativamente ao PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) deve-se referir como principal característica que é um material amorfo. Devido ao facto de possuir um menor nível de cristalinidade, este tem um maior grau de transparência. Por fim, o PCTG (*Polycyclohexylene dimethylene terephthalate*) e CHDM (*Cyclohexanedimethanol*) é também considerado um polímero amorfo, com excelente resistência ao impacto [13].

Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

O ABS é um plástico amorfo e possui uma estrutura molecular bastante desorganizada, ou seja, não apresenta um verdadeiro ponto de fusão (T_m). O processo de obtenção do ABS baseia-se na polimerização de estireno e acrilonitrilo na presença de polibutadieno. As proporções em que cada um destes polímeros é utilizado para obter o ABS pode variar entre 40 a 60% (estireno), 15 a 35% (acrilonitrilo) e 5 a 30% polibutadieno). Apesar de ter melhores propriedades mecânicas do que, por exemplo, o PS, o custo de produção do ABS é cerca do dobro. Acresce-se ainda o facto de, em termos ambientais, não ser particularmente sustentável. Segundo a associação de comércio de plásticos da Europa, 1 kg de ABS necessita em média de 95,34 MJ de energia, derivada de petróleo e gás natural [8].

2.1.3. Determinação de propriedades e normas

A determinação das propriedades mecânicas do material utilizado na impressão 3D é um aspeto fundamental no que diz respeito à sua utilização em aplicações reais, para as quais é necessário saber de antemão algumas características. Destacam-se a tensão de rotura, módulo de elasticidade ou alongamento e, sobretudo, como variam com a temperatura, uma vez que o

grupo em análise (termoplásticos) é bastante mais sensível a esta variável do que outros materiais poliméricos utilizados no quotidiano.

A norma ISO 527-1 qualifica o tipo de material em questão para determinação das suas propriedades mecânicas à tração por este método através do ponto 1.3 no qual, entre outros, se referem “materiais termoplásticos rígidos e semirrígidos para extrusão” [14]. Alternativamente pode ser seguida a norma ASTM D638-14 na qual é referido que se trata a mesma matéria que a ISO 527-1 embora existam diferenças no seu conteúdo técnico [15]. O procedimento especificado na norma prevê que o corpo de prova seja solicitado à tração na direção do seu maior eixo longitudinal até à sua fratura ou até que um valor predeterminado para a carga ou alongamento seja atingido. Durante todo o processo os parâmetros a medir são a força aplicada e o alongamento.

O equipamento utilizado para ensaio dos provetes deve estar de acordo com as normas ISO 7500-1 e ISO 9513. A norma ISO 527-1 remete para a ISO 20753 relativamente à forma e às dimensões dos provetes a utilizar. Existem 4 grupos diferentes: Tipo A (subdividido em A1 e A2), tipo B, tipo C e tipo D (subdividido em D1 e D2). Esta norma apresenta também configurações de provetes para outros ensaios referidos como o ensaio de flexão e de impacto. Através dos dados recolhidos no ensaio de tração deve ser construído um gráfico de tensão-deformação. As propriedades mecânicas possíveis de determinar com recurso a esta informação são a tensão de cedência (caso exista para o polímero em análise), tensão de rotura, deformação na cedência (caso exista), deformação na rotura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (caso seja utilizado um extensómetro).

Para a determinação das propriedades mecânicas à flexão pode-se recorrer à norma ISO 178. Existe uma qualificação idêntica à ISO 527-1 para os materiais a que esta norma é aplicável: “termoplásticos para moldação, extrusão ou injeção”. Existem dois procedimentos diferentes para determinação do módulo de flexão e da curva de tensão/ deformação. Ambos utilizam o mesmo *set-up* no qual o provete é pousado sobre dois suportes, um em cada uma das suas extremidades e solicitado por uma força exterior no seu centro geométrico. A principal diferença entre o método A e o método B é que o primeiro utiliza uma velocidade de deformação constante de 1%/minuto durante todo o ensaio, enquanto o segundo apenas utiliza esta velocidade até o módulo de elasticidade à flexão ser determinado, já que a partir deste momento a velocidade é alterada para 5%/minuto ou 50%/ minuto dependendo do tipo de material [16].

A resistência ao impacto é outra característica importante dos polímeros que pode ser aferida através de ensaios de impacto. Existem algumas normas diferentes que explicam os procedimentos cada um deles: ISO 179-1 e ISO 179-2 para ensaios do tipo Charpy e ISO 180 para o tipo Izod. A Fig. 3 apresenta estes dois tipos de ensaios e algumas das suas diferenças. Segundo a norma ISO 179-1 o método Charpy é mais apropriado para materiais que apresentem fratura por corte interlaminar, ou materiais que apresentem efeitos de superfície devido a fatores ambientais. Relativamente ao ensaio Izod a norma ISO 180 refere que este não é apropriado a materiais rígidos e celulósicos, nem estruturas sandwich contendo material celuloso. O ensaio Izod é recomendado para provetes que possam ser moldados para as dimensões necessárias, maquinados a partir de um provete com múltiplos propósitos ou

maquinados a partir de um produto semiacabado. Em ambas as normas o provete pode apresentar entalhe ou não e a resistência ao impacto é medida em kJ/m^2 . A direção de impacto (identificada pelo número 1) também pode variar para ambas as normas.

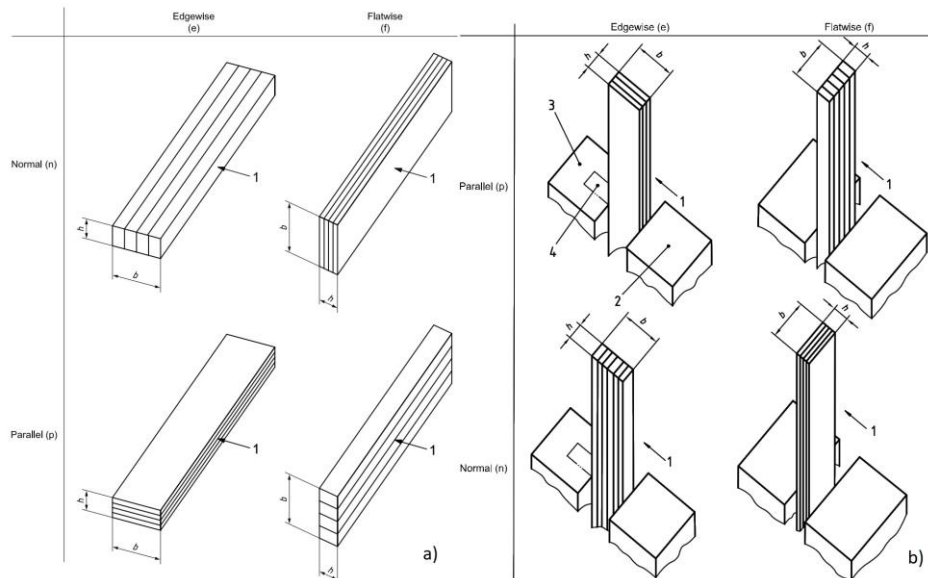


Fig. 3 - Direções de impacto para a) ensaio Charpy [17] e b) ensaio Izod [18]

Por fim, é também importante determinar a temperatura de fusão (para polímeros semi cristalinos) e a temperatura de transição vítrea de forma que o processamento do material durante a impressão seja realizado a temperaturas que não degradem as suas propriedades. Para tal pode ser realizada uma calorimetria de varrimento diferencial (DCS - *Differential Scanning Calorimetry*). A norma associada à utilização desta técnica para determinação de propriedades térmicas de polímeros é a ISO 11357-1:2016. O seu princípio básico consiste na comparação de leituras do fluxo de calor para um cadinho contendo o provete e outro de referência, numa atmosfera controlada na qual a temperatura é variada [19].

2.2. Fabrico aditivo de polímeros

Neste capítulo serão abordados um conjunto de tópicos relacionados com o Fabrico aditivo (FA) e que se consideram essenciais para adquirir as bases necessárias perceber as particularidades desta área do saber e poderem ser formuladas opiniões educadas e escolhas bem fundamentadas relativamente aos processos mais adequados para determinadas aplicações e especificações técnicas requeridas, por exemplo, para obtenção de máxima resistência mecânica dos produtos fabricados, ou para a obtenção do melhor acabamento superficial possível, sem recorrer a pós processamento.

2.2.1. Introdução histórica

A AM (*Additive Manufacturing*) tem os seus primórdios em trabalhos de escultura fotográfica e topografia conduzidos na segunda metade do século XIX, que culminaram no desenvolvimento da técnica de gravação por foto glifo, patenteada em 1951 nos Estados Unidos por Otto John

Munz. O mecanismo descrito nesta patente recebia uma imagem através de um captador e transmitia-a para o interior de um cilindro com pistão. No interior deste era adicionado um líquido fotossensível que reagia com a radiação a que era permitida a passagem e solidificava o líquido. O pistão movimentava-se ao longo do processo permitindo a solidificação de sucessivas camadas até que um modelo 3D da imagem inicial fosse completo [15]. Apesar disto a tecnologia manteve-se muito restrita à fabricação de microchips em contexto industrial, até aos anos 80 do século passado [16]. Atualmente apresenta-se como uma alternativa bastante viável à fabricação subtrativa tradicional e estudos apontam para um crescimento significativo na sua quota de mercado até 2030, rondando os 20% [17]. Existe mesmo quem apelide a FA como a “Nova revolução industrial” [18] De facto, a expansão do mercado da FA ao longo dos recentes anos tem sido notável e deixou mesmo de ser um tipo de processo utilizado em nichos restritos, como a prototipagem, tornando-se num campo integral da indústria, por direito próprio, que adquiriu dada a sua importância crescente. Estes factos são ainda mais justificados pelo número crescente de vendas de impressoras do tipo FDM, sendo o tipo principal de equipamento de FA adquirido. Na Fig. 4 apresenta-se um gráfico que ilustra a evolução do mercado da FA na América do Norte, desde dois mil e catorze e as previsões até dois mil e vinte e cinco.

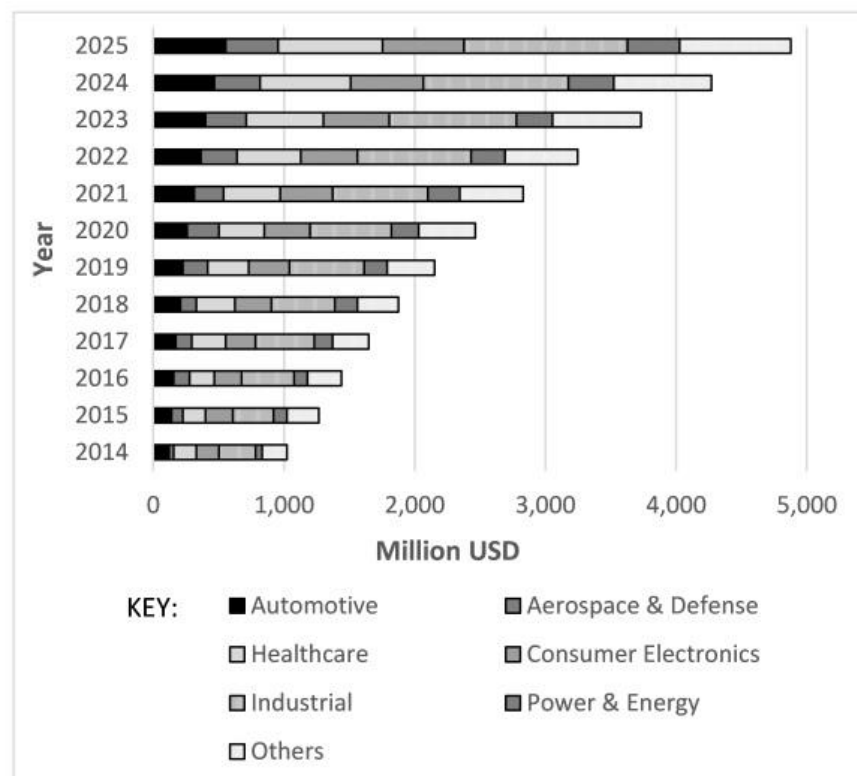


Fig. 4- Evolução de mercado da FA na América do Norte de 2014 a 2025 [20]

2.2.2. Tipos de processos de FA

Dentro da área do FA existem vários processos distintos, utilizando diferentes meios para atingir o mesmo fim, a produção de determinado objeto através da deposição de camadas sucessivas de material que após mais, ou menos processamento dão origem ao produto final.

Segundo a norma ISO/ ASTM 52900: 2015 pode ser feita uma primeira divisão entre os vários processos de FA em sete categorias principais: *Binder Jetting*, *Directed Energy Deposition*, *Vat Photopolymerization*, *Powder Bed Fusion*, *Material Extrusion*, *Sheet Lamination* e *Material Jetting* [1]. Uma outra divisão entre os diferentes processos de FA que pode ser feita é quanto ao estado físico do material utilizado na impressão, como se apresenta na Fig. 5. Os processos *Binder Jetting*, *Selective Laser Sintering*, *Stereolithography* e *Continuous Liquid Interface Production*, que se enquadram nas primeiras quatro categorias, o seu modo de funcionamento, características que os distinguem dos demais processos de FA e as suas principais vantagens e desvantagens serão explicados sumariamente. O processo FDM será abordado com mais pormenor em 2.2.3.

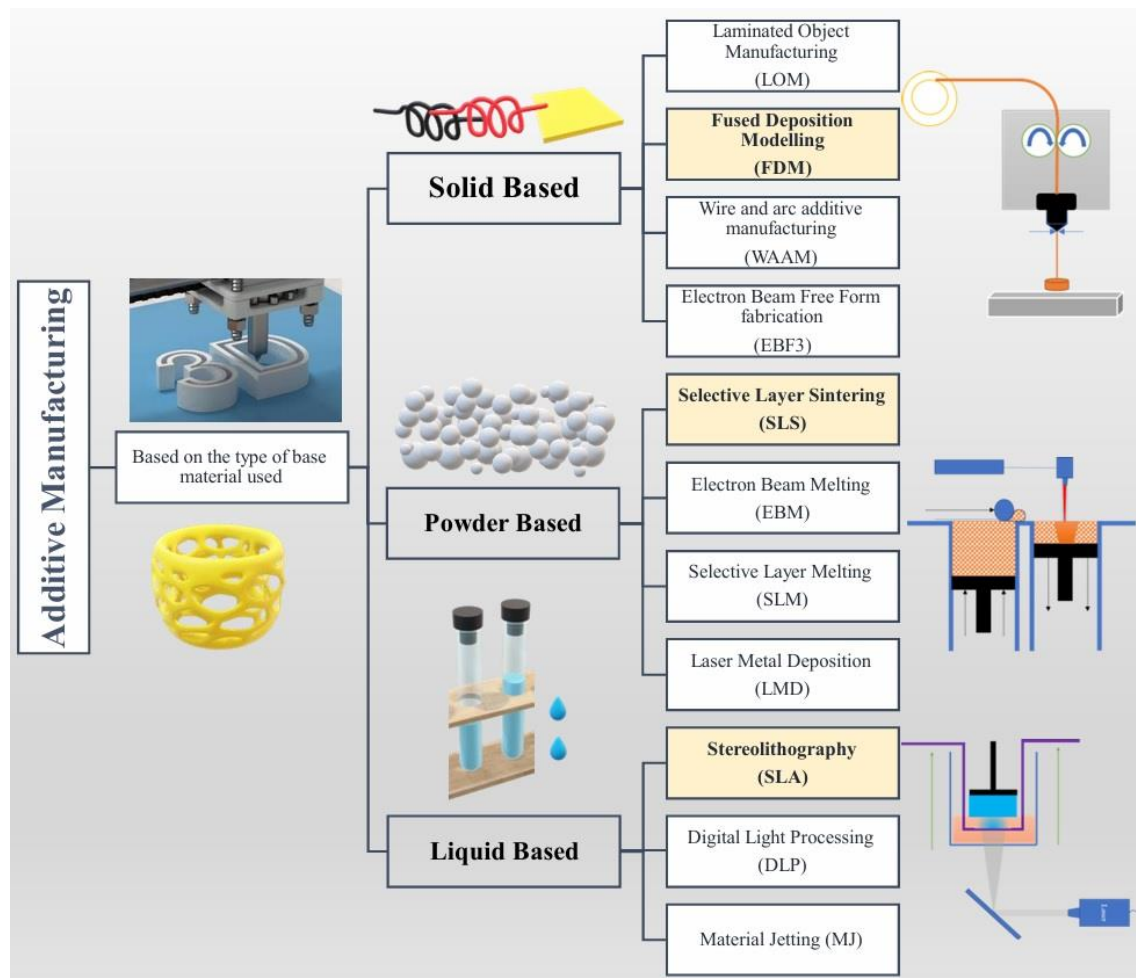


Fig. 5- Divisão dos processos de FA quanto ao estado físico do material utilizado [1]

O gráfico da Fig. 6 demonstra para o ano de 2022 as tecnologias de FA mais utilizadas e se estas são de propriedade pessoal ou contratadas a serviços externos.

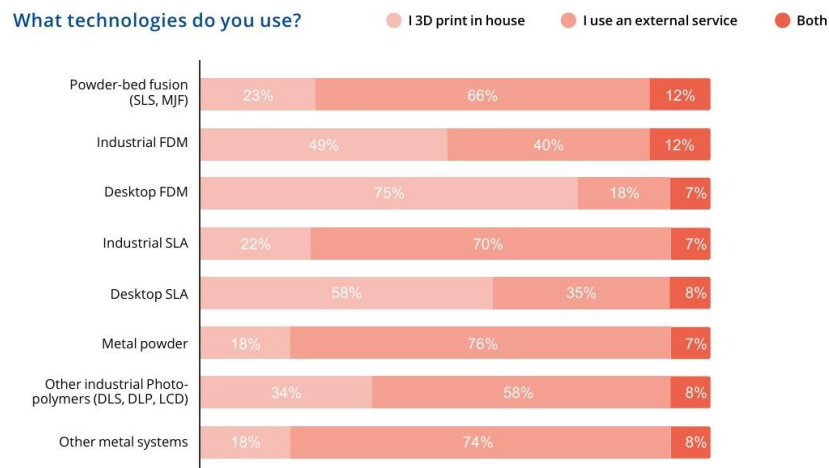


Fig. 6 - Tecnologias de impressão 3D mais utilizadas em 2022 [21]

Binder Jetting (BJ3DP)

Apesar de não estar presente no esquema da Fig. 5 quanto ao estado físico do material utilizado, o BJ3DP enquadra-se no grupo em que o material que dá origem aos componentes produzidos é um pó.

O processo em si consiste na deposição do ligante por parte da cabeça de impressão em locais específicos, predefinidos de acordo com o modelo CAD da peça a ser produzida. Este ligante cai sobre o pó do material a ser utilizado e é rapidamente “curado” com recurso a uma lâmpada de aquecimento. De seguida a mesa de construção desce uma distância igual à altura de camada predefinida no software para impressão 3D e uma camada de pó, da mesma espessura, é depositada sobre a anterior, repetindo-se este processo até que o produto esteja totalmente impresso. Em algumas situações é ainda realizado um tratamento de pós-cura com objetivo de secar o pó e proporcionar à peça uma resistência mecânica suficiente para poder ser manuseada e removida da base de construção sem correr o risco de a danificar. Tipicamente toda a base de construção contendo a peça e o pó não utilizado, é movida para um forno e aquecida entre 180 e 200°C, durante um determinado período que dependerá do volume da base de construção e das características do ligante utilizado. Neste ponto do processo considera-se que a peça ainda está “verde” e não tem as características necessárias para ser colocada em serviço, a sua densidade é cerca de metade da necessária para garantir melhores propriedades mecânicas. Antes de se proceder à agregação das partículas o ligante utilizado tem de ser removido. A solução várias vezes utilizada para tal fim é simplesmente queimá-lo entre 600 e 700°C (pirolisação/ decomposição do ligante), visto que este é normalmente de origem polimérica. Neste estado a peça pode ser submetida a uma sinterização ou infiltração com a qual o produto vai obter uma estrutura mais coesa e capaz de suportar solicitações mecânicas bastante superiores ao seu estado vinda diretamente do processo de impressão 3D. Por fim é realizada a operação de acabamento, que tem como principal objetivo diminuir a rugosidade superficial que por norma ronda os 6 µm antes de ser tratada. As opções mais comuns são polimento rotativo, que permite Ra (Rugosidade média aritmética) da ordem dos 1,25 µm, e uma espécie de granalhagem. Contudo a maquinagem, polimento manual, infiltração superficial, entre outros, também podem ser utilizados [22].

Como principais vantagens desta tecnologia assinalam-se as seguintes:

- Aplicável, virtualmente a todas as famílias de materiais (cerâmicos, metais, polímeros) desde que estejam em pó;
- O pó que sobra após a peça ser impressa pode ser reciclado;
- Das maiores áreas de impressão de entre todos os processos de FA (até 2200 × 1200 × 600 mm);
- Não necessita de estruturas de suporte;
- Tensões induzidas pela temperatura são praticamente inexistentes, resultando em peças sem distorção de forma;
- Elevadas taxas de produção;
- Capacidade de controlar a densidade da peça através da temperatura e tempo de sinterização;
- Capacidade de impressão a cores (uma cabeça de impressão deposita o ligante e outra a tinta).

Relativamente às desvantagens do BJ3DP deve ter-se em conta:

- Existe uma necessidade de pós processamento para ter peças com resistência mecânica suficiente;
- O processo de aumento da densidade com recurso à sinterização pode criar distorções acentuadas nas peças;
- O acabamento superficial é fraco necessitando, muitas vezes de pós processamento;
- Existem muitos materiais para os quais ainda não existem estratégias de pós processamento bem definidas e/ ou normas aplicáveis para guiar os produtores.

Selective Laser Sintering (SLS)

O SLS utiliza uma plataforma de construção que se movimenta verticalmente. Esta está coberta pelo pó que será sinterizado com recurso a laser. Cada camada é processada de uma vez e após estar concluída a mesa movimenta-se uma distância igual à espessura de camada definida. Após a movimentação da mesa é ainda redistribuído pó sobre a superfície de modo que esta seja o mais regular possível e que o material tenha alguma compactação. A partir deste ponto o processo repete-se até que o produto esteja concluído.

Relativamente aos materiais utilizados no processo de SLS, virtualmente qualquer material pode ser utilizado desde que esteja disponível em pó e que as suas partículas apresentem tendência a fundir ou sinterizar quando calor é aplicado. No caso dos pós com fraca tendência para sinterização pode ainda recorrer-se a um “ligante de sacrifício”, por norma de origem polimérica, que é removido por queima após a impressão do componente estar concluída. Apesar da enorme gama de materiais disponíveis para o SLS, os polímeros foram os primeiros a ser processados desta forma e são os mais utilizados. Contudo existe pouca variedade: cerca

de 90% dos componentes poliméricos produzidos com recurso à tecnologia SLS são monopolizados pela PA12. Outros polímeros importantes no que diz respeito ao SLS são a PA11, TPE, TPU, PEBA (*polyether block amide*) (que resulta da mistura de poliéter e PA), PEEK, o PC e poliestireno acrílico (PMMA/PS). Existe uma grande diferença entre as propriedades obtidas quando se utilizam polímeros semi-cristalino ou polímeros amorfos. O PC, um polímero amorfo, tem excelente acabamento superficial quando processado através de SLS e apresenta também grande rigor dimensional. Apesar de tudo devido às porosidades internas a sua resistência mecânica e durabilidade são diminutas. Por outro lado, polímeros semi-cristalinos como a PA apresentam menor grau de porosidade após processamento por SLS, encontrando-se aliás, muito próximos de componentes obtidos por injeção em termos de propriedades mecânicas. O seu principal problema centra-se, precisamente no rigor dimensional e acabamento superficial. Contudo alguns desenvolvimentos levam a que existam tipos de nylon especiais que mantêm as propriedades mecânicas num nível elevado e conseguem consolidá-las com rigor dimensional e acabamento superficial comparáveis aos do PC. Resta referir ainda que o processo consegue acomodar a utilização de aditivos nos pós como por exemplo fibras de carbono, fibras de vidro, alumínio ou até mesmo cobre, capazes de melhorar propriedades mecânicas e térmicas dos componentes. Contudo a sua adição aumenta o nível de anisotropia pelo que a decisão de utilização de aditivos deve ter sempre este aspeto em conta.

Existem essencialmente seis fatores importantes a controlar para que o processo de SLS seja aplicável e produza componentes com propriedades satisfatórias. São estes a temperatura de processamento, propriedades óticas do material, tensão superficial, viscosidade, morfologia das partículas do pó e a distribuição do seu tamanho PSD (*Particle Size Distribution*) [23].

Como principais vantagens dos componentes produzidos com recurso a este processo enumeram-se as seguintes:

- Propriedades mecânicas bastante isotrópicas (salvo as exceções já explicadas);
- Possibilidade de serem utilizados como componentes funcionais sujeitos a situações reais ou protótipos;
- Aditivos podem ser incorporados no pó para melhorar algumas propriedades;
- Não necessita de suporte para a criação de geometrias complexas;
- As capacidades de produção são excelentes para pequenos e médios lotes.

Como desvantagens, as mais importantes são:

- Existência de porosidades internas e superfícies rugosas que podem necessitar de pós processamento mais ou menos moroso e caro, dependendo da aplicação;
- Grandes superfícies planas e pequenos furos são de difícil impressão com precisão, pois deformam-se facilmente devido às temperaturas e gradientes térmicos envolvidos.

SLA (*Stereolithography*)

De entre os vários processos de impressão 3D o SLA é o mais antigo tendo sido patenteado em 1984 por Charles Hull.

O processo de impressão 3D por SLA tem como princípio a fotopolimerização, isto é, a utilização de uma resina líquida que é curada através de luz UV. Para a cura da resina ocorrer é necessário que esta esteja misturada com um agente reticulador, designado por fotoiniciador. As camadas são geradas com recurso a um feixe de laser controlado por computador que projeta formas sobre a resina e a cura. Cada vez que uma camada está concluída a plataforma de construção move-se a uma distância correspondente à altura de uma camada. A espessura de camada, que pode variar entre 25 e 150µm, é controlada pela energia transmitida pelo laser UV (ultravioleta) e pelo tempo de exposição da resina à sua ação.

Como principais parâmetros de processo para o SLA deve-se considerar a profundidade de cura e altura de camada. Por norma também é necessário pós processamento de pós-cura para melhorar as propriedades mecânicas dos componentes.

Os materiais utilizados em SLA são resinas de polímeros fotossensíveis termoendurecíveis. Existem três grupos principais: resinas à base de poliéster (PPF, PLA, PCL), resinas à base de policarbonato (PTMC, PTMC/ gelatin, carbonato de trimetilopropano) e resinas de poliéter (PEG, PEG/quitosana, PEO/PEG, politetrahidrofurano de éter) [1].

Este processo apresenta como principais vantagens o grande rigor dimensional dos componentes (+0,010-0,030mm), capacidade de reproduzir detalhes bastante complexos, acabamento superficial excelente e a possibilidade de processar materiais transparentes, flexíveis ou moldáveis. Como desvantagens apontam-se o facto de os componentes serem frágeis e não serem apropriados para protótipos funcionais, existir uma degradação tanto do aspeto visual como das propriedades mecânicas ao longo do tempo quando expostas a radiação solar e a necessidade de estruturas de suporte e pós processamento.

CLIP

O processo CLIP faz parte da família de processamento digital através de luz (DLP - *Digital Light Processing*) e o seu modo de funcionamento é semelhante ao SLA e na medida em que também utiliza uma resina fotoendurecível como material base para produção dos seus componentes. A sua principal característica é a grande velocidade de produção.

O processo em si utiliza uma plataforma de construção imersa num recipiente com a resina ainda líquida. Esta plataforma está voltada para baixo. No fundo do recipiente com a resina existe uma janela transparente, permeável a oxigénio que cria uma fina membrana ao seu redor. A zona em redor desta janela revestida a oxigénio dá-se o nome de “zona morta” e tem como função impedir que a resina fique colada no vidro através do qual a luz que cura a resina é projetada. Do lado de fora do tanque um processador de luz digital projeta uma secção de uma camada do componente e cura a resina imediatamente acima da membrana de oxigénio. Durante todo o processo a base de construção encontra-se sempre em movimento para cima. Após todas as camadas terem sido impressas é ainda necessário remover estruturas de suporte, excessos de resina e a peça ainda necessita de uma pós-cura em câmaras dedicadas a esse fim, com o objetivo de melhorar as suas propriedades mecânicas e térmicas.

Como principais características deste processo referem-se a sua capacidade de produzir componentes muito mais rapidamente do que o SLA. No entanto, tem a desvantagem de perder

capacidade de detalhe quanto maiores forem as dimensões da peça a produzir. Existe ainda a questão do efeito de voxel, devido à imagem gerada por computador, que leva a que sejam visíveis pequenos quadrados na superfície da peça e pode levar a que seja necessário pós processamento para os eliminar.

2.2.3. Processo *Fused Deposition Modeling* (FDM)

O processo de FDM também é conhecido por *Fused Filament Fabrication* (FFF). O primeiro passo para a impressão de uma peça com recurso à tecnologia de FDM é a criação do modelo CAD desta mesma peça. Após ter o modelo completo este deve ser exportado como um ficheiro de estereolitografia, comumente designado por STL. Este ficheiro é depois alimentado a softwares específicos de impressão 3D, como PrusaSlicer, Cura, UltiMaker, Lychee Slicer, que têm como principal objetivo dividir o modelo em camadas, um processo muitas vezes referido por “fatiamento” (*slicing*), durante o qual também é criado o código G que vai definir os movimentos que a impressora necessita de realizar para produzir o modelo. Nesta fase podem ainda ser configurados muitos outros parâmetros como a altura de camada, o posicionamento do modelo na base de impressão, definição de temperaturas e/ou tempos de pré-aquecimento, entre muitos outros. Quando este passo estiver pronto resta enviar o ficheiro resultante para a impressora com a ordem de impressão e esperar que o modelo esteja finalizado.

Relativamente ao processo na impressora em si, este pode iniciar pela calibração do equipamento de forma a manter um registo da localização preciso da cabeça de impressão face à base de construção. Estando a fase de calibração completa pode ocorrer um dos seguintes passos. A criação de um ambiente controlado mais favorável à impressão (caso a máquina esteja equipada com uma estrutura de encapsulamento) que é uma fase importante do trabalho, na qual a própria impressora aquece a base e as suas proximidades. Ou, alternativamente a purga de filamentos de trabalhos anteriores que ainda se encontrem no interior dos canais de alimentação à cabeça de impressão, que pode também ser acompanhada pela limpeza da cabeça de extrusão, se o equipamento possuir essa funcionalidade. Caso contrário estes serão passo que terão de ser executados manualmente pelos operadores, de forma a garantir que o procedimento de impressão se inicie da forma mais correta possível e para que se evitem falhas na primeira camada. A impressão, propriamente dita, inicia-se logo após o fim da calibração. O filamento é puxado para o interior da cabeça de extrusão através de roletes, e aí aquecido até um estado semi fundido, no qual é empurrado para o exterior do bocal de extrusão e depositado sobre a base de construção no que será a primeira camada do modelo. Tendo toda a primeira camada de material depositado a base, ou a cabeça de impressão (dependendo de o equipamento em questão ser do tipo XY ou delta, respetivamente) vai-se mover no eixo Z de forma que a camada seguinte de material seja depositada e assim sucessivamente até o modelo estar completo. É ainda possível que a impressora seja dotada de um sistema de pós aquecimento quando o modelo está completo, que tem como objetivo controlar o seu arrefecimento de modo a maximizar as propriedades mecânicas do componente. O esquema apresentado na figura abaixo tenta ilustrar os componentes e funcionamento do processo FDM, nas fases comuns a todas as impressoras deste tipo.

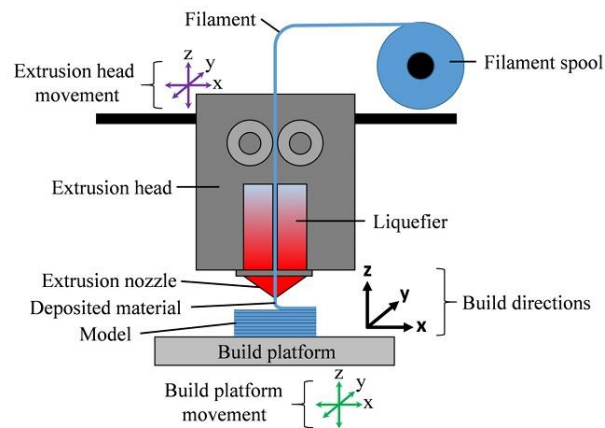


Fig. 7- Componentes e estrutura básica de equipamentos de impressão 3D do tipo FDM [20]

Existem alguns plásticos mais apropriados ao processamento pelo processo FDM que outros, devido a uma variada gama de fatores, incluindo o custo/qualidade do material face à qualidade do produto obtido por este processo em específico e das suas propriedades mecânicas, a própria facilidade com que é processado através da extrusão e o simples facto de existirem equipamentos mais bem adaptados ao seu processamento. Contudo existe uma larga gama de plásticos que se aplicam no dia de hoje de forma relativamente comum ao processo de FDM. Abaixo apresentam-se alguns destes materiais e as gamas de temperaturas de processamento normalmente utilizadas em FDM. Refere-se também que, por vezes, são adicionadas pequenas quantidades de fibras ou pós metálicos misturados com o plástico de base, no próprio filamento com o objetivo de melhorar algumas propriedades do produto final, sejam elas mecânicas, térmicas ou estéticas. Os casos mais comuns são a adição de pó de madeira, cortiça, fibras de vidro e fibras de carbono, mas existem também misturas de plástico com pós metálicos, por exemplo, óxidos de cobre, óxidos de ferro, óxidos de titânio e óxidos de molibdénio, ou ainda pós cerâmicos como pó de tijolo e pó de mármore [24].

Materials	Extrusion temperature [°C]	Bed temperature [°C]
PLA	175 ÷ 220	60 ÷ 90
ABS	230 ÷ 260	80 ÷ 100
HIPS	220 ÷ 250	80 ÷ 110
PC	290 ÷ 315	110 ÷ 130
PA	240 ÷ 280	100 ÷ 120
TPU	195 ÷ 230	60 ÷ 90
PVDF	210 ÷ 215	120 ÷ 125
PEEK	360 ÷ 400	110 ÷ 120
PEI	330 ÷ 360	110 ÷ 160

Fig. 8- Alguns materiais utilizados em FDM e respetivas temperaturas de processamento [25]

2.2.4. Variáveis do processo

Espessura de camada

Uma das variáveis fundamentais do processo é a espessura de camada. Por espessura de camada entende-se a dimensão medida perpendicularmente à direção de deposição do material sobre a mesa de impressão, de uma iteração do percurso que a cabeça de impressão necessita de fazer para produzir o modelo 3D pretendido. O aumento da espessura de camada pode ser detetado, muitas vezes, a olho nu. Desta forma tem uma grande importância no aspeto visual dos modelos, contribuindo também para propriedades superficiais como a rugosidade superficial e a molhabilidade. Para além disto a espessura de camada pode afetar também as propriedades mecânicas do produto, sobretudo o módulo de elasticidade [26]. Segundo um estudo realizado para ABS e PLA a variação de altura de camada para os valores de 0,2 mm, 0,3 mm e 0,4 mm as diferenças de tensão limite de cedência dos provetes produzidos com ABS foram mínimas. No entanto quando avaliados os valores para os provetes de PLA existia uma diferença de 24,5% no valor da tensão de cedência entre os produzidos com camadas de 0,2 mm e 0,3 mm, indicando que a menor espessura de camada proporciona melhor resistência à tração aos componentes. Apesar deste indicador, verifica-se ainda que este não é um fenómeno linear, uma vez que a diferença entre a tensão de cedência do provete produzido com camadas de 0,2 mm apenas é 10% superior à daquele produzido com camadas de 0,4mm de espessura. Estes dados levam a concluir que para diferentes tipos de material poderão existir parâmetros ideais que maximizem a resistência mecânica dos componentes com eles produzidos [20].

Diâmetro do bico

O diâmetro do bico de extrusão é uma variável tem influência sobretudo na largura dos padrões de preenchimento do interior dos componentes, no seu rigor dimensional e acabamento superficial. Este parâmetro é inversamente proporcional à precisão das dimensões e geometria da peça assim como da qualidade da sua superfície [27]. Um estudo aponta que existe uma correlação entre o aumento do diâmetro do bico e um ligeiro aumento da densidade dos componentes produzidos [28].

Taxa de preenchimento (*infill rate/ density*)

A taxa de preenchimento é uma variável ligada à área de vazios presentes no interior do componente a ser produzido. O seu efeito nas propriedades mecânicas dos componentes é dos mais estudados estando bem reconhecido. Uma taxa de preenchimento menor significa menor quantidade de material utilizado para a produção da peça, reduzindo custos, massa e diminuindo tempos de processamento. Contudo, menores taxas de preenchimento significam também menor quantidade de material a resistir a solicitações mecânicas, de forma que, as propriedades mecânicas são afetadas negativamente. Uma imagem exemplificadora da taxa de preenchimento é apresentada na Fig. 9 para uma mesma geometria de preenchimento. Um estudo consultado, comparando a tensão de cedência de taxas de preenchimento de 100% e cerca de 20% para ABS e PLA, demonstrou que no primeiro caso seria obtido o dobro da tensão de cedência, e que para o PLA seria obtida uma tensão de cedência 2,5 vezes superior à dos

provetes com menor taxa de preenchimento. Também foi avaliada a resistência específica, constatando-se que para estruturas completamente sólidas de ABS seria 1,4 vezes superior e que para PLA 1,3 vezes. O estudo refere ainda que a estrutura com 20% de taxa de preenchimento tinha geometria de ninho de abelha [29]. Mais adiante na Tabela 3 apresentam-se os resultados de um estudo que avaliou a influência da taxa de preenchimento e sua geometria em algumas propriedades mecânicas. Verifica-se que quanto maior for a taxa de preenchimento maior será o valor da tensão de cedência do componente, independentemente da sua geometria de preenchimento, assim como o seu módulo de elasticidade. A taxa de deformação não apresenta uma variação constante com a taxa de preenchimento, verificando-se mesmo uma regressão para geometrias retilíneas e em ninho de abelha para taxas de preenchimento de 50%.

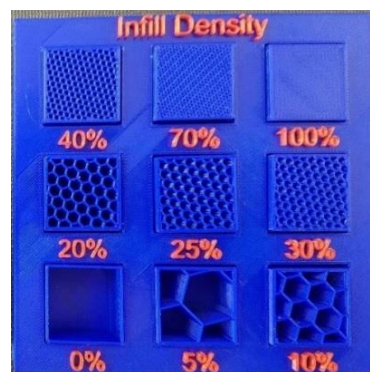


Fig. 9- Exemplo de diferentes taxas de preenchimento para uma estrutura de ninho de abelha [27]

Ângulo de preenchimento

Esta variável é a mais investigada para otimização no processo FDM e traduz a orientação do material extrudado presente no interior dos componentes impressos face uma referência interna do equipamento de impressão, no entanto o ângulo é também analisado muitas vezes em função da direção da solicitação a que o componente vai ser sujeito quando em serviço pelo que a escolha de referência utilizada deve ser bastante clara na apresentação de resultados. Em muitos equipamentos, caso não sejam introduzidas alterações pelo utilizador as impressoras estarão a utilizar ângulos de $\pm 45^\circ$, no entanto este parâmetro pode ser controlado de forma a atribuir um ângulo específico a cada camada de material depositado [20]. Estudos revelam que utilizando ABS para um ângulo de preenchimento de 0° , com o qual a direção da solicitação mecânica se alinha são registados os valores mais elevados de resistência à tração [30], o que é relativamente próximo de valores registados, nas mesmas condições de ensaio para provetes produzidos através de injeção por moldes (94,8% da resistência à tração de um provete obtido por injeção) [31]. Por outro lado, o ângulo de 90° resulta na menor resistência à tração, mantendo todos os restantes parâmetros constantes. Verifica-se ainda que provetes produzidos com ângulo $\pm 45^\circ$ apresentam uma resistência à tração de cerca de 75% de provetes produzidos com ângulo de 0° [31]. Contudo este parece não ser um parâmetro que varie da mesma forma para diferentes materiais dado que, noutra estudo, desta vez para PLA, verificou-se que a utilização de um ângulo de 45° resulta numa resistência à tração 10% superior à obtida para um ângulo de 0° [32].

Geometria do preenchimento

A geometria de preenchimento diz respeito aos padrões formados pelo movimento da cabeça de extrusão e do material depositado sobre a mesa de construção. Existem diversas geometrias diferentes disponíveis nos softwares de impressão 3D

A Tabela 3, já anteriormente referida quando analisada a influência da taxa de preenchimento nas propriedades mecânicas de ABS impresso pela tecnologia FDM, apresenta também resultados onde se pode verificar a influência da geometria de preenchimento na tensão de cedência, taxa de deformação, módulo de elasticidade e massa dos provetes. As conclusões acerca da influência da taxa de preenchimento já foram tratadas no respetivo ponto pelo que aqui apenas será avaliada a influência da geometria. Segundo a Tabela 3 verifica-se que a geometria que apresenta a maior tensão de cedência é a de ninho de abelha. Relativamente à taxa de deformação os resultados são mistos não existindo uma influência clara da geometria. O maior valor de módulo de elasticidade obtido foi para a geometria retilínea.

Tabela 3- Variação de propriedades mecânicas de provetes de ABS impressos com FDM em função da geometria e taxa de preenchimento [33]

<i>Infill pattern</i>	<i>Infill density</i>	<i>Tensile strength (MPa)</i>	<i>Tensile strain (%)</i>	<i>Elastic modulus (MPa)</i>	<i>Weight (g)</i>
Line	20	16.00	4.76	499	11.06
Line	50	20.06	4.86	640	13.98
Line	100	35.68	5.30	784	17.54
Rectilinear	20	15.62	5.30	408	10.64
Rectilinear	50	19.58	4.62	659	13.98
Rectilinear	100	36.40	5.36	834	19
Honeycomb	20	16.52	4.44	568	11.22
Honeycomb	50	21.78	4.38	745	14.76
Honeycomb	100	36.10	5.42	802	18.88
Raw ABS	-	36.56	5.44	1826	

Temperatura de extrusão

A temperatura de extrusão refere-se à temperatura à qual o material é expelido pela cabeça de extrusão e depositado sobre a base de construção ou outra camada de material. Este é um parâmetro que deve em primeiro lugar satisfazer os requisitos do material. Isto é, ter uma temperatura suficiente para o deixar num estado em que possa ser extrudido com relativa facilidade, ou seja, com um nível de viscosidade adequado, mas também não degradar o polímero com temperaturas excessivas, nem o tornar demasiado líquido, pois terá de adquirir um nível de rigidez suficiente e num curto período para que uma nova camada possa ser depositada sobre si, mantendo o rigor geométrico dos componentes. Um estudo consultado obteve resultados que indicam que para o PLA, dentro da sua gama de temperaturas de processamento a maior tensão de cedência apresentada é obtida para valores mais próximos do limite superior (215°C), apesar de existir uma diminuição para 200°C, temperatura para a qual a tensão de cedência é menor que 190°C [34]. Num outro estudo verificou-se que a tensão de cedência e alongamento na rotura de provetes produzidos por FDM em PEEK diminui ligeiramente com o aumento da temperatura de extrusão de 360°C para 370°C, mas aumentaram até um máximo a 420°C e 410°C, respetivamente [35].

2.2.5. Equipamento de impressão

BJ3DP

Este tipo de processo requer uma plataforma de construção capaz de reter o pó do material utilizado na impressão e com capacidade para se mover verticalmente. É ainda necessário um rolo ou acessório com a função de colocar novo material em pó por cima da camada anterior e compactá-la ligeiramente, uma cabeça de impressão capaz de ejetar com grande precisão e exatidão quantidades de ligante na ordem do picolitro (pL) e ainda uma lâmpada e aquecimento para curar rapidamente o ligante depositado.

SLS

O processo de sinterização seletiva por laser tem algumas semelhanças ao BJ3DP, no sentido em que também utiliza uma base de construção que é preenchida com material em pó e que se move na direção vertical. Para formar uma nova camada é também utilizado um rolo que coloca toda a superfície ao mesmo nível e agrega ligeiramente as partículas de pó adicionadas. No SLS existe também equipamento responsável por realizar o pré-aquecimento do pó, levando-o até uma temperatura muito próxima do ponto de fusão do material em bruto. De seguida recorre-se a um laser, tipicamente de CO₂, para fundir o pó. É ainda necessário, pelo menos um passo adicional, que é a remoção do pó, processado em câmara próprias para esse fim que impedem que este seja perdido, permitem a sua reutilização e também protegem os operadores e o ambiente pois impedem que este seja aspirado durante a respiração ou que cause poluição ambiental.

A Fig. 10 a) ilustra o equipamento, etapas e modo de funcionamento da produção de componentes através do processo SLS.

SLA

O equipamento utilizado na impressão por SLA tem algumas semelhanças com o do *Binder Jetting* e SLS, na medida em que possui uma plataforma de construção que se vai movendo à medida que o componente é produzido. Contudo, para o SLA a plataforma tanto se pode mover de cima para baixo como no sentido inverso dependendo do equipamento. A plataforma é mergulhada num tanque com o fotopolímero e move-se uma distância igual à espessura de camada em cada passo. Um laser de luz UV é utilizado para curar a resina líquida.

CLIP

O equipamento necessário para o processo CLIP é um pouco diferente dos anteriores. Tem as particularidades da plataforma de construção estar virada para baixo e existir um vidro no fundo do tanque de resina com uma membrana de oxigénio. É ainda necessário um processador de luz digital ligado a um computador para curar a resina.

FDM

Existem dois tipos principais de equipamentos de impressão do tipo FDM, são eles impressoras cartesianas e impressoras do tipo Delta. As impressoras cartesianas trabalham com um sistema de eixos x-y-z em que normalmente o eixo z está associado ao movimento vertical que pode ser realizado pela cabeça de extrusão ou pela plataforma de construção. Os movimentos na direção x e y podem ser ambos executados pela cabeça de extrusão ou apenas um deles. Nesta última situação, a direção de movimento em falta pode ser conseguida através de um sistema que move toda a plataforma de construção nessa direção [livro Matering 3D printing da drive]. Dependendo da sua configuração pode ainda ser feita uma divisão dentro das impressoras cartesianas em equipamentos do estilo cantiléver, que apresentam uma configuração semelhante à de uma grua, ou pórtico e equipamentos do estilo *corexy* sempre com uma configuração de pórtico, mas nos quais é a plataforma de construção que se move no eixo z [36].

Relativamente a impressoras do tipo delta a principal diferença é que utilizam três vigas verticais à quais a cabeça de impressão está ligada e utiliza para se deslocar nessa direção. A movimentação no eixo x-y é assegurada por suportes que deixam a cabeça de extrusão suspensa entre as três vigas e que se movem sempre em conjunto, para além disso a geometria do equipamento assegura que o bico de extrusão está sempre perpendicular à base de construção. Ao contrário das impressoras cartesianas, a plataforma de construção é fixa nas do tipo delta. Uma outra característica muito importante destes equipamentos é que a cabeça de extrusão é bastante mais leve do que a dos seus competidores e assim consegue tempos de impressão muito mais curtos. Contudo ainda é complexo determinar a resolução teórica no eixo x-y para impressoras deste tipo. A Fig. 10 apresenta diferentes tipos de impressoras cartesianas (Fig. 10 b), c) e d)) e uma impressora delta (Fig. 10 e)).

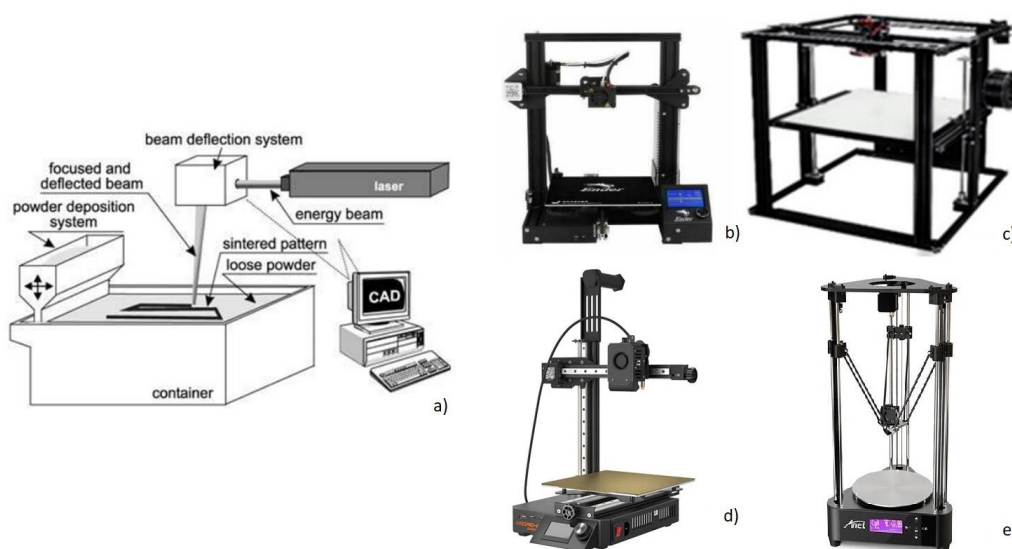


Fig. 10 - a) Componentes e etapas necessários para o processo SLS [23]; b) impressora cartesiana com movimento da cabeça em xz [36]; c) impressora cartesiana *corexy* [36]; d) impressora cartesiana do tipo cantiléver; e) impressora do tipo delta

2.2.6. Equipamentos de extrusão de filamento

Existe uma grande variedade de equipamentos para extrusão de filamento aplicável à impressão 3D, desde pequenas dimensões ou *desktop*, até máquinas industriais. Apesar da variação de porte e capacidade de produção, as características e componentes básicos destes equipamentos são comuns. Um equipamento de extrusão de filamento é normalmente composto por [37]:

- Parafuso giratório - este componente tem três funções, transportar o material do ponto de alimentação para o tambor da extrusora, liquefazê-lo por compressão e expulsá-lo através da matriz de extrusão. Para além disto é importante referir que o seu diâmetro diminui desde a zona de transporte até à de saída;
- Tambor ou câmara de extrusão - é dentro deste componente que se processa a fusão e mistura do plástico alimentado à extrusora. Um requerimento fundamental deste componente é que tenha boa resistência ao desgaste por fricção e a altas temperaturas;
- Tremonha ou ponto de alimentação - esta é uma peça simples com formato de pirâmide invertida que tem como objetivo alimentar o equipamento, por norma, recorrendo apenas à gravidade;
- Sistema de aquecimento - o sistema de aquecimento é composto por aquecedores e termopares que devem cobrir uma área significativa do tambor. O objetivo destes termopares é manter a temperatura do polímero o mais constante possível, permitindo que todo o material no interior da câmara se encontre no estado líquido. Por cada zona podem existir até três bandas de aquecimento com um termopar a controlá-las;
- Motor - este componente tem como único objetivo animar o parafuso de movimento giratório;
- Bico de extrusão - este componente é responsável pelo diâmetro final do filamento produzido. Normalmente este é produzido em latão devido à suas propriedades térmicas e resistência ao desgaste.

Associado ao equipamento de extrusão está, normalmente, uma linha de outros equipamentos que garantem a qualidade e armazenamento correto do filamento produzido. A Fig. 11 apresenta um exemplo destes equipamentos. As suas funções são sumarizadas na Tabela 4.

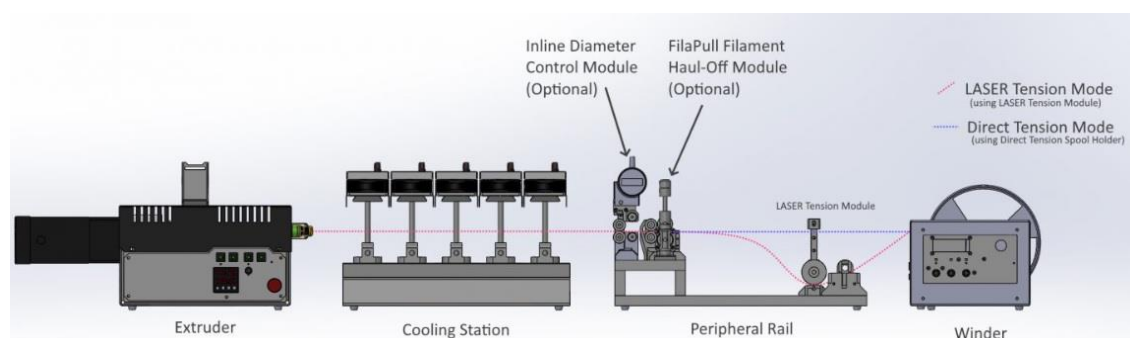


Fig. 11 - Linha de extrusão de filamento para impressão 3D [38]

Tabela 4 - Equipamentos e suas funções numa linha de extrusão de filamento

Equipamento	Função
Extrusora	Produção do filamento
Estação de arrefecimento	Controlo da temperatura do filamento
Módulo de controlo de diâmetro	Medição do diâmetro do filamento
Módulo de corte	Corte do filamento
Enrolador	Armazenar o filamento sob a forma de bobina

2.2.7. Desenvolvimentos recentes/ Estado da arte

Alguns dos desenvolvimentos mais significativos dos últimos cinco anos na área dos processos de FA são sumarizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Desenvolvimentos científicos recentes em diferentes processos de FA

Autor	Descrição
Borg et al. [39]	Neste estudo os autores verificaram a influência de pré-aquecimento com recurso a laser do material depositado antes de ser impressa uma nova camada. O processo em causa foi o FDM, e o material foi PLA com adição de 2% de grafite. Por comparação com provetes impressos no mesmo material e com os mesmos parâmetros, a influência verificada pelo pré-aquecimento com laser foi nas seguintes propriedades: aumento do módulo de elasticidade em 14,5% e aumento da tensão de cedência em 27,8%. Verificou-se ainda que as amostras processadas com laser tiveram o seu aspeto visual afetado negativamente.
Sondagar et al. [40]	Neste estudo é apresentado o conceito da impressão 4D, materiais utilizados neste processo e as perspetivas futuras da sua utilização. Existem vários tipos de estímulos diferentes para alteração, por exemplo, da sua forma geométrica. Alguns destes são a temperatura, humidade, corrente elétrica, nível de luminosidade e a presença de um campo magnético. Existem várias aplicações para a impressão 4D no campo da engenharia biomédica, robótica e equipamentos elétricos. Como principais desafios são referidas algumas dificuldades para trazer os componentes de volta à sua forma original após retirado o estímulo e o facto de muitos destes componentes possuírem tensão de cedência e rigidez reduzida, não sendo ideais para aplicações estruturais de baixo peso.
Wu et al. [41]	Neste estudo os autores fazem uma revisão dos desenvolvimentos recentes de materiais e estruturas com grande capacidade de absorção de energia produzidos com recurso a tecnologia de impressão 3D. São apresentadas várias estruturas em forma de treliça diferentes utilizadas por diferentes

	processos. Para além disto são também dados inúmeros exemplos de processos, materiais, parâmetros de processo e a principal característica que cada combinação oferece.
Sawant et al. [42]	Neste estudo é investigada a influência de alguns parâmetros de impressão da tecnologia FDM na rugosidade superficial dos componentes obtidos e do pós processamento por lixagem manual. Verificou-se que para uma espessura de camada de 0,12 mm, velocidades superiores e taxas de preenchimento mais altas contribuem para uma rugosidade superficial média menor. Contudo para uma espessura de camada de 0,14 mm a mesma tendência não foi observada, apenas se constatou que existe uma combinação de parâmetros (velocidade 90 mm/s e taxa de preenchimento de 80%) que minimiza o valor da rugosidade superficial média. Relativamente ao pós- processamento verificou-se a maior influência da lixagem nos componentes produzidos com menor espessura de camada.
Rasheed et al. [43]	Neste estudo os autores investigam os parâmetros ideais para impressão com recurso a tecnologia FDM de camadas com material alternado entre PLA e ABS. Foi concluído que para maximização da tensão de cedência deve ser utilizada uma taxa de preenchimento de 75% e velocidade de impressão igual a 20 mm/s. Se o objetivo for maximizar o rácio tensão de cedência/massa do componente deve ser utilizada a mesma velocidade e uma taxa de preenchimento de 50%. O estudo relata ainda que o aumento da temperatura da base de construção influencia positivamente a tensão de cedência dos componentes até à temperatura máxima de 95°C, a partir da qual o PLA se começa a degradar. Deste modo recomenda a utilização de 90°C, no máximo, para a temperatura da base de construção.

2.3. Sustentabilidade e reciclabilidade em FA

Neste subcapítulo será abordada a temática da sustentabilidade e reciclabilidade em FA. Numa primeira parte vão ser mencionados os princípios da sustentabilidade e os dezassete pilares fundamentais definidos pela ONU para a criação de um ambiente sustentável. De seguida é feita uma breve introdução aos símbolos de reciclagem presentes nas embalagens e outros produtos à base de plásticos. Referem-se também as propriedades mecânicas de polímeros utilizados de forma comum no FA, após a sua reciclagem. São ainda apresentados alguns produtores de filamento reciclado para o processo FDM. E, por fim, é feito um resumo do estado da arte da reciclagem nos processos de FA.

2.3.1. Princípios da sustentabilidade

A sustentabilidade é um dos temas mais marcantes da atualidade, estando presente em quase todos os ramos da sociedade, desde o planeamento e organização de infraestruturas ligadas à

agricultura, construção, indústria, entre outras, comportamentos das pessoas e influência que grandes superfícies comerciais podem ter sobre hábitos de consumo mais sustentáveis, etc.

Deste modo é importante estabelecer os princípios fundamentais da sustentabilidade, para perceber de que maneiras esta pode ser atingida, neste caso em particular, relativamente aos processos de impressão 3D mais ligados a polímeros.

De forma simples pode-se explicar que a sustentabilidade é a interseção dos interesses e resultados que são de forma comum benéficos ao ambiente, economia e sociedade, como exemplificado pela Fig. 12.



Fig. 12 - Três princípios da sustentabilidade [44]

Segundo a organização das nações unidas (ONU) a sustentabilidade é definida como “corresponder às necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de corresponder às suas próprias necessidades”. Com o objetivo de atingir sustentabilidade esta organização estabeleceu dezassete pilares fundamentais que contribuem direta ou indiretamente para um ambiente sustentável. Estes são apresentados na Fig. 13.



Fig. 13- 17 pilares fundamentais estabelecidos pela ONU para o desenvolvimento sustentável [45]

Os principais pilares sobre os quais o FA de polímeros pode agir diretamente são a responsabilidade consumo e produção (12) e ação climática (13), no entanto pode também existir uma contribuição indireta para a melhoria da vida marinha (14) e terrestre (15) através da substituição de plásticos não biodegradáveis, pelos que se degradam mais facilmente e também através da reciclagem de polímeros em fim de vida.

A preocupação com o impacto causado pela acumulação de plásticos por reciclar e potenciais ameaças que estes apresentam aos ecossistemas naturais não é recente. Facto este comprovado pelas datas de criação dos primeiros plásticos biodegradáveis- o PHA (polihidroxialcanoato) foi pela primeira vez disponibilizado a nível industrial em 1980.

A biodegradação de um polímero pode ser definida de várias formas diferentes, mas todas assentam em princípios comuns: ação de microrganismos sobre o material e sua conversão em dióxido de carbono ou metano e água.

Como referido, a biodegradabilidade dos polímeros é das formas mais relevantes como podem contribuir para o desenvolvimento sustentável, assim, importa perceber quais são os polímeros biodegradáveis e quais as implicações que a sua produção traz.

Polímeros biodegradáveis podem ser obtidos através de recursos renováveis ou não renováveis.

De entre os que provêm de fontes renováveis existem três categorias principais:

- Polímeros naturais que podem ser modificados, mas se mantêm inalterados na maior parte da sua composição e estrutura, como os que são obtidos a partir do amido, normalmente designados por TPS (*termoplastic starch*);
- Obtidos pela fermentação de monómeros biológicos que são posteriormente polimerizados, caso do PLA;
- Obtidos diretamente a partir de microrganismos ou plantas geneticamente modificadas, como o PHA (polihidroxialcanoatos).

Para além destas três categorias principais também existem polímeros biodegradáveis obtidos através de recursos renováveis à base de celulose, proteínas e quitosana (encontrada e produzida através dos exoesqueletos de crustáceos)

Relativamente aos polímeros biodegradáveis provenientes de fontes não renováveis, ou seja, petróleo, citam-se cinco grupos importantes:

- Poliésteres alifáticos e copoliésteres, dos quais o PBS (sucinato de polibutileno) e o PBSA (adipato de sucinato de polibutileno) são exemplos;
- Poliésteres aromáticos, referindo-se o PBAT (adipato de tereftalato de polibutileno);
- O PCL (policaprolactona);
- As PEA (amidas de poliéster);
- E o PVA (polivinilo de álcool).

Na Fig. 14 apresentam-se os polímeros da família do poliéster obtidos a partir de recursos renováveis e não renováveis.

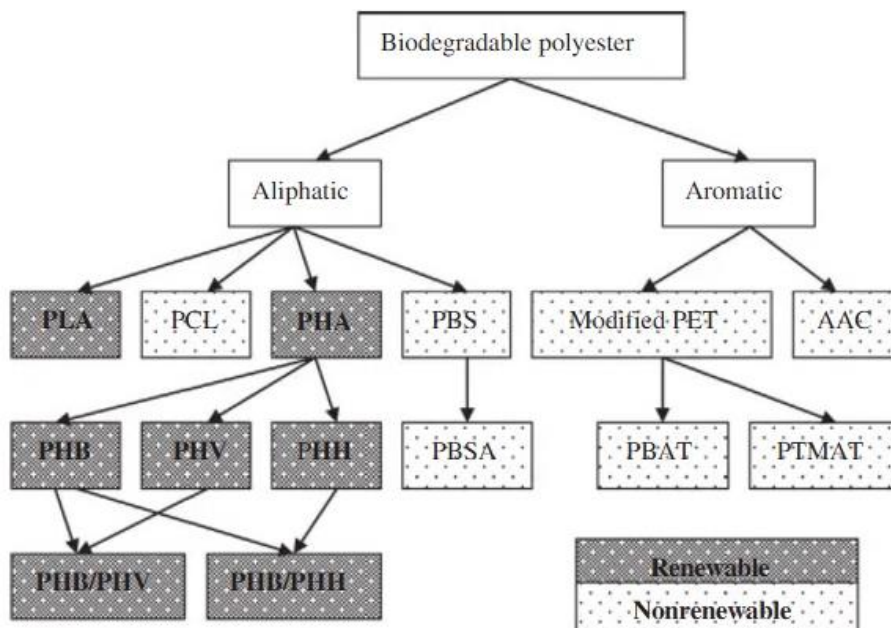





Fig. 14- Família dos poliésteres biodegradáveis (ACC- copoliésteres aromáticos alifáticos; PBAT- poli adipato de butileno tereftalato; PBS- poli butilenosuccinato; PBSA- poli succinato adipato de butileno; PCL- policaprolactona; PET- poli tereftalato de etileno; PHB- poli hidroxibutirato; PHH- polihidroxi hexanoato; PHV- poli hidroxi valerato; PLA- poli ácido láctico) [46]

Com a análise destas informações pode-se concluir que, de entre os polímeros biodegradáveis, existirá uma preferência natural pelos que provém de fontes renováveis, assim o PLA e o PHA apresentam-se como as escolhas mais “verdes” em termos ambientais para aplicações com plásticos em que as suas propriedades correspondem aos requisitos necessários. A principal desvantagem que evidenciam é o seu preço, comparativamente a outros polímeros não biodegradáveis.

2.3.2. Reciclagem de polímeros

Atualmente, a importância da reciclagem de polímeros já se encontra bastante disseminada nos consumidores e nos produtores. Na ótica dos produtores, existem normas que recomendam a que a grande maioria dos produtos à base de plástico sejam marcados com símbolos que indicam algumas características acerca do material que está presente naquele item. A norma ISSO/ TR 18568:2021 [47] estabelece os símbolos e o seu significado para uma variada gama de materiais passíveis de ser reciclados, desde papel, alumínio, vidro, plásticos, aços e até mesmo madeira, podendo haver variações principalmente a nível dos símbolos de região para região. Para o caso específico dos plásticos apresenta-se uma tabela com os símbolos e regulamentações para diferentes regiões.

Tabela 6 – Adaptada da tabela 4 da norma ISO/TR 18568:2021(E), resumo de simbologia de reciclagem de plásticos em diferentes países [47].

Material	País/ Região	Símbolo	Aplicação, propósito e significado	Organização emissora Fonte de informação
Plásticos	China		Aplicável a embalagens de plástico Este é um exemplo do símbolo	Indicação: Voluntário SAC, GB/T18455-2010
	Europa	HDPE2	Aplicável a embalagens de plástico e meios de identificação de material	Indicação: Voluntário Decisão 1997/129 EC, mas a marcação é obrigatória quando a identificação de material de embalagem for adotada
			Aplicável a embalagens de plástico e meios de identificação de material Este é um exemplo do símbolo	Indicação: Voluntário EN/TR 14311
	USA		Aplicável a embalagens de plástico Este é um exemplo do símbolo	Indicação: Voluntário ASTM, ASTM D7611/D7611M - 2013e1, mas obrigatório quando a identificação do material for adotada por legislação dos estados nos USA

Relativamente ao significado dos números, existe numeração de um até sete, estando um tipo específico de plástico atribuído aos números de um a seis. O sete encontra-se reservado para todos aqueles não incluídos nas categorias anteriores. A correspondência do material ao número, a sua reciclabilidade e usos para os produtos reciclados com esses materiais são expostos abaixo.

O número um está atribuído ao PET, normalmente presente em recipientes e embalagens de uso único de bebidas ou alimentos. É o plástico mais reciclado e neste estado encontra-se

sobretudo em fibras para tapetes, vestuário de vela, recipientes para alimentos ou objetos, filmes e folhas e em cordas para cintas.

O HDPE (polietileno de alta densidade) é designado pelo número dois. É dos plásticos mais fáceis de reciclar, no entanto não pode ser misturado com outros durante o processo de reciclagem, pois contribui negativamente para os produtos finais. As suas principais aplicações após reciclagem são recipientes para produtos não alimentares, madeira plástica, baldes, caixas, azulejos para pavimentos, cercas para jardins, filme e folha.

O PVC (policloreto de vinila) identifica-se pelo número três. Este requer também a separação dos restantes plásticos devido ao seu elevado teor em cloro e aditivos perigosos. Contudo o tempo de vida dos seus componentes também é extenso, em média de trinta anos, podendo atingir cinquenta ou mais. Quando reciclado tem aplicações bastante semelhantes às do material virgem, ou seja, canalizações, cercas, calhas, mangueiras de jardim, pavimentos resistentes, guarda-lamas, caixas elétricas e revestimento de cabos elétricos, rodapés, cones de trânsito e alguns recipientes.

O polietileno de baixa densidade (LDPE) encontra-se associado ao número quatro. As suas aplicações mais comuns são para sacos para alimentos de espessura relativamente fina, por exemplo para pão, alimentos congelados, e também sacos das compras. A sua reciclagem requer que seja separado do HDPE e também que exista separação entre filmes transparentes e filmes com cor, caso esta separação não ocorra o valor do LDPE pode ser afetado. Após reciclagem é utilizado para proteções de encomendas, forros para caixotes do lixo, pisos e painéis, mobília, e imitações de madeira para exterior.

Relativamente ao polipropileno (PP), este é identificado pelo número cinco. Alguns dos principais objetos do dia a dia feitos deste material são as tampas de garrafas de plástico, alguns recipientes de iogurtes, frascos de medicamentos e palhinhas. De entre todos os plásticos é dos menos reciclados após ser utilizado pelos consumidores, apresentado uma taxa de reciclagem inferior a 1%. O seu processo de reciclagem envolve a fusão do material em torno de 250°C com o objetivo de remover moléculas contaminantes, remover novamente contaminantes sob vácuo e por fim dá-se a solidificação a 140°C. O PP reciclado pode ser misturado com PP virgem em taxas até 50%. Como produtos comuns obtidos a partir de PP reciclado citam-se peças para automóveis (proteções de baterias, piscas, revestimentos de cabos para baterias), pegas de escovas, funis para combustíveis, caixas de arrumação e bandejas.








O número seis designa produtos compostos por poliestireno (PS), como talheres e copos de café de uso único e alguns recipientes para alimentos. A sua reciclagem é das mais complicadas devido ao facto deste material possuir uma densidade muito baixa (em média é 98% ar). Para ser economicamente viável a sua reciclagem tem de ser comprimido. De entre os produtos obtidos a partir da sua reciclagem enumeram-se isolamentos térmicos, suportes para matrículas de carros, molduras de interruptores e interruptores de luzes e organizadores de secretária.

Por fim, como já referido, o número sete é dedicado a todos os tipos de polímeros que não são cobertos pelos números anteriores e componentes que são misturas de plásticos ou resinas, sendo exemplo as estruturas de alguns equipamentos eletrónicos, armações de óculos e alguns

brinquedos. Um dos materiais mais difíceis de reciclar que se enquadra nesta categoria é o policarbonato (PC) que apresenta perdas significativas de propriedades mecânicas após o seu processo de reciclagem química. A reciclagem de misturas de plásticos também é de difícil execução. Alguns dos produtos obtidos a partir da reciclagem dos materiais contidos no grupo sete são garrafas e madeira plástica.

Abaixo apresenta-se uma tabela sumária dos grupos de materiais e respetivos números relativos aos símbolos recomendados pela ISSO/TR 18568:2021 para a identificação de embalagens ou outros produtos plásticos.

Tabela 7- Simbologia e respetivo material reciclado segundo a norma ISO/TR 18568:2021 [47]

Símbolo	Material	Símbolo	Material	Símbolo	Material
 PETE	PET/PETE	 LDPE	LDPE	 OTHER	Outros- PC, misturas de plásticos, resinas
 HDPE	HDPE	 PP	PP		
 PVC	PVC	 PS	PS		

2.3.3. Propriedades obtidas pela reciclagem

A reciclagem de polímeros e a sua reutilização para impressão 3D é um assunto em estudo atualmente. De seguida são apresentados os resultados de alguns desses estudos relativamente a propriedades mecânicas obtidas tendo em conta alguns polímeros diferentes e número de vezes que já foram reciclados.

PLA

Relativamente à reciclagem do PLA, alguns autores apontam que após um ciclo de reciclagem existe uma pequena descida da massa molecular deste material [48]. É ainda indicado por outros que a degradação do PLA aumenta até 30% após três ciclos e 60% após sete ciclos [49].

Um estudo consultado, refere que após serem realizados ensaios de flexão de acordo com a norma ASTM D2344, o PLA com um ciclo de reciclagem apresentou tensão de cedência à flexão de $106,8 \pm 9.0$ MPa e o PLA com 2 ciclos de reciclagem apresentava valores de 108.5 ± 9.9 MPa. Segundo os autores trata-se de valores próximos do material virgem, também ele ensaiado e que obteve a tensão de cedência à flexão de 119.1 ± 6.6 MPa. Contudo, após um terceiro ciclo

de reciclagem o PLA a tensão de cedência à flexão baixou consideravelmente para 75.0 ± 16.2 MPa [50].

ABS

A Tabela 8, proveniente de um estudo [51], apresenta listadas várias propriedades mecânicas (TS - *tensile strength*; ϵ_{TS} - *strain at tensile strength*; σ_f - *fracture stress*; ϵ_f - *nominal strain at fracture stress*; E - *elastic modulus*) e a taxa de porosidades obtidas pelo ensaio segundo a norma ASTM D3039 de 317 provetes de ABS virgem e ABS reciclado com um, dois ou três ciclos de reciclagem. Apresenta-se também o gráfico tensão - deformação, retirado do mesmo estudo, obtido com os dados recolhidos dos ensaios.

Tabela 8- Comparação de propriedades de ABS virgem com ABS com 1, 2 e 3 ciclos de reciclagem [51]

Sample	Property	Virgin ABS	ABS1	ABS2	ABS3
Filament	TS (MPa)	38.90±0.75	39.40±0.40	38.90±0.23	39.38±0.43
FMDed	TS (MPa)	32.96±1.43	31.90±3.50	31.49±3.90	29.44±1.99
FMDed	ϵ_{TS} (%)	3.10±0.20	3.04±0.26	2.78±0.16	2.68±0.12
FMDed	σ_f (MPa)	31.05±1.03	28.78±3.03	28.94±2.64	28.72±1.71
FMDed	ϵ_f (%)	5.22±0.81	4.80±0.86	4.28±0.70	3.92±0.55
FDMed	E (GPa)	1.57±0.10	1.54±0.16	1.64±0.18	1.58±0.07
FMDed	P (vol.%)	10.61±1.17	17.59±2.70	17.42±2.80	15.47±1.59

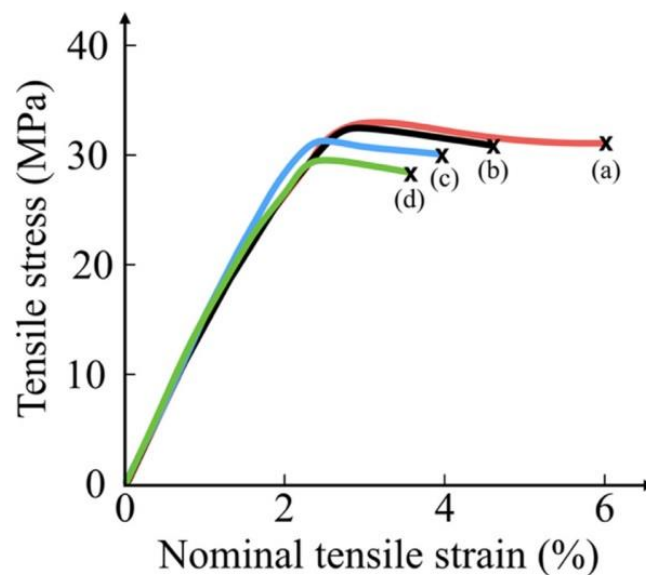


Fig. 15 - Gráfico tensão - deformação para ABS virgem e ABS reciclado com diferentes números de ciclo [51]

PET

Um estudo consultado apresenta propriedades obtidas para provetes concebidos pela tecnologia de impressão 3D em que se compara material novo com PET reciclado [52]. Os seus resultados estão sumarizados na Tabela 9.

Tabela 9- Comparação de propriedades de PET novo e reciclado [52]

	Virgin	Recycled
Number of specimens	20	20
Average tensile yield strength (MPa)	34.871	29.742
Standard deviation	1593	2778
Average tensile modulus of elasticity (MPa)	3670	3346
Standard deviation	224	413

As principais observações a serem realizadas são a obtenção de propriedades relativamente próximas das do material novo, no entanto, existe um desvio padrão quase do dobro. Relativamente ao PET existe um cuidado especial a ter na sua reciclagem, sobretudo no que diz respeito à sua possível contaminação com HDPE, presente nas tampas de garrafas. Desta forma é apresentado também um estudo no qual foram investigadas as propriedades de PET reciclado com diferentes níveis de contaminação com HDPE (0, 2, 5 e 10%) [53].

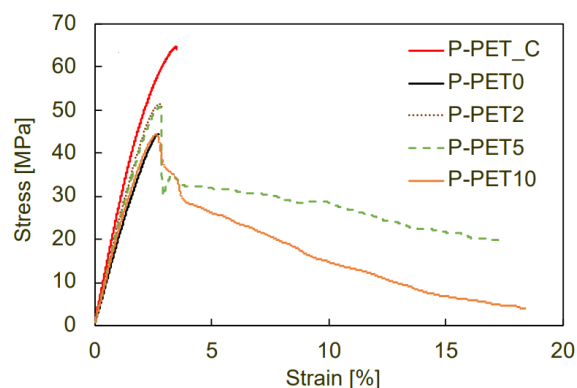


Fig. 16 - Gráfico de tensão - deformação de PET novo e PET reciclado com diferentes percentagens de contaminação por HDPE [53]

O estudo relata que a adição de 2% de polietileno de alta densidade contribui para um pequeno aumento de módulo de Young relativamente a PET reciclado e sem qualquer indício de contaminação. Para níveis superiores de contaminação o módulo de Young desceu, mas houve um enorme aumento na deformação de rotura [53].

2.3.4. Fabrico de filamentos reciclados

Atualmente já é possível adquirir filamentos para impressão 3D produzidos a partir de material reciclado. Embora as opções ainda estejam limitadas sobretudo ao ABS, PET e PLA já existem algumas empresas que trabalham com nylon proveniente de redes de pesca e TPU reutilizado de botas de esqui. A Tabela 10 apresenta um sumário de fabricantes que se dedicam à produção

de filamentos reciclados, a percentagem de material reciclado contido em cada um deles, preço e endereço na web.

Tabela 10- Materiais e respetivos fabricantes de filamento reciclado [54]

Manufacturer	Material	Source	Content of r-plastic (%)	Price (€)	Web address
B-PET	PET	PET bottles	100%	n.a.	(www.bpetfilament.com ; accessed 2020.04.08)
Filamentive	PLA	Factory waste streams	55%	35.57	(www.filamentive.com ; accessed 2020.04.09)
	ASA	n.a.	50%	36.82	
	PETg	Plastic food containers and drinks bottles	99.5%	36.93	
Fila-cycle	PET	Plastic bottles	100%	37.62	(www.fila-cycle.com ; accessed 2020.04.09)
	ABS	n.a.	64%	35.57	
	PLA	Yogurt pots	100%	n.a.	
	ABS	Automotive waste	n.a.		
	PET	Bottle plastics			
Refil	HIPS	Automotive Industrial Plastics, Home Electronics Industry	100%	n.a.	(www.re-filament.com ; accessed 2020.04.09)
	ABS	Refrigerators			
	PLA	Car dashboards			
	PET	Food packaging			
Innofil3D	PET	Blue bottles	100%	39.95	(www.ultrafuseff.com ; accessed 2020.04.09)
Fishy filaments	Nylon	Recycled PET materials	100%	34.21	(www.fishyfilaments.com ; accessed 2020.04.09)
Tridea	Porthuemo	Fishy nets	100%	29.99	(www.tridea.co ; accessed 2020.04.09)
	PET	PET food containers	100%	27.99	
CREAMELT	PLA	n.a.	100%	37.43	(www.ceramelt.com ; accessed 2020.04.09)
	TPU	Recycled ski boots			

n.a. not available

2.3.5. Estado da arte

Alguns dos desenvolvimentos mais significativos dos últimos cinco anos na reciclagem de plástico para a produção de filamento para impressão 3D são indicados na Tabela 11.

Tabela 11 - Desenvolvimentos recentes na reciclagem de polímeros para produção de filamentos de impressão 3D

Autor	Descrição
Dohan et al. [55]	Neste estudo é feita uma comparação entre as propriedades mecânicas de componentes em PETG novo e reciclado, obtidos por impressão 3D com recurso à tecnologia de FDM. Foi verificado que existe uma diferença muito pequena em termos de rigidez, mas o material reciclado apresenta o maior valor. Uma das conclusões mais importantes do estudo é que apesar do material reciclado ocasionalmente poder apresentar melhores propriedades, também existe uma maior variação da sua performance nos ensaios mecânicos. Quer isto dizer que o material novo continua a dar mais garantias.
Al Rashid e Koç [56]	Neste artigo são enumeradas as principais necessidades, desafios e oportunidades à utilização de polímeros reciclados em impressão 3D. Essencialmente existem três formas diferentes de reciclar plásticos: mecanicamente, quimicamente ou com recurso a calor. Cada método tem as suas vantagens e desvantagens, mas a reciclagem

	<p>química é referida como aquela de implementação mais difícil, contudo, com maiores benefícios a longo prazo. Os desafios quanto à reciclagem dos polímeros estão ligados às suas composições químicas, à necessidade da sua separação, sobretudo, na reciclagem mecânica, remoção de aditivos e revestimentos, a sua contaminação e a reciclagem de plásticos termoendurecíveis.</p>
Olawumi et al. [57]	<p>Neste estudo é explorada a sustentabilidade da reciclagem de polímeros através da tecnologia de FDM. Também se faz um estudo sobre a alteração das propriedades mecânicas com os ciclos de reciclagem, segundo o qual a tensão de cedência cai para 90% do valor original após o primeiro ciclo, e 80% após o terceiro. Refere-se ainda que é necessária uma quantidade de energia 30% menor para reciclar do que para processar material novo e que a pegada de carbono do processo de reciclagem é 25% menor do que a pegada do processamento de material novo.</p>

Revisão Bibliográfica

3. Métodos e Procedimentos

Neste capítulo serão abordados quatro tópicos principais. O primeiro a ser apresentado será o das máquinas e equipamentos utilizados durante a realização do estudo para a produção de filamento, produção dos provetes e para a realização dos ensaios. O segundo tópico tratado neste capítulo aborda os parâmetros de impressão utilizados na produção dos provetes. Como pode ser observado na Tabela 12, existe um conjunto de parâmetros comuns para todos os provetes produzidos. As variáveis estudadas foram o próprio material utilizado na impressão, a temperatura de impressão e, para o conjunto dos provetes *Charpy* a temperatura de ensaio. A Tabela 13 apresenta as variáveis estudadas.

Tabela 12- Sumário dos parâmetros de impressão comuns a todos os provetes

Diâmetro do bico de extrusão (mm)	0,4
Altura de camada (mm)	0,4
Taxa de preenchimento (%)	50
Padrão de preenchimento	Rectilinear
Temperatura da base de construção durante toda a impressão (°C)	55
Velocidade de impressão da 1ª camada (mm/s)	50
Velocidade de impressão da parede exterior das camadas intermédias (mm/s)	200
Velocidade de impressão da parede interior das camadas intermédias (mm/s)	300
Velocidade de impressão da última camada (mm/s)	200
Direção de impressão (eixo)	XY

Tabela 13- Variáveis estudadas

Material de impressão	PLA virgem/ PLA reciclado
Temperatura de impressão (°C)	220, 237 e 255
Temperatura de ensaio <i>Charpy</i> (°C)	24,1 e -30,9

O terceiro ponto abordado neste capítulo envolve as normas seguidas para as dimensões dos provetes e os respetivos ensaios para determinação das propriedades mecânicas.

Por fim será explicado todo o procedimento experimental com as várias etapas pelas quais o trabalho passou até se chegarem aos resultados, em análise no capítulo 4.

3.1. Máquinas e equipamentos

Neste subcapítulo serão apresentadas brevemente as máquinas e equipamentos aos quais se recorreu para a produção de filamento, impressão dos provetes e realização dos ensaios.

3.1.1. Máquina de ensaios de tração e flexão

Os ensaios de tração e flexão foram realizados com recurso ao mesmo equipamento, através dos adaptadores para acoplamento de garras de posicionamento dos provetes para ensaio de tração e do punção e suporte de dois pontos que permitem a realização do ensaio de flexão.

A máquina utilizada foi uma Shimadzu do modelo Autograph AG-X com uma célula de carga de 100 kN. Esta é apresentada na Fig. 17 nas diferentes configurações utilizadas durante os ensaios.

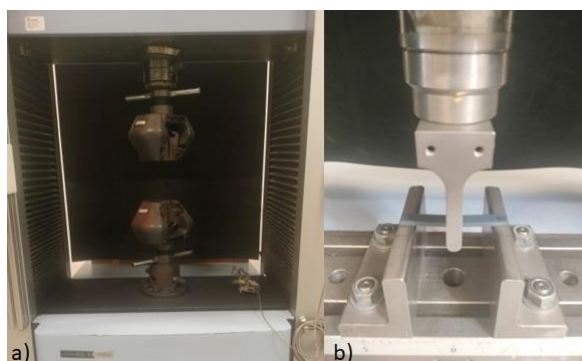


Fig. 17- a) *Setup* da máquina para ensaio de tração; b) *Setup* para ensaio de flexão (3 pontos)

3.1.2. Máquina de ensaio Charpy

Os ensaios Charpy foram realizados com recurso a um equipamento de pêndulo manual da Hounsfield apresentado na Fig. 18. Devido ao facto de ser uma máquina de origem inglesa, os *impactors* que partiram os provetes têm a sua massa em libras, assim como a escala da energia absorvida que se apresenta em libras pé. Contudo, a conversão de unidades foi facilmente realizada com recurso a um conjunto de tabelas fornecidas pelo fabricante da máquina.

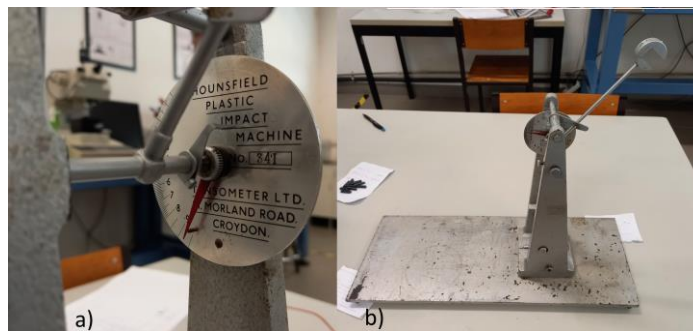


Fig. 18- a) Escala em libras pé informações do fabricante; b) Equipamento de ensaios Charpy

3.1.3. Extrusora de filamento

Para a produção de filamento foi utilizada uma pequena máquina extrusora de parafuso com a designação *Wellzoom B desktop extruder*, adquirida à empresa *Shenzhen Mistar Technology Co. LTD* e apresentada na Fig. 19. Alguns dos parâmetros deste equipamento podem ser consultados na Tabela 14.



Fig. 19- Extrusora de filamento Wellzoom [58].

Tabela 14- Parâmetros do equipamento *Wellzoom B desktop extruder*.

Taxa de extrusão (mm/min)	200- 600
Diâmetro do filamento produzido (mm)	1.75 ou 3.00 (dependendo do bico instalado)
Precisão da extrusão (mm)	+0.05 (1.75) e +0.1 (3.00)
Materiais possíveis de processar	PLA, ABS, PVA e plástico com pó de madeira
Temperatura máxima de operação (°C)	300
Precisão do controlador de temperatura (°C)	+ - 1
Alimentação	220 V, 50 Hz
Potência (W)	120
Capacidade do alimentador de material (ml)	400
Dimensões do equipamento (mm ³)	502x 138x 252

Este equipamento é acompanhado por um manual de instruções que contém algumas informações relevantes para a operação correta e preservação do seu tempo de vida.

Em primeiro lugar chama-se a atenção para o facto de o fabricante testar o equipamento antes da venda, para verificar que está a trabalhar corretamente, com ABS granulado. Foi possível confirmar esta advertência presente no manual de instruções, pois na abertura da embalagem ainda existiam algum deste ABS granulado no interior do barril de extrusão e na zona de alimentação de matéria-prima. Assim, conforme recomendado no referido manual, quando o equipamento foi operado pela primeira vez, configurou-se o PID (*Proportional- Integral-Derivative controller*) para uma temperatura apropriada à extrusão de ABS (196°C- 208°C, segundo o manual). O material ainda presente no interior da máquina extrusora foi removido quase totalmente, contudo, desde logo se verificou que apresentava pouca flexibilidade. Estes ABS terá estado no interior do equipamento de extrusão durante um período superior a cinco meses, pois a máquina foi testada pelo fabricante cerca de quatro meses antes de ter sido realizado o primeiro ensaio para verificar o seu bom funcionamento e apenas algumas semanas depois foi utilizada para a produção de filamento para esta tese.

Um outro ponto importante a observar é a libertação de odores intensos durante a operação do equipamento, que nunca é referido no manual de instruções, pelo que pela experiência adquirida, se recomenda a operação num local arejado para melhor escoamento de gases potencialmente nocivos à saúde.

Por último refere-se também que existe a opção de adquirir a extrusora em conjunto com um enrolador automático do mesmo fabricante, que se pode demonstrar bastante útil no caso de ser produzida uma quantidade significativa de filamento reciclado.

3.1.4. Impressora 3D

A impressora 3D utilizada para a produção de todos os provetes testados nesta tese é do tipo FDM, com a designação Bambu Lab X1-Carbon.



Fig. 20- a) Impressora 3D (FDM) Bambu Lab X1-Carbon; b) Base de construção em PEI

Trata-se de um equipamento relativamente moderno à data da sua aquisição e utilização, com um volume de construção de 256 mm³. Outra característica importante é que se trata de uma impressora 3D totalmente fechada, ou seja, a atmosfera junto do prato de impressão é bastante

mais controlada do que para uma impressora sem este tipo de estrutura, o que permite que o material arrefeça mais lentamente e obter componentes com menores deformações de origem térmica.

Outros parâmetros relevantes relacionados com este equipamento de impressão são a utilização de filamento de 1.75 mm de diâmetro, o diâmetro do bico de extrusão ser de 0.4 mm (com possibilidade de alterar para 0.2, 0.6 ou 0.8 mm se adquiridos separadamente) e a base de construção ser aquecida.

Relativamente à base de construção, salienta-se que a base utilizada foi uma *Textured PEI*. Este tipo de base é produzido pela aplicação de uma fina camada de 0.075 mm de pó de polieterimida em ambas as faces de uma folha de 0.5 mm de aço inoxidável. Tem como grande vantagem a capacidade de proporcionar uma boa adesão da primeira camada à base e ainda permitir uma fácil remoção dos componentes impressos após arrefecer. O fabricante informa que este material é capaz de suportar uma temperatura de operação até 180°C, o que se comprova por um estudo que sugere que provetes de PEI aquecidos a 190°C durante 24 horas começam a apresentar um pico de sinais de envelhecimento físico comparados com provetes aquecidos nas mesmas condições até 175°C [59].

A ficha técnica fornecida pelo fabricante relativa às características da impressora pode ser consultada no Anexo B.

3.1.5. Lupa

Para a uma observação mais detalhada da zona de rotura dos provetes ensaiados foi utilizada uma lupa Stemi DV4, na qual foi montada uma câmara fotográfica Canon PC1089, com o objetivo de captar as imagens observadas. A lupa possuía um conjunto de lentes de diferentes ampliações, dos quais foram utilizadas as que permitiam ampliação de 8x para os provetes de ensaio de tração, 16x para os provetes de ensaio de flexão e de 25x para os provetes de ensaio *Charpy*. Na Fig. 21 apresenta-se o conjunto de equipamentos referido.



Fig. 21- a) Lupa Stemi DV4; b) Conjunto Lupa Stemi e câmara Canon utilizado para fotografar zona de rotura dos provetes

3.2. Parâmetros de impressão

Um dos principais objetivos do trabalho que aqui se desenvolve é perceber o comportamento de material novo face a material reciclado, tanto a nível de propriedades mecânicas obtidas por componentes impressos em 3D como a nível da sua facilidade de impressão e maior ou menor probabilidade de propiciarem falhas durante o processo como bloqueio do bico de extrusão. De acordo com o explicado acima, estipulou-se que o parâmetro que seria de maior interesse estudar e poderia ter uma maior influência nos resultados seria a temperatura de extrusão. A gama de temperaturas normalmente recomendada para impressão de PLA virgem situa-se entre 190 e 220°C [60], contudo alguns estudos sugerem que a tensão de cedência sobe proporcionalmente com um aumento da temperatura de extrusão até 240°C [61]. Para PLA reciclado, é necessária uma maior temperatura de processamento uma vez que a sua estrutura molecular se degrada após a primeira extrusão, o que diminui a sua viscosidade a baixas temperaturas. Um estudo consultado concluiu que é necessário um aumento da ordem de 20% em relação à temperatura de extrusão de PLA virgem, para realizar uma extrusão adequada de PLA reciclado em impressões 3D [62]. Tendo em conta estas recomendações consideraram-se três temperaturas diferentes para extrusão do material: 220°C (temperatura comum aos dois tipos de material) e 237°C e 255°C para material reciclado.

Relativamente aos restantes parâmetros de impressão optou-se por seguir os mesmos de uma tese anterior para que fosse possível uma comparação de resultados. Estes parâmetros são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15- Parâmetros de impressão comuns a todos os provetes produzidos

Diâmetro do bico de extrusão utilizado (mm)	0,4
Altura de camada (mm)	0,4
Taxa de preenchimento (%)	50
Geometria de preenchimento	“Rectilinear”
Velocidade de impressão do contorno da primeira camada (mm/s)	50
Velocidade de impressão do preenchimento da primeira camada (mm/s)	105
Velocidade de impressão para parede externa de camadas intermédias (mm/s)	200
Velocidade de impressão para parede interna de camadas intermédias (mm/s)	300
Velocidade de impressão para preenchimento de camadas intermédias (mm/s)	250
Velocidade de impressão da última camada (mm/s)	200
Direção de impressão	XY

3.3. Dimensões dos provetes

As dimensões dos provetes utilizados para todos os ensaios realizados nesta tese seguem o estipulado nas normas ISO:

- Ensaio de tração- ISO 527-1;
- Ensaio de flexão- ISO 178-1;
- Ensaio de impacto/ Charpy- ISO 179-1.

Na Fig. 22 podem ser verificadas estas dimensões.

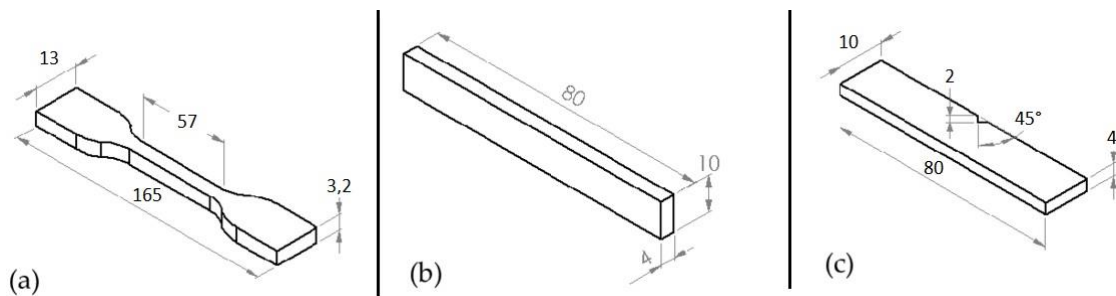


Fig. 22- a) Dimensões dos provetes para ensaio de tração; b) Dimensões dos provetes para ensaio de flexão; c) Dimensões dos provetes para ensaio *Charpy*.

Foram produzido 16 provetes para ensaio de tração e 16 para ensaio de flexão com o objetivo de estudar a influência do material virgem e do material reciclado nas propriedades mecânicas e também a influência da temperatura de extrusão. Relativamente aos provetes para ensaio *Charpy* foram produzidos vinte. A razão para a utilização de um número superior de provetes neste ensaio é porque se pretendia estudar também a influência da temperatura de ensaio nos resultados da capacidade de absorção de energia. Para uma melhor compreensão do número de provetes utilizados em cada ensaio e das variáveis em estudo em cada um destes apresenta-se a Tabela 16 que resume o que foi explicado neste parágrafo.

Tabela 16- Tabela sumário do número de provetes e variáveis em estudo em cada ensaio

Ensaio	Temperatura de extrusão dos provetes (°C)	Tipo de material	Temperatura de ensaio (°C)	Número de provetes ensaiados
Tração	220, 237 e 255	PLA virgem e PLA reciclado	22 (temperatura ambiente)	16
Flexão	220, 237 e 255	PLA virgem e PLA reciclado	22 (temperatura ambiente)	16
<i>Charpy</i>	220, 237 e 255	PLA virgem e PLA reciclado	-30,9 e 24	40

Após a produção dos provetes foram ainda realizadas medições a estes com dois objetivos diferentes:

- Um primeiro objetivo de ter dados o mais próximo possível da realidade das dimensões que os provetes tinham de modo que a tensão calculada também fosse o mais correta possível;
- Um objetivo secundário de analisar a variação de dimensões e verificar se existe algum tipo de relação entre estas e as variáveis de ser material reciclado ou não e a influência de diferentes temperaturas.

Os resultados destas medições são apresentados no Apêndice A.

3.4. Procedimento experimental

Inicialmente o desenvolvimento deste trabalho consistiu na recolha de material já utilizado para impressões anteriores e material de impressões que apresentaram falhas com vista à produção de novo filamento através da sua reciclagem.

No processo de impressão 3D, muitas vezes, o equipamento de impressão realiza purgas de material que ficou alojado nos canais de acesso para a cabeça de extrusão da impressora e até no próprio bico de extrusão. Deste modo, é possível garantir que a nova impressão será realizada com filamento nas melhores condições e, na hipótese de ter existido troca do tipo de material ou cor do filamento utilizado na impressão, sem conter misturas de material. Estas pequenas quantidades de PLA foram armazenadas ao longo de alguns meses com vista à sua “re-extrusão” na forma de filamento de 1.75 mm que poderia ser utilizado para novas impressões.

A presença de água nestes desperdícios de PLA é um parâmetro que pode interferir negativamente na qualidade do filamento produzido, pois às temperaturas de processamento (130 a 200°C) esta entra em ebulição e tenta expandir-se rapidamente. Contudo, como o material é comprimido dentro da câmara de extrusão enquanto aquece, o vapor não tem forma de escapar. Assim, quando o filamento sai pelo bico de extrusão, podem ocorrer pequenas explosões de bolhas de vapor de água que ficaram presas no interior do filamento e que vão ter um impacto bastante negativo na regularidade da sua morfologia. Verificou-se ainda, através de várias experiências, que este fenómeno é mais propício de acontecer quanto mais alta for a temperatura. Após várias experiências concluiu-se que a temperatura ideal de processamento se encontra entre os 150°C e os 157°C, para esta combinação específica de PLA e equipamento de produção de filamento. Estes resultados estão em linha com a pesquisa desenvolvida por Sanusi Hamat et al. [63].

Outro aspeto importante a considerar na produção de filamento de PLA pelo método aqui em estudo são as dimensões das partículas de desperdícios de PLA que vão ser introduzidas na máquina de produção de filamento. Devido à falta de informação na bibliografia e estudos realizados nesta área, foi utilizado como guia geral para informação alguns fóruns online acerca de impressão 3D nos quais era recomendada a utilização de partículas, no máximo, com cerca de 4 mm. Também se verificou que Wei et al. [62] utilizaram partículas de PLA reciclado com

valores entre 1,5 e 4,5 mm, pelo que havia uma concordância nas dimensões gerais recomendadas. Deste modo, foi dada uma especial atenção às dimensões dos desperdícios de PLA, com o objetivo de as reduzir para medidas que não ultrapassassem os 4 mm.

Tendo em conta a informação já apresentada relativa à influência da água na matéria prima para produção de filamento, optou-se por realizar um estágio a cerca de 110°C num forno durante 20 minutos, com o objetivo de eliminar a maior parte da humidade e, conseqüentemente, água presente no PLA para reciclagem. Durante a realização deste estágio o equipamento de produção de filamento foi ligado e definida uma temperatura de operação de 155°C. Devido ao seu modo de funcionamento, este equipamento demora algum tempo (cerca de 20 minutos) a atingir a temperatura escolhida e estabilizá-la dentro da câmara de extrusão. Quando a matéria-prima saiu do processo de desumidificação a máquina de produção de filamento já se encontrava à temperatura pretendida. O próximo passo foi introduzir a matéria-prima na extrusora de filamento e verificar a qualidade deste. Apesar das deficiências apresentadas pelo filamento produzido ainda se experimentou a sua utilização para impressão 3D, mas este ficou várias vezes preso no interior dos tubos que o conduzem à cabeça de extrusão da impressora o que conduziu ao seu entupimento.

Verificando que a impressão dos provetes seria impraticável, por este método optou-se por utilizar material reciclado comprado a produtores especializados. A ficha técnica do material adquirido e utilizado na produção dos provetes de PLA reciclado pode ser consultada no Anexo B. Após a aquisição do PLA reciclado procedeu-se à impressão dos provetes para ensaio de tração, flexão e *Charpy*. Para cada um destes ensaios foram produzidos três conjuntos de provetes, variando apenas um parâmetro de impressão, a temperatura de extrusão. Para ser possível uma comparação direta com o PLA novo, utilizou-se na impressão de PLA reciclado a mesma temperatura que o fabricante recomenda para a extrusão do primeiro, 220°C. Tendo em conta o trabalho de Wei et al. [62] que verificou a necessidade de aumentar a temperatura de impressão para PLA reciclado em cerca de 20% da recomendação do fabricante para PLA virgem, decidiu-se que seria utilizada a temperatura de 255°C, abaixo do valor de 20% como uma estimativa conservadora, de modo a evitar a degradação por temperatura excessiva. Por fim a temperatura de 237°C foi selecionada como um ponto médio entre os 220°C e os 255°C, que permitisse melhor avaliar o comportamento do material com o aumento de temperatura de extrusão. No caso dos provetes para ensaio *Charpy* foi adicionada a variável extra da temperatura de ensaio. Considerou-se que seria um fator importante a estudar no caso de peças que se encontram no exterior e que podem estar sujeitas a impactos a temperaturas negativas durante o inverno. Assim um total de 20 provetes foi ensaiado à temperatura ambiente (cerca de 24°C) e os restantes 20 foram ensaiados a -30,9°C. A temperatura negativa foi conseguida com recurso a arrefecimento dos provetes com azoto líquido. Os provetes para ensaio a temperatura negativa foram colocados dentro de uma tina de aço inox, com o azoto líquido e aí deixados durante algum tempo até atingirem a temperatura desejada.

Com os provetes para ensaio de tração e ensaio de flexão prontos foram realizadas algumas medições, com recurso a um paquímetro digital de incerteza $\pm 0,01$ mm, com o objetivo de perceber se as dimensões teóricas comunicadas ao equipamento de impressão apresentavam uma variação significativa. Procurou-se que as medições fossem realizadas todas em

Métodos e Procedimentos

pontos diferentes ao longo do comprimento e espessura dos provetes de modo a obter um valor médio mais representativo da realidade. Para cada uma das variáveis (espessura e largura) foram realizadas três medições. Com os valores registados calculou-se ainda a área de secção média dos provetes.

Após a realização de todos os ensaios para determinação de propriedades mecânicas foi ainda levado a cabo um estudo do tipo de rotura que os provetes que sofreram fratura apresentaram. Com recurso ao conjunto já referido no subcapítulo das máquinas e equipamentos, lupa e câmara fotográfica, foram fotografadas as superfícies de rotura dos provetes dos diferentes ensaios e analisada a sua superfície com o objetivo de encontrar indícios que pudessem ajudar a concluir se estes sofreram uma rotura do tipo dúctil ou do tipo frágil.

4. Resultados e discussão

Neste subcapítulo serão analisados sequencialmente todos os ensaios realizados para determinação de propriedades mecânicas dos provetes de PLA novo e PLA reciclado e os respectivos resultados. A análise inicia-se pela produção de filamento, seguida da comparação das dimensões dos provetes para ensaio de tração, passa depois pela apresentação dos resultados do ensaio de tração e respetiva análise, o mesmo para o ensaio de flexão e, por fim, o ensaio *Charpy*.

4.1. Produção do filamento

A produção do filamento como já referido no procedimento experimental, teve o seu início com o processo de trituração da matéria-prima para produção do filamento reciclado. A dimensão dos fragmentos criados poderá ter influenciado o resultado final na medida em que se verificou através da observação do filamento produzido que este não possuía um bom grau de homogeneidade, dado que as diferentes cores de diferentes fragmentos eram visíveis em alguns locais da superfície do filamento. Considera-se que este defeito também poderá ter estado associado a uma mistura deficiente do material no interior da extrusora ligada a temperaturas de extrusão exageradamente baixas. Tal constituiu um problema no que toca à homogeneidade do filamento produzido e à sua rapidez de extrusão devido ao aumento da viscosidade do PLA por este se encontrar mais próximo da temperatura de solidificação, o que conduz à necessidade de uma força de maior intensidade para atingir a mesma velocidade de extrusão. Devido à inexistência de controlos no equipamento para aumentar a força que o parafuso de extrusão exerce sobre o material, a única variável que poderia ser controlada para aumentar a velocidade de produção era a temperatura pois, como referido, afeta a viscosidade do material.

Outro aspeto de realce foi, mesmo após o processo de desumidificação, o filamento conter alguma água pois quando este saía do bico de extrusão, pequenas bolhas rebentavam, o que contribuiu para uma secção e superfície irregular do filamento. Após outra tentativa de secagem do material verificaram-se melhores resultados neste aspeto. Contudo, foi detetada uma outra característica prejudicial à processabilidade do filamento. Este adquiriu uma elevada rigidez e baixa flexibilidade, que se traduziram em várias quebras ao longo do seu comprimento. Uma outra característica apresentada a nível visual era o escurecimento do PLA, que se constatou devido ao facto de uma grande parte do material para reaproveitamento colocado

em primeiro lugar no interior da extrusora possuir cor branca, amarela e/ou lilás. Estes defeitos podem ser visualizados na Fig. 23. A fragilidade do filamento nunca chegou a ser corrigida mesmo após serem experimentadas temperaturas de extrusão diferentes, nomeadamente 130 e 200°C.

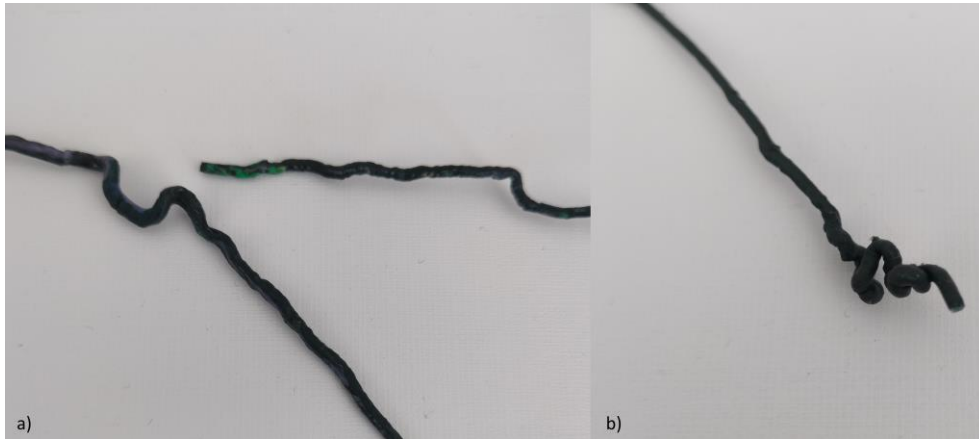


Fig. 23- a) Defeitos variados na extrusão do filamento (rugosidade excessiva, secção variável, falta de mistura, falta de flexibilidade); b) Defeito de secção irregular, rugosidade excessiva e falta de flexibilidade

4.2. Análise dimensional dos provetes

Com recurso a um paquímetro digital (incerteza de $\pm 0,01$ mm) foram realizadas três medições em diferentes pontos ao longo do comprimento e espessura dos provetes utilizados no ensaio de tração e ensaio e flexão. Com os dados referentes a estas dimensões dos provetes foi representada visualmente a relação entre estas dimensões e o material e temperatura de extrusão utilizados. Para informação mais detalhada acerca dos dados recolhidos pode ser consultado o Apêndice A.

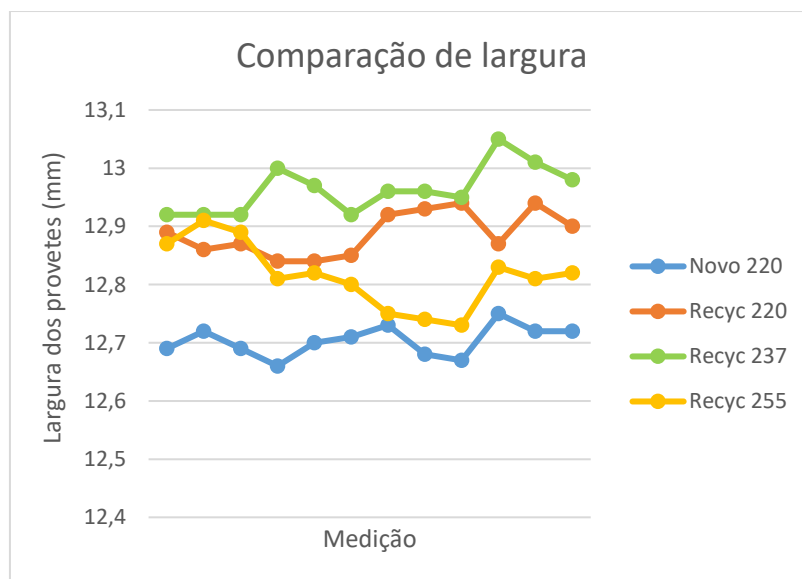


Fig. 24- Comparação das larguras de provetes para ensaio de tração

Tabela 17- Dados complementares da Fig. 24

Material	Largura média (mm)	Desvio padrão largura (mm)	Diferença para o valor teórico (%)
PLA novo impresso a 220°C	12,70	0,03	2,28
PLA reciclado impresso a 220°C	12,89	0,04	0,87
PLA reciclado impresso a 237°C	12,96	0,04	0,28
PLA reciclado impresso a 255°C	12,82	0,06	1,42

Através da Fig. 24 verifica-se que existe uma relação entre a contração do material e o tipo de material e também entre a contração e a temperatura de extrusão. Os provetes produzidos em material novo apresentam uma menor largura do que aqueles produzidos em material reciclado. Este dado é relevante pois indica uma maior contração térmica quando sujeito ao processo de extrusão para a produção dos provetes. Prova deste facto é a largura teórica transferida ao equipamento de impressão por via do *software* de *licer* ser 13 mm e os provetes de material novo, consistentemente, apresentarem valores inferiores de largura, na ordem dos 12,7 mm. A conclusão retirada destes dados demonstra-se em linha com Rădulescu et al. [64].

É também possível de constatar que existe uma temperatura ideal de extrusão que resulta em dimensões mais próximas da pretendida, neste caso 237°C, uma vez que a temperatura inferior (220°C) os valores medidos estão um pouco abaixo dos 13 mm e a temperatura superior (255°C) se afastam ainda mais do pretendido. Esta conclusão, embora não contradizendo totalmente Zharylkassyn et al.[65], também não está alinhada com os seus resultados. De seguida apresenta-se a Fig. 25 que contém os resultados relativos à espessura dos provetes utilizados no ensaio de tração.

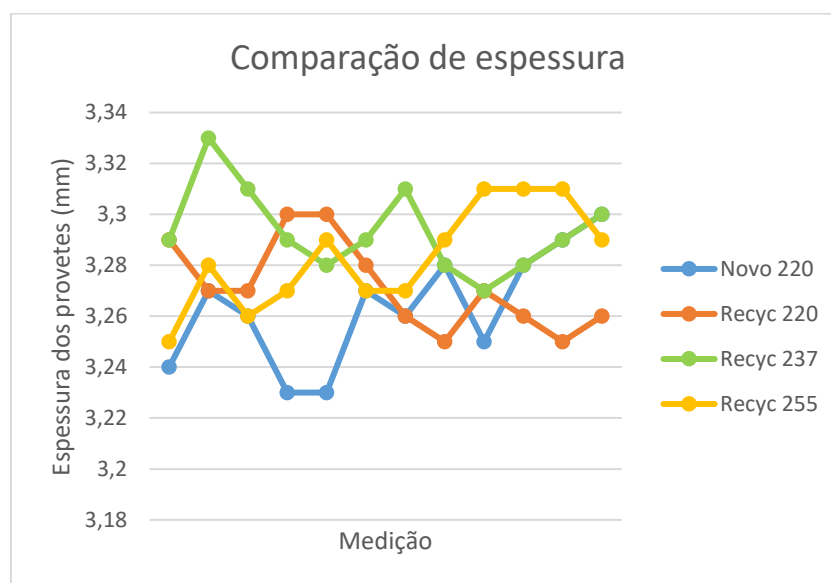


Fig. 25- Comparação das espessuras de provetes para ensaio de tração

Tabela 18- Dados complementares da Fig. 25

Material	Espessura média (mm)	Desvio padrão espessura (mm)	Diferença para o valor teórico (%)
PLA novo impresso a 220°C	3,26	0,02	1,98
PLA reciclado impresso a 220°C	3,27	0,02	2,24
PLA reciclado impresso a 237°C	3,29	0,02	2,92
PLA reciclado impresso a 255°C	3,28	0,02	2,60

O gráfico da Fig. 25 mostra que não existe uma relação entre a variação da espessura dos provetes, o tipo de material de que são feitos e a temperatura de extrusão, tão clara e demarcada como o que se confirmou relativamente às dimensões da largura dos provetes. Nesta análise verifica-se que todos os provetes, em todas as medições efetuadas, apresentavam espessura superior à teórica de 3,2 mm. Este facto poderá ser justificado pela existência de espaços vazios entre camadas que não são totalmente preenchidos por material e que, assim, elevam a espessura dos provetes. Abaixo pode ser observada a Fig. 26 na qual é feita uma comparação das áreas de secção dos provetes em análise.

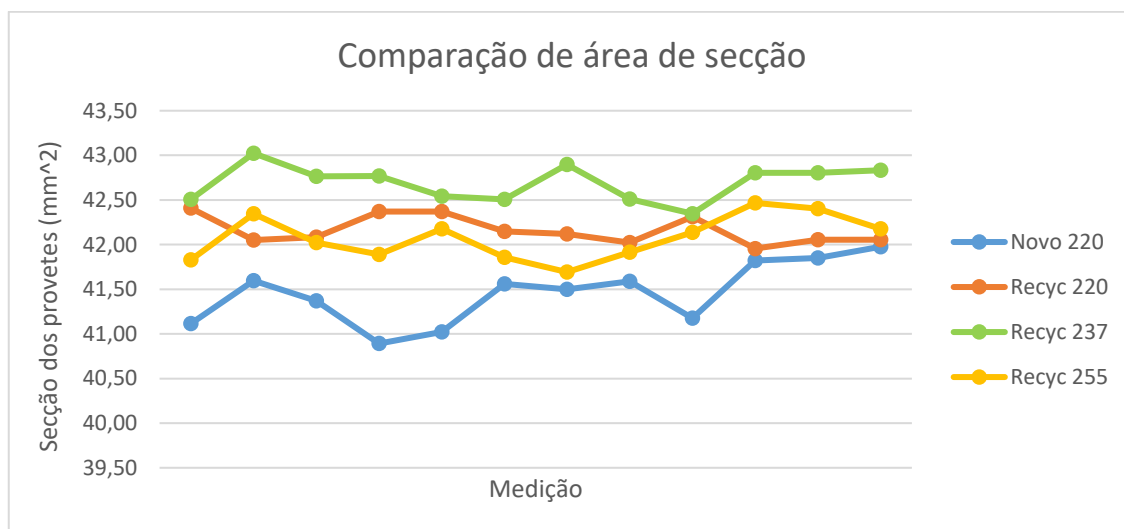


Fig. 27- Comparação das áreas de secção de provetes para ensaio de tração

A Fig. 27 vem confirmar o verificado na Fig. 24, porque a espessura entra no cálculo da área. No entanto, a largura, que apresentava um padrão, exerce a sua influência sobre os resultados da área mostrando mais uma vez que PLA novo tem uma maior contração térmica do que PLA reciclado, e que a temperatura de 237°C é a que resulta numa maior expansão do material, superando em média, em mais de 2.5 mm² os 41.6 mm² de área de secção teórica.

4.3. Análise dos resultados do ensaio de tração

4.3.1. Material novo

O primeiro ensaio realizado foi ao PLA virgem, para qual foram utilizados 4 provetes impressos com uma temperatura do bico de extrusão de 220°C, com uma taxa de preenchimento de 50%, entre outros aspetos já especificados no capítulo 3.2. Em primeiro lugar refere-se que todos os provetes ensaiados sofreram rotura. Os resultados do ensaio foram satisfatórios, na medida em que o comportamento do material e as propriedades obtidas foram semelhantes, de um modo geral, apenas se verificou uma maior variação na deformação na rotura. Os valores obtidos para as propriedades podem ser consultados na tabela abaixo, junto do gráfico comparativo tensão/deformação dos 4 provetes em questão.

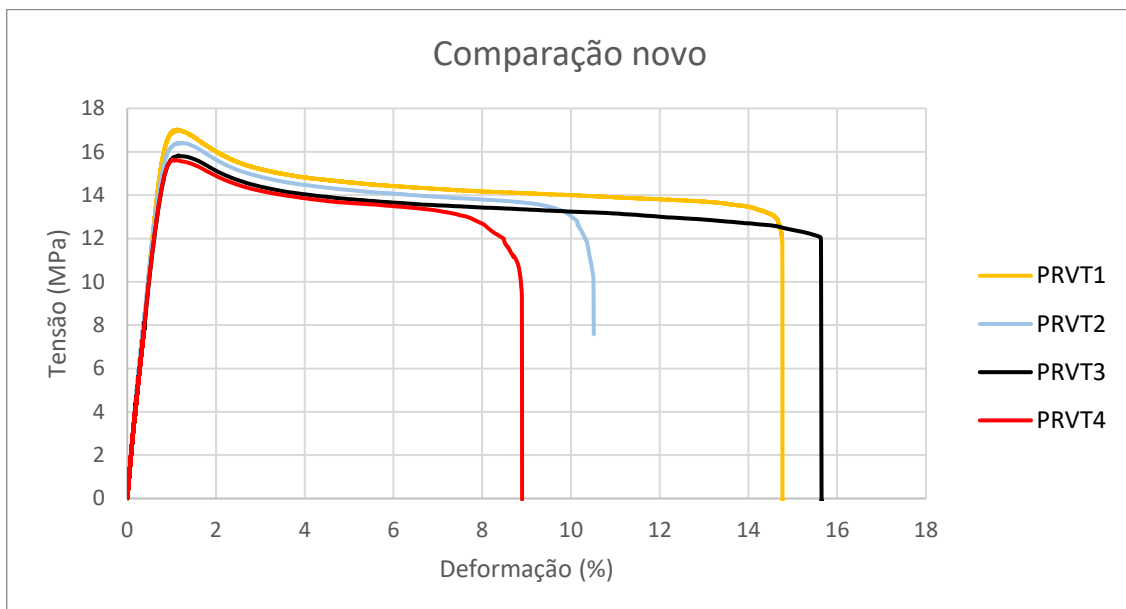


Fig. 28- Gráfico tensão/ deformação comparativo dos 4 provetes de PLA virgem analisados

Tabela 19- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de tração do PLA virgem

		Desv. Pad.	CoV (%)
E (MPa)	2130,68	77,57	3,64
Tensão de cedência (MPa)	7,78	1,80	23,21
Tensão máxima (MPa)	16,23	0,54	3,35
Deformação de rotura (%)	12,46	2,83	22,69

A análise dos valores obtidos, mostra que tanto a tensão máxima atingida pelos provetes, assim como o módulo de elasticidade tiveram valores bastante precisos, uma vez que o CoV é de apenas 3,35% e 3,64%, respetivamente. Por outro lado, a tensão de cedência dos provetes e a deformação na rotura apresentam um CoV significativo de 23,21% e 22,69%, respetivamente. Considera-se que o erro associado à tensão de cedência médio poderá derivar a sensibilidade dos dados às retas de aproximação utilizadas.

Relativamente à deformação de rotura verificou-se que dois dos provetes apresentaram valores da ordem dos 15% e outros dois mais por volta de 9%-10%. Esta é uma variação considerável e, tendo em conta o padrão que existiu, é importante perceber o que poderá ter estado na sua origem. Considera-se que um dos fatores que poderá ter estado na origem deste efeito é a existência de falhas ao nível microscópico, por exemplo, a existência de uma maior quantidade de vazios, nos dois provetes que apresentaram menor deformação na rotura, que terá contribuído para uma propagação de fissuras mais rápida do que nos provetes 1 e 3.

4.3.2. Material reciclado impresso a 220°C

O segundo conjunto de provetes a ser analisado é o de PLA reciclado impresso a 220°C, também com taxa de preenchimento de 50%, mantendo os restantes parâmetros constantes e iguais tanto ao PLA virgem como dos provetes que serão analisados adiante. Todos os provetes da PLA reciclado impresso a 220°C sofreram rotura. Os resultados preliminares do ensaio de tração ao material reciclado demonstraram-se dentro do esperado [66], ou seja, verificou-se um aumento da tensão da tensão máxima suportada e diminuição da deformação na rotura, face ao material novo. Assim como apresentado anteriormente para o PLA novo, na Fig. 29 e Tabela 20 apresentam-se os resultados dos ensaios e as propriedades mecânicas calculadas para o PLA reciclado impresso a 220°C.

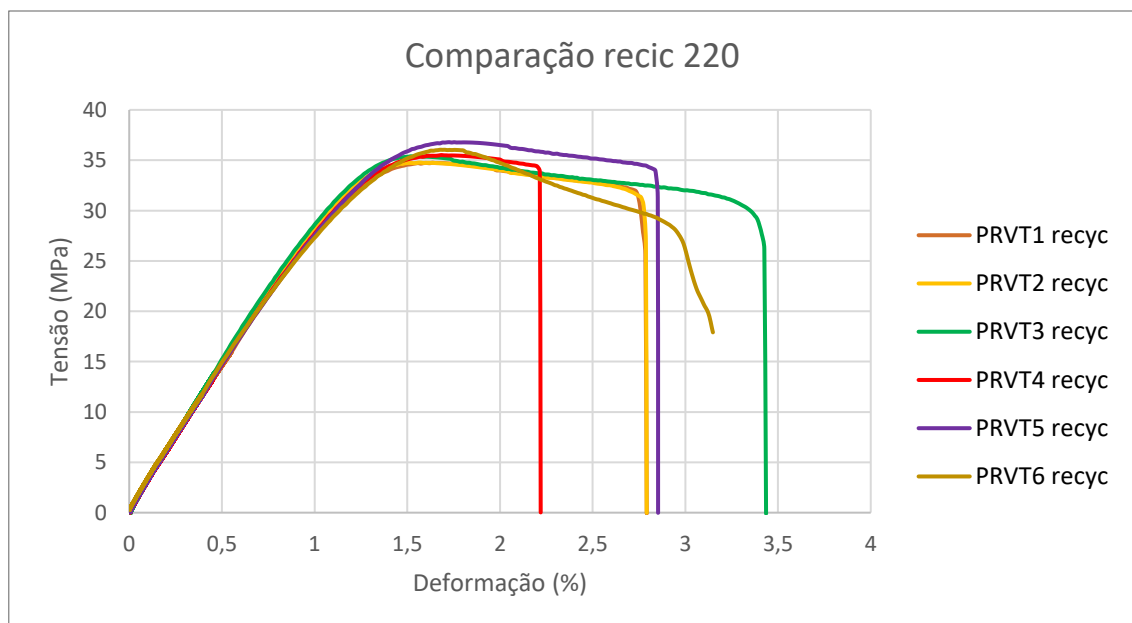


Fig. 29- Gráfico tensão/ deformação comparativo dos 4 provetes de PLA reciclado e impresso a 220°C

Tabela 20- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de tração do PLA reciclado impresso a 220°C

		Desv. Pad.	CoV (%)
E (MPa)	2991,15	43,75	1,46
Tensão de cedência (MPa)	22,80	1,52	6,68
Tensão máxima (MPa)	35,55	0,71	2,00
Deformação de rotura (%)	2,87	0,37	12,97

A diminuição do CoV associado aos valores das diversas propriedades torna-se difícil de explicar sem a realização de mais testes, por exemplo, que permitissem a análise da composição química e homogeneidade dos provetes. O comportamento aqui verificado difere da literatura consultada na comparação de propriedades mecânicas de PLA virgem e PLA reciclado, segundo esta, o material virgem apresenta um comportamento mais constante ou uniforme entre diferentes provetes do mesmo lote de material do que provetes de PLA reciclado [50]. Ora, através dos dados apresentados nas Tabela 19 e Tabela 20 verifica-se que esse não foi o caso aqui. Pode-se especular que esta discrepância se deva a lotes anormais tanto de PLA novo com grande variação na sua homogeneidade e composição química que se demonstrará como maior variação nas propriedades mecânicas, como de um lote de PLA reciclado, anormalmente homogêneo que, como consequência, apresentará maior concordância e menor variação nas propriedades mecânicas. Através da Tabela 20 podem ser retiradas mais algumas conclusões para além das já referidas para a tensão máxima e deformação na rotura. Em primeiro lugar verifica-se um aumento de cerca de 15 MPa na tensão de cedência do material face ao PLA novo e uma diminuição bastante acentuada da deformação na rotura, cerca de 5 vezes menor. Em segundo lugar denota-se que a tensão de cedência média teve uma diminuição do CoV muito acentuada que se explica de forma relativamente fácil, dado que, as retas de ajuste utilizadas para calcular a interseção entre os valores reais e a reta teórica de deformação a 0,2% de deformação tem um ajuste bastante melhor aos valores obtidos, ou seja, os dados registados pelo equipamento de ensaio durante a fase de cedência do material foram mais lineares do que para o material novo, durante a mesma fase. Apesar de tudo, como se refere no parágrafo anterior é difícil explicar as diferenças verificadas para as restantes propriedades.

4.3.3. Material reciclado impresso a 237°C

O conjunto de provetes dos quais são apresentados os dados e resultados do ensaio de tração na Fig. 30 e Tabela 21 são de PLA reciclado impresso a 237°C, todos os restantes parâmetros de impressão mantiveram-se inalterados. Assim como nos ensaios anteriores todos os provetes sofreram rotura. Os resultados do ensaio voltaram a mostrar-se satisfatórios, aponta-se apenas a diferença na deformação de rotura do provete 3 como o dado com maior variação.

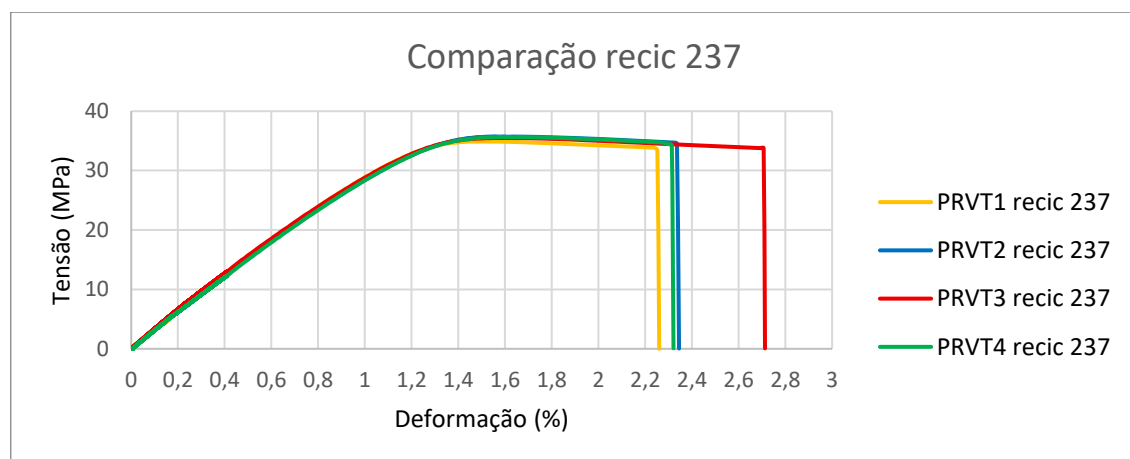


Fig. 30- Gráfico tensão/ deformação comparativo dos 4 provetes de PLA reciclado e impresso a 237°C

Resultados e Discussão

Tabela 21- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de tração do PLA reciclado impresso a 237°C.

		Desv. Pad.	CoV (%)
E (MPa)	3090,38	123,51	4,00
Tensão de cedência (MPa)	22,80	1,52	6,68
Tensão máxima (MPa)	35,43	0,34	0,95
Deformação de rotura (%)	2,41	0,18	7,37

4.3.4. Material reciclado impresso a 255°C

Os resultados apresentados na Fig. 31 e Tabela 22 são referentes aos provetes de PLA reciclado impressos a 255°C. Com exceção da temperatura de impressão, todos os outros parâmetros mantiveram-se inalterados na produção dos provetes. Todos os quatro provetes produzidos sofreram rotura durante o ensaio de tração. Numa primeira análise aos resultados verifica-se que as curvas obtidas são muito semelhantes até ser atingida a tensão máxima teórica, mas após este ponto a deformação dos provetes para a qual ocorre rotura varia moderadamente (cerca de 1%).

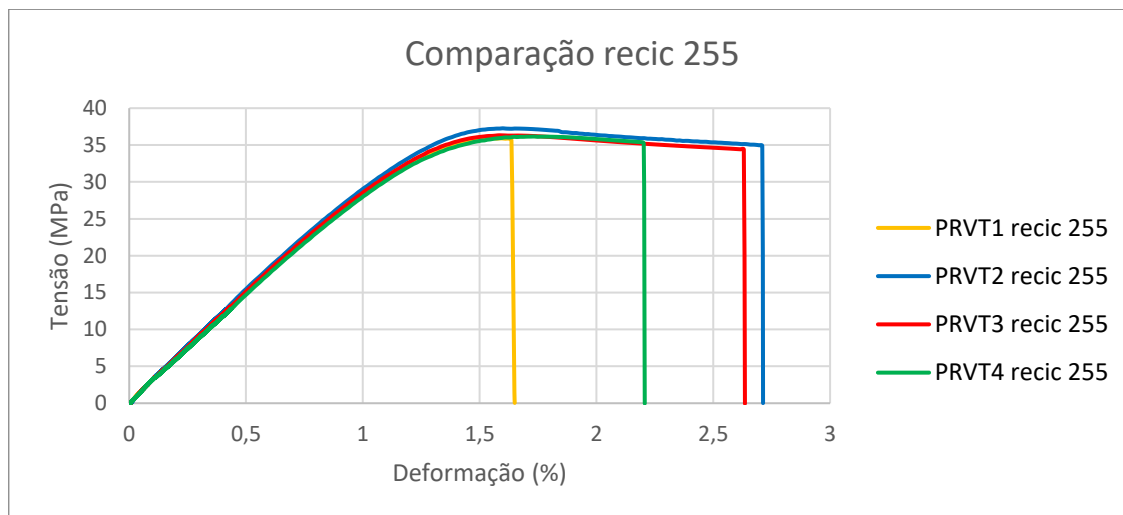


Fig. 31- Gráfico tensão/ deformação comparativo dos 4 provetes de PLA reciclado e impresso a 255°C

Tabela 22- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de tração do PLA reciclado impresso a 255°C.

		Desv. Pad.	CoV (%)
E (MPa)	2961,03	9,45	0,32
Tensão de cedência (MPa)	26,06	1,72	6,59
Tensão máxima (MPa)	36,42	0,52	1,41
Deformação de rotura (%)	2,30	0,42	18,36

Através da análise dos dados presentes na Tabela 22 pode-se verificar que o módulo de elasticidade tem um CoV de apenas 0,32%, o que indica uma grande precisão de todo o

processo produtivo dos provetes de PLA reciclado impressos a 255°C e também da sua preparação para o ensaio de tração.

Relativamente à tensão de cedência verifica-se um coeficiente de variação dentro dos níveis apresentados pelos restantes provetes de material reciclado e apesar do seu valor de 6,59% considerou-se aceitável para um teste com apenas quatro provetes.

A tensão máxima atingida apresentou-se muito constante, com um CoV de apenas 1,41%.

Por fim, a deformação de rotura foi a propriedade com maior variação como é verificado pelo CoV de 18,36%. Como já referido para os provetes de PLA novo e PLA reciclado impresso a 220°C, atribui-se esta elevada variação a defeitos microscópicos como vazios de material que contribuíram para que fissuras se propagassem mais rapidamente e a rotura fosse atingida em fases mais precoces para os provetes 1 e 4.

4.3.5. Comparação de todos os ensaios de tração

A Fig. 32 a Fig. 35 e Tabela 23 a Tabela 25 apresentam a informação de cada um dos ensaios sumarizada de forma a que se torne mais fácil a comparação da influência do tipo de material e da temperatura de impressão nas propriedades mecânicas em estudo. No seguimento de cada um destes gráficos e tabelas será feita uma pequena exposição das conclusões retiradas da análise dos mesmo.

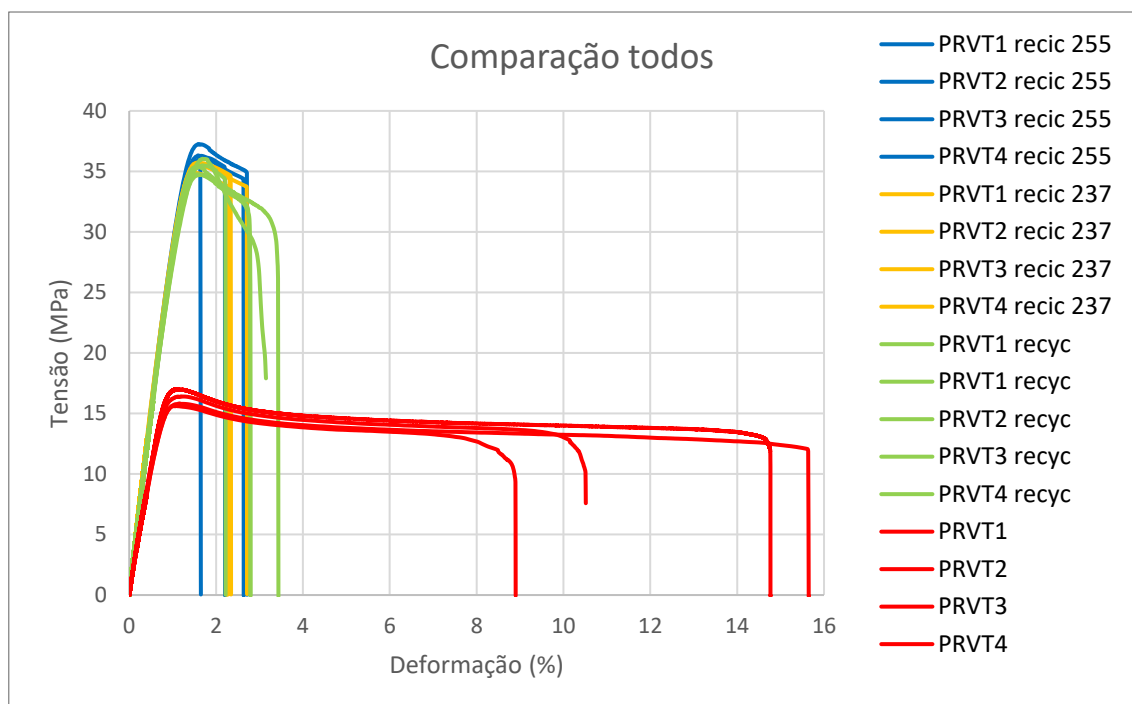


Fig. 32- Gráfico tensão/ deformação comparativo dos vários provetes ensaiados

O gráfico da Fig. 32 mostra a comparação entre as curvas dos vários provetes ensaiados. Como principais conclusões a retirar deste apontam-se a capacidade do material novo sofrer uma deformação até 8 vezes superior ao material reciclado antes de sofrer rotura, mas, em contrapartida, suporta tensões máximas de cerca de metade dos valores suportados pelo PLA

Resultados e Discussão

reciclado. Pode-se ainda verificar que existe uma ligeira tendência para diminuição da capacidade de deformação do material reciclado, antes de sofrer rotura, com o aumento da temperatura de extrusão. De seguida são apresentados de forma gráfica todos os valores das propriedades mecânicas analisadas dos vários provetes em estudo e do material em bruto (quando disponível), disponibilizadas pelo fabricante.

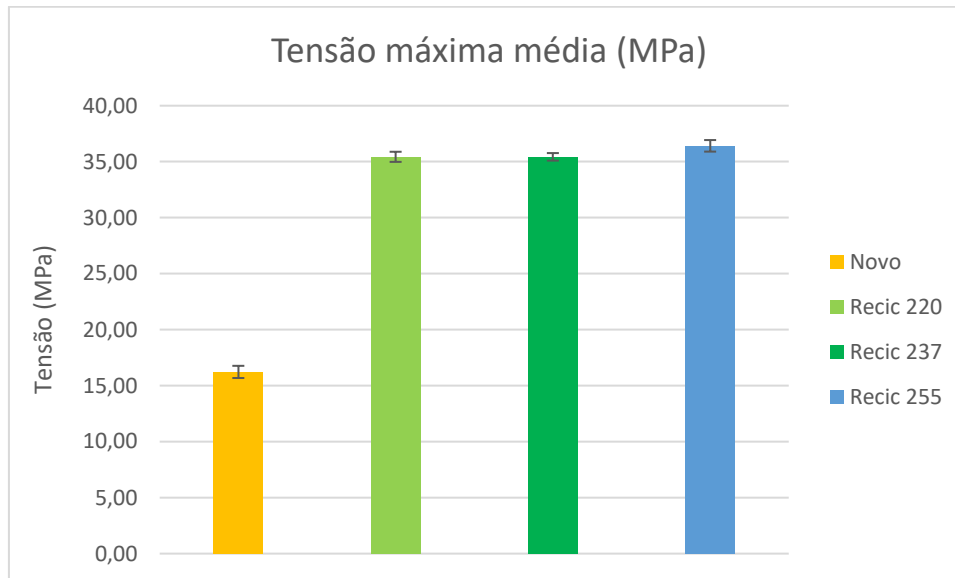


Fig. 33- Comparação da tensão máxima média obtida por cada conjunto de provetes

Tabela 23- Comparação da tensão máxima média obtida por cada conjunto de provetes.

Material	Tensão máxima média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CoV (%)
Fabricante	-	-	-
Novo	16,23	0,54	3,35
Recic 220	35,43	0,45	1,27
Recic 237	35,43	0,34	0,95
Recic 255	36,42	0,52	1,41

A partir dos dados apresentados na Fig. 33 e Tabela 23 verifica-se que o material novo atinge a sua tensão máxima para valores muito inferiores aos do PLA reciclado, na verdade, não atinge sequer metade da tensão máxima suportada por qualquer destes. Aponta-se também que o coeficiente de variação (CoV) do material reciclado é menos de metade do calculado para o PLA virgem. Este facto vem contrariar a tendência apontada na literatura do tema, que identificava o PLA reciclado como apresentando maiores variações nos valores das propriedades mecânicas, comparativamente ao PLA novo [50, 67].

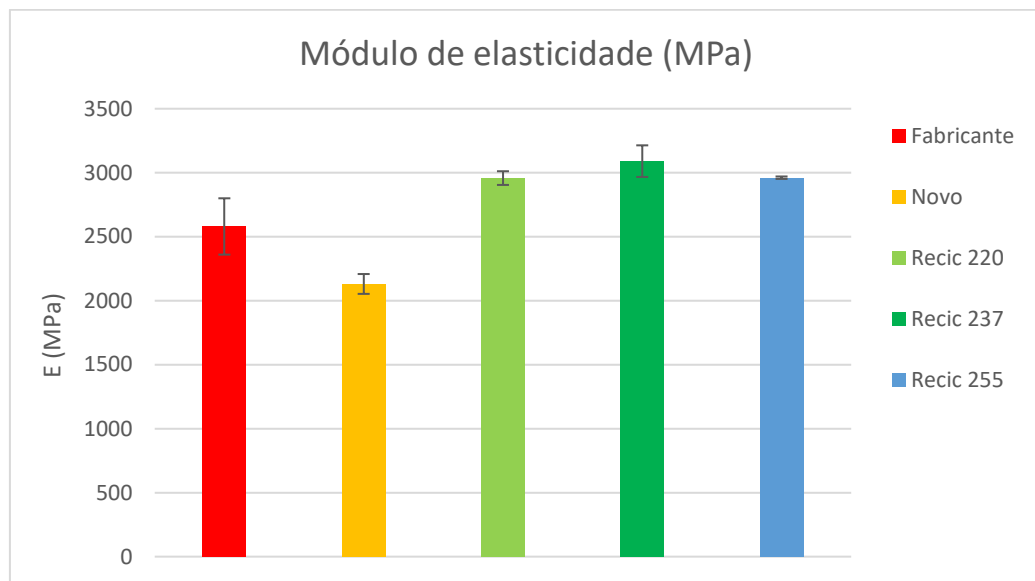


Fig. 34- Comparação do módulo de elasticidade médio dos provetes ensaiados e do material em bruto.

Tabela 24- Comparação do módulo de elasticidade médio dos provetes ensaiados e do material em bruto.

Material	E médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CoV (%)
Fabricante (novo)	2580	220	8,53
Fabricante (reciclado)	3500	-	-
Novo	2130,68	77,57	3,64
Recic 220	2958,00	53,43	1,81
Recic 237	3090,38	123,51	4,00
Recic 255	2961,03	9,45	0,32

Relativamente ao módulo de elasticidade médio obtido através dos ensaios efetuados registam-se três aspetos importantes:

- O material novo, após ser impresso na forma de provete, apresenta um módulo de elasticidade cerca de 17% inferior ao do PLA em bruto testado pelo fabricante. Esta diferença pode advir de alguns fatores como o próprio processamento do PLA em bruto levar a que o material tenha uma perda no seu módulo elasticidade ou lote de material que foi utilizado para a produção dos provetes ser anómalo e poder conter algumas impurezas que contribuiriam para o impacto negativo verificado;
- O PLA reciclado, independentemente da temperatura de processamento, tem um módulo de elasticidade superior ao PLA novo e também superior ao PLA em bruto, o que está em linha de resultados com outros trabalhos desenvolvidos na área;
- A temperatura de processamento demonstra ter um impacto pequeno na variação do módulo de elasticidade do PLA reciclado, dado que, de 220°C para 255°C a variação do módulo é muito pequena (cerca de 3MPa). Verifica-se ainda que a temperatura para a qual o módulo de elasticidade à tração foi mais elevado foi 237°C e que é cerca de 130

Resultados e Discussão

MPa superior quer ao módulo para material processado a 220°C quer ao módulo de material processado a 255°C. Estes dados também apontam para o reduzido impacto da temperatura de processamento no módulo de elasticidade à tração do PLA reciclado.

Uma outra conjectura que se poderá formular a partir destes resultados, atendendo ao COV é que a tendência de menor erro para o PLA reciclado verificada na tensão máxima se mantém para as temperaturas de processamento de 220°C e 255°C. O aumento pontual do erro para a temperatura de 237°C poderá dever-se a fatores relacionados com a própria impressão dos provetes e a coesão entre o material de diferentes camadas, ou a um aperto diferente nas garras da máquina de ensaio de tração. Contudo o menor desvio padrão de propriedades mecânicas de PLA reciclado face ao PLA virgem vem contrariar alguns estudos realizados por outros autores como já referido anteriormente.

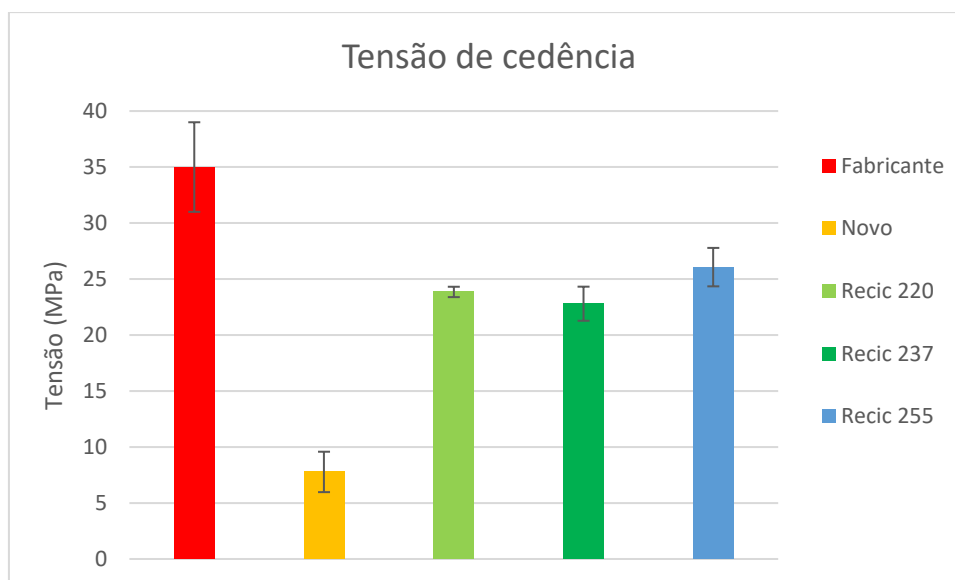


Fig. 35- Comparação da tensão de cedência média dos provetes ensaiados e do material em bruto.

Tabela 25- Comparação da tensão de cedência média dos provetes ensaiados e do material em bruto.

Material	Tensão de cedência média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CoV (%)
Fabricante (novo)	35	4	11,43
Fabricante (reciclado)	45	-	-
Novo	7,78	1,80	23,21
Recic 220	23,85	0,46	1,94
Recic 237	22,80	1,52	6,68
Recic 255	26,06	1,72	6,59

A partir da análise dos dados compilados na Fig. 35 e Tabela 25 retira-se que:

- O material em bruto ensaiado pelo fabricante tem uma tensão de cedência de quase 4.5 vezes a do material novo testado, e em média 1.4 vezes superior ao do PLA reciclado;

- A tensão de cedência calculada para o PLA novo tem um elevado erro, pelo que não será o mais correto fazer comparações com o PLA reciclado, no entanto o seu valor é claramente inferior.
- O aumento da temperatura de processamento tem um impacto positivo no aumento da tensão de cedência do PLA reciclado, tendo sido obtido o máximo de 26.06 MPa para 255°C.
- Em linha com o verificado para a tensão máxima e módulo de elasticidade, identifica-se um menor COV para material reciclado do que para PLA novo, embora se registre uma subida acentuada deste valor para as temperaturas de 237°C e 255°C por comparação com o que se verificou para os provetes processados a 220°C.

Por último apresenta-se a Fig. 36 na qual é visível o detalhe da rotura de um provete de cada conjunto ensaiado e a Fig. 37 onde são visíveis todos os provetes utilizados nos ensaios de tração e a respetiva rotura.

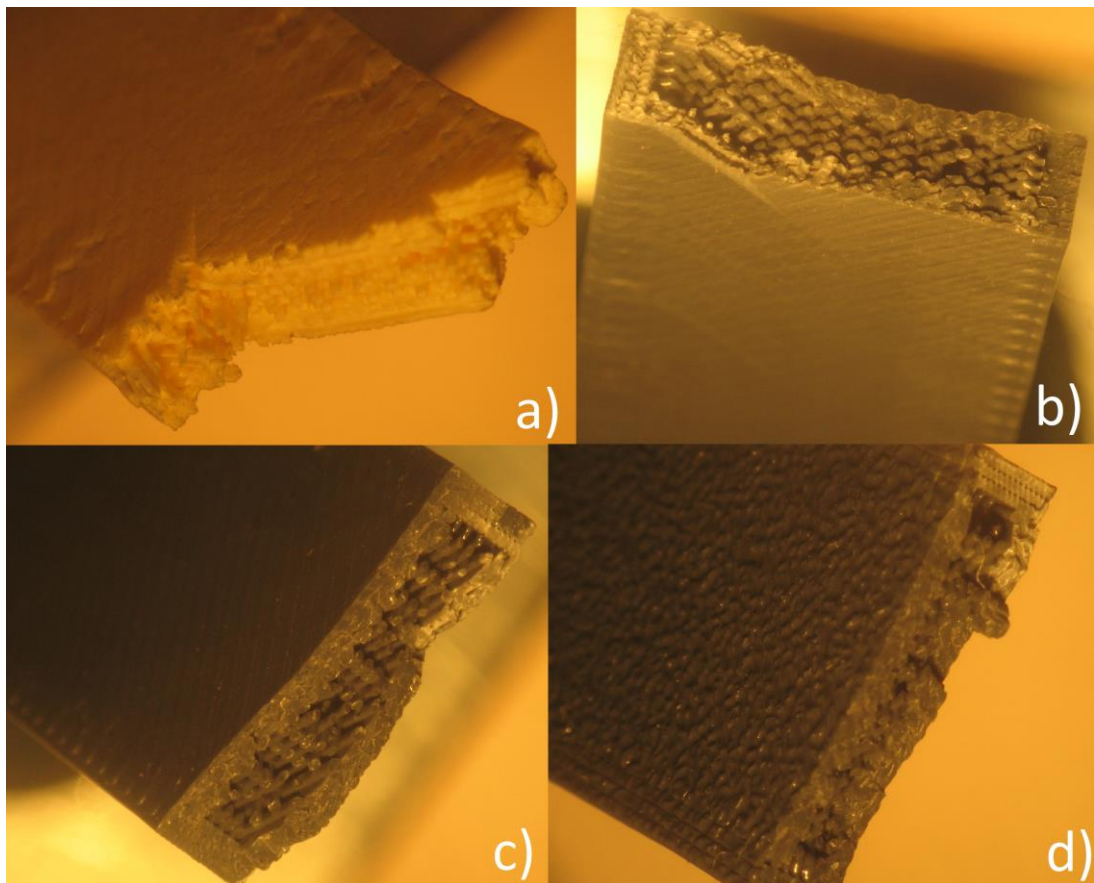


Fig. 36- a) Superfície de rotura de provete de PLA virgem; b) Superfície de rotura de provete de PLA reciclado impresso a 220°C; c) Superfície de rotura de provete de PLA reciclado impresso a 237°C; d) Superfície de rotura de provete de PLA reciclado impresso a 255°C

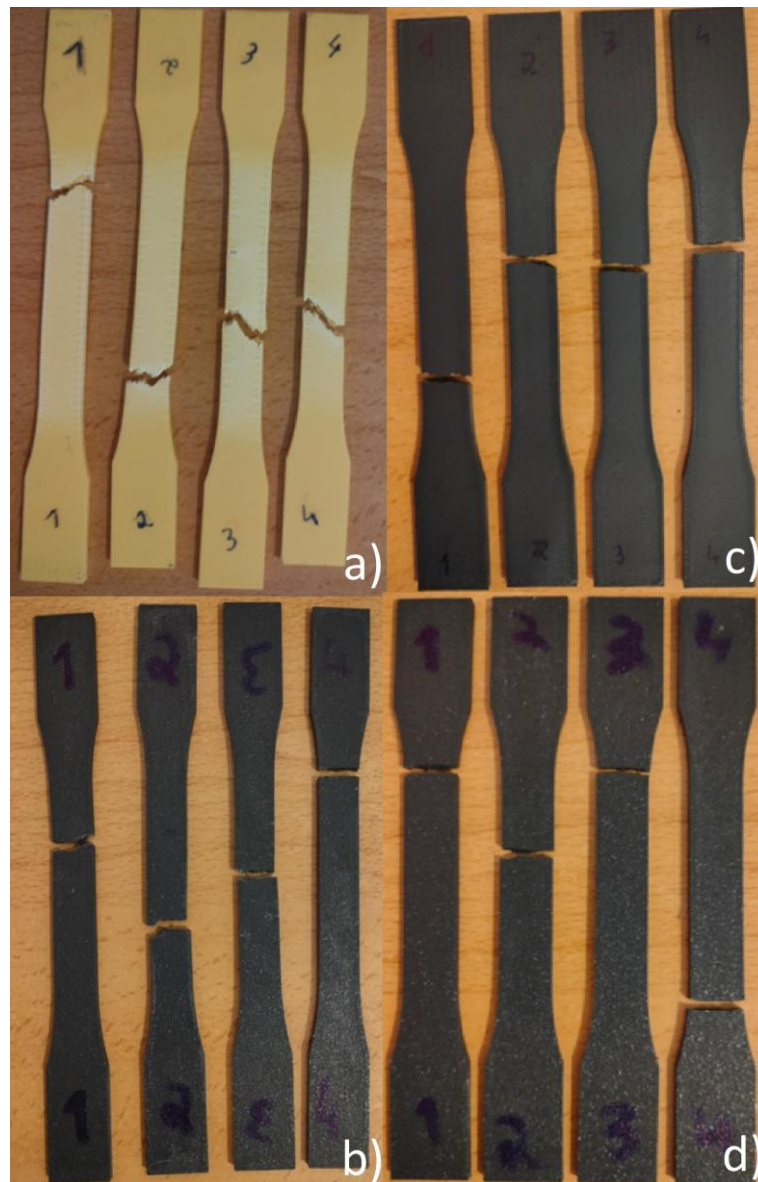


Fig. 37- a) Provetes de PLA novo após ensaio; b) Provetes de PLA reciclado impresso a 220°C, após ensaio; c) Provetes de PLA reciclado impresso a 237°C, após ensaio; d) Provetes de PLA reciclado impresso a 255°C, após ensaio

Através da análise das Fig. 36 e Fig. 37 pode-se identificar que os provetes de PLA virgem apresentaram um comportamento bastante mais dúctil na rotura do que os de material reciclado. Esta conclusão é retirada devido ao facto de o local da rotura ser mais irregular nos provetes de PLA novo, esta característica é típica de uma rotura dúctil. Por seu lado os provetes de PLA reciclado apresentam uma superfície de rotura mais homogénea, indicativo de rotura predominantemente frágil. Verifica-se ainda que a temperatura de impressão exerceu uma influência muito pequena no tipo de rotura verificada para os provetes de material reciclado uma vez que apenas dois provetes impresso a 220°C (provetes números 1 e 2) apresentam uma superfície de rotura com ligeira irregularidade, um dos provetes impresso a 237°C também apresenta esta característica (proвете número 1) e nenhum dos que foi impresso a 255°C tem o mesmo comportamento.

4.4. Análise dos resultados do ensaio de flexão

O ensaio de flexão realizado a 16 provetes produzidos com temperaturas de extrusão diferentes permitiu a recolha de dados relativos à força aplicada sobre os provetes e à deslocação registada pela movimentação do ponteiro de aplicação da força. Após o tratamento de dados para obtenção do gráfico tensão/ deformação registaram-se alguns valores importantes como serão mostrados abaixo.

4.4.1. Material novo

No gráfico da Fig. 38 pode-se observar que o comportamento dos provetes produzidos em material novo é bastante semelhante quer em termos de tensão máxima suportada como de deformação na rotura. A tensão máxima média obtida pelos 4 provetes foi de 43,25 MPa, com um desvio padrão de 0,97 MPa. Relativamente ao módulo de elasticidade médio, calculou-se que seria da ordem dos 3,67 GPa, com desvio padrão de 88,21 MPa.

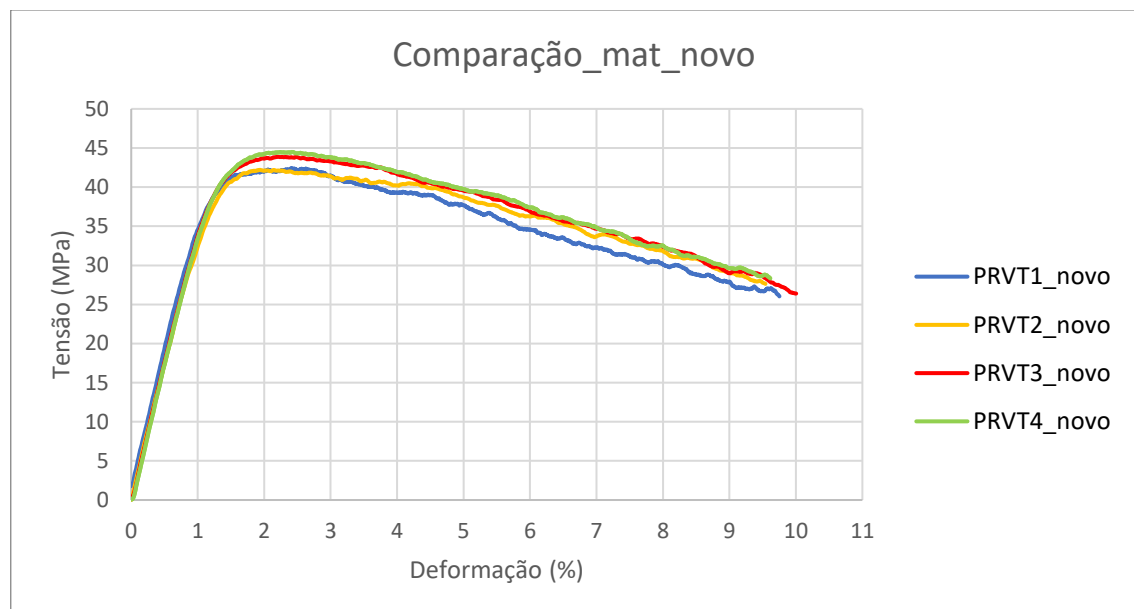


Fig. 38- Gráfico de tensão/ deformação resumo dos provetes produzidos com material novo

Tabela 26- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de flexão do PLA virgem

		Dev. Pad.	CoV (%)
E (MPa)	3669,65	88,21	2,40
Tensão de cedência (MPa)	20,16	10,19	50,53
Tensão máxima (MPa)	43,25	0,97	2,25

A tensão de cedência média calculada foi de 20,16 MPa, no entanto este valor apresenta um erro muito elevado de 50,53%. Este erro elevado deve-se ao facto de dois dos provetes terem apresentado uma tensão de cedência de 11 MPa e 15 MPa e um terceiro na ordem de 34 MPa. Desta forma o valor da tensão de cedência para o PLA novo aqui obtido não será o mais correto

para comparações. Aponta-se ainda que nenhum destes provetes sofreu rotura durante o ensaio.

4.4.2. Material reciclado impresso a 220°C

Para o PLA reciclado extrudido a 220°C ocorreram as primeiras roturas de provetes no ensaio de flexão. Como se verifica através da observação da Fig. 39, existiu uma menor variação no comportamento à flexão dos provetes de PLA reciclado processado a 220°C do que se viu para o PLA novo, o que está contrária as expectativas e os resultados referido na literatura da área. A tensão máxima e módulo de elasticidade apresentam valores satisfatórios e um COV bastante baixo, indicativo de que tanto o processamento dos provetes como o seu ensaio decorreram sem quaisquer problemas. A tensão de cedência, apesar de ter um coeficiente de variação de 13.44%, ficou dentro do esperado.

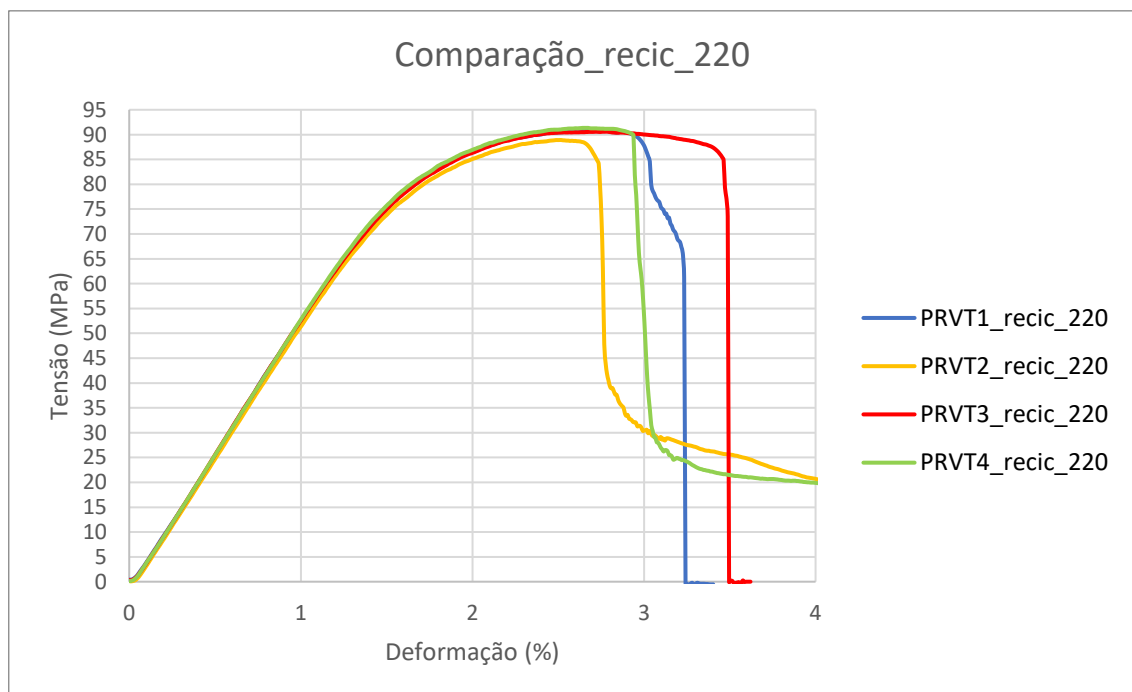


Fig. 39- Gráfico de tensão/ deformação resumo dos provetes produzidos com material reciclado, extrudido a 220°C.

Tabela 27- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de flexão do PLA reciclado impresso a 220°C.

		Desv. pad.	CoV (%)
E (MPa)	5255,50	14,20	0,27
Tensão de cedência (MPa)	63,29	8,51	13,44
Tensão máxima (MPa)	90,40	0,90	1,00

4.4.3. Material reciclado impresso a 237°C

Os provetes de material reciclado impressos a 237°C sofreram todos rotura durante o ensaio de flexão. A tensão máxima e o módulo de elasticidade apresentaram valores médios com uma pequena variabilidade e dentro do esperado. A tensão de cedência obtida, apesar de ter um erro cerca de seis vezes superior, também se mostrou satisfatória por comparação com valores de referência [50].

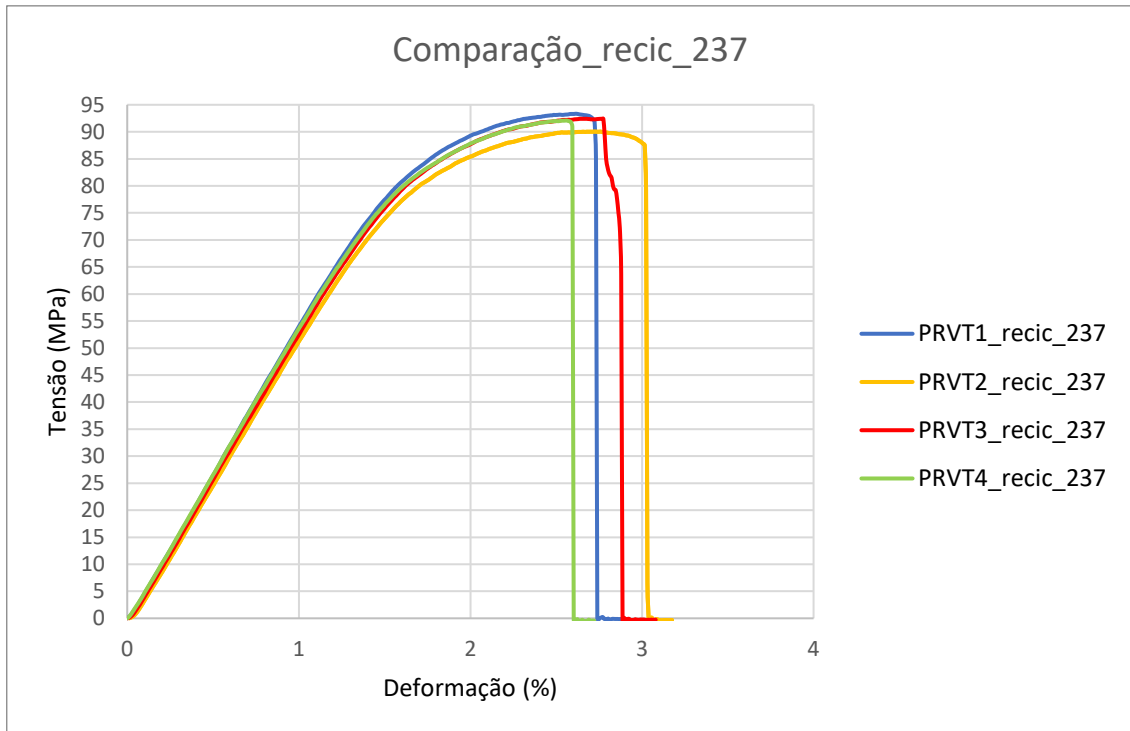


Fig. 40- Gráfico de tensão/ deformação resumo dos provetes produzidos com material reciclado, extrudido a 237°C.

Tabela 28- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de flexão do PLA reciclado impresso a 237°C.

		Desv. Pad.	CoV (%)
E médio (MPa)	5262,20	86,08	1,64
Tensão de cedência média (MPa)	74,66	5,13	6,88
Tensão máxima média	91,96	1,21	1,31

4.4.4. Material reciclado impresso a 255°C

Fazendo a leitura do gráfico da Fig. 41 e da Tabela 29 observa-se, mais uma vez, um comportamento estável da tensão máxima registada e do módulo de elasticidade calculado.

A tensão de cedência média também apresenta valores bastante estáveis.

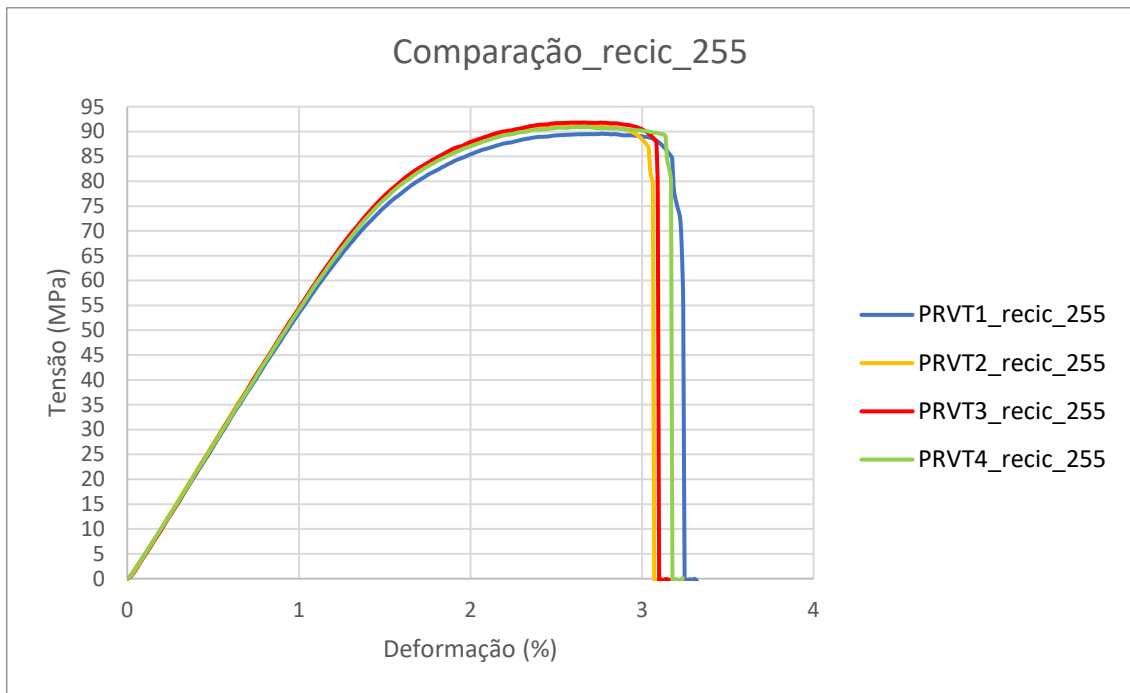


Fig. 41- Gráfico de tensão/ deforma o resumo dos provetes produzidos com material reciclado, extrudido a 255 C.

Tabela 29- Propriedades mecânicas calculadas a partir do ensaio de flexão do PLA reciclado impresso a 255 C.

		Desv. Pad.	CoV (%)
E (MPa)	5436,05	56,76	1,04
Tensão de cedência (MPa)	63,90	2,20	3,44
Tensão máxima (MPa)	90,89	0,82	0,91

4.4.5. Compara o de todos os ensaios de flexão

De seguida   apresentado um conjunto de gráficos de tabelas que, tal como foi feito para o ensaio de traço, pretende possibilitar uma compara o mais expedita da influência do tipo de material, novo ou reciclado, e da temperatura de impressão nas propriedades mecânicas em estudo.

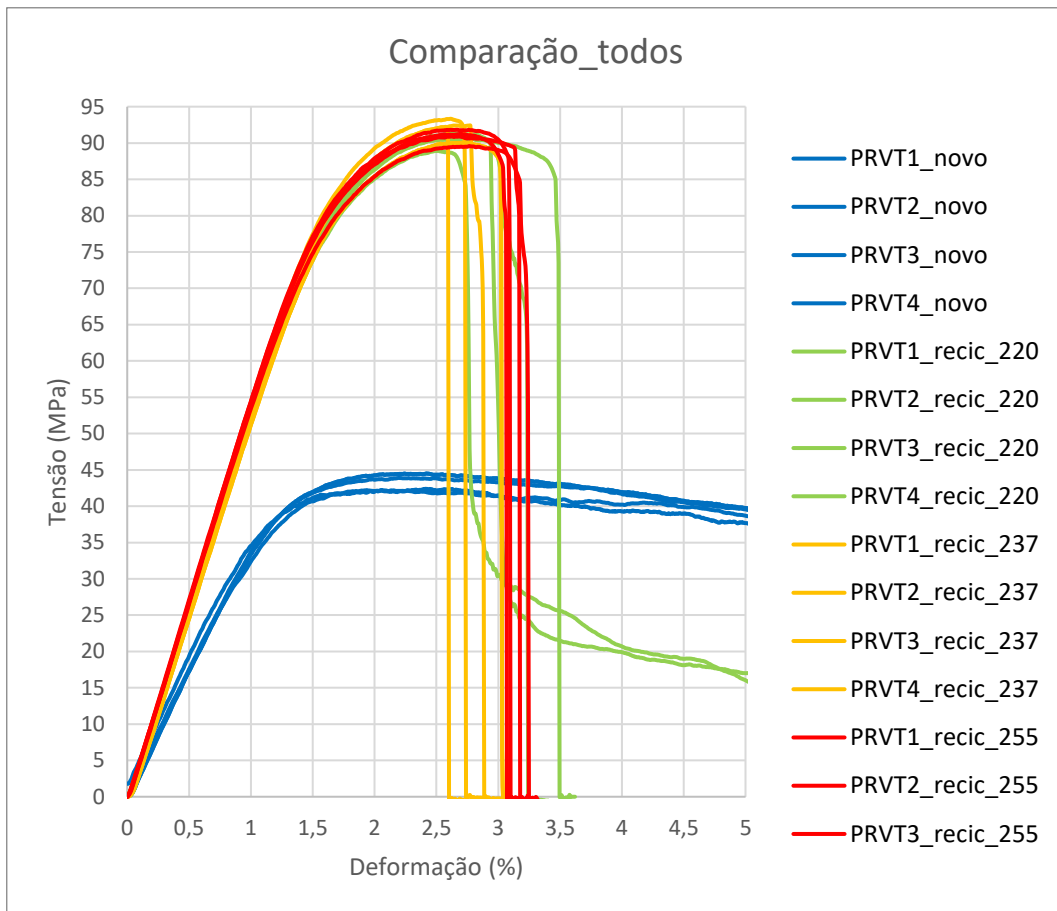


Fig. 42- Gráfico de tensão/ deformação de comparação entre todos os provetes

O gráfico da Fig. 42 pretende evidenciar as diferenças no comportamento dos vários provetes ensaiados. De seguida são apresentados um conjunto de gráficos e tabelas de valores que sintetizam os resultados obtidos de todos os ensaios de forma que seja fácil a sua comparação e a retirada de conclusões.

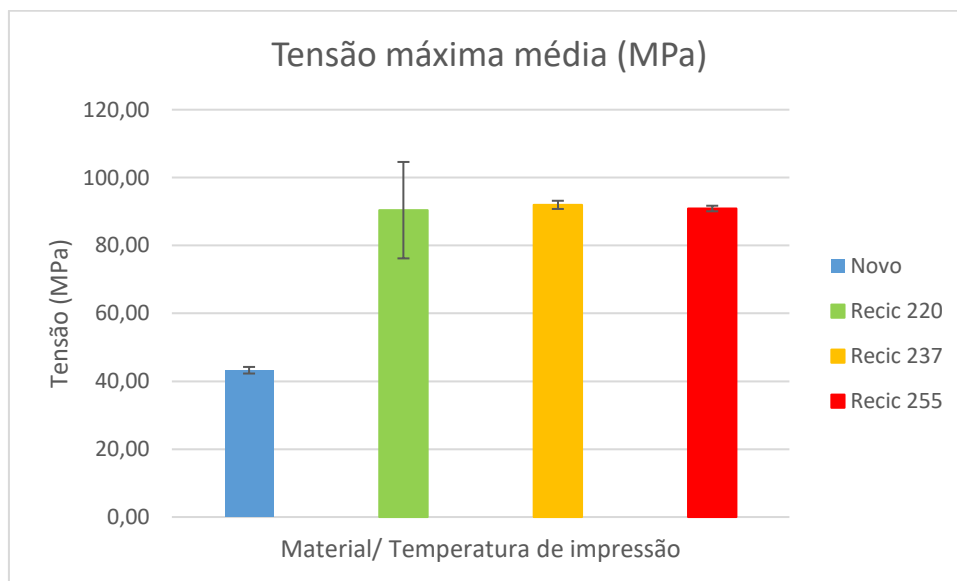


Fig. 43- Gráfico de comparação de valores médios de tensão máxima à flexão por tipo de material.

Resultados e Discussão

Tabela 30- Tabela de comparação valores médios de tensão máxima atingida à flexão.

Material	Tensão máxima média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CoV (%)
Fabricante (novo)	-	-	-
Novo	43,25	0,97	2,25
Recic 220	90,40	14,20	0,27
Recic 237	91,96	1,21	1,31
Recic 255	90,89	0,82	0,91

Realizando agora uma análise entre os diferentes provetes, no que diz respeito à tensão máxima atingida, retiram-se duas conclusões:

- O PLA novo atinge tensões máximas muito inferiores, aliás, nem sequer chegando a metade do valor registado para o PLA reciclado;
- A variação de temperatura de processamento não provoca uma alteração significativa na tensão máxima suportada pelo PLA reciclado.

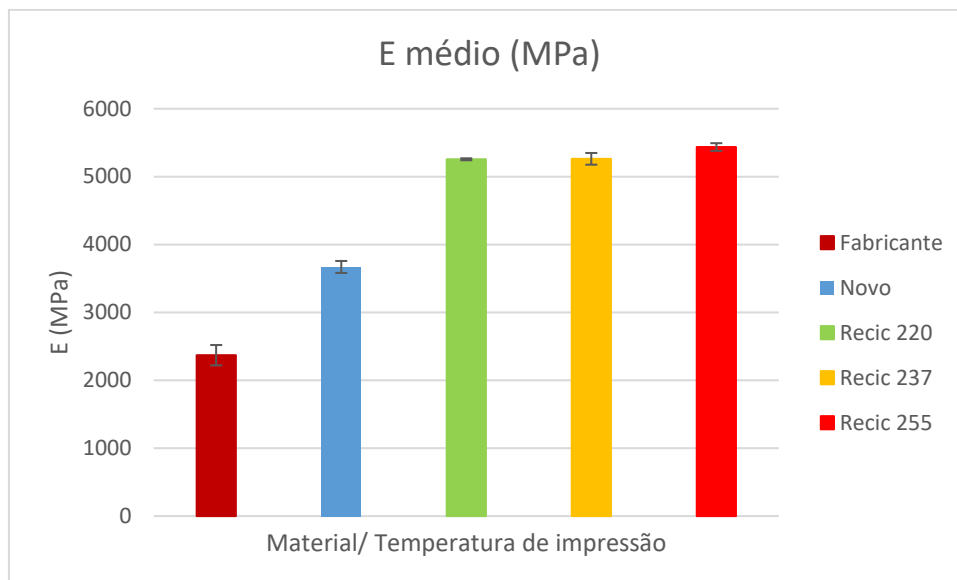


Fig. 44- Gráfico de comparação de valores médios de módulo de elasticidade à flexão por tipo de material.

Tabela 31- Tabela de comparação valores médios de módulo de elasticidade à flexão.

Material	E médio (MPa)	Desvio Padrão MPa)	CoV (%)
Fabricante (novo)	2370	150	6,33
Novo	3669,65	88,21	2,40
Recic 220	5255,50	14,20	0,27
Recic 237	5262,20	86,08	1,64
Recic 255	5436,05	56,76	1,04

O gráfico da Fig. 44 e a Tabela 31 permitem concluir que:

- O módulo de elasticidade à flexão do PLA novo é cerca de 30% inferior ao calculado para o material reciclado, um resultado expectável e que vai de encontro ao que outros trabalhos concluíram;
- O aumento da temperatura de processamento demonstra um pequeno impacto positivo no aumento do módulo de elasticidade à flexão do PLA reciclado;
- Existe uma menor variação de resultados no material reciclado do que no PLA virgem.

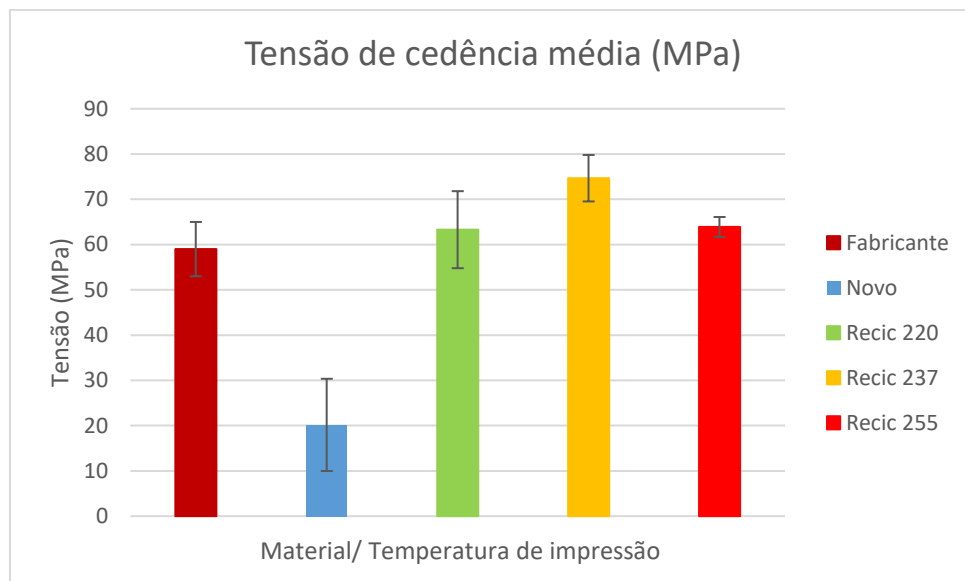


Fig. 45- Gráfico de comparação de valores médios de tensão de cedência à flexão por tipo de material.

Tabela 32- Tabela de comparação de valores médios de tensão de cedência à flexão.

Material	Tensão de cedência média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CoV (%)
Fabricante (novo)	59	6	10,17
Novo	20,16	10,19	50,53
Recic 220	63,29	8,51	13,44
Recic 237	74,66	5,13	6,88
Recic 255	63,90	2,20	3,44

Com base nos dados presentes na Fig. 45 e na Tabela 32 para a tensão de cedência dos provetes analisados, podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- Ocorreu algum tipo de erro durante a produção dos provetes de PLA novo ou durante o seu ensaio, uma vez que o COV é de 50,53%, pelo que o resultado aqui apresentado para a sua tensão de cedência não se considera válido. Desta forma apenas poderá ser realizada uma comparação com a tensão de cedência do material em bruto, fornecida pelo produtor de filamento;
- A tensão de cedência é, de acordo com o esperado, superior para o material reciclado;

Resultados e Discussão

- A distribuição dos valores de tensão de cedência em função da temperatura de processamento apresenta uma tendência que indica a existência de uma temperatura de ideal de processamento para obtenção de uma tensão de cedência máxima para PLA reciclado, em torno do 237°C.

Por fim apresenta-se um conjunto de fotografias dos provetes após ensaio de flexão na Fig. 46 e na Fig. 47 que pretende ajudar a perceber qual o tipo de rotura sofrida pelos provetes.

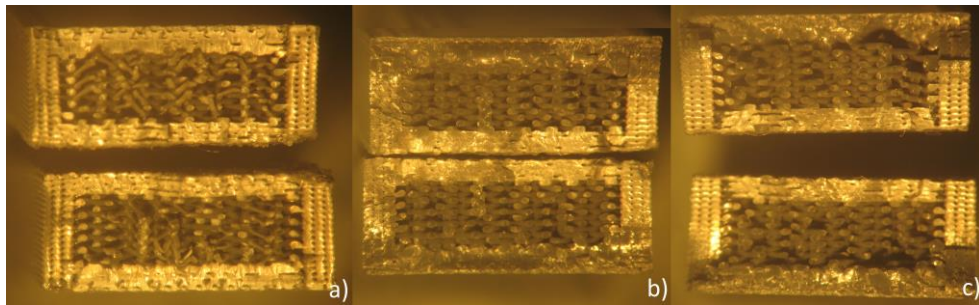


Fig. 46- a) PLA reciclado 220°C; b) PLA reciclado 237°C; c) PLA reciclado 255°C

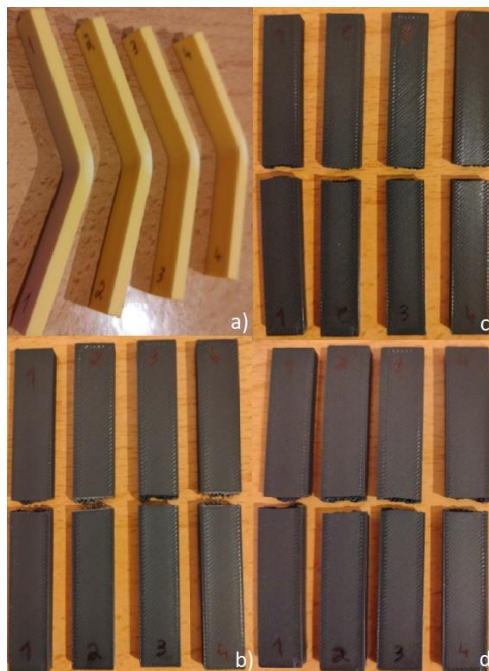


Fig. 47- a) Provetes de PLA virgem após ensaio; b) Provetes de PLA reciclado impresso a 220°C, após ensaio; c) Provetes de PLA reciclado impresso a 237°C, após ensaio; d) Provetes de PLA reciclado impresso a 255°C, após ensaio

Através da análise das Fig. 46 e Fig. 47 verifica-se que o tipo de rotura apresentado pelos provetes de material reciclado foi predominantemente frágil, devido à superfície relativamente regular apresentada por todos os provetes. Desta forma, pode-se também concluir que a temperatura de impressão não demonstra ter influência significativa no tipo de rotura apresentado pelos provetes. Por último resta referir que o facto de os provetes de PLA novo não terem sofrido rotura mostra que têm uma grande ductilidade, pelo que a ocorrer, a sua rotura, seria predominantemente dúctil.

4.5. Análise dos resultados do ensaio Charpy

Antes de mais é importante referir que todos os provetes ensaiados sofreram rotura e que não foi registada nenhuma anomalia ou fator externo imprevisto que possa ter influenciado os resultados obtidos durante todo o ensaio.

O ensaio Charpy foi realizado a 40 provetes produzidos mantendo todos os parâmetros dos ensaios anteriores. A única variável diferente estudada no ensaio Charpy em comparação com os provetes dos outros ensaios é o facto de metade dos provetes ter sido ensaiado à temperatura ambiente e os restantes a temperatura negativa. Para clarificar: produziram-se 10 provetes de PLA virgem com os mesmos parâmetros de impressão utilizados nos ensaios anteriores, 5 dos quais foram ensaiados à temperatura ambiente e outros 5 a temperatura negativa. O mesmo sucedeu com cada um dos 3 conjuntos de 10 provetes de material reciclado restantes, impressos com as diferentes temperaturas de extrusão em estudo. Após o tratamento de dados para conversão dos valores lidos na escala do equipamento de ensaio e a sua organização obtiveram-se os gráficos apresentados abaixo.

4.5.1. Material novo

A Fig. 48 e Tabela 33 apresentam os dados recolhidos a partir do ensaio dos provetes de PLA novo. Chama-se a atenção para a existência de apenas 3 provetes representados no ensaio à temperatura ambiente pelo facto de o primeiro ter sido testado com um *impactor* de 2lb, que demonstrou possuir demasiada energia para uma recolha correta de dados, assim como sucedeu para o segundo provete testado com um *impactor* de 0,5lb que apresentou o mesmo problema. Os restantes provetes foram ensaiados com uma massa de 0,125 lb e todos apresentaram rotura. Da Fig. 48 retira-se que a capacidade de absorção de energia do PLA novo é mais de duas vezes superior à temperatura ambiente do que a -30,9°C.

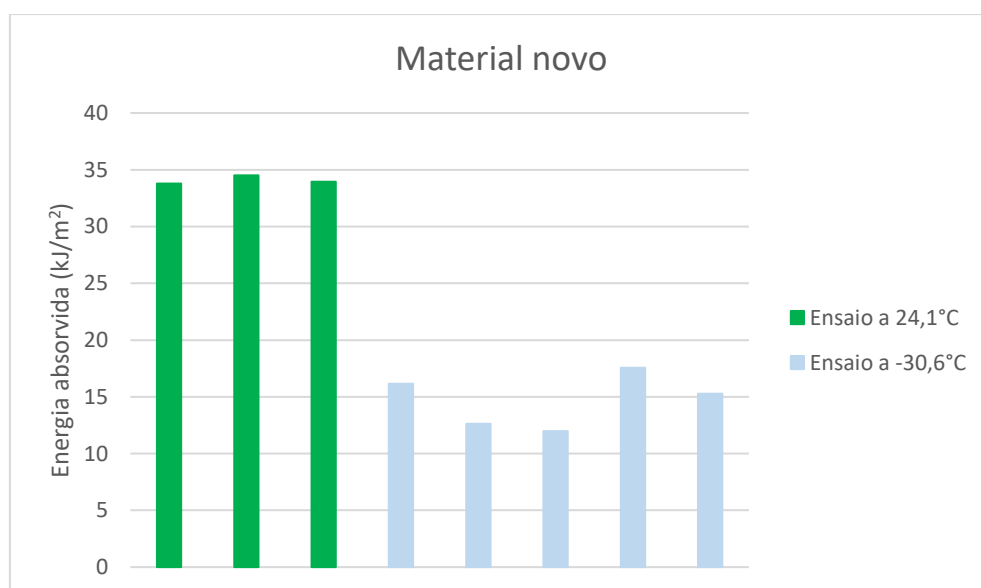


Fig. 48- Gráfico de energia absorvida pelos provetes de PLA virgem.

Tabela 33- Valores médios registados no ensaio Charpy ao PLA virgem.

Temperatura (°C)	Energia absorvida média (kJ/m ²)	Desvio Padrão (kJ/m ²)	CoV (%)
24,1	34,08	0,31	0,91
-30,6	14,72	2,11	14,36

Através do gráfico da Fig. 48 e dos valores apresentados na Tabela 33 observa-se a diferença na capacidade de absorção de energia provocada pela variação da temperatura. A uma temperatura de 24,1°C os provetes de PLA virgem foram capazes de absorver, em média, uma energia de 34,08± 0,31 kJ/m². Por seu lado, quando provetes do mesmo material, fabricados com os mesmos parâmetros, foram ensaiados a uma temperatura média de -30,6°C, a energia que estes foram capazes de absorver ficou-se por 14,72± 2,11 kJ/m². Trata-se de uma diferença média de capacidade de absorção de energia próxima de 43%. Verifica-se ainda que os provetes ensaiados a temperatura negativa apresentaram resultados com um desvio padrão de 14,36%, bastante superior aos provetes ensaiados à temperatura ambiente, com 0,91%.

4.5.2. Material reciclado impresso a 220°C

Na Fig. 49 e Tabela 34 apresentam-se os dados recolhidos do ensaio de provetes de PLA reciclado impressos a 220°C. O impactor utilizado no ensaio possui a massa de 0,125lb e todos os provetes sofreram rotura. Da Fig. 49 retira-se que a capacidade de absorção de energia à temperatura de 24,1°C é superior a -30,9°C.

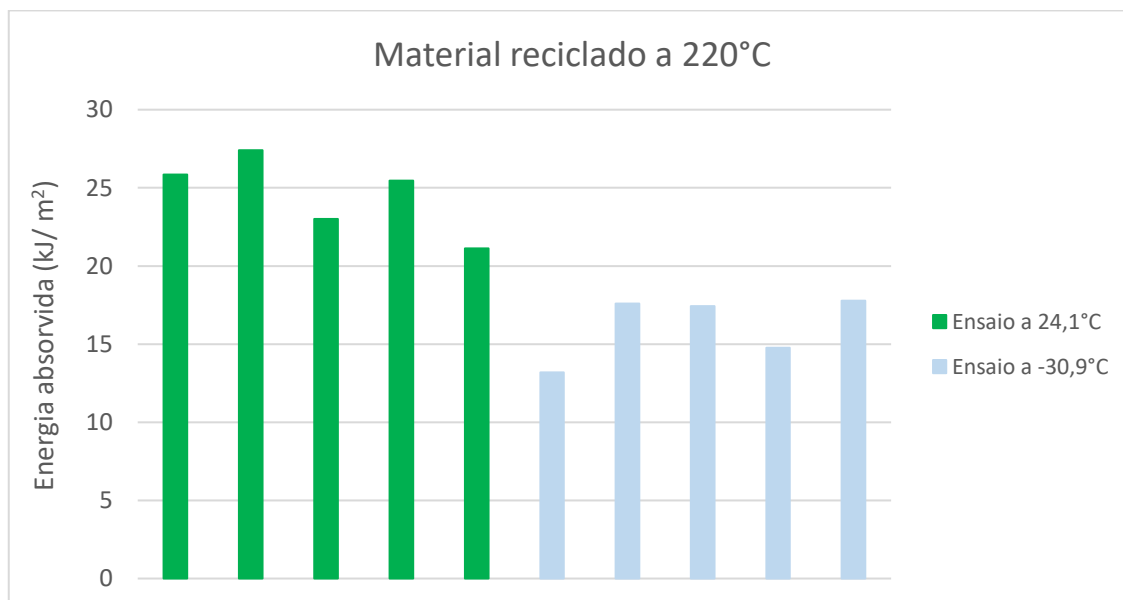


Fig. 49- Gráfico de energia absorvida pelos provetes de PLA reciclado impresso a 220 °C.

Tabela 34- Valores médios registados no ensaio Charpy ao PLA reciclado impresso a 220 °C.

Temperatura (°C)	Energia absorvida média (kJ/m ²)	Desvio Padrão (kJ/m ²)	CoV (%)
24,10	24,57	2,23	9,06
-30,90	16,15	1,85	11,45

É notória a aproximação de valores de capacidade de absorção de energia que existe por comparação com o que se registou para o material novo. A diferença entre a energia média absorvida à temperatura ambiente e a energia absorvida a $-30,9^{\circ}\text{C}$ foi de 34,3%. O desvio padrão das medições efetuadas ficou na ordem de 9% para o material ensaiado a $24,1^{\circ}\text{C}$ e 11,45% para os provetes ensaiados a temperaturas negativas, o que mantém a tendência do PLA novo de apresentar maior variação de resultado para temperaturas negativas.

4.5.3. Material reciclado impresso a 237°C

A Fig. 50 e Tabela 35 apresentam os dados recolhidos no ensaio dos provetes de PLA reciclado impressos a 237°C . Todos os provetes foram ensaiados com um *impactor* de 0,125lb e todos eles sofreram rotura. Numa primeira análise do gráfico verifica-se a maior capacidade de absorção de energia do material à temperatura ambiente do que a $-30,9^{\circ}\text{C}$.

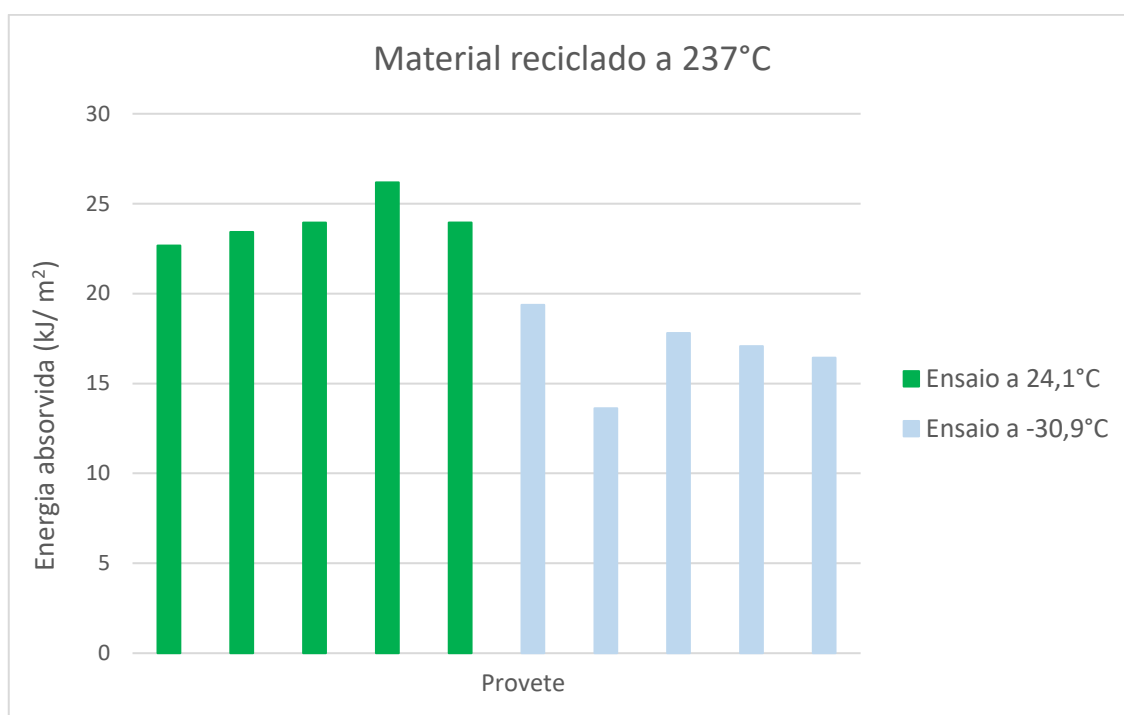


Fig. 50- Gráfico de energia absorvida pelos provetes de PLA reciclado impresso a 237°C .

Tabela 35- Valores médios registados no ensaio Charpy ao PLA reciclado impresso a 237°C .

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Energia absorvida média (kJ/m^2)	Desvio Padrão (kJ/m^2)	CoV (%)
24,1	24,04	1,17	4,87
-30,6	16,86	1,89	11,23

Através da análise da Fig. 50 e Tabela 35 verifica-se um intensificar do que ocorreu para os provetes impressos a 220°C em relação à diferença de capacidade de absorção de energia dos provetes testados à temperatura ambiente e dos testados a $-30,9^{\circ}\text{C}$ que desce para 29,9%.

O erro percentual calculado também apresentou uma evolução positiva face aos provetes impressos a 220°C , uma vez que tanto os provetes ensaiados à temperatura ambiente como os

que foram testados a $-30,9^{\circ}\text{C}$ apresentaram uma diminuição do desvio padrão como se pode consultar na Tabela 35.

4.5.4. Material reciclado impresso a 255°C

Os dados referentes ao ensaio dos provetes de material reciclado impresso a 255°C podem ser consultados na Fig. 51 e Tabela 36. Assim como todos os anteriores, estes provetes foram ensaiados com um *impactor* de 0,125 lb e todos sofreram rotura. Numa análise superficial ao gráfico da Fig. 51, verifica-se que a diferença na capacidade de absorção de energia à temperatura ambiente face a $-30,9^{\circ}\text{C}$ é mínima.

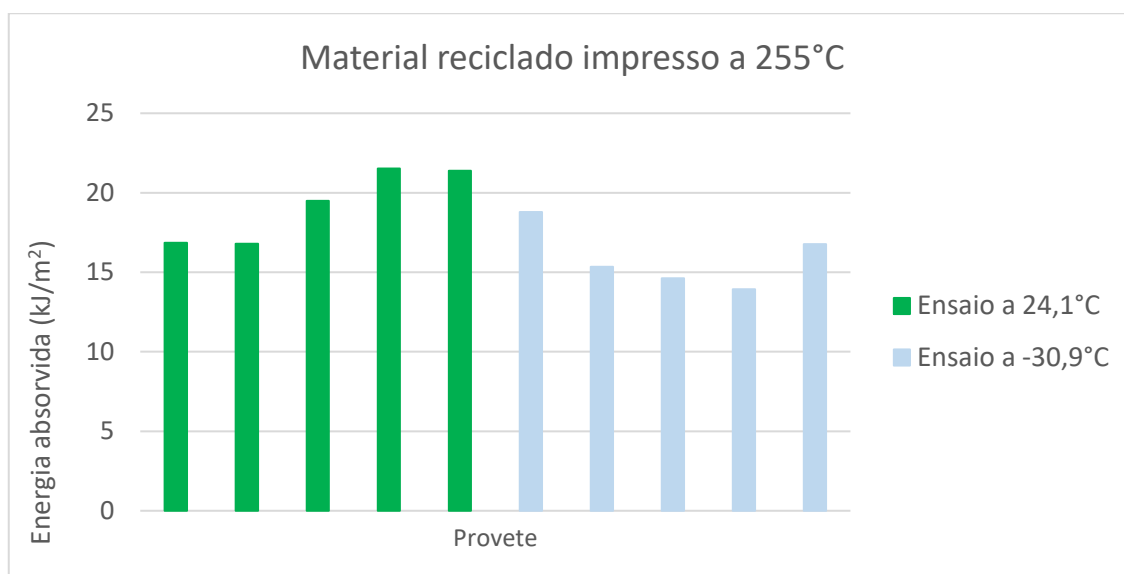


Fig. 51- Gráfico de energia absorvida pelos provetes de PLA reciclado impresso a 255°C .

Tabela 36- Valores médios registados no ensaio Charpy ao PLA reciclado impresso a 255°C .

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Energia absorvida média (kJ/m ²)	Desvio Padrão (kJ/m ²)	CoV (%)
24,1	19,21	2,08	10,80
-30,6	15,89	1,73	10,87

Os provetes de material reciclado impresso a 255°C apresentaram uma diminuição significativa de capacidade de absorção de energia face a praticamente todos os outros ensaiados anteriormente, tanto para a temperatura ambiente como para $-30,9^{\circ}\text{C}$. Na Tabela 36 podem ser consultados estes valores médios de energia absorvida.

Quanto ao desvio padrão dos valores registados para os vários provetes também se observou uma evolução negativa face aos provetes impressos a temperaturas diferentes. Este facto poderá indicar a existência de um fator associado à temperatura de impressão que leva a que exista uma maior variabilidade das propriedades de absorção de energia do material, quando uma certa gama de temperaturas é ultrapassada.

4.5.5. Comparação de todos os ensaios Charpy

As Fig. 52 a Fig. 54 e Tabela 37 a Tabela 39 apresentam um resumo da energia absorvida pelos vários provetes em função do seu material, temperatura de ensaio e da temperatura de extrusão, de forma a permitir que se tornem mais evidentes as influências de cada um destes parâmetros.

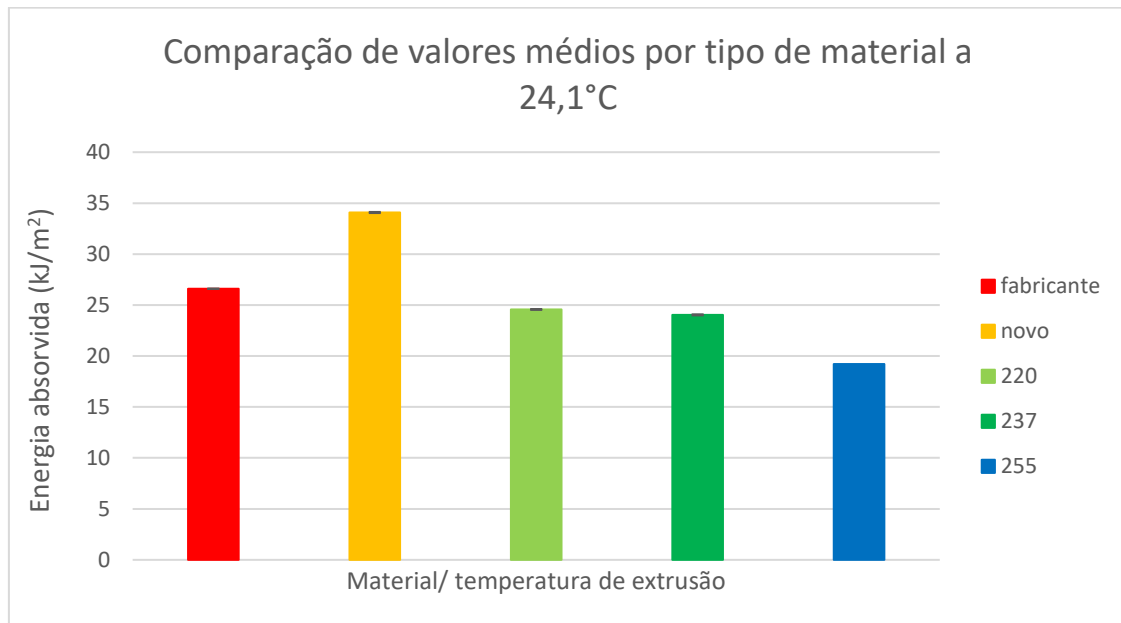


Fig. 52- Gráfico de comparação de valores médios por tipo de material a 24,1°C.

Tabela 37- Tabela de comparação valores médios para os vários ensaios Charpy realizados a 24.1°C.

Tipo de material	Proвете	Energia absorvida média (kJ/m²)	Desvio padrão (kJ/m²)	CoV (%)
Fabricante (novo)	-	26,6	2,8	10,53
Novo	Novo	34,08	0,31	0,91
220	Reciclado impresso a 220°C	24,57	2,23	9,06
237	Reciclado impresso a 237°C	24,04	1,17	4,87
255	Reciclado impresso a 255	19,21	2,08	10,80

Na Fig. 52 apresenta-se a comparação de resultados médios para os vários provetes ensaiados à temperatura ambiente. Daqui podem ser retiradas duas conclusões importantes:

- Como era esperado, existe uma maior capacidade de absorção de energia bastante evidente do PLA virgem em comparação com PLA reciclado;
- Existe uma temperatura ideal de processamento para o PLA reciclado, uma vez que a capacidade de absorção de energia é muito semelhante entre os provetes impressos a 220°C e 237°C, mas desce claramente para 255°C.

Resultados e Discussão

Pode-se ainda apontar que parece existir uma relação entre o desvio padrão do valor médio de absorção de energia e a temperatura de processamento, potencialmente conectado com a existência da já referida temperatura ideal de processamento, dado que, a 220°C e a 255°C se verifica um aumento da variabilidade desta propriedade e que a 237°C é bastante mais reduzida ($\pm 1,17 \text{ kJ/m}^2$).

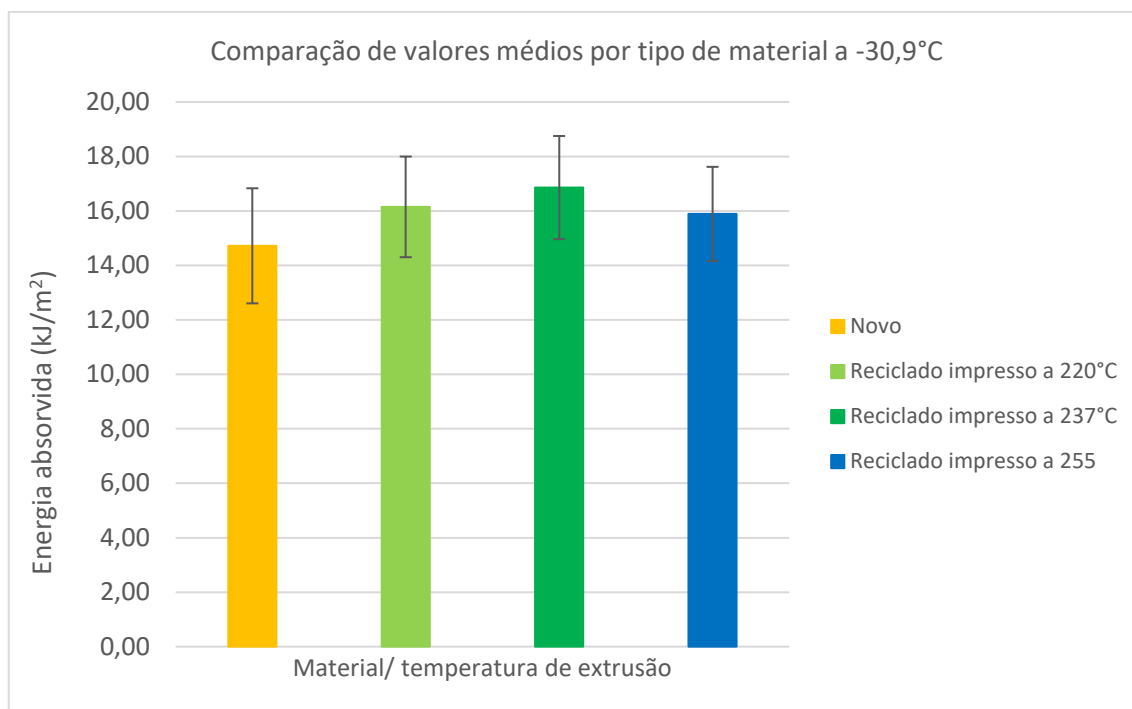


Fig. 53- Gráfico de comparação de valores médios por tipo de material a -30,9°C.

Tabela 38- Tabela de comparação valores médios para os vários ensaios Charpy realizados a -30,9°C.

Tipo de material	Provete	Energia absorvida média (kJ/m ²)	Desvio padrão (kJ/m ²)	CoV (%)
novo	Novo	14,72	2,11	14,36
220	Reciclado impresso a 220°C	16,15	1,85	11,45
237	Reciclado impresso a 237°C	16,86	1,89	11,23
255	Reciclado impresso a 255	15,89	1,73	10,87

Através do gráfico apresentado na Fig. 53 e dos dados apresentados na Tabela 38 podem ser retiradas duas conclusões importantes relativas à capacidade de absorção de energia do PLA a uma temperatura de -30,9°C:

- Em primeiro lugar assinala-se o melhor desempenho do material reciclado face ao material novo, para qualquer uma das três temperaturas de impressão estudadas;
- Em segundo lugar chama-se a atenção para a inflexão que existe nos valores de energia absorvida média, com máximo para o PLA reciclado, processado a 237°C. Este facto

aponta para a existência de uma temperatura ideal de processamento para obtenção de capacidade máxima de absorção de energia de PLA reciclado, entre temperaturas de processamento de 220°C e 255°C.

Assim como ocorreu para a análise feita aos provetes ensaiados à temperatura ambiente, assinala-se aqui que pode existir também para temperaturas negativas, uma relação entre a variação das propriedades de absorção de energia e a temperatura de processamento. Esta hipótese proposta deriva do facto do erro percentual calculado ter um mínimo para a temperatura de impressão de 237°C.

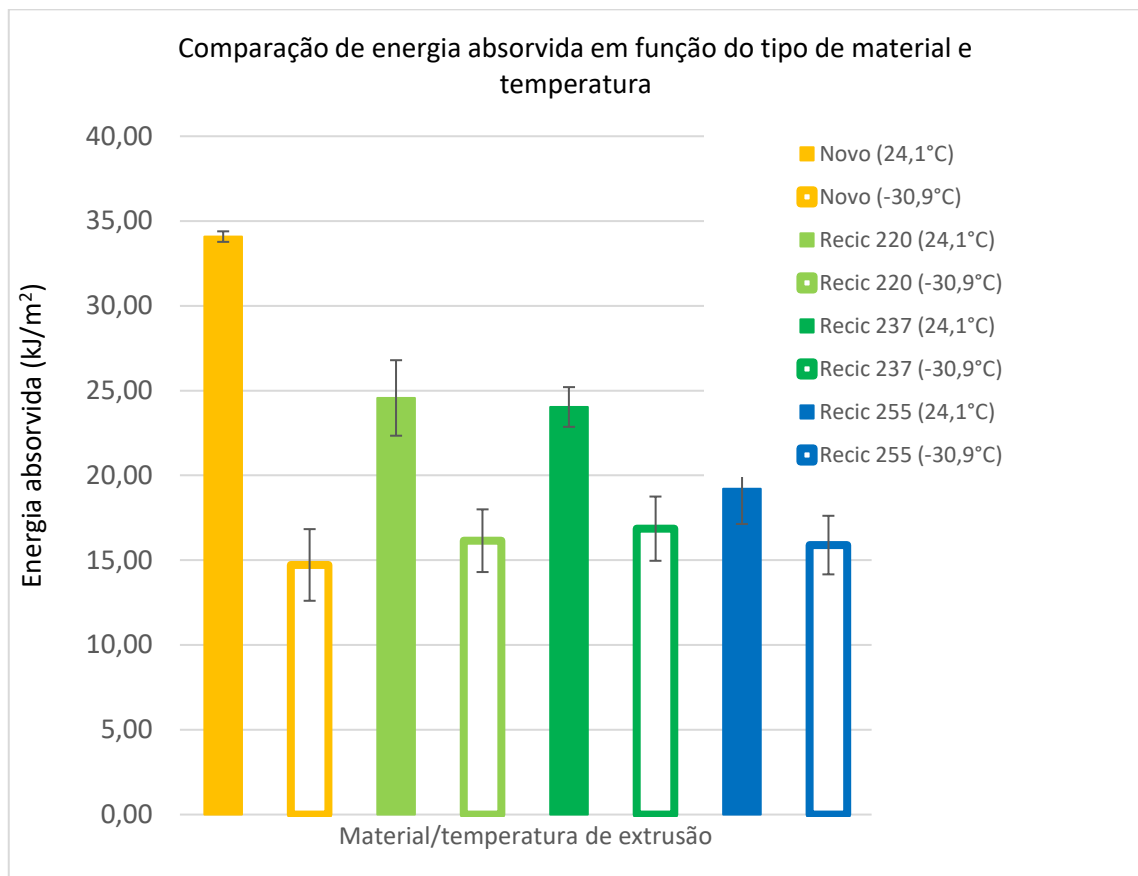


Fig. 54- Gráfico de comparação de valores médios global.

Tabela 39- Tabela de comparação valores médios globais.

Material	Energia absorvida (kJ/m ²)	Desvio padrão (kJ/m ²)	CoV (%)
Novo (24,1°C)	34,08	0,31	0,91
Novo (-30,9°C)	14,72	2,11	14,36
Recic 220 (24,1°C)	24,57	2,23	9,06
Recic 220 (-30,9°C)	16,15	1,85	11,45
Recic 237 (24,1°C)	24,04	1,17	4,87
Recic 237 (-30,9°C)	16,86	1,89	11,23
Recic 255 (24,1°C)	19,21	2,08	10,80
Recic 255 (-30,9°C)	15,89	1,73	10,87

Resultados e Discussão

Na Fig. 54 e Tabela 39 são apresentados todos os valores médios calculados para os vários provetes ensaiados e temperaturas de ensaio diferentes, de forma que seja feita uma comparação mais expedita dos resultados globais do ensaio Charpy.

Por fim apresenta-se um conjunto de imagens na Fig. 55 e Fig. 56, que pretendem mostrar o tipo de rotura sofrido pelos vários provetes ensaiados.

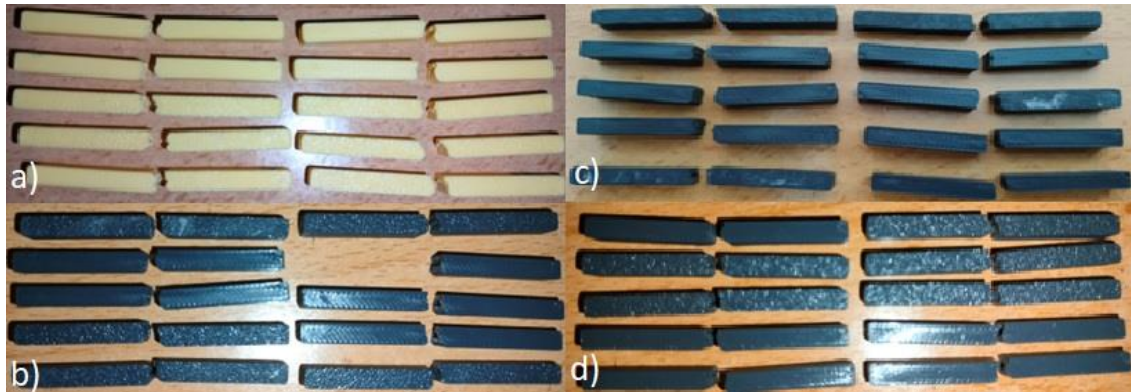


Fig. 55- a) Provetes de material novo após ensaio; b) provetes de PLA reciclado impresso a 220°C após ensaio; c) provetes de PLA reciclado impresso a 237°C após ensaio; d) provetes de PLA reciclado impresso a 255°C após ensaio.

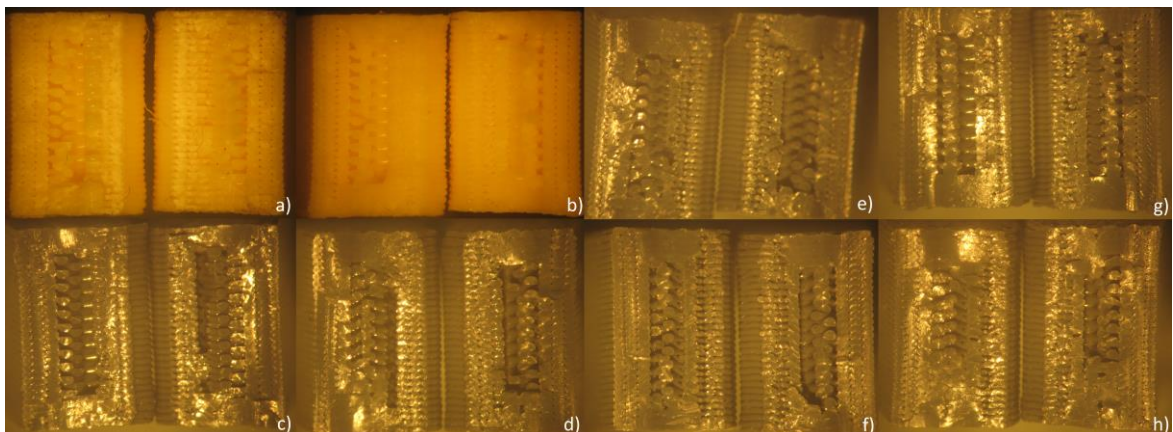


Fig. 56-a)PLA novo 24,1°C; b) PLA novo -30,9°C; c) PLA reciclado impresso a 220°C (24,1°C);d) PLA reciclado impresso a 220°C(-30,9°C);e) PLA reciclado impresso a 237°C (24,1°C); f) PLA reciclado impresso a 237°C(-30,9°C); g) PLA reciclado impresso a 255°C (24,1°C); h) PLA reciclado impresso a 255°C (-30,9°C)

Através da análise da Fig. 55 e Fig. 56 não é possível assinalar características que permitam afirmar com elevado grau de certeza qual o tipo de rotura sofrido pelos provetes. No entanto, verifica-se na Fig. 55 que os provetes de material novo apresentam uma superfície de rotura ligeiramente mais irregular do que os restantes, o que leva a concluir que o tipo de rotura no PLA novo é ligeiramente mais dúctil do que no PLA reciclado, que seguindo esta lógica, terá um comportamento mais frágil devido à superfície de fratura mais regular apresentada pela maioria dos provetes deste material, independentemente da temperatura de extrusão.

5. Conclusão

5.1. Conclusões finais

Com os resultados do estudo efetuado à viabilidade de reutilização de PLA em impressão 3D, especificamente FDM, foram possíveis retirar várias conclusões em relação a algumas variáveis.

Em primeiro lugar, concluiu-se que a reciclagem direta de desperdícios de PLA provenientes de purgas efetuadas pelo equipamento de impressão 3D, de estruturas de suporte para impressões 3D e de impressões falhadas que foram destruídas para reciclagem, necessitam de uma cuidada preparação antes da sua utilização para produção de filamento reciclado, isto é, devem ser armazenados num local seco, que não se encontre sob a ação direta da luz solar e embalados de forma que não sejam contaminados por exemplo com pó. Estes desperdícios devem ser cortados em partículas de pequenas dimensões para que a extrusão de filamento seja o mais homogénea possível. Antes de ser colocados no interior do equipamento de extrusão, os desperdícios deverão ainda ser sujeitos a um estágio a temperatura superior a 100°C, mas inferior à temperatura de fusão do PLA (cerca de 210°C), com o objetivo de remover o máximo de humidade possível do material, que é prejudicial durante a sua extrusão. Após este estágio, deve ser realizada a extrusão a temperatura apropriada. Este estudo identificou que a temperatura ideal de extrusão se encontra entre os 150°C e os 157°C, para o material utilizado. Contudo, como já foi explicado, o filamento produzido nestas condições não apresentava características que permitissem a sua utilização para a produção dos provetes. Assim, considera-se que pode ser necessário algum tipo de tratamento adicional, prévio à extrusão do material reaproveitado, para que se possa obter filamento reciclado de melhor qualidade. Considera-se também que pode ser necessária a utilização de aditivos que melhorem a coesão e diminuam a rigidez do filamento reciclado produzido com recurso a este material reaproveitado.

Em função dos resultados obtidos, que inviabilizaram a reciclagem própria de PLA, este material reciclado foi adquirido externamente e as propriedades comparadas com PLA novo. Seguiu-se a análise dos resultados decorrentes da comparação de PLA virgem e PLA reciclado, impresso a diferentes temperaturas, que permitiram obter as seguintes conclusões:

Ensaio de tração

- Quando submetido a ensaio de tração, o PLA novo apresentou um valor médio de módulo de elasticidade sempre inferior ao registado para os provetes de PLA reciclado.

Conclusão

A maior diferença ocorreu para o PLA reciclado impresso a 237°C, que obteve um valor médio de módulo de elasticidade à tração 31.05% superior ao PLA novo;

- Os valores de módulo de elasticidade à tração obtido pelo material reciclado ficaram cerca de 500 MPa abaixo do valor indicado pelo fabricante, contudo a comparação não é viável uma vez que foram produzidos sob diferentes condições;
- Existiu uma influência reduzida da temperatura de processamento na evolução do módulo de elasticidade à tração do material reciclado. Contudo, assinala-se a possibilidade da existência de uma temperatura ideal de processamento para obtenção de elasticidade máxima à tração, próxima dos 237°C;
- Chama-se ainda a atenção para o maior COV do módulo de elasticidade do material novo, 3.64%, face ao do material reciclado e impresso a 220 e 255°C, com COVs de 1,81% e 0,32%, respetivamente. Este dado contraria conclusões apresentadas por outros trabalhos;
- A tensão de cedência do material novo é inferior à observada para o material reciclado, dado que apresenta uma tensão de cedência média cerca de três vezes menor que a de qualquer um dos conjuntos de PLA reciclado;
- Assinala-se um bom COV nos valores de tensão de cedência para PLA reciclado e impresso a 220°C e uma tendência de redução dos valores médios da tensão de cedência desde 220 até 237°C, onde tem um mínimo, aumento até atingir o máximo para 255°C, com valor de 26.06 MPa.

Ensaio de flexão

- Quanto às propriedades à flexão, retira-se que o módulo de elasticidade para o material novo é bastante inferior ao do reciclado, na ordem de 32% para o valor médio mais elevado;
- Também se observa que o aumento da temperatura de impressão tem um ligeiro impacto positivo no aumento do módulo de elasticidade do material reciclado;
- A tensão de cedência à flexão do material novo não deverá ser considerada representativa devido ao elevado erro associado, acerca do qual já foram mencionadas possíveis causas;
- Os resultados da tensão de cedência média do material reciclado indicam a existência de uma temperatura de processamento ideal, pois é atingido um valor máximo para a temperatura de 237°C, de 74.66 MPa, enquanto os valores para 220 e 255°C são bastante semelhantes, cerca de 63 MPa.

Ensaio Charpy

- O ensaio Charpy à temperatura ambiente permitiu concluir que o PLA novo apresenta uma capacidade de absorção de energia cerca de 29% superior à do PLA reciclado;

- Para temperaturas negativas verificou-se um comportamento inverso na capacidade de absorção de energia do material novo face ao reciclado, embora a diferença não tenha sido tão significativa como à temperatura ambiente;
- Entre os provetes de PLA reciclado verificou-se uma diminuição não linear da capacidade de absorção de energia com o aumento da temperatura de impressão;
- Entre os provetes de material reciclado a capacidade de absorção de energia não apresentou uma grande variação com diferentes temperaturas de impressão;
- Verifica-se um menor COV para a capacidade de absorção de energia de provetes de material reciclado face aos de PLA novo para temperaturas negativas;
- Comparando a capacidade de absorção de energia à temperatura ambiente e a -30,9°C observaram-se, como esperado, menores valores para a temperatura negativa, cerca de metade para PLA novo, 65% do valor à temperatura ambiente para PLA reciclado e impresso a 220°C e 237°C e 82,7% para 255°C.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Tendo em conta as dificuldades enfrentadas durante a realização deste estudo e as conclusões retiradas considerou-se que seria importante o desenvolvimento de trabalhos futuros que contemplem os seguintes aspetos:

- Afinação do processo de produção de filamento através de PLA reaproveitado das fontes já referidas, por exemplo, com a introdução de um armazenamento em condições de menor humidade para os desperdícios recolhidos, utilização de uma *dry box* de modo a ter mais garantias que o material vai conter uma menor quantidade de água absorvida, realização de estágios mais longos no forno e trituração da matéria-prima em fragmentos de menor dimensão (cerca de 2 mm) antes ser introduzida na extrusora de filamento;
- Identificação de possíveis aditivos, preferencialmente recicláveis ou reutilizados, para adicionar ao filamento de PLA reciclado produzido;
- Variação de outros parâmetros de impressão como a altura de camada, velocidade de impressão, taxa de preenchimento, entre outros, e comparação de resultados entre PLA virgem e PLA reciclado de modo a criar um melhor “mapa” da variabilidade de propriedades mecânicas destes dois materiais com estes parâmetros;
- Estudo da energia que é poupada ao realizar a impressão a temperaturas de extrusão inferiores de forma a otimizar o rendimento quando se usa material reciclado;
- Repetição do ensaio de flexão para o PLA novo, de forma que possam ser obtidos resultados com um menor erro e possa ser feita uma comparação correta da sua tensão de cedência com a do PLA reciclado.

Conclusão

Referências

1. Kafle, A., E. Luis, R. Silwal, H.M. Pan, P.L. Shrestha, e A.K. Bastola, *3D/4D printing of polymers: fused deposition modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA)*. *Polymers*, 2021. **13**(18): p. 3101.
2. Ebewele, R.O., *Polymer science and technology*. 2000: CRC press.
3. Banavar, J.R., T.X. Hoang, e A. Maritan, *Proteins and polymers*. *The Journal of chemical physics*, 2005. **122**(23).
4. Zhou, S. e G. Huang, *Preparation, structure and activity of polysaccharide phosphate esters*. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2021. **144**: p. 112332.
5. Agrawal, A.A. e K. Konno, *Latex: a model for understanding mechanisms, ecology, and evolution of plant defense against herbivory*. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 2009. **40**: p. 311-331.
6. Emblem, A. e M. Hardwidge, *Adhesives for packaging*, in *Packaging Technology*. 2012, Elsevier. p. 381-394.
7. Nguyen, T. e M. Khine, *Advances in materials for soft stretchable conductors and their behavior under mechanical deformation*. *Polymers*, 2020. **12**(7): p. 1454.
8. Swetham, T., K.M.M. Reddy, A. Huggi, e M.N. Kumar, *A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM*. *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol*, 2017. **3**: p. 353-361.
9. Vert, M., J. Chen, K.-H. Hellwich, P. Hodge, T. Nakano, C. Scholz, S. Slomkowski, e J. Vohlidal, *Nomenclature and terminology for linear lactic acid-based polymers (IUPAC Recommendations 2019)*. *Pure and Applied Chemistry*, 2020. **92**(1): p. 193-211.
10. Auras, R., B. Harte, e S. Selke, *An overview of polylactides as packaging materials*. *Macromolecular bioscience*, 2004. **4**(9): p. 835-864.
11. Casalini, T., F. Rossi, A. Castrovinci, e G. Perale, *A perspective on polylactic acid-based polymers use for nanoparticles synthesis and applications*. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 2019. **7**: p. 259.
12. Crippa, M. e B. Morico, *Chapter 12 - PET depolymerization: a novel process for plastic waste chemical recycling*, in *Studies in Surface Science and Catalysis*, A. Basile, et al., Editors. 2020, Elsevier. p. 215-229.
13. Berk, O., *What's the Difference between PET, OPET, EPET, PETG AND PCTG?* <https://www.oberk.com/packaging-crash-course/differences-in-pet>.
14. ISO, *Plastics — Determination of tensile properties*. 2019: <https://www.iso.org/standard/75824.html>.
15. ASTM, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. 2014: <https://www.astm.org/d0638-14.html>.
16. ISO, *Plastics — Determination of flexural properties*. 2019: <https://www.iso.org/standard/70513.html>.
17. ISO, *Plastics — Determination of Charpy impact properties*. 2010: <https://www.iso.org/standard/44852.html>.

Referências

18. ISO, *Plastics — Determination of Izod impact strength*. 2019: <https://www.iso.org/standard/72820.html>.
19. ISO, *Plastics — Differential scanning calorimetry (DSC)*. 2016: <https://www.iso.org/standard/70024.html>.
20. Gordelier, T.J., P.R. Thies, L. Turner, e L. Johanning, *Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review*. *Rapid Prototyping Journal*, 2019. **25**(6): p. 953-971.
21. Sculpteo, *The state of 3d Printing 2022 Edition*, in Sculpteo. 2022: <https://www.sculpteo.com/en/ebooks/state-of-3d-printing-report-2022/>.
22. Mostafaei, A., A.M. Elliott, J.E. Barnes, F. Li, W. Tan, C.L. Cramer, P. Nandwana, e M. Chmielus, *Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges*. *Progress in Materials Science*, 2021. **119**: p. 100707.
23. Kruth, J.-P., X. Wang, T. Laoui, e L. Froyen, *Lasers and materials in selective laser sintering*. *Assembly Automation*, 2003. **23**(4): p. 357-371.
24. Fafenrot, S., N. Grimmelsmann, M. Wortmann, e A. Ehrmann, *Three-dimensional (3D) printing of polymer-metal hybrid materials by fused deposition modeling*. *Materials*, 2017. **10**(10): p. 1199.
25. Calignano, F., D. Manfredi, E.P. Ambrosio, S. Biamino, M. Lombardi, E. Atzeni, A. Salmi, P. Minetola, L. Iuliano, e P. Fino, *Overview on additive manufacturing technologies*. *Proceedings of the IEEE*, 2017. **105**(4): p. 593-612.
26. Almansoori, K. e S. Pervaiz, *Effect of layer height, print speed and cell geometry on mechanical properties of marble PLA based 3D printed parts*. *Smart Materials in Manufacturing*, 2023. **1**: p. 100023.
27. Tanveer, M.Q., G. Mishra, S. Mishra, e R. Sharma, *Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts-a current review*. *Materials Today: Proceedings*, 2022. **62**: p. 100-108.
28. Czyżewski, P., D. Marciniak, B. Nowinka, M. Borowiak, e M. Bieliński, *Influence of extruder's nozzle diameter on the improvement of functional properties of 3D-printed PLA products*. *Polymers*, 2022. **14**(2): p. 356.
29. Ebel, E. e T. Sinnemann, *Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties*. *RTe Journal*, 2014.
30. Ahn, S.H., M. Montero, D. Odell, S. Roundy, e P.K. Wright, *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. *Rapid prototyping journal*, 2002. **8**(4): p. 248-257.
31. Constance, Z., S. Mala, e Z. Sophia, *Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling*, in *Mechanical Engineering*, G. Murat, Editor. 2012, IntechOpen: Rijeka. p. Ch. 7.
32. Letcher, T. e M. Waytashek. *Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer*. in *ASME international mechanical engineering congress and exposition*. 2014. American Society of Mechanical Engineers.
33. Fernandez-Vicente, M., W. Calle, S. Ferrandiz, e A. Conejero, *Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing*. *3D printing and additive manufacturing*, 2016. **3**(3): p. 183-192.
34. Wittbrodt, B. e J.M. Pearce, *The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components*. *Additive Manufacturing*, 2015. **8**: p. 110-116.
35. Ding, S., B. Zou, P. Wang, e H. Ding, *Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM*. *Polymer Testing*, 2019. **78**: p. 105948.

36. Mulyanto, F.D., Y. Setyoadi, e R. Hermana, *The Performance Analysis of The 3D Printer Corexy FDM Type With Area X= 200 Y= 200 Z= 200 mm*. Jurnal Teknik Mesin Mechanical Xplore, 2022. **3**(1): p. 26-33.
37. Nassar, M., M.A. El Farahaty, S. Ibrahim, e Y.R. Hassan, *Design of 3D filament extruder for Fused Deposition Modeling (FDM) additive manufacturing*. International Design Journal, 2019. **9**(4): p. 55-62.
38. Filafab. <https://www.filafab.co.uk/>.
39. Borg, G., S. Kiss, e A. Rochman, *Filament development for laser assisted FFF 3D printing*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2021. **5**(4): p. 115.
40. Sondagar, H.D., S. Kumar, e V.S. Sharma, *A state-of-the-art review of 4D printing techniques, stimuli activated materials and future perspectives*. Materials Today: Proceedings, 2024.
41. Wu, Y., J. Fang, C. Wu, C. Li, G. Sun, e Q. Li, *Additively manufactured materials and structures: A state-of-the-art review on their mechanical characteristics and energy absorption*. International Journal of Mechanical Sciences, 2023. **246**: p. 108102.
42. Sawant, D.A., B.M. Shinde, e S.J. Raykar, *Post processing techniques used to improve the quality of 3D printed parts using FDM: State of art review and experimental work*. Materials Today: Proceedings, 2023.
43. Rasheed, A., M. Hussain, S. Ullah, Z. Ahmad, H. Kakakhail, A.A. Riaz, I. Khan, S. Ahmad, W. Akram, e S.M. Eldin, *Experimental investigation and Taguchi optimization of FDM process parameters for the enhancement of tensile properties of Bi-layered printed PLA-ABS*. Materials Research Express, 2023. **10**(9): p. 095307.
44. Stein, Z. *What is Sustainability*. 2022 [cited 2024 18/11/2024].
45. UN, *Take Action for the Sustainable Development Goals*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.
46. Sin, L.T. e B.S. Tuen, *Polylactic acid: a practical guide for the processing, manufacturing, and applications of PLA*. 2019: William Andrew.
47. ISO, *Packaging and the environment — Marking for material identification*. 2021: <https://www.iso.org/standard/66933.html>.
48. Badia, J., E. Strömberg, S. Karlsson, e A. Ribes-Greus, *Material valorisation of amorphous polylactide. Influence of thermo-mechanical degradation on the morphology, segmental dynamics, thermal and mechanical performance*. Polymer degradation and stability, 2012. **97**(4): p. 670-678.
49. Brüster, B., F. Addiego, F. Hassouna, D. Ruch, J.-M. Raquez, e P. Dubois, *Thermo-mechanical degradation of plasticized poly (lactide) after multiple reprocessing to simulate recycling: Multi-scale analysis and underlying mechanisms*. Polymer Degradation and Stability, 2016. **131**: p. 132-144.
50. Lanzotti, A., M. Martorelli, S. Maietta, S. Gerbino, F. Penta, e A. Gloria, *A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA*. Procedia Cirp, 2019. **79**: p. 143-146.
51. Cress, A.K., J. Huynh, E.H. Anderson, R. O’neill, Y. Schneider, e Ö. Keleş, *Effect of recycling on the mechanical behavior and structure of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS)*. Journal of Cleaner Production, 2021. **279**: p. 123689.
52. Oussai, A., Z. Bártfai, e L. Kátai, *Development of 3D printing raw materials from plastic waste. A case study on recycled polyethylene terephthalate*. Applied Sciences, 2021. **11**(16): p. 7338.
53. Vaucher, J., A. Demongeot, V. Michaud, e Y. Leterrier, *Recycling of bottle grade PET: influence of HDPE contamination on the microstructure and mechanical performance of 3D printed parts*. Polymers, 2022. **14**(24): p. 5507.

Referências

54. Mikula, K., D. Skrzypczak, G. Izydorczyk, J. Warchoń, K. Moustakas, K. Chojnacka, e A. Witek-Krowiak, *3D printing filament as a second life of waste plastics—a review*. Environmental Science and Pollution Research, 2021. **28**: p. 12321-12333.
55. Dohan, V., S.-V. Galatanu, e L. Marsavina, *Mechanical evaluation of recycled PETG filament for 3D printing*. Fracture & Structural Integrity/Frattura ed Integrità Strutturale, 2024(70).
56. Al Rashid, A. e M. Koç, *Additive manufacturing for sustainability and circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste*. Materials Today Sustainability, 2023: p. 100529.
57. Olawumi, M.A., B.I. Oladapo, e T.O. Olugbade, *Evaluating the impact of recycling on polymer of 3D printing for energy and material sustainability*. Resources, Conservation and Recycling, 2024. **209**: p. 107769.
58. *Wellzoom desktop filament extruder*. 2025 [cited 2025].
59. Johnson, R.O. e H.S. Burlhis. *Polyetherimide: A new high-performance thermoplastic resin*. in *Journal of Polymer Science: Polymer Symposia*. 1983. Wiley Online Library.
60. Hasan, M.R., I.J. Davies, A. Pramanik, M. John, e W.K. Biswas, *Impact of process parameters on improving the performance of 3D printed recycled polylactic acid (rPLA) components*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024. **131**(7): p. 3751-3779.
61. Pang, R., M. Lai, K. Ismail, e T. Yap. *The effect of printing temperature on bonding quality and tensile properties of fused deposition modelling 3d-printed parts*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022. IOP Publishing.
62. Wei, X. e R. Bähr, *A comparative study of 3D printing with virgin and recycled polylactic acid filaments*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2024. **54**: p. 75-84.
63. Hamat, S., M.R. Ishak, M.S. Salit, N. Yidris, S.A.S. Ali, M.S. Hussin, M. Ibrahim, e A. Sanuddin, *Tensile properties of 3D printed recycled PLA Filament: a detailed study on filament fabrication parameters*. J Adv Res Appl Mech, 2023. **110**(1): p. 63-72.
64. Rădulescu, B., A.M. Mihalache, A. Hrițuc, M. Rădulescu, L. Slătineanu, A. Munteanu, O. Dodun, e G. Nagîț, *Thermal expansion of plastics used for 3D printing*. Polymers, 2022. **14**(15): p. 3061.
65. Zharylkassyn, B., A. Perveen, e D. Talamona, *Effect of process parameters and materials on the dimensional accuracy of FDM parts*. Materials Today: Proceedings, 2021. **44**: p. 1307-1311.
66. Aly, R., O. Olalere, A. Ryder, M. Alyammahi, e W.A. Samad, *Mechanical Property Characterization of Virgin and Recycled PLA Blends in Single-Screw Filament Extrusion for 3D Printing*. Polymers, 2024. **16**(24): p. 3569.
67. Anderson, I., *Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid*. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2017. **4**(2): p. 110-115.

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P. PORTO.

NOME: Manuel António Rocha da Veiga Esteves

ISEP, Porto, 14/09/2025

Apêndice A

Tabelas dos valores registados para dimensões dos provetes para ensaio de tração:

Tabela 40- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de tração- material novo T=220°C

Material novo impresso a 220°C				
Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Área média
1	12,69	3,24	41,12	41,36
	12,72	3,27	41,59	
	12,69	3,26	41,37	
2	12,66	3,23	40,89	41,16
	12,7	3,23	41,02	
	12,71	3,27	41,56	
3	12,73	3,26	41,50	41,42
	12,68	3,28	41,59	
	12,67	3,25	41,18	
4	12,75	3,28	41,82	41,88
	12,72	3,29	41,85	
	12,72	3,3	41,98	

Tabela 41- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de tração- material reciclado T=220°C

Material reciclado impresso a 220°C				
Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Área média
1	12,89	3,29	42,41	42,18
	12,86	3,27	42,05	
	12,87	3,27	42,08	
2	12,84	3,3	42,37	42,30
	12,84	3,3	42,37	
	12,85	3,28	42,15	
3	12,92	3,26	42,12	42,15
	12,93	3,25	42,02	
	12,94	3,27	42,31	
4	12,87	3,26	41,96	42,02
	12,94	3,25	42,06	
	12,9	3,26	42,05	

Apêndice A

Tabela 42- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de tração- material reciclado T=237°C

Material reciclado impresso a 237°C				
Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Área média
1	12,92	3,29	42,51	42,77
	12,92	3,33	43,02	
	12,92	3,31	42,77	
2	13	3,29	42,77	42,61
	12,97	3,28	42,54	
	12,92	3,29	42,51	
3	12,96	3,31	42,90	42,58
	12,96	3,28	42,51	
	12,95	3,27	42,35	
4	13,05	3,28	42,80	42,81
	13,01	3,29	42,80	
	12,98	3,3	42,83	

Tabela 43- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de tração- material reciclado T=255°C

Material reciclado impresso a 255°C				
Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Área média
1	12,87	3,25	41,83	42,06
	12,91	3,28	42,34	
	12,89	3,26	42,02	
2	12,81	3,27	41,89	41,97
	12,82	3,29	42,18	
	12,8	3,27	41,86	
3	12,75	3,27	41,69	41,91
	12,74	3,29	41,91	
	12,73	3,31	42,14	
4	12,83	3,31	42,47	42,35
	12,81	3,31	42,40	
	12,82	3,29	42,18	

Tabelas dos valores registados para as dimensões dos provetes para ensaio de flexão:

Tabela 44- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de flexão- material novo T=220°C

Material novo impresso a 220°C				
Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Área média
1	9,94	4,07	40,46	40,46
	9,95	4,07	40,50	
	9,93	4,07	40,42	
2	10,11	4,11	41,55	41,34
	10,05	4,1	41,21	
	10,11	4,08	41,25	
3	9,95	4,07	40,50	40,49
	9,94	4,07	40,46	
	9,93	4,08	40,51	
4	9,93	4,09	40,61	40,54
	9,93	4,07	40,42	
	9,95	4,08	40,60	

Tabela 45- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de flexão- material reciclado T=220°C

Material reciclado impresso a 220°C				
Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Área média
1	9,97	4,1	40,88	40,90
	9,99	4,11	41,06	
	9,97	4,09	40,78	
2	9,99	4,11	41,06	41,11
	10,04	4,11	41,26	
	9,98	4,11	41,02	
3	9,95	4,09	40,70	40,86
	9,95	4,12	40,99	
	9,95	4,11	40,89	
4	9,95	4,08	40,60	40,72
	9,96	4,1	40,84	
	9,96	4,09	40,74	

Tabela 46- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de flexão- material reciclado
T=237°C

Material reciclado impresso a 237°C				
Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Área média
1	9,96	4,06	40,44	40,75
	9,99	4,09	40,86	
	10,04	4,08	40,96	
2	9,94	4,1	40,75	41,12
	10,01	4,13	41,34	
	9,97	4,14	41,28	
3	10,1	4,09	41,31	41,12
	10,03	4,09	41,02	
	10,01	4,1	41,04	
4	10,04	4,08	40,96	40,86
	10,05	4,06	40,80	
	10	4,08	40,80	

Tabela 47 Tabela 48- Dimensões medidas dos provetes para ensaio de flexão- material reciclado
T=255°C

Material reciclado impresso a 255°C				
Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Área média
1	9,97	4,12	41,08	40,90
	9,95	4,11	40,89	
	9,96	4,09	40,74	
2	9,94	4,07	40,46	40,62
	9,95	4,09	40,70	
	9,95	4,09	40,70	
3	9,96	4,07	40,54	40,62
	9,96	4,08	40,64	
	9,95	4,09	40,70	
4	9,94	4,09	40,65	40,68
	9,96	4,09	40,74	
	9,96	4,08	40,64	

Anexo A

Especificações técnicas do equipamento de impressão

Bambu Lab X1-Carbon

Technical Specifications

Technology		X1-Carbon
		Fused Deposition Modeling
Body	Build Volume(W×D×H)	256 x 256 x 256 mm ³
	Chassis	Steel
	Shell	Aluminum & Glass
Tool Head	Hot End	All-Metal
	Extruder Gears	Hardened Steel
	Nozzle	Hardened Steel
	Max Hot End Temperature	300 °C
	Nozzle Diameter (Included)	0.4 mm
	Nozzle Diameter (Optional)	0.2 mm, 0.6 mm, 0.8 mm
	Filament Cutter	Yes
	Filament Diameter	1.75 mm
	Hot bed	Build Plate
Build Plate Surface (Included)		Bambu Cool Plate, Bambu Engineering Plate
Build Plate Surface (Optional)		Bambu High Temperature Plate
Max Build Plate Temperature		110°C @220 V, 120°C @110 V
Speed	Max Speed of Tool Head	500 mm/s
	Max Acceleration of Tool Head	20 m/s ²
	Max Hot End Flow	32 mm ³ /s @ABS (Model: 150 x 150 mm single wall; Material: Bambu ABS; Temperature: 280°C)
Cooling	Part Cooling Fan	Closed Loop Control
	Hot End Fan	Closed Loop Control
	Control Board Fan	Closed Loop Control
	Chamber Temperature Regulator Fan	Closed Loop Control
	Auxiliary Part Cooling Fan	Closed Loop Control
	Air Filter	Activated Carbon Filter
Supported Filament	PLA, PETG, TPU, ABS, ASA, PET	Yes
	PA, PC	Ideal
	Carbon/Glass Fiber Reinforced Polymer	Ideal
Sensors	Bambu Micro Lidar	Yes
	Chamber Monitoring Camera	1920 x 1080 Included
	Door Sensor	Yes
	Filament Run Out Sensor	Yes
	Filament Odometry	Optional with AMS
	Power Loss Recover	Yes
Physical Dimensions	Dimensions	389 x 389 x 457 mm ³
	Net Weight	14.13 kg
Electrical Requirements	Voltage	100-240 VAC, 50-60 Hz
	Max Power	1000 W @220 V, 350 W @110 V
Electronics	Display	5-inch 1280 x 720 Touch Screen
	Connectivity	Wi-Fi, Bambu-Bus
	Storage	4 GB EMMC and Micro SD Card Reader
	Control Interface	Touch Screen, APP, PC Application
	Motion Controller	Dual-Core Cortex M4
	Application Processor	Quad ARM A7 1.2 GHz
	Neural-Network Processing Unit	2 Tops
Software	Slicer	Bambu Studio Support third party slicers which export standard G-code such as Superslicer, Prusaslicer and Cura, but certain advanced features may not be supported.
	Slicer Supported OS	MacOS, Windows

Anexo B

Ficha técnica do PLA virgem



Bambu Filament

Technical Data Sheet V3.0

PLA BASIC

- **Basic Info**

PLA is the most common material in 3D printing as it's easy to print and inexpensive. Meanwhile, its stiffness and strength can meet most printing needs. It is worth mentioning that it can biodegrade in some artificial composting conditions. Bambu PLA Basic is designed for high-speed printing. Compared to general PLA, it can easily achieve printing speeds up to 250-300 mm/s and has excellent toughness and Z-layer strength.

- **Specifications**

Subjects	Data
Diameter	1.75 mm
Net Filament Weight	1 kg
Spool Material	ABS (Temperature resistance 70 °C)
Spool Size	Diameter: 200 mm; Height: 67 mm

- **Recommended Printing Settings**

Subjects	Data
Drying Settings before Printing	Blast Drying Oven: 55 °C, 8 h X1 Series Printer Heatbed: 65 - 75 °C, 12 h
Printing and Storage Humidity	< 20% RH (Sealed with desiccant)
Nozzle Size	0.2, 0.4, 0.6, 0.8 mm
Nozzle Temperature	190 - 230 °C

Bed Type	Cool Plate, High Temperature Plate or Textured PEI Plate
Bed Surface Preparation	Glue
Bed Temperature	35 - 45 °C
Cooling Fan	Turn on
Printing Speed	< 300 mm/s
Retraction Length	0.6 - 1.0 mm
Retraction Speed	20 - 40 mm/s
Chamber Temperature	25 - 45 °C
Max Overhang Angle	55°
Max Bridging Length	30 mm
Support Material	Support for PLA

• Properties

Bambu Lab has tested the differing aspects in the performance of PLA Basic material, including physical, mechanical, and chemical properties. Typical values are listed as followed:

Physical Properties		
Subjects	Testing Methods	Data
Density	ISO 1183	1.24 g/cm ³
Melt Index	210 °C, 2.16 kg	42.4 ± 3.5 g/10 min
Melting Temperature	DSC, 10 °C/min	160 °C
Glass Transition Temperature	DSC, 10 °C/min	60 °C
Crystallization Temperature	DSC, 10 °C/min	N / A
Vicar Softening Temperature	ISO 306, GB/T 1633	57 °C
Heat Deflection Temperature	ISO 75 1.8 MPa	54 °C
Heat Deflection Temperature	ISO 75 0.45 MPa	57 °C
Saturated Water Absorption Rate	25 °C, 55% RH	0.43%

Mechanical Properties		
Subjects	Testing Methods	Data
Young's Modulus (X-Y)	ISO 527, GB/T 1040	2580 ± 220 MPa

Young's Modulus (Z)	ISO 527, GB/T 1040	2060 ± 170 MPa
Tensile Strength (X-Y)	ISO 527, GB/T 1040	35 ± 4 MPa
Tensile Strength (Z)	ISO 527, GB/T 1040	31 ± 3 MPa
Breaking Elongation Rate (X-Y)	ISO 527, GB/T 1040	12.2 ± 1.8 %
Breaking Elongation Rate (Z)	ISO 527, GB/T 1040	7.5 ± 1.3 %
Bending Modulus (X-Y)	ISO 178, GB/T 9341	2750 ± 160 MPa
Bending Modulus (Z)	ISO 178, GB/T 9341	2370 ± 150 MPa
Bending Strength (X-Y)	ISO 178, GB/T 9341	76 ± 5 MPa
Bending Strength (Z)	ISO 178, GB/T 9341	59 ± 6 MPa
Impact Strength (X-Y)	ISO 179, GB/T 1043	26.6 ± 2.8 kJ/m ² ; 7.9 ± 1.2 kJ/m ² (notched)
Impact Strength (Z)	ISO 179, GB/T 1043	13.8 ± 0.9 kJ/m ²

Other Physical and Chemical Properties	
Subjects	Data
Odor	Odorless
Composition	PLA
Skin Hazards	No hazard
Chemical Stability	Stable under normal storage and handling conditions
Solubility	Insoluble in water
Resistance to Acid	Not resistant
Resistance to Alkali	Not resistant
Resistance to Organic Solvent	Not resistant to some organic solvents
Resistance to Oil and Grease	Resistant to most kinds of oil and grease
Flammability	Flammable
Combustion Products	Water, carbon oxides

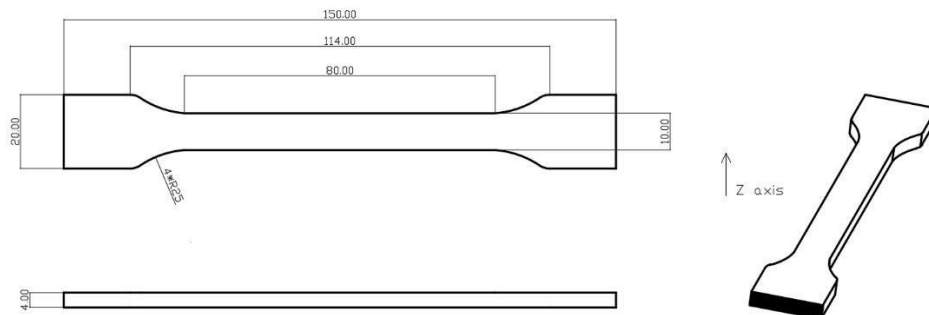
Odor of Combustion Products	Odorless
-----------------------------	----------

• Specimen Test

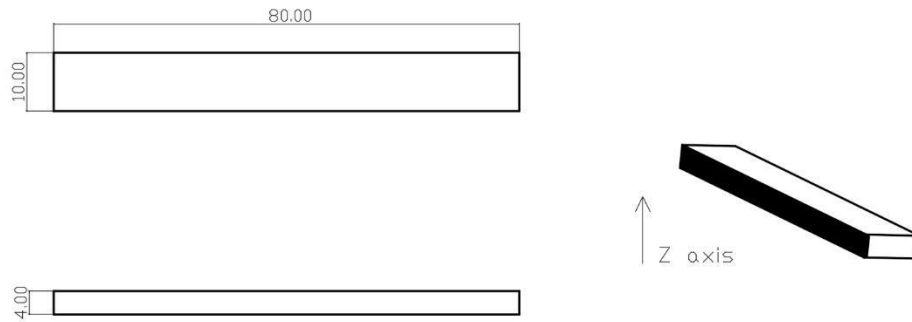
Specimen Printing Conditions	
Subjects	Data
Nozzle Temperature	220 °C
Bed Temperature	35 °C
Printing Speed	200 mm/s
Infill Density	100%

*All the specimens were annealed and dried at 55 °C for 8 h before testing. And the suggested annealing temperature of models printed with Bambu PLA Basic is 50 to 60 °C, and the time is 6 to 12 hours. The annealing effect depends on the annealing temperature, time and the model itself: size, structure, infill and other printing settings; some prints may deform and warp after annealing. When drying the filament and annealing the prints, it's required to use an oven that has big enough inside volume and can provides even temperature distribution, such as a blast drying oven (forced-air drying oven), and the filament and prints need to be away from the heater, and a micro-wave oven or kitchen oven is not compatible, otherwise the filament and prints can get damaged.

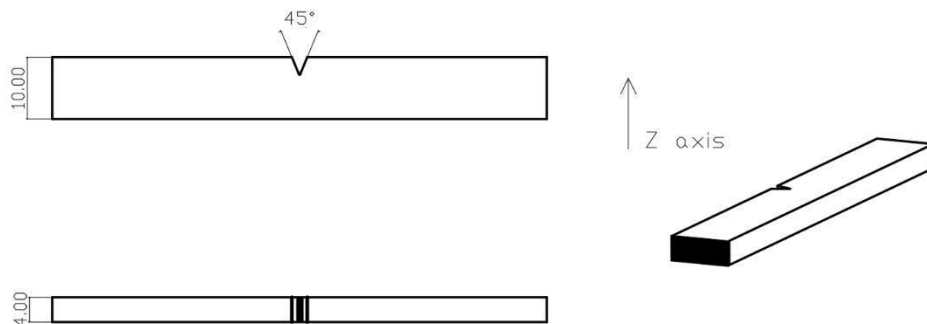
1. Tensile Testing



2. Bending Testing



3. Impact Testing



• Disclaimer

The performance values are tested by standard samples at Bambu Lab, and the values are for design reference and comparison only. Actual 3D printing model performance is related to many other factors, including printers, printing conditions, printing models, printing parameters, etc.

In the process of using Bambu Lab 3D printing filaments, users are responsible for the legality, safety, and performance indicators of printing. Bambu Lab is not responsible for the use of materials and scenarios and is not responsible for any damage that occurs in the process of using our filaments.

Ficha técnica do PLA reciclado

SAKATA 3D RE-GO&PRINT filament is suitable for all consumer-grade 3D FDM/FFF printers. This filament is 100% made of recovered PLA GO&PRINT filaments from our production processes. No external recycled PLA resin is added to its formulation. This material exhibits similar physical, mechanical, chemical and thermal properties than SAKATA 3D PLA GO&PRINT. Made in Spain by POLIMERSIA GLOBAL S.L.

FILAMENT SPECIFICATIONS	Unit	Value
Diameter	mm	1.75 ± 0.05
Max. roundness deviation	mm	0.05
Net weight	g	1,000 / 2,500

PHYSICAL PROPERTIES	Standard	Unit	Value
Specific gravity	ASTM D792	g/cm ³	1.24
MECHANICAL PROPERTIES ⁽¹⁾	Standard	Unit	Value
Tensile strength	ISO 527-1	MPa	45
Tensile modulus	ISO 527-1	MPa	3,500
Tensile elongation	ISO 527-1	%	5
Charpy notched impact	ISO 179-1eA	J/m	118
THERMAL PROPERTIES	Standard	Unit	Value
Heat distortion temperature	ISO 527-1	°C	60

⁽¹⁾ All 3D printed parts printed at 100% infill and annealed at 110°C/15 min.

PRINT SETTINGS	Unit	Value
Nozzle temp.	°C	185-205
Bed temp.	°C	Not needed (50-70 optional)
Bed modification	-	--
Fan speed	%	100
Layer height	mm	0.1-0.3
Shell thickness	mm	1.2
Print speed	mm/s	Up to 120 mm/s

Colour information

The filament color may vary significantly from spool to spool depending on the recovered PLA GO&PRINT mixture composition.

Certifications / Approvals

SAKATA 3D RE-GO&PRINT filament is not certified for food contact either medical applications.

Safety Considerations

Good general ventilation of the workplace is recommended.

Disclaimer

The above information is provided in good faith. POLIMERSIA GLOBAL S.L. makes no warranty or representation of any kind, regarding the information given or the products described, and expressly disclaims all implied warranties, representations and conditions, including without limitation all warranties and conditions of quality, merchantability and suitability or fitness for a particular purpose.

POLIMERSIA GLOBAL S.L.
www.sakata3d.com

Tel: +34 958 993824

Email: info@sakata3d.com