

# **Desempenho Mecânico de Filamento rPET obtido por Termoformagem para Fabrico Aditivo**

**Pedro Nabais Pires**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Eletromecânica**

2º Ciclo de Estudos

Orientador: Prof. André Ferreira Costa Vieira

Coorientador: Mestre Martim Lima de Aguiar

Versão final após defesa

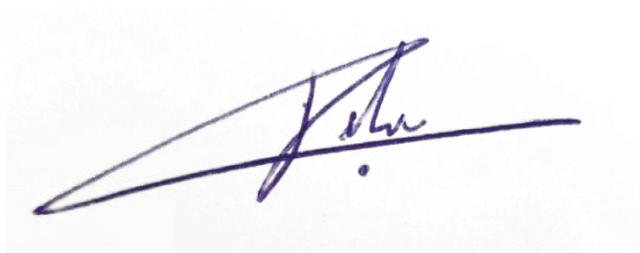
**Janeiro de 2025**

## Declaração de Integridade

Eu, Pedro Nabais Pires, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M12978 de/o Engenharia Eletromecânica, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridade da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 07/01 /2025

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pedro Nabais Pires', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero expressar a minha profunda gratidão ao meu orientador, Professor André Ferreira Costa Vieira. A orientação, sempre disponível e rápida, foi crucial ao longo deste percurso. Agradeço, especialmente, a dedicação em rever tudo o que lhe enviava e o incentivo para tornar esta dissertação cada vez mais completa.

Ao meu coorientador, Mestre Martim Lima de Aguiar, um grande obrigado também. Os conselhos práticos e a forma como me ajudou a clarificar as ideias mais confusas foram essenciais para que este projeto tomasse forma.

Aos meus pais, deixo o maior dos agradecimentos. Não só permitiram que este projeto fosse possível, como estiveram presentes ao longo de todo o meu percurso académico, desde o apoio financeiro até à confiança que sempre depositaram em mim. Obrigado por me proporcionarem as experiências e memórias que enriqueceram estes anos.

À minha irmã Cláudia, obrigado pelo apoio e por beber muita água, os garrações foram essenciais para a conclusão da dissertação.

À Bruna, um obrigado por ser o meu suporte em todos os momentos. A paciência e ajuda foram cruciais, assim como as revisões de tudo o que escrevia. E claro, por me passar as ferramentas quando montava a máquina.

Aos meus amigos, gostaria de agradecer o apoio durante todos estes anos. Obrigado por estarem sempre prontos a ajudar a desanuviar nos momentos de maior pressão e por terem partilhado comigo todos os momentos boémios que fazem parte de um bom percurso académico.

Um obrigado a todos os que estiveram, de alguma forma, envolvidos na minha passagem pela UBI. E claro, sem esquecer: “Mais vale feito do que perfeito”.



## **Resumo**

A popularização do uso de impressoras 3D em ambientes domésticos reflete o avanço tecnológico que estamos a viver, mas também suscita preocupações ambientais, particularmente no que diz respeito à poluição por plástico. Embora a reciclagem seja vista como uma solução para a poluição, a sua eficácia é questionável, sendo que muitas vezes gera mais resíduos do que soluções. O aumento da produção de plástico e o descarte inadequado de produtos como garrafas PET agravam este problema.

Este estudo pretende apresentar uma alternativa para a reciclagem de garrafas PET, transformando-as em filamento para impressoras 3D. A ideia central é promover a independência dos utilizadores na produção de filamento, reduzindo o lixo doméstico e, consequentemente, a poluição ambiental.

A máquina desenvolvida neste trabalho oferece uma solução inovadora para a gestão de resíduos, que pode ser recriada e utilizada para uso pessoal ou mesmo em ambientes como universidades, tornando a reciclagem de garrafas PET acessível e com uma recompensa direta para quem a faz.

Ao focar-se inicialmente em garrafas PET devido à sua abundância e facilidade de reciclagem, o equipamento procura simplificar o processo de produção de filamento. No entanto, existe margem para futuras melhorias, tais como o tratamento de outros materiais termoplásticos ou a adição de fibras para melhorar as propriedades mecânicas do filamento.

Este trabalho não só contribui para mitigar a poluição por plástico, como também promove uma cultura de sustentabilidade e responsabilidade ambiental, salientando a importância de soluções práticas e acessíveis para enfrentar os desafios ambientais globais.

## **Palavras-chave**

Reciclagem de PET, Sustentabilidade Ambiental, Economia Circular, Filamento para Impressoras 3D, RPET, Máquina DIY



# Abstract

The growing popularity of 3D printers in homes reflects the technological advancements we are experiencing, but it also raises environmental concerns, particularly regarding plastic pollution. While recycling is seen as a solution to pollution, its effectiveness is debatable, as it can sometimes generate more waste than solutions. The increase in plastic production and the improper disposal of products like PET bottles worsen this problem.

This study aims to present an alternative for recycling PET bottles by transforming them into filament for 3D printers. The core idea is to foster user independence in filament production, thereby reducing household waste and consequently curbing environmental pollution.

The machine developed in this work offers an innovative solution for waste management, which can be replicated and used for personal use or even in environments like universities, making PET bottle recycling accessible and rewarding for those who do it.

Initially focusing on PET bottles due to their abundance and ease of recycling, the equipment aims to simplify the filament production process. However, there is room for future improvements, such as expanding the machine's capabilities to handle other thermoplastic materials or incorporating fibers to enhance the filament's mechanical properties.

This work not only contributes to mitigating plastic pollution but also promotes a culture of sustainability and environmental responsibility, emphasizing the importance of practical and accessible solutions to address global environmental challenges.

## Keywords

PET Recycling, Environmental Sustainability, Circular Economy, Filament for 3D Printers, RPET, DIY Machine



# Índice

1.Introdução.....	1
1.1. Enquadramento .....	2
1.2. O problema em estudo e a sua relevância .....	3
1.3. Objetivos e contribuição da dissertação.....	3
1.4. Visão geral e organização da dissertação .....	4
2. Estado da Arte .....	5
2.1 Da produção à poluição do plástico .....	5
2.1.1. Impacte ambiental das garrafas de plástico.....	6
2.1.2. Economia circular na Gestão de Resíduos .....	10
2.2. Introdução à Impressão 3D .....	13
2.2.1 Tipos de tecnologias de impressão 3D .....	14
2.2.2. Processamento computacional .....	17
2.2.3. Crescimento da impressão 3D no setor doméstico .....	18
2.3. Fundamentos do PET e derivados .....	20
2.3.1. Tipos de filamentos PET.....	23
2.3.2. Sustentabilidade e Ciclo de vida dos filamentos PET .....	24
2.3.3. Reciclagem e a sua complexa logística.....	25
2.4. Contribuição do mecanismo .....	27
3. Máquinas Semelhantes.....	29

3.1. Equipamentos Comerciais para Produção de Filamento Reciclado em Pequena Escala .....	30
3.2. Equipamentos DIY.....	34
4. Materiais e métodos .....	47
4.1. Componentes e mecanismos usados.....	47
4.2. Montagem da máquina.....	52
4.3. Processo de fabrico do filamento.....	55
4.4. Impressão com rPET .....	60
5. Resultados .....	69
5.1. Introdução .....	69
5.2. Discussão dos resultados .....	73
5.2.1. Comparação de rPET e PETG.....	73
5.2.2. Comparação do rPET de dois garrações de diferentes marcas.....	77
5.2.3. Resultados para PET cortado diretamente do garrafão.....	79
5.3. Discussão de resultados .....	80
5.4. Exemplos de impressões com rPET.....	81
6. Conclusões.....	85
6.1. Conclusões gerais .....	85
6.2. Sugestões de trabalhos futuros .....	86
7. Referências Bibliográficas .....	89
8. Anexos .....	97

# Lista de Figuras

Figura 1. Produção global de plásticos (Ritchie et al, 2023), adaptado .....	5
Figura 2. Os dez tipos de lixo mais encontrados nos oceanos (Morales-Caselles et al, 2021), adaptado.....	7
Figura 3. Produção global de garrafas de plástico (The Guardian, 2017) .....	8
Figura 4. Hierarquia da gestão de resíduos (Bucknall, D., 2020).....	8
Figura 5. Ciclo da Economia Circular (Parlamento Europeu, 2024) .....	10
Figura 6. Produção mundial de plásticos em 2022 (Plastics Europe, 2023) .....	11
Figura 7. Produção de plástico na Europa em 2022 (Plastics Europe,2023) .....	12
Figura 8. Exemplo de impressão por FDM (Zeal 3D, 2017) .....	14
Figura 9. Exemplo de impressão por SLA (Zeal 3D, 2017) .....	15
Figura 10. Exemplo de impressão por SLS (Zeal 3D, 2017).....	16
Figura 11. A mesma peça feita pelas 3 tecnologias diferente (Zeal 3D, 2017).....	16
Figura 12. Peça desenvolvida no Solidworks.....	17
Figura 13. Peça no UltiMaker Cura .....	18
Figura 14. Peça feita em PETG .....	18
Figura 15. Exemplos de peças disponibilizadas prontas a imprimir (Printables, 2024) ....	20
Figura 16. Estrutura e equação química do PET (Welle, F., 2015) .....	21
Figura 17. Fabricação de garrafas PET (Engenharia 360, 2022) .....	21
Figura 18. Classificação de produtos PET (Welle, F., 2015).....	22
Figura 19. Tipos de Produção de Filamento Reciclado .....	29

Figura 20. Extrusora EX2 Filabot (Filabot, 2022).....	30
Figura 21. Pellets no depósito da máquina (Filabot, 2023), adaptado .....	31
Figura 22. Parafuso sem fim colocado por baixo do depósito (Filabot, 2023), adaptado ...	31
Figura 23. Interior da extrusora (Filabot, 2023), adaptado.....	32
Figura 24. Sistema de arrefecimento por ar (Filabot, 2023) adaptado .....	32
Figura 25. Sistema de arrefecimento com banho (Filabot, 2023), adaptado .....	33
Figura 26. Módulo de controlo e armazenamento do filamento (Filabot, 2023), adaptado .....	33
Figura 27. Extrusora ProtoCycler V3 (Redetec, .....	34
Figura 28. RepRapable Recyclebot (HardwareX, .....	35
Figura 29. Extrusora de Filamento MK2.5 (ARTME 3D, 2024).....	36
Figura 30. Kit MK5 da Recreator 3D (ReCreator3D, 2024).....	37
Figura 31. Peças necessárias de uma impressora Ender 3 (ReCreator3D , 2023) .....	38
Figura 32. Processo de corte da ReCreator 3D (ReCreator3D, 2023) .....	39
Figura 33. Sistemas de arrefecimento da ReCreator 3D (a) Desenho CAD do suporte do ventilador (b) Montagem do ventilador (c) Ventilador usado para proteger do bloco de aquecimento (d) Dissipador de calor (ReCreator3D, 2023).....	39
Figura 34. Sistema de Enrolamento do filamento (a) Sistema de polias (b) Mecanismo para controlar o enrolamento (c) Furos para prender a ponta do filamento (ReCreator3D,2023).....	40
Figura 35. Extrusora Petalot (Function3D, 2024) .....	41
Figura 36. Sistema de corte da Petalot (Function3D, 2024).....	41
Figura 37. Componentes para Otimização do Processo (a) Sistema de limpeza da tira de plástico (b) Sistema de paragem quando acaba o filamento (Function3D,2024) .....	42

Figura 38. Sistema de engrenagens (Function3D, 2024) .....	42
Figura 39. Sistema de controlo (a) Placa de Circuitos (b) Layout do controlador no smartphone (Function3D,2024).....	43
Figura 40. Extrusora PETmachine (Cults 3D, 2023) .....	43
Figura 41. Sistema de corte da garrafa (Cults 3D,2023) .....	44
Figura 42. Sistema de controlo (Cults 3D, 2023).....	45
Figura 43. Cortador da tira de plástico.....	48
Figura 44. Bobina para armazenar a tira de plástico .....	48
Figura 45. Base em MDF para o projeto .....	49
Figura 46. Sistema de extrusão (a) Bocal de extrusão (b) Bloco de aquecimento .....	49
Figura 47. Sistema de Controlo de temperatura (a) W3230 (b) cartucho de aquecimento (c) sensor termopar tipo K .....	50
Figura 48. Sistema de tração (a) Motor JGY370 (b) Controlador PWM (c) Sistema de engrenagens .....	51
Figura 49. Mecanismo para direcionar o filamento .....	51
Figura 50. Alimentação da máquina (a) Fonte Mean Well LRS-100-24 (b) Tomada Ficha de alimentação AC .....	52
Figura 51. Esquema elétrico da máquina .....	53
Figura 52. Vista inferior da máquina .....	54
Figura 53. Modelo CAD da Máquina .....	54
Figura 54. Vista de perfil da Máquina .....	55
Figura 55. Vista de cima da Máquina .....	55
Figura 56. Preparação do garrafão (a) Antes (b) Depois.....	56

Figura 57. Cortador com regulação de largura da tira .....	56
Figura 58. Tira de plástico a passar no bocal de extrusão.....	58
Figura 59. Filamento preso à bobina.....	59
Figura 60. Filamento rPET pronto a usar .....	59
Figura 61. Torre de Temperatura no Ultimaker Cura .....	61
Figura 62. Torre de temperatura impressa .....	62
Figura 63. Torre de velocidade no Ultimaker Cura.....	62
Figura 64. Torre de velocidade impressa .....	63
Figura 65. Camadas superiores: filamento comercial (esquerda) vs. rPET (direita).....	63
Figura 66. Secção ampliada do filamento rPET .....	64
Figura 67. Estimativa da área de secção do filamento no Solidworks .....	65
Figura 68. Teste com um Flow de 100% no Ultimaker Cura .....	66
Figura 69. Amostras com os diferentes valores de Flows .....	66
Figura 70. Dimensões da peça de teste em milímetros.....	70
Figura 71. Representação dos provetes no fatiador com os ângulos 0° (a), 45° (b), e 90° (c) respectivamente.....	70
Figura 72. Máquina de ensaios universal Shimadzu AGS-50kN .....	72
Figura 73. Provetes após os testes (a) PETG 45° (b) PETG 90° (c) PETG 0° (d) PET (e) rPET 45° (f) rPET 90° (g) rPET 0° (h) rPET de uma marca diferente 45° .....	72
Figura 74. Gráfico Tensão x Deformação do PETG e do rPET a 45° .....	73
Figura 75. Gráfico Tensão x Deformação do PETG e do rPET a 0° .....	75
Figura 76. Gráfico Tensão x Deformação do PETG e do rPET a 90° .....	76

Figura 77. Gráfico Tensão x Deformação de rPET de marcas diferentes.....	78
Figura 78. Gráfico Tensão x Deformação do rPET e do PET .....	79
Figura 79. Acessórios para pasta e escova de dentes impresso com rPET.....	82
Figura 80. Porta-chaves para transportar palitos impresso com rPET .....	82
Figura 81. Mola para fechar embalagens impresso com rPET.....	83
Figura 82. Especificações do motor JGY-370 .....	97



# Lista de Tabelas

Tabela 1. Várias medidas para a tira de plástico e os resultados obtidos.....	57
Tabela 2. Alterações nas configurações usadas no Ultimaker .....	71
Tabela 3. Comparação das propriedades mecânicas do PETG e do rPET a 45° .....	73
Tabela 4. Comparação das propriedades mecânicas do PETG e do rPET a 0° .....	75
Tabela 5. Comparação das propriedades mecânicas do PETG e do rPET a 90° .....	76
Tabela 6. Comparação das propriedades mecânicas de rPET de marcas diferentes .....	78
Tabela 7. Comparação das propriedades mecânicas do rPET e do PET .....	79
Tabela 8. Lista dos Materiais.....	97



# Lista de Acrónimos

**PET** Polyethylene Terephthalate

**FDM** Fused Deposition Modeling

**SLS** Selective Laser Sintering

**SLA** Stereolithography

**CAD** Computer-Aided Design

**STL** Stereolithography (file format for 3D printing)

**CNC** Computer numerical control

**PETG** Polyethylene Terephthalate Glycol-modified

**PETE** Polyethylene Terephthalate

**PLA** Polylactic Acid

**ACV** Avaliação do Ciclo de Vida

**rPET** Recycled Polyethylene Terephthalate

**DIY** Do It Yourself

# 1.Introdução

As impressoras 3D, inicialmente associadas a contextos industriais, tornaram-se uma presença comum em ambientes domésticos, refletindo a evolução desta tecnologia. Num mundo marcado por avanços tecnológicos, é obrigatório fazer pausas para avaliar questões como a poluição. Uma das maiores preocupações globais é a poluição dos plásticos. A reciclagem, muitas vezes vista como solução, revela-se mais complexa e incoerente do que pode aparentar. Por vezes reciclar gera mais resíduos do que aqueles que queremos eliminar, por isso é importante fazer uma análise dos processos.

O principal desafio reside principalmente nos produtos feitos a partir de plástico que são normalmente usados uma só vez e descartados passado pouco tempo, como sacos e garrafas de plástico, os dois principais poluentes dos oceanos (Morales-Caselles et al, 2021). Embora surjam soluções como sacos e garrafas de plástico feitos de materiais reciclados, existem situações em que podem surgir alternativas mais vantajosas para o fim de vida desse tipo de produtos. Neste trabalho vai ser apresentada uma alternativa para dar uma nova vida às garrafas de plástico usadas.

Como referido, a expansão das impressoras 3D nas residências tem vindo a crescer. Uma das razões, é que à medida que estes equipamentos foram evoluindo, e com a concorrência, os preços baixaram, passando a ser acessível para o consumidor comum conseguir adquirir uma impressora 3D. Dessa forma, as pessoas já não dependem da indústria para ver concretizadas as suas ideias (Vashi et al, 2021). No entanto essa independência vai encontrar barreiras na necessidade de filamento, o componente mais importante logo após termos a impressora.

Seria interessante imaginar se essa autonomia se prolongasse à produção do próprio filamento. Além disso, e mais importante ainda, seria ao mesmo tempo que produzimos o filamento, conseguir controlar e reduzir os nossos próprios resíduos. Com base em dados da Beyond Plastics (2024) que indicam que cada pessoa adquire em média 156 garrafas de água, e considerando a pesquisa de Jannik Lindner publicada no Gitnux (2023), que revela que 80% dessas garrafas de plástico acabam em aterros sanitários, fica evidente a quantidade de material que podia ser reaproveitado para criar filamento. Além disso, reciclar localmente não apenas reduz os custos associados ao transporte e seleção de plásticos, mas também minimiza a poluição decorrente desses processos.

No seguimento dessa ideia, nesta dissertação foi explorada e desenvolvida uma máquina relativamente simples, capaz de reciclar garrafas de politereftalato de etileno (PET), em filamento reciclado, proporcionando independência aos utilizadores, ao mesmo tempo que transformam resíduos domésticos num produto de valor acrescentado.

## **1.1. Enquadramento**

Depois do aparecimento da impressão 3D na indústria, o crescimento e a evolução foi exponencial e passou de uma tecnologia lenta e dispendiosa, para se tornar uma ferramenta indispensável em diversas indústrias, tais como os setores de aeroespacial, automotivo, médico e de design, isto devido à capacidade de produzir protótipos rapidamente e a um custo relativamente baixo em relação aos métodos convencionais.

A lógica de querer possuir uma impressora 3D em casa reside na ideia de autonomia criativa e independência da indústria para fazer o que queremos. No entanto essa independência vai encontrar barreiras na necessidade de filamento. No seguimento deste problema, surgem então algumas técnicas que usam garrafas de plástico para fabricar filamento reciclado em casa, que para além de combater esse problema, ainda permite reutilizar lixo comum que é produzido nas nossas casas.

Uma realidade preocupante é o crescimento da produção global de plástico, que disparou para além de 450 milhões de toneladas (Ritchie et al, 2023). Embora o plástico seja indispensável nas nossas vidas, pelas características únicas que tem, existem certos produtos que poderiam ser substituídos por outros, feitos com materiais mais sustentáveis. Porém quando se fala em garrafas de plástico, dificilmente se consegue arranjar alternativas viáveis. Por ser um produto produzido em grande escala, deve ser alvo de boas técnicas de reciclagem que evitem que acabe nos oceanos.

Em 2016, foram vendidas 480 mil milhões de garrafas de plástico, um aumento significativo em comparação com os 300 mil milhões vendidos uma década antes, e foi previsto que em 2021 o valor aumentasse para 583,3 mil milhões (Laville & Taylor, 2017). É evidente o problema vinculado a esse tipo de produto, e se já é prejudicial produzir uma quantidade tão expressiva de garrafas, não as reciclar agrava ainda mais a situação.

Embora a reciclagem seja considerada uma solução, diversos fatores, como os custos de transporte e do próprio processo de reciclagem, podem torná-la menos vantajosa. Portanto, identificar métodos de reciclagem simples e económicos, possíveis de instalar quer seja em centros especializados ou até mesmo nas nossas casas, é altamente benéfico.

## **1.2. O problema em estudo e a sua relevância**

Como apontado anteriormente, o problema em estudo refere-se à gestão inadequada dos resíduos plásticos, especialmente o proveniente de garrafas. A relevância deste problema está intrinsecamente ligada ao impacto ambiental global e às consequências para a saúde humana. As garrafas, amplamente utilizadas na sociedade moderna são uma fonte significativa de resíduos plásticos, e a falta de práticas eficazes de reciclagem e reutilização agrava esse cenário.

Esta dissertação procura abordar esse problema, destacando a importância de desenvolver métodos acessíveis e eficientes para a reciclagem de garrafas, especialmente em ambientes domésticos. A implementação de soluções práticas e sustentáveis não apenas contribuirá para a preservação do meio ambiente, mas também promoverá uma maior responsabilidade do humano no que toca à gestão dos seus resíduos. Para além disso, como refere Sukholthaman e Shirahada (2015) quando a pessoa que recicla obtém benefícios diretos, existe maior probabilidade que o faça, mesmo que não se importe com questões ambientais.

A realidade é que não se pode esperar que todos compartilhem das mesmas preocupações, especialmente em contextos empresariais. Se não houver incentivos diretos que justifiquem a adoção de práticas mais sustentáveis, as empresas tenderão a escolher o caminho que seja economicamente mais vantajoso, que raramente é o mais ecológico.

## **1.3. Objetivos e contribuição da dissertação**

O objetivo desta dissertação é testar a viabilidade do filamento feito de garrafas de plástico, produzido por uma máquina que será desenvolvida e construída no âmbito deste projeto, testando protótipos fabricados por modelagem por deposição de material fundido (FDM), utilizando esse mesmo filamento. O estudo pretende avaliar a qualidade e o desempenho do filamento de politereftalato de etileno reciclado (rPET), bem como a eficiência da máquina na sua produção, promovendo uma solução sustentável para a reutilização de resíduos plásticos em impressões 3D. Como existem diferentes tipos de materiais de que são feitas as garrafas de plástico, e também porque cada material tem propriedades diferentes, optou-se por simplificar o equipamento e produzir apenas filamento com garrafas de PET, que é o material mais usado para produzir as garrafas e também por ser um material relativamente fácil de reciclar.

O projeto desenvolvido será divulgado em formato aberto, com os desenhos técnicos e lista de componentes em anexo, assim como os modelos digitais em formato SolidWorks. Isto permitirá alavancar futuros desenvolvimentos e adaptações.

#### **1.4. Visão geral e organização da dissertação**

Esta dissertação está organizada em três partes principais. A primeira parte consiste num estudo sobre as máquinas já existentes para a produção de filamento reciclado, os materiais mais utilizados e as técnicas associadas. Com base nesse estudo, foi projetada e construída uma máquina, priorizando a robustez, a redução de custos e a adaptabilidade para qualquer garrafa.

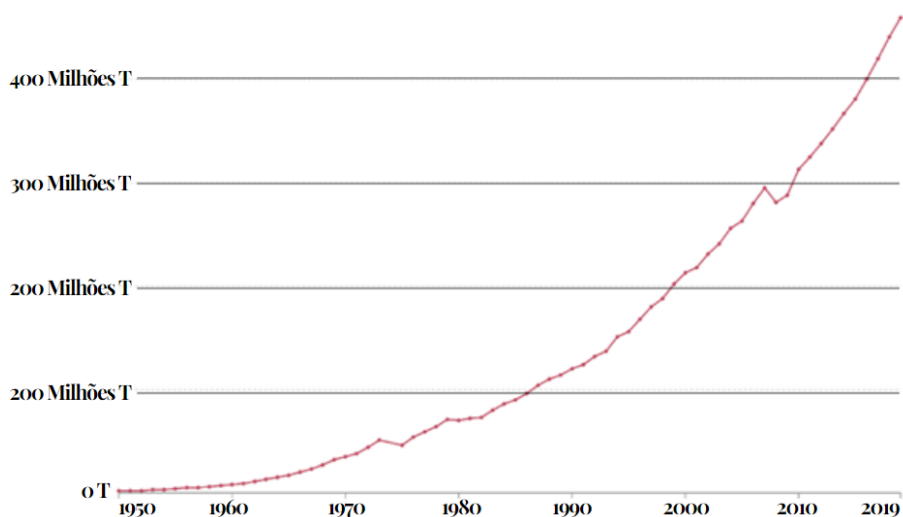
Na segunda parte, detalha-se o processo experimental para garantir que o filamento reciclado produzido pela máquina tivesse as medidas necessárias para ser utilizado em impressão FDM. Foram ajustados diversos parâmetros do processo para otimizar a qualidade do filamento. Para além disso foram feitos testes de calibração das configurações do fatiador para imprimir com a melhor qualidade possível.

Por fim foram realizados testes de tração a provetes impressos com filamento reciclado, com filamento comercial de politereftalato de etileno modificado com glicol (PETG), e ainda com provetes de politereftalato de etileno (PET). Estes testes permitiram comparar as propriedades mecânicas de ambos os materiais, considerando a resistência, deformação e módulo de elasticidade, com o objetivo de avaliar a viabilidade do uso de rPET em impressões 3D. A dissertação termina com uma análise comparativa dos resultados e sugestões para trabalhos futuros, assim como exemplos de possíveis peças produzidas com rPET.

## 2. Estado da Arte

### 2.1 Da produção à poluição do plástico

No início do século XX foram desenvolvidos novos tipos de materiais, um dos quais o plástico, que começou a ganhar mais importância e a ser usado nos mais diversos setores. Um dos aspetos que mais coloca em destaque o plástico é o económico, pois é possível confeccionar os mais diferentes artigos e objetos com um custo muito reduzido comparado ao custo estipulado se fosse feito de outro material qualquer. Combinado com o preço, fica destacado também por ser impermeável e mesmo com um peso bastante baixo ainda consegue apresentar uma boa resistência. Tudo isso contribuiu para que nos últimos 70 anos o crescimento da produção de plástico tenha aumentado acentuadamente. Em 1950, a produção global limitava-se a 2 milhões de toneladas. Como podemos ver na Figura 1 em 2019, esse número disparou para além de 450 milhões de toneladas (Ritchie et al, 2023).



**Figura 1.** Produção global de plásticos (Ritchie et al, 2023), adaptado.

Paralelamente, no cenário económico recente e segundo a *Plastics Europe* (2023), o valor das exportações de plásticos em formas primárias chegou aos 7,9 mil milhões de euros no primeiro trimestre de 2023, representando uma queda de 0,2 mil milhões de euros em comparação com o trimestre anterior, sendo a Ásia o continente que apresentou as maiores diferenças de valores.

Os plásticos têm um extremo impacto em vários âmbitos das nossas vidas, seja o social como o económico. Porém podem ter efeitos negativos e graves no ambiente e na

saúde humana se não se conseguir tomar medidas para combater a poluição que este material provoca.

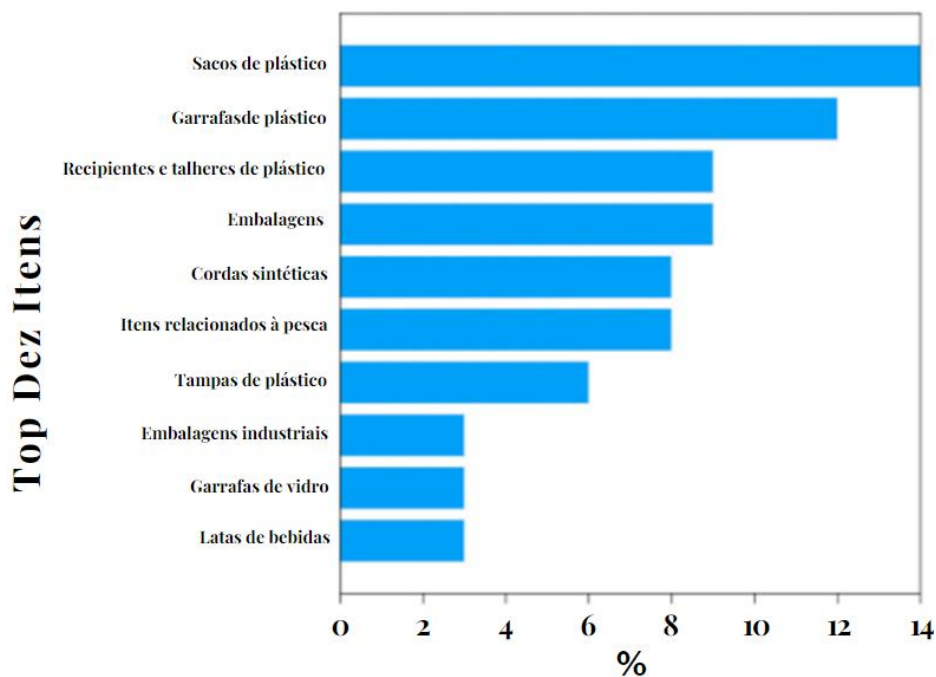
A produção em massa de plásticos vai também resultar numa quantidade alarmante de resíduos. Como era de esperar, com o número impactante do volume da produção, o número correspondente de resíduos é igualmente substancial. De acordo com a Comissão Europeia, quase 26 milhões de toneladas de resíduos plásticos são produzidos na Europa todos os anos (European Commission, 2023).

A solução para o problema não reside na interrupção da produção de plástico, mas sim na implementação de um controlo mais eficaz e assegurar sempre que possível a sua reintegração em novos ciclos de utilização. Atualmente, um dos principais problemas relacionados ao uso de produtos fabricados com plástico reside no seu fim de vida, uma vez que na maioria das vezes são descartados no meio ambiente. São aproximadamente 1 a 2 milhões de toneladas de plástico que acabam anualmente nos nossos oceanos, com impacto direto na vida selvagem e nos ecossistemas marinhos (Ritchie et al,2023).

Analisada a problemática dos plásticos na generalidade, deve-se reconhecer a diversidade de produtos que são produzidos e saber os que mais poluem. Devido a essa diversidade e ao diferente intervalo de tempo que decorre até ao descarte do produto, torna-se evidente a necessidade de uma abordagem personalizada para cada tipo de produto plástico.

### **2.1.1. Impacte ambiental das garrafas de plástico**

Como foi destacado por Morales-Caelles et al (2021) os 10 tipos de produtos mais comuns encontrados nos oceanos são responsáveis por três quartos de todos os itens de lixo encontrados globalmente. Como é evidenciado pelo segundo lugar no gráfico da Figura 2, torna-se obrigatório encontrar soluções eficazes para evitar que as garrafas de plástico contribuam para a poluição dos oceanos e a acumulação em aterros. Assim, a implementação de métodos de reciclagem específicos para esse tipo de objeto emerge como uma necessidade, que sublinha a importância deste estudo.



**Figura 2.** Os dez tipos de lixo mais encontrados nos oceanos (Morales-Caselles et al, 2021), adaptado

Analisando o gráfico dos 10 itens mais encontrados nos oceanos, é possível ver que os sacos e as garrafas de plástico têm uma característica em comum. Ambos são produtos de baixo custo, frequentemente descartados depois de um único uso, muitas vezes após apenas alguns minutos de utilização (OceanCare, 2022).

Para além de toda a poluição e problemas associados, a utilização excessiva e inconsciente deste tipo de produtos descartáveis vai ainda afetar fortemente a economia. Segundo o relatório “The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics” (2016) publicado pela fundação Ellen Macarthur, 95% do plástico utilizado nas embalagens é eliminado após uma utilização, que representa perdas de até 120 mil milhões de dólares por ano.

A produção de garrafas de plástico é enorme, porém quando isso se traduz em dados e estatísticas, o problema parece aumentar exponencialmente. Laville e Taylor (2017) afirmam que o consumo mundial de garrafas plásticas é de um milhão por minuto e que esse ritmo de consumo é tão perigoso quanto as mudanças climáticas. Em 2016, foram vendidas 480 mil milhões de garrafas de plástico, um aumento significativo em comparação com os 300 mil milhões vendidos uma década antes, e foi previsto que em 2021 o valor aumentasse para 583,3 mil milhões, como se pode constatar na

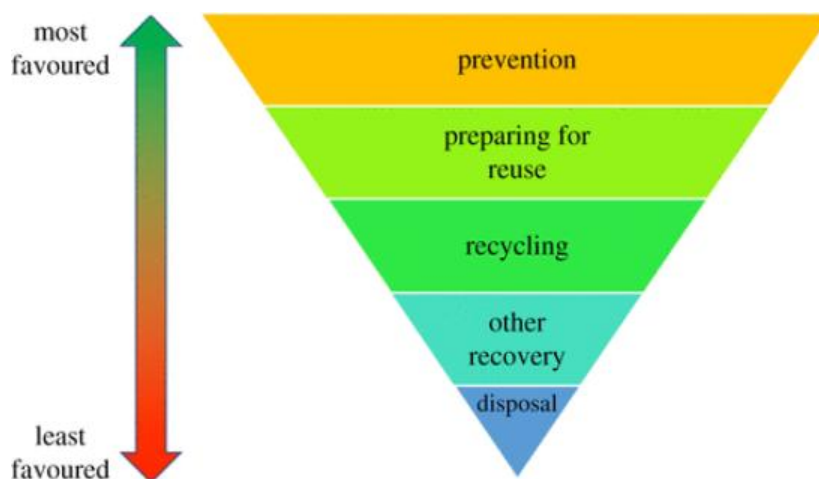
Figura 3 (Laville & Taylor, 2017). A maioria das garrafas de plástico usadas para refrigerantes e água são feitas de PET, um plástico altamente reciclável.



**Figura 3.** Produção global de garrafas de plástico (The Guardian, 2017).

Segundo o relatório “The New Plastics Economy: Catalysing action” (2017) publicado pela fundação Ellen Macarthur, mais de quatro décadas após a introdução do primeiro símbolo universal de reciclagem, apenas 14% das embalagens plásticas são efetivamente recolhidas para reciclagem. O que difere muito dos valores associados à reciclagem do papel e do ferro, respetivamente 58% e 70 a 90%.

A maioria do plástico recolhido no mundo para reciclagem vai para aterros sanitários, que é sem dúvida uma opção melhor do que acabar descartado na natureza. Existem inúmeras regulamentações quanto às proteções ambientais que fazem com que o plástico nos aterros não represente um risco significativo para a contaminação do ecossistema. No entanto, é preciso considerar que apenas resolvemos um dos problemas (Nace, 2017). É por isso preciso seguir uma hierarquia da Gestão de Resíduos, que é apresentada com o esquema da Figura 4.



**Figura 4.** Hierarquia da gestão de resíduos (Bucknall, D., 2020).

No nível 1, focamos na prevenção, reduzindo a produção inicial de resíduos através da escolha de garrafas não descartáveis. No nível 2, a preparação para reutilização envolve a recuperação e transformação de resíduos para futuras utilizações, quer seja para usar para o propósito inicial do produto como é o caso de lavar e voltar a encher uma garrafa de água ou por exemplo para criar um objeto de decoração. O nível 3 abrange a reciclagem, que

converte materiais descartados em matéria-prima para criar produtos. No nível seguinte, aproveitamos os resíduos não recicláveis para criar energia. A última opção, é enviar os resíduos para aterros sanitários, que obviamente é a opção a ser evitada sempre que possível. Esta hierarquia destaca a importância de priorizar práticas sustentáveis em todas as fases do ciclo de vida dos materiais.

A reciclagem é normalmente considerada a solução para este grande problema, mas assim como defende a Ocean Care (2022) é muitas vezes uma falsa solução. Como abordado anteriormente, os aterros sanitários têm a seu favor o facto de conseguirem conter o plástico fora dos ecossistemas, mas por outro lado ocorre o chamado *downcycling*, pois a qualidade do plástico diminui quando é reciclado, e para além disso existem inúmeros tipos de plástico com diferentes propriedades que dificultam o processo da reciclagem. Felizmente o PET é uma exceção, mas mesmo aqui não existe um ciclo fechado pois o mais comum é usar garrafas antigas e produzir novas, e nesse processo é frequentemente adicionado plástico virgem (Ocean Care ,2022).

Segundo Bucknall (2020), o ciclo de vida da maioria dos plásticos segue uma abordagem de economia linear, em que como já foi referido, o plástico é produzido, utilizado uma vez e descartado. É nesta fase que se encontra a origem de todos os problemas relacionados. Por outro lado, as estratégias que previnem os danos ambientais provocados pelos plásticos de uso único, começam por evitar que estes entrem no meio ambiente, e para isso inclui-se estratégias de reutilização e recuperação dos recursos que este material ainda tem para oferecer.

Atualmente, consegue-se compreender que a solução para superar esse desafio não está apenas na reciclagem, uma vez que não se consegue remover o plástico dos oceanos na mesma proporção em que são introduzidos. Enterrar esses resíduos não se mostra como uma solução eficaz a longo prazo, e a incineração é considerada um desperdício, além de ser um processo altamente poluente. Com isto, torna-se imperativo abordar esse problema de maneira inovadora. Além de se enfrentar o desafio da crescente produção, é crucial direcionar esforços para impedir a geração excessiva de resíduos e reintegrá-los eficientemente na economia. A solução reside na implementação da economia circular. (Woolven, 2021).

### 2.1.2. Economia circular na Gestão de Resíduos

Antes de falar especificamente na economia circular aplicada ao tema, é importante saber no que se baseia este conceito. Nos últimos anos, o conceito de economia circular tem sido bastante abordado e é um assunto dominante nos mais diversos âmbitos da sociedade.

Assim como é visível a partir da página oficial do Parlamento Europeu (2023), é um modelo de produção e de consumo que envolve a reutilização, renovação e a reciclagem de um material, para assim conseguir aumentar o seu ciclo de vida. Assim sendo, é previsto reduzir ao máximo desperdícios e resíduos.



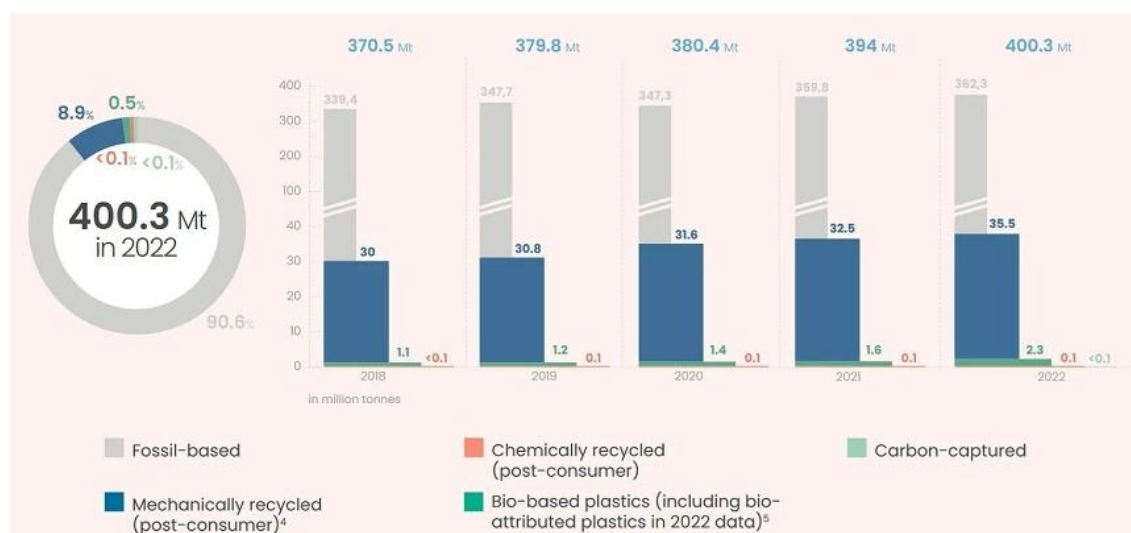
**Figura 5.** Ciclo da Economia Circular (Parlamento Europeu, 2024).

Como se pode ver na Figura 5 não é apenas considerado o fim de vida do produto, mas sim todo o seu tempo de uso. Esta abordagem não é apenas direcionada para a resolução do problema de poluição, mas também oferece benefícios económicos e sociais. Segundo a Fundação Ellen MacArthur (2024), até 2040, a economia circular tem o potencial de:

- Reduzir em 80% o volume anual de plásticos que se encontram nos oceanos;
- Reduzir em 25% as emissões de gases de efeito estufa;
- Gerar uma economia de 200 mil milhões de dólares americanos por ano;
- Criar 700 mil novos postos de trabalho.

Como é dito também pela Fundação Ellen MacArthur (2024) para se conseguir aplicar este tipo de estratégias nos plásticos, são necessárias três ações principais. A primeira é eliminar produtos de plástico desnecessários, o que implica rever e redesenhar produtos para reduzir a quantidade de plástico usando para isso alternativas e materiais mais sustentáveis. De seguida, e por meio de avanços em pesquisas e tecnologia, devem-se desenvolver plásticos reutilizáveis, recicláveis ou compostáveis que sejam mais eficientes e mais amigos do ambiente. É de extrema importância focar na criação de produtos que sejam facilmente recicláveis e que apresentem longa durabilidade, porque no fim do ciclo de vida também se gasta menos energia para o reciclar. Por último, a circularidade dos plásticos envolve manter esses materiais em uso constante, para evitar que se tornem resíduos. Consegue-se alcançar este objetivo promovendo a implementação de sistemas eficazes de recolha, triagem e reciclagem. Com esta medida mantém-se a circularidade do plástico na economia.

Como se pode observar no gráfico da Figura 6, em 2022, a produção mundial de plásticos atingiu os 400,3 milhões de toneladas, o que sugere um aumento relativamente ao ano anterior. No entanto, como constatado pela associação Plastics Europe (2023), o mais notável é que, proporcionalmente, a produção de plásticos circulares teve um crescimento 16 vezes maior do que a de plásticos de origem fóssil, atingindo assim quase 10% da produção global.



**Figura 6.** Produção mundial de plásticos em 2022 (Plastics Europe, 2023).

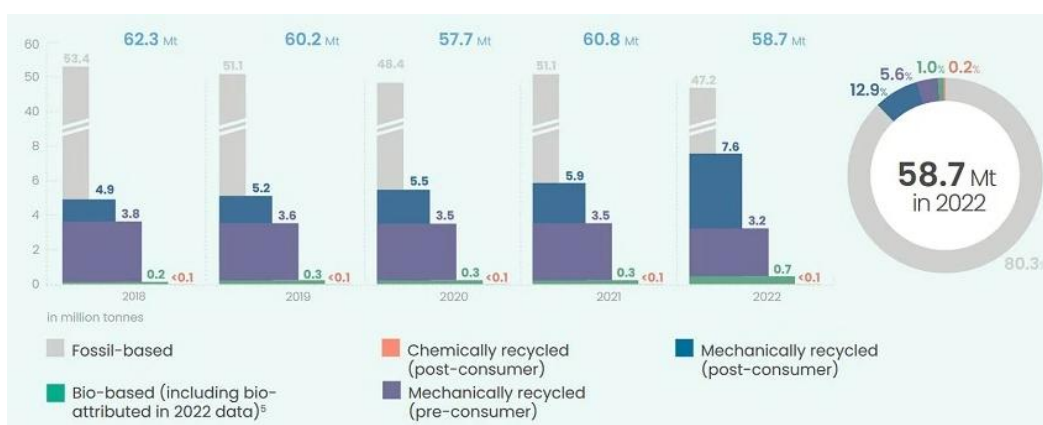
Se se considerar apenas a análise do mercado europeu, a situação da circularidade é ainda mais positiva. Devido a todas as medidas adotadas na Europa, a produção de plásticos de base fóssil está em declínio, na medida que a produção de plásticos circulares aumentou

29,2% desde 2018, alcançando uma quota de 19,7% da produção global de plásticos na Europa em 2022.

Pode-se constatar que a produção de plásticos na Europa é composta por quatro tipos principais:

- Plásticos fósseis, que são produzidos a partir de combustíveis fósseis, como o petróleo e o gás natural. Os plásticos fósseis são os mais comuns na Europa, representando 80,3% da produção total;
- Os plásticos reciclados mecanicamente, que incluem tanto os de pré-consumo quanto os de pós-consumo, constituem 18,5% da produção total. Esse tipo de plástico passou por um processo de reciclagem mecânica, uma abordagem simples e económica que converte resíduos plásticos em novos produtos;
- Os plásticos reciclados quimicamente representam 0,2% da produção total e estes são plásticos que foram reciclados usando um processo químico, mais complexo e mais caro em relação aos reciclados mecanicamente, porém permite a reciclagem de produtos mais complexos e obter maior qualidade;
- Os bioplásticos são materiais derivados de fontes renováveis, como biomassa vegetal, que podem oferecer uma alternativa mais sustentável aos plásticos tradicionais derivados do petróleo. O crescimento da produção de bioplásticos é um sinal positivo.

A produção de plásticos fósseis na Europa diminuiu ligeiramente em 2022, enquanto que a produção de plásticos reciclados mecanicamente e quimicamente aumentou. É uma tendência positiva, pois é um sinal que se começam a usar mais os métodos da economia circular (Plastics Europe, 2023).



**Figura 7.** Produção de plástico na Europa em 2022 (Plastics Europe,2023).

Após discutir a economia circular como uma solução para combater a poluição causada pelos plásticos, é crucial destacar o papel dos governos na promoção de práticas mais sustentáveis. No blog Thirdview (2023) referem programas de reciclagem subsidiados que oferecem às empresas medidas vantajosas por adquirirem material reciclado em vez de material novo quando fabricam os seus produtos.

Outra forma de garantir esse tipo de práticas é aplicando penalizações a quem não as cumpre. Por exemplo, em janeiro de 2021, entrou em vigor o imposto Europeu sobre Plásticos, “*Plastics Own Resource*”, que aplica uma taxa de 0,80 euros por quilograma de plástico não reciclado pelos Estados-Membro da União Europeia (Comissão Europeia , 2023).

Como discutido anteriormente, as garrafas de plástico são o segundo produto mais encontrado nos oceanos, e por isso é necessário encontrar soluções que consigam combater a tendência que este produto tem em acabar nos oceanos.

## **2.2. Introdução à Impressão 3D**

O aumento da eficiência, a redução de custos e o estímulo à inovação são algumas das razões pelas quais muitos estão entusiasmados com o impacto que a impressão 3D vai ter no futuro. No entanto, a verdade é que já teve um impacto significativo na indústria e cada vez mais começa a ser normal usar esta tecnologia para uso pessoal.

Era comum falar-se no fabrico subtrativo, até que na década de 1980 foi proposta uma nova forma de fabricação industrial, o fabrico aditivo. A diferença, tal como diz o próprio nome, é que o subtrativo remove material de um bloco maciço e o aditivo começa do zero, e vai adicionando material camada por camada. Por referência às impressoras de jato de tinta que havia na altura, essa forma inovadora de fabrico apelidou-se de impressão 3D, já que ambas envolvem o processo de criar uma imagem/objeto, camada por camada (Matias & Rao, 2015).

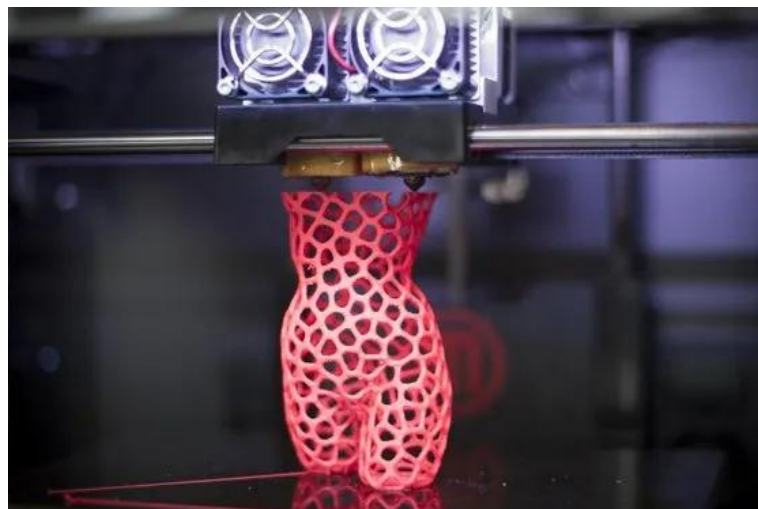
O fabrico aditivo, ou impressão 3D tem todo o potencial para revolucionar a indústria. Com esta tecnologia é possível criar um protótipo digital e produzi-lo com uma boa tolerância dimensional e geométrica, e o mais notável é que pode ser feito de forma rápida e relativamente barata em relação aos outros métodos de prototipagem (Gibson et al, 2015).

### 2.2.1 Tipos de tecnologias de impressão 3D

A tecnologia Modelação de Deposição Fundida (FDM), desenvolvida e implementada por Scott Crump, fundador da Stratasys Ltd., na década de 1980, é uma das técnicas mais usadas para uso pessoal. Nesse método, os objetos são construídos camada por camada, de baixo para cima, utilizando filamentos de diversos tipos de materiais. Durante o processo, a impressora aquece o filamento até ao seu ponto de fusão e através de uma extrusora vai sendo sobreposto camada por camada na base de impressão, seguindo um caminho calculado. O software da impressora traduz as dimensões do objeto em coordenadas tridimensionais X, Y e Z que indicam os movimentos dos seus eixos (3dprintingfromscratch, 2015).

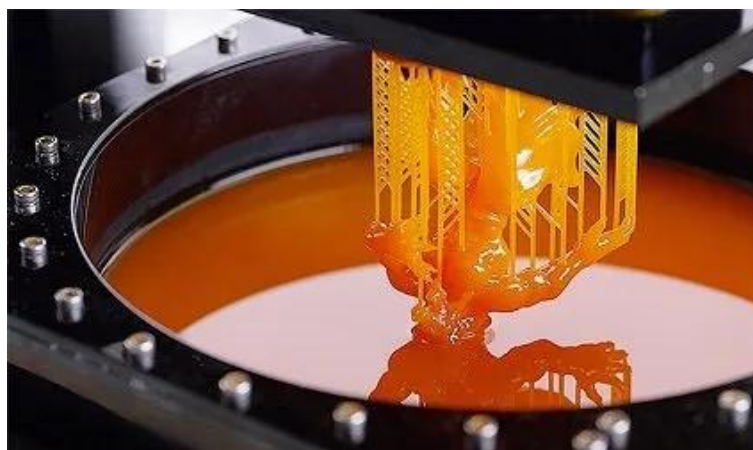
Dependendo do modelo da impressora, a base ou a extrusora ou ambos deslocam-se em 3 dimensões durante a extrusão, permitindo a sobreposição das camadas entre si com grande precisão. Quando a próxima camada é depositada, o calor permite a ligação molecular com a camada anterior. Depois de arrefecer com a ajuda de pequenos ventiladores incorporados, o objeto fica rígido e vai criando assim uma peça tridimensional. Esta tecnologia produz objetos com geometrias complexas a partir de um desenho digital, sem utilizar moldes ou outras técnicas industriais convencionais (Awad et al, 2018).

A maioria das impressoras permite configurar a temperatura de extrusão. Assim sendo, uma impressora FDM pode ser usada para imprimir diferentes tipos de materiais termoplásticos, que conferem diferentes propriedades mecânicas e térmicas aos produtos impressos (Awad et al, 2018). Um exemplo de uma impressão com essa tecnologia é a da Figura 8.



**Figura 8.** Exemplo de impressão por FDM (Zeal 3D, 2017).

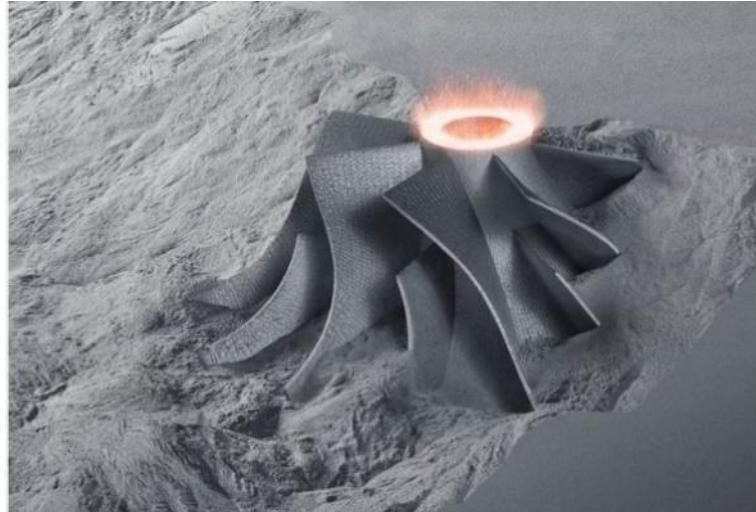
A estereolitografia (SLA) envolve o uso de uma resina sensível à luz e lasers para imprimir objetos tridimensionais. O equipamento tem uma plataforma de construção que se move para cima e para baixo. A resina solidifica quando exposta a uma determinada frequência de luz e por isso usa lasers ajustados para essa mesma frequência. O processo consiste em movimentos repetidos, construindo camada por camada à medida que as camadas vão sendo solidificadas com os lasers (Sam, 2017). Na Figura 9 é possível ver uma peça fabricada por estereolitografia.



**Figura 9.** Exemplo de impressão por SLA (Zeal 3D, 2017).

Uma grande vantagem desta técnica de impressão é conseguir fabricar geometrias mais complexas e com maior pormenor. Isto deve-se à presença constante da resina na impressão e por permitir uma altura de camada que pode atingir os 0,025 mm (Griffey, 2014).

A técnica de impressão que consegue maior detalhe em relação às anteriores, mas que conseqüentemente é mais dispendiosa, é a sinterização seletiva a laser (SLS). É semelhante à estereolitografia, pois utiliza lasers para aquecer e sintetizar um substrato solto. No entanto, na SLS, o material de impressão é um pó, e são utilizados lasers de alta energia em vez de ultravioleta, como pode ser visto na Figura 10. As impressões são concluídas camada por camada, exatamente como nas outras tecnologias de impressão abordadas anteriormente, exceto que o produto final é um objeto sólido desenhado por lasers, envolvido no pó que não foi fundido que é depois manualmente retirado (Sam, 2017). É possível usar qualquer material desde que possa ser pulverizado e fundido com calor, incluindo a maioria dos termoplásticos (Griffey, 2014).



**Figura 10.** Exemplo de impressão por SLS (Zeal 3D, 2017).

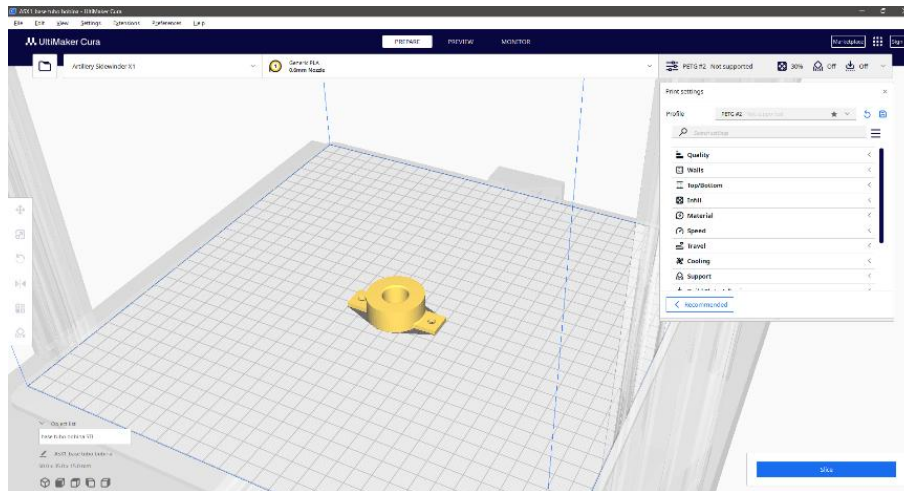
Embora a impressão FDM seja, de longe, o método de impressão 3D mais acessível ao consumidor final, há estas e outras técnicas de fabrico aditivo que vão depois apresentar resultados diferentes. Como neste trabalho apenas será abordada a produção do filamento usado neste tipo de tecnologia, sempre que for referido impressão 3D será aplicado à impressão FDM.

Podemos ver na Figura 11 a mesma peça feita pelas 3 tecnologias diferentes e perceber a diferença da qualidade do acabamento. Há que ter em conta que a qualidade vai sempre depender da gama do equipamento utilizado.



**Figura 11.** A mesma peça feita pelas 3 tecnologias diferente (Zeal 3D, 2017).





**Figura 13.** Peça no UltiMaker Cura.

A última etapa será então passar esse código para a impressora 3D e imprimir. Para isto deve-se inserir o material de impressão, que foi previamente selecionado, e carregar o *G-code* que inclui as configurações adequadas ao trabalho que se pretende realizar. Após iniciar o trabalho de impressão, resta aguardar a produção da peça (Wang et al, 2020). Na Figura 14 pode ser vista a peça já concluída.



**Figura 14.** Peça feita em PETG.

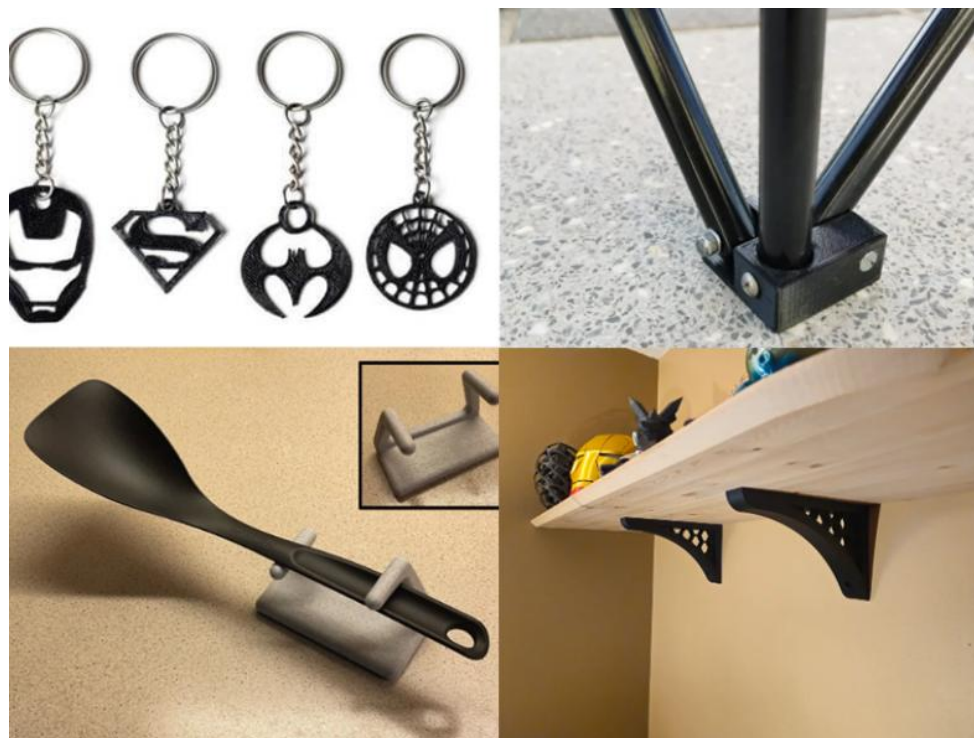
### **2.2.3. Crescimento da impressão 3D no setor doméstico**

Como anteriormente destacado, a impressão 3D teve as suas origens há algumas décadas. Como mencionado por Savini, A. e Savini, G. (2015), até ao início dos anos 2000 essa tecnologia era predominantemente utilizada em setores industriais para prototipagem, mas em meados de 2005 surgiram iniciativas para disponibilizar impressoras acessíveis para

uso pessoal. No mesmo ano, a Universidade de Bath realizou um projeto para desenvolver uma impressora 3D com uma particularidade que despertou uma nova tendência. O nome do projeto era Rep Rap (*Replicating Rapid prototyping*) e esta impressora era constituída por 3 eixos e usando filamento fundido tinha de conseguir imprimir um número significativo das peças que compunham a própria impressora (Jones et al, 2011). O software e o hardware eram de código aberto, incluindo a eletrónica. Outras iniciativas semelhantes ocorreram, e todas com o objetivo de que qualquer pessoa construísse a sua própria impressora e experimentasse vários designs e materiais, o que desencadeou uma nova onda de invenções na comunidade de impressão 3D, que passou de ser apenas uma tecnologia usada na indústria para ser usada na casa do utilizador comum. Com base nisto começaram então a vender-se kits que permitiam a qualquer pessoa com apenas habilidades técnicas básicas fazer uma impressora de fabrico aditivo (Savini, A. & Savini, G., 2015).

Como é referido por Savini, A. e Savini, G. (2015) pode haver uma nova revolução industrial, caracterizada pela produção cada vez mais conduzidas em pequenas fábricas ou mesmo em casa, graças às impressoras 3D, algo que nos dias de hoje é já bastante comum. Devido ao baixo custo de muitas impressoras FDM, muitos utilizadores começaram a adquirir este tipo de equipamento somente para uso próprio e sobretudo para imprimir componentes para substituir e reparar itens de uso diário ou mesmo para criar objetos de decoração ou presentes personalizados (Jain, P. K., & Jain, P. K , 2021).

Na Figura 15, é possível ver o potencial da impressão 3D no setor doméstico. Um dos exemplos são os porta-chaves personalizados, uma peça simples e rápida de imprimir. É possível tirar proveito da impressão 3D para criar objetos para substituir alguma peça danificada e manter, neste caso a cadeira, com um aspeto novo. Um exemplo de uma peça pratica é o suporte para os utensílios de cozinha, um produto que não precisa de ser feito com materiais muito resistentes. No entanto, a impressão 3D não é algo frágil, sendo possível produzir suportes de prateleiras. Qualquer um destes itens pode ser encontrado no website “Printables”.



**Figura 15.** Exemplos de peças disponibilizadas prontas a imprimir (Printables, 2024).

Neste tipo de plataformas online são disponibilizados vários modelos de peças criadas por outros utilizadores e é apenas necessário fazer o download gratuito do ficheiro STL e imprimir. Ou se no caso de o utilizador precisar de uma peça específica pode sempre desenhar a peça num software CAD e posteriormente imprimir.

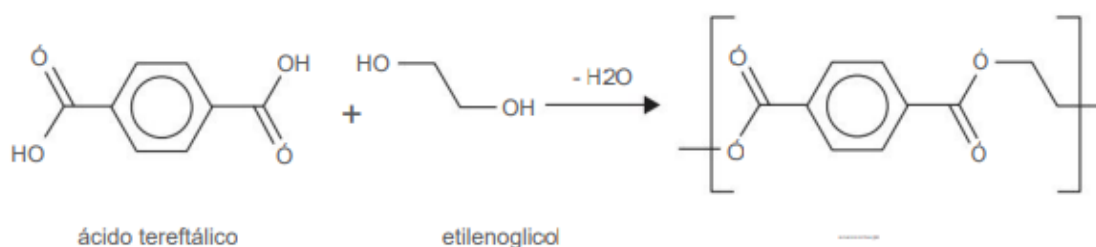
Estas impressoras têm a capacidade de utilizar uma variedade de filamentos, desde os mais resistentes até aos mais flexíveis. Contudo, se o objetivo é contribuir para um mundo mais sustentável, é importante optar, sempre que possível, por filamentos ecológicos. Dentre eles, o PET, destaca-se como uma escolha viável, dada a sua altíssima reciclabilidade. É importa ressaltar que, dependendo da finalidade da peça a ser produzida, o PET pode não ser a opção mais indicada, mas ainda assim permanece como um material a ser considerado.

### **2.3. Fundamentos do PET e derivados**

A abreviatura PET ou PETE significa politereftalato de etileno e foi desenvolvido em 1941 usado inicialmente em fibras sintéticas pela British Calico Printers. Não demorou muito até a DuPont e a ICI comprarem a patente, e posteriormente venderem os direitos a diversas empresas. Com isto, o PET deixou de ser utilizado exclusivamente para a produção de fibras e a partir de meados da década de 1960 passou a ser utilizado na fabricação de filme usado para empacotar. Nos anos 70, com a técnica de sopro começou a usar-se o PET para fabricar

garrafas, primeiramente de refrigerantes e logo depois expandiram o conceito para engarrafar água (Welle, 2015).

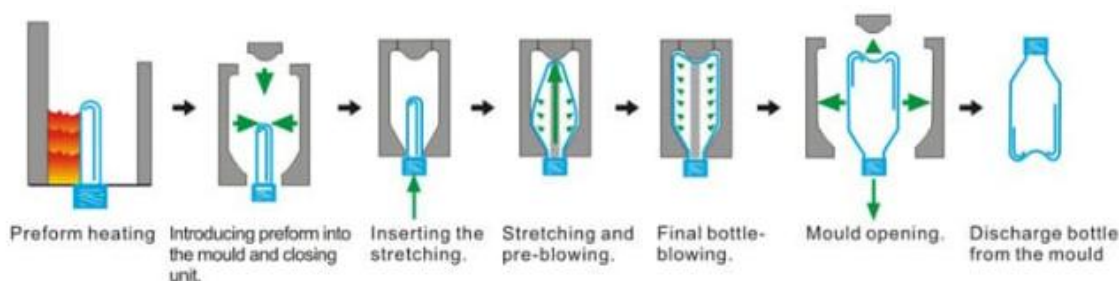
O PET é fabricado a partir de ácido tereftálico e etilenoglicol. Essas duas substâncias reagem e formam longas cadeias poliméricas. Na Figura 16 é apresentada a sua estrutura e a equação química.



**Figura 16.** Estrutura e equação química do PET (Welle, F., 2015).

É um material bastante usado pela sua resistência, por ser incolor e pelo seu baixo peso. As garrafas são compostas por este material devido às características referidas que facilitam o seu transporte e posteriormente leva a uma redução de custos perante o consumidor final.

Geralmente, as garrafas PET são fabricadas em duas etapas. A resina de PET é fundida a cerca de 280°C para criar uma forma semelhante a um tubo de ensaio que foi previamente projetada para assumir um formato e espessura específica, enquanto que o gargalo já está na sua forma final. No final desta etapa tem-se a pré-forma. Na segunda etapa esta pré-forma é aquecida num forno a cerca de 110°C para amolecer e ganhar elasticidade. Para ganhar a forma final, o tubo de ensaio é termoformado a sopro e logo de seguida arrefecido para garantir que mantém a forma obtida, tal como é mostrado na Figura 17 (Welle ,2015).



**Figura 17.** Fabricação de garrafas PET (Engenharia 360, 2022).

Como mencionado pelo Dr. Frank Welle (2015), o PET é um dos plásticos mais recicláveis do mundo, podendo ser reciclado para criar novas garrafas, fibras PET ou outros tipos de embalagens.

Em 1991, foi aprovado nos Estados Unidos da América o primeiro processo de reciclagem de PET pós-consumo em aplicações de contacto direto com alimentos (Welle, 2011). Depois desse marco importante tudo mudou e devido ao aumento da conscientização pública sobre a importância da reciclagem, a implementação de sistemas melhorados de recolha de resíduos em vários países e o investimento em infraestruturas de reciclagem, fez com que o valor da taxa de reciclagem aumentasse.

Existem alguns métodos de reciclagem, porém todos começam com a mesma etapa, recolher e separar os resíduos. Para facilitar a separação dos resíduos, as embalagens de PET contém o símbolo apresentado na Figura 18.



**Figura 18.** Classificação de produtos PET (Welle, F., 2015)

Após a separação, os resíduos de PET podem ser submetidos a diferentes processos de reciclagem, dos quais os principais são:

- A reciclagem química, que abrange um conjunto de tecnologias que alteram a estrutura química dos resíduos plásticos. As cadeias de hidrocarbonetos são quebradas em frações mais curtas de hidrocarbonetos ou monómeros usando processos químicos, térmicos ou ambos. Essas moléculas mais curtas são depois usadas como matéria-prima para novas reações químicas para produzir novos plásticos reciclados (Plastics Europe, 2023);
- A reciclagem mecânica, que processa os resíduos sem alterar a sua estrutura química, criando assim a matéria-prima. O processo começa com a trituração, onde se reduz as garrafas a pequenos pedaços, que posteriormente são limpos e descontaminados. São novamente submetidos a uma segunda triagem para depois serem enviados para uma extrusora onde

os flocos de plástico são convertidos em *pellets* homogêneos, prontos para uso na fabricação de novos produtos (Plastics Europe, 2023).

No presente trabalho, será apresentado um método para reciclar garrafas PET, que apesar de seguir um processo de reciclagem mecânica, destaca-se pela ausência da trituração convencional, proporcionando uma simplificação do processo, redução do consumo de energia e ainda uma diminuição do preço da máquina.

### **2.3.1. Tipos de filamentos PET**

A influência da espessura das camadas, orientação do filamento, temperaturas e velocidades da impressão na qualidade das peças impressas destaca a complexidade dos requisitos da Modelação por Deposição Fundida (FDM). Para se obter um bom resultado quando se imprime uma peça, não basta adquirir um bom equipamento. Um elemento fundamental é o filamento e a sua qualidade. É por isso bastante importante passar ao tema seguinte: os diversos filamentos utilizados na impressão 3D e a origem do material do próprio filamento (Kristiawan et al, 2021).

Há uma variedade de filamentos disponíveis no mercado. Alguns deles possuem características semelhantes, outros variam entre si. O trabalho presente foca apenas nos que contém PET. Existem várias variantes de filamentos com esse material para impressoras 3D, cada uma com as suas próprias características e aplicações. Além do PET existe o politereftalato de etileno modificado com glicol (PETG) e o politereftalato de etileno reciclado (rPET) assim como outros filamentos mais complexos que usam fibras e outros componentes que lhe conferem características distintas.

A composição do filamento PET é baseada na estrutura polimérica resultante da reação de esterificação entre o etilenoglicol e o ácido tereftálico. Esse processo forma uma cadeia polimérica de poliéster, com a presença de unidades aromáticas repetidas. O teor de etileno confere ao PET a sua incoloração, enquanto a alta percentagem de unidades aromáticas contribui para sua resistência e tenacidade (Xometry, 2022).

O PETG é uma modificação do PET com a adição de glicol, que resulta num ponto de fusão mais baixo e também por isso é mais fácil conseguir bons resultados no momento de imprimir. Para criar este material geralmente é estendida a polimerização do PET e é incorporado o glicol durante essa mesma etapa (Valvez et al, 2022). O PETG incorpora diversas propriedades mecânicas notáveis, maior flexibilidade e maior resistência ao impacto em comparação com o PET padrão. Tal como o PET, o PETG também é um material

sustentável já que segundo o estudo de viabilidade da reciclagem de resíduos e erros de impressão 3D do plástico PETG conduzido por Bremer et al, (2022), foi constatado que esses resíduos são apropriados para reciclagem e produção de novo filamento.

O rPET é obtido a partir da reciclagem de PET e apresenta características distintas que o tornam uma opção sustentável e interessante para diversas aplicações, especialmente quando comparado aos filamentos de PET e PETG. Para além disso, estudos comprovam que ao usar polímeros reciclados, o consumo de energia baixa até 84% e as emissões de gases com efeito de estufa até 74% (Rashwan et al, 2023).

### **2.3.2. Sustentabilidade e Ciclo de vida dos filamentos PET**

Ao contemplar a relevância de práticas ambientais conscientes como a reciclagem e a reutilização, não se pode esquecer que assim como o plástico usado noutras aplicações, os filamentos utilizados nas impressoras também apresentam desafios ambientais. Assim sendo e como também já foi discutido para todos os outros resíduos plásticos, a solução para a ecologia não reside no deixar de produzir, mas sim em aplicar uma economia circular.

Como o uso desta tecnologia é cada vez maior, a urgência de integrar a sustentabilidade no processo cresce, sempre com o objetivo de mitigar os impactes ambientais provocados durante todo o processo de imprimir uma peça (Kumar et al, 2022).

Para verificar se uma tecnologia ou um processo é sustentável a análise do ciclo de vida é uma ferramenta fundamental. Essa análise funciona como uma ferramenta para assegurar a viabilidade e pertinência de novas tecnologias, permitindo a avaliação dos seus benefícios em relação aos métodos tradicionais, neste caso, se o fabrico aditivo pode vir a ser vantajoso em relação ao fabrico tradicional. Esta avaliação ajuda a encontrar oportunidades para reduzir o impacte ambiental da impressão 3D, utilizando materiais sustentáveis, melhorando a eficiência da impressão e reciclando da melhor forma os resíduos finais (Motalebi et al, 2024).

No estudo conduzido por Kumar et al (2022), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi aplicada para avaliar os impactes ambientais associados a produtos fabricados por impressão 3D utilizando PLA, PETG e ABS, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma ISO 14040. A análise concluiu que, em todos os parâmetros considerados, o material PETG demonstrou ser o mais ecológico e sustentável. Embora o PETG tenha sido considerado o mais sustentável, há sempre potencial para melhorar, e uma solução do que toca a materiais derivados do PET, é usar o rPET como será estudado ao longo desta dissertação.

### **2.3.3. Reciclagem e a sua complexa logística**

Com o objetivo de agir de maneira consciente e sustentável na impressão 3D durante a aquisição de filamentos, é obrigatório escolher filamentos de fácil reciclagem. Após a utilização dos produtos impressos, é essencial depositá-los num recipiente designado exclusivamente para esse material para mais tarde ser reciclado. O mesmo princípio é aplicado aos resíduos e desperdícios criados durante o processo de impressão. A seleção cuidadosa do tipo de filamento desempenha um papel importante na promoção da economia circular desses materiais (Zhu et al, 2021).

No mercado, estão disponíveis diversos materiais, e cada um deles possui vantagens e desvantagens, mas este trabalho concentra-se na reciclagem e em preservar o ambiente, por isso, e como é mencionado pela Team Xometry (2022), o PET destaca-se, uma vez que é 100% reciclável, o que lhe confere uma característica especial.

Segundo uma publicação no site ALL3DP, escrita por Jones (2023), apesar da semelhança química entre o PETG e o PET, o primeiro é geralmente excluído dos programas de reciclagem, embora seja reciclável. Na verdade, o PETG é um contaminante durante os processos de reciclagem do PET, pois a similaridade dificulta a sua distinção e separação. Essa combinação resulta num ponto de fusão mais baixo e uma estabilidade térmica fora das especificações, o que vai causar variações indesejáveis que na maioria dos casos vai fazer com que acabe na incineração.

Uma abordagem ainda mais vantajosa do que escolher materiais virgens sustentáveis é adquirir, preferencialmente, filamentos reciclados. Essa opção não apenas contribui para a redução do impacto ambiental ao utilizar recursos reciclados, mas também fomenta o ciclo sustentável dos materiais, alinhando-se a princípios de economia circular.

Diversas pesquisas exploraram o potencial do filamento reciclado usado na impressão 3D, apresentando resultados promissores. Por exemplo, Shen et al (2016) e Sadhukhan (2022) concluíram que os filamentos reciclados demonstraram desempenhos comparáveis aos filamentos virgens em termos de propriedades mecânicas, o que torna esta opção bastante viável. No entanto não é assim tão linear, porque para além dos resultados que se obtém a nível do filamento, também é necessário ter em conta as consequências de todo o processo de reciclagem de filamento, desde a recolha de resíduos plásticos até à entrega do produto final na casa do consumidor. Por vezes é preciso fazer uma análise para saber se não se está a ir contra a ideia principal, que é não poluir.

Embora existam diversos métodos para o fabrico de filamento a partir de material reciclado, o processo mais adotado começa com o envio de resíduos plásticos para um centro de reciclagem, depois ocorre a lavagem desse mesmo material para remover impurezas, e é em seguida triturado em pedaços menores. A etapa seguinte envolve a fusão do plástico triturado, transformando-o em pequenos *pellets*. Esses *pellets* reciclados servem como matéria-prima na fabricação de novos produtos injetados ou extrudidos, incluindo o filamento utilizado em impressão 3D. Essas etapas podem ser realizadas numa única instalação ou distribuídas em vários locais (Jones, 2023).

Tal como refere Jones (2023), existem vários materiais que podem ser usados para fabricar filamento. Essa diversidade, apesar de benéfica, torna-se uma barreira para a reciclagem de resíduos de impressão 3D. A falta de padronização e o risco de contaminação, devido à semelhança de muitas peças impressas em 3D, dificultam a separação eficiente dos diferentes materiais.

Existem dois tipos de materiais possíveis de reciclar no contexto dos filamentos de impressão 3D: os de pré-consumo, provenientes dos resíduos gerados durante o processo de fabricação, que é vantajoso por ser conhecida a sua origem e ter um desempenho equiparável ao material virgem; e os resíduos pós-consumo, que, embora ofereçam benefícios ambientais ao evitar o descarte em aterros, apresentam os desafios anteriormente relatados, devido à mistura de diferentes polímeros, resultando em maior complexidade e custos no reprocessamento (Toor, 2023).

Porém, mesmo após superar as barreiras de contaminação, ainda se verifica a complexidade da logística da recolha dos resíduos. O plástico, devido à sua alta relação volume/peso, torna a recolha menos eficiente em comparação com materiais mais pesados. Ou seja, o transporte de plástico é dispendioso e obviamente para fazer essa deslocação do material contribui-se para o aumento da poluição (Toor, 2020).

A logística da reciclagem desempenha um papel importante na eficiência e viabilidade dos processos de reciclagem de filamento para impressão 3D e por isso uma abordagem descentralizada da reciclagem oferece diversas vantagens significativas. Há duas maneiras de obter filamento reciclado. A opção mais conveniente e que foi abordada até então, é adquiri-lo em lojas especializadas que oferecem filamento reciclado comercial, que devido aos rigorosos testes e controlo de qualidade, esses filamentos apresentam uma qualidade equiparável aos filamentos feitos de material virgem, no entanto, é importante notar que o preço tende a ser mais elevado em comparação com os filamentos tradicionais.

A segunda opção, que pode ser vantajosa para aqueles dispostos a investir mais tempo, envolve a fabricação do próprio filamento em casa com máquinas semelhantes à que será desenvolvida no trabalho presente. Embora seja um processo que exige tempo para ser configurado e iniciar a produção, pode resultar numa redução significativa nos custos do material de impressão 3D (Boyd & Burr, 2023). Com esta opção resolve-se o problema da centralização dos centros de reciclagem.

Para produzir o filamento em casa é necessário um equipamento específico para essa tarefa. Existem diferentes formas de abordar esse processo, desde a aquisição de kits até a construção completa do equipamento. No entanto é importante ressaltar que esses projetos requerem mais do que conhecimento de impressão 3D, uma vez que será necessário conhecimento em mecânica e eletrônica, assim como ferramentas para construir e montar os mecanismos e os sistemas de controle (Boyd & Burr, 2023).

## **2.4. Contribuição do mecanismo**

Como discutido anteriormente, a crescente preocupação ambiental relacionada aos produtos plásticos descartáveis destaca a necessidade de encontrar soluções eficazes para a reciclagem de garrafas PET. Simultaneamente, o elevado custo do filamento, representa um desafio económico significativo. A máquina proposta para realizar a transformação das garrafas PET para filamento rPET enfrenta esses dois problemas de uma só vez.

Embora as máquinas em questão possuam um preço considerável e uma complexidade correspondente, a solução não exige necessariamente que cada indivíduo possua um equipamento deste tipo. A estratégia poderia envolver a instalação destas máquinas em locais estratégicos, como lojas especializadas e universidades, onde as pessoas poderiam facilmente levar as suas garrafas para realizar o processo de reciclagem. Esta estratégia permitiria que cada utilizador, seja um estudante ou um laboratório de investigação da universidade, utilize o equipamento para criar seu próprio filamento com as garrafas que recolhe.

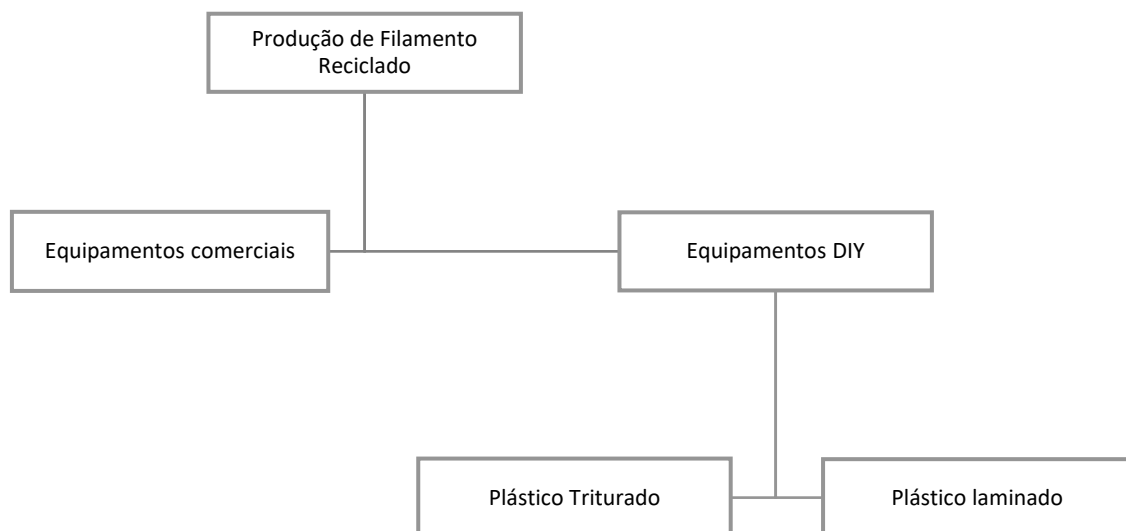
Essa abordagem descentralizada mitigaria a necessidade do transporte para depositar garrafas em ecopontos, que depois têm ainda de ser levados para aterros ou centros de reciclagem. Ao oferecer uma alternativa simples e rápida, a máquina proporcionaria uma solução prática para a reciclagem localizada, incentivando ainda mais a participação. A ideia de recompensar aqueles que reciclam cria um incentivo adicional,

tornando o processo não apenas ambientalmente benéfico, mas também atrativo para os utilizadores.

### 3. Máquinas Semelhantes

Como já foi discutido anteriormente, uma das soluções para combater a poluição causada pelo plástico e o uso mais ecológico de impressoras 3D é o uso de filamento reciclado. No entanto, para viabilizar essa abordagem, são necessárias máquinas capazes de produzir esse filamento de forma eficiente. Neste capítulo, vão ser abordadas diversas máquinas com essa finalidade, cada uma com as suas próprias técnicas e características distintas.

O filamento reciclado pode ser produzido de duas formas. Podem ser usados equipamentos comerciais, ou equipamentos *open source*, desenvolvidos por entusiastas do “do-it-yourself” (DIY) que em português significa “faça você mesmo”. Ao abordar as máquinas comerciais, vão ser analisadas as suas capacidades de processamento em larga escala, o seu alto desempenho e eficiência, assim como os investimentos significativos necessários para adquiri-las e operá-las. Por outro lado, nas máquinas DIY, vai ser destacada a sua acessibilidade, simplicidade operacional e de construção do próprio equipamento e por isso a capacidade de se integrar facilmente em ambientes domésticos e comunitários. Na Figura 19 está representado o diagrama dos dois tipos de equipamentos para produção de filamento reciclado.



**Figura 19.** Tipos de Produção de Filamento Reciclado.

### 3.1. Equipamentos Comerciais para Produção de Filamento Reciclado em Pequena Escala

As máquinas de produção comercial de filamentos para impressão 3D representam um avanço tecnológico significativo em relação aos modelos de uso pessoal que vão ser abordadas mais à frente. Estas máquinas são mais dispendiosas e complexas, permitindo assim um controlo mais preciso dos parâmetros de produção e garantindo uma qualidade superior no filamento final. Além disso, são capazes de produzir em maior escala, atendendo às necessidades do mercado de filamentos. Mesmo ao utilizar materiais reciclados, é essencial manter um alto padrão de qualidade, o que requer um maior nível de controlo e precisão durante o processo de fabrico.

Nesse contexto, e para ilustrar o conceito destes equipamentos comerciais, que compartilham no geral os processos de fabrico e conceitos associados, será analisado o funcionamento do EX6 Filabot, que é apresentado na Figura 20.



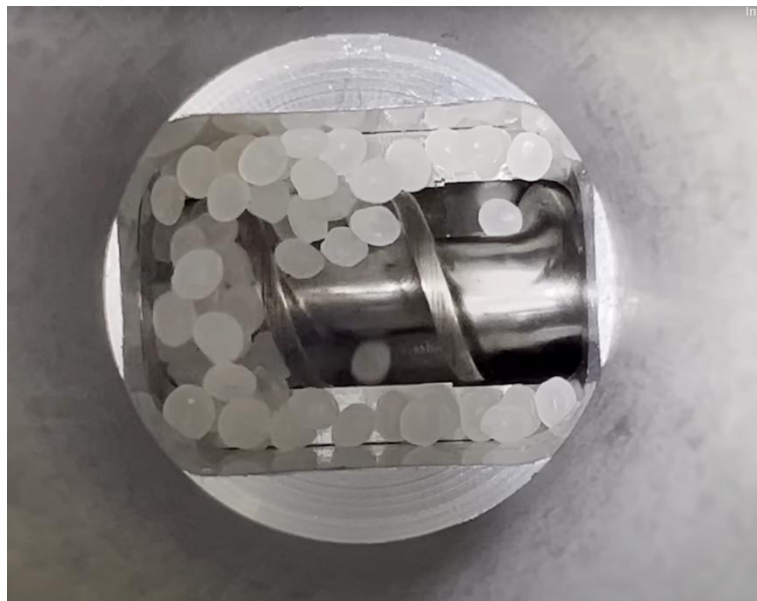
Figura 20. Extrusora EX2 Filabot (Filabot, 2022).

Na primeira etapa do processo de produção, ao reutilizar produtos de plástico, é fundamental fazer a separação dos diferentes tipos de plástico e com uma trituradora, que pode ser integrada à máquina, como é o caso do equipamento da Figura 27, reduzir os resíduos a pequenos pedaços e posteriormente, descontaminar e secar. Durante esse processo, podem ser adicionados aditivos para proporcionar cor ou outras propriedades desejadas. Após o tratamento dos resíduos, o produto vão ser os *pellets* mostrados na Figura 21.



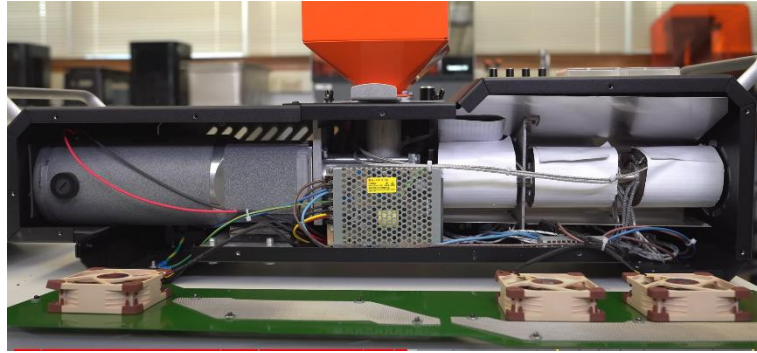
**Figura 21.** *Pellets* no depósito da máquina (Filabot, 2023), adaptado.

Esses *pellets* vão para o depósito da máquina que gradualmente entram na câmara de aquecimento, encaminhadas por um parafuso sem fim, como é ilustrado na Figura 22.



**Figura 22.** Parafuso sem fim colocado por baixo do depósito (Filabot, 2023), adaptado.

Durante esta etapa, os pellets são gradualmente derretidos e misturados na câmara de aquecimento, cujo mecanismo pode ser observado na Figura 23, sob a ação do parafuso sem fim. Esse processo resulta na formação de uma substância pegajosa e uniforme, pronta para ser moldada com facilidade.



**Figura 23.** Interior da extrusora (Filabot, 2023), adaptado.

O próximo passo é a etapa da extrusão propriamente dita, onde o plástico derretido é pressionado contra um bocal de extrusão de diâmetro pré-definido que depende do tamanho final desejado para o filamento. Em seguida, o material é submetido ao processo de arrefecimento para manter a sua forma. No caso do equipamento da Filabot, o sistema de arrefecimento original é composto por ventiladores, como mostrado na Figura 24.



**Figura 24.** Sistema de arrefecimento por ar (Filabot, 2023) adaptado.

No entanto, esse sistema pode ser melhorado adicionando um banho para garantir a solidificação do material mais rapidamente, como é utilizado no equipamento da PushPlastic da Figura 25.



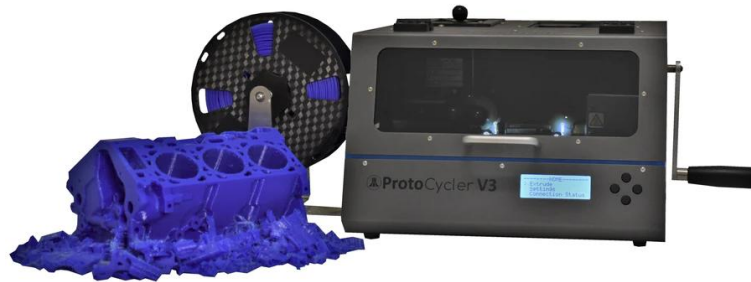
**Figura 25.** Sistema de arrefecimento com banho (Filabot, 2023), adaptado.

No final do processo, neste tipo de máquinas, é incorporado um sensor, conforme ilustrado na Figura 26, que permite ao operador verificar se o diâmetro do filamento está de acordo com o desejado. Caso haja alguma discrepância, é possível ajustar a velocidade de saída do filamento da extrusora, a intensidade do arrefecimento entre outros parâmetros. Assim como em todas as máquinas, o filamento é enrolado numa bobina após a produção para ser posteriormente embalado e vendido.



**Figura 26.** Módulo de controlo e armazenamento do filamento (Filabot, 2023), adaptado.

Existem diversos tipos de equipamentos usados para fabricar filamento reciclado comercial, sendo alguns mais compactos do que outros, mais complexos, e com preços diferentes. Um exemplo é o ProtoCucler V3, que é mais compacto e tem ainda a opção de adicionar um sistema integrado de trituração que é operado pela manivela manual que se encontra na lateral, como pode ser visto na Figura 27 (ReDeTech, 2024).



**Figura 27.** Extrusora ProtoCycler V3 (Redetec).

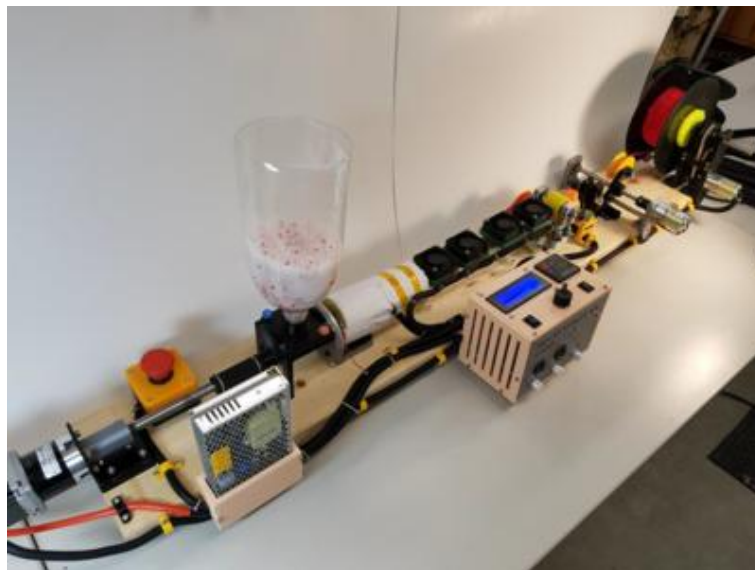
### **3.2. Equipamentos DIY**

Com o tipo de máquinas mostradas anteriormente conseguimos produzir filamento com maior qualidade e com uma maior demanda para ser rentável às empresas que vendem filamento. No entanto, com os avanços tecnológicos e a procura por soluções de reciclagem mais acessíveis, foram surgindo versões adaptadas destas máquinas, que têm ganho popularidade entre os entusiastas DIY.

A RepRapable Recyclebot é uma extrusora de código aberto, acessível para aqueles que desejam construir um equipamento semelhante. A lógica do mecanismo é semelhante à das máquinas industriais com a diferença da capacidade de produção de filamento e da qualidade do mesmo, devido a ter menos controlo e por serem usados materiais menos robustos. No entanto, a máquina da Figura 28 possui até um sensor para medir com precisão o diâmetro do filamento e assegurar um tamanho constante. Esta máquina pode ser montada por menos de 645 €, e em aproximadamente 24 horas segundo o criador da mesma (Woern et al, 2018).

Uma das vantagens que contribuem para o baixo custo do RepRapable Recyclebot é a capacidade de fabricar várias peças que a constituem utilizando uma impressora 3D. Além disso, utilizando resíduos de plástico e considerando apenas os custos de eletricidade (excluindo os custos de mão de obra e os custos de equipamentos de capital), o RepRapable Recyclebot pode produzir filamento a menos de 2,5 cêntimos por kg, um valor que é 1000 vezes inferior ao preço do filamento comercial atualmente disponível. Todos os arquivos STL necessários para a montagem da impressora estão disponíveis, juntamente com

instruções detalhadas para facilitar o processo de montagem, permitindo uma abordagem DIY (Pearce e Petsiuk, 2020).

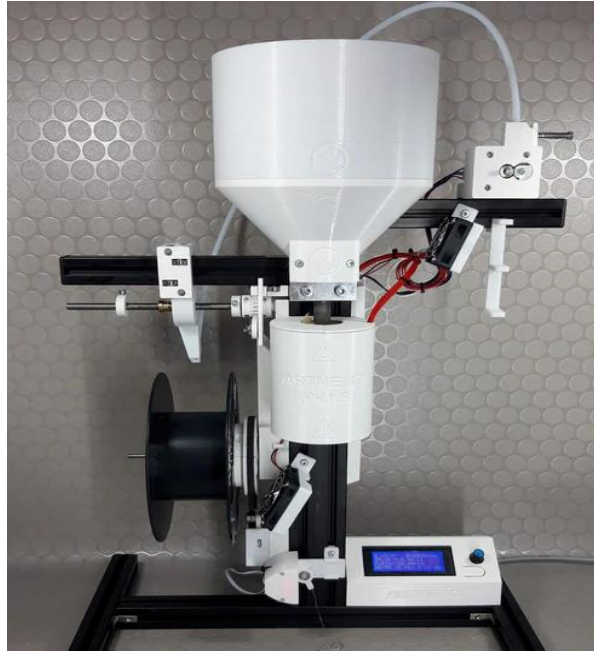


**Figura 28.** RepRapable Recyclebot (HardwareX).

É de ressaltar que a trituração tem de ser feita à parte com outro equipamento, e é aconselhável fazer uma seleção do tamanho do grão para ajudar a manter a consistência da taxa de alimentação. Por isso, no caso da fabricação com resíduos plásticos tem de haver todo um processo da fabricação dos *pellets*.

A Extrusora de filamento MK2.5 da ARTME 3D, apresentada na Figura 29, difere da anterior por estar montada na vertical, sendo mais compacta e simples de montar.

Está disponível um kit para facilitar o processo de montagem, com um custo de 649 €, que inclui todas as peças necessárias, exceto as peças impressas representadas a branco na Figura 29. A fonte de alimentação também não está incluída, mas o vendedor afirma que um carregador com pelo menos 24 volts e 6 amperes é suficiente para alimentar a máquina. Esta máquina requer menos conhecimento e ferramentas em comparação com o modelo anterior. É capaz de produzir filamentos com diâmetros de 1,75 mm a 2,85 mm, utilizando *pellets* que têm de ser preparados antes de serem introduzidos no depósito, com tamanho ideal de aproximadamente 4,5 mm a 5,0 mm para evitar entupimentos.



**Figura 29.** Extrusora de Filamento MK2.5 (ARTME 3D, 2024).

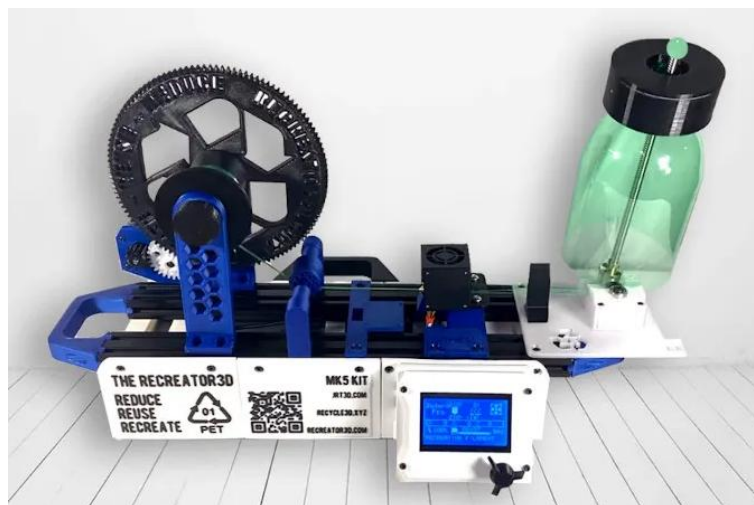
Dentro das máquinas de produção de filamento adequadas para utilização doméstica e destinadas a alimentar impressoras 3D FDM com resíduos plásticos, existem duas abordagens principais. Ambas realizam a reciclagem mecânica, mas diferem na forma como os materiais são processados.

A primeira abordagem, como apresentada nas máquinas da Figura 28 e da Figura 29, tem um processo semelhante ao das máquinas comerciais, que conseguem fabricar filamento de praticamente qualquer tipo de plástico, na condição de este estar triturado com um tamanho de grão minimamente regular. Portanto, para utilizar resíduos plásticos ou mesmo impressões falhadas, é necessário passar por um processo de trituração, garantir o tamanho de grão adequado e constante e evitar misturas de materiais para evitar problemas na fabricação. Como vimos, as máquinas DIY requerem algum conhecimento técnico, e devido à sua complexidade, o custo dessas máquinas tende a ser relativamente elevado. Além disso, esse processo pode consumir mais energia, o que impacta o custo total de produção do filamento e a ideia principal de contribuir para um mundo mais sustentável. Outra desvantagem é que a fusão do material, que pode degradar as suas propriedades, tornando necessário adicionar material virgem para manter a qualidade do filamento.

Por outro lado, a segunda abordagem, pode oferecer uma alternativa mais acessível e eficiente. Ao permitir a alimentação direta de resíduos plásticos, sem a necessidade de trituração prévia em *pellets*, essas máquinas simplificam o processo e têm uma abordagem mais econômica devido aos menores custos da fabricação da máquina, e de energia.

Com este novo método de fabricação, é possível reutilizar garrafas PET, que como visto anteriormente é um produto que regularmente descartamos. As garrafas são usadas praticamente na sua forma original. Embora não seja necessário triturar o plástico, ainda é necessário remover qualquer contaminante que possa existir, tais como sujeira, adesivos, poeira e resíduos de líquidos, garantindo assim maior qualidade do filamento reciclado. Em seguida, a base da garrafa é removida e o corpo é cortado numa tira contínua o mais uniformemente possível, até chegar ao gargalo. Esta tira passa num bocal de extrusão e é termoformada para adquirir a forma e o diâmetro adequados para uso na impressora 3D. É importante saber que neste processo, o plástico não chega a ser fundido e a mudar de estado físico, é apenas termoformado na forma e medida correta.

Uma maneira simples de construir uma máquina com este fim é aproveitar alguns dos componentes de uma impressora FDM. Um exemplo, é a extrusora da ReCreator 3D, mostrada na Figura 30, que mostra uma forma simples de converter uma impressora 3D Ender 3 padrão numa máquina de reciclagem de garrafas PET. Para isso, basta remover os elementos destacados na Figura 31. As restantes peças necessárias podem ser produzidas recorrendo à impressão 3D, uma vez que todos os arquivos STL são disponibilizados gratuitamente pelo autor.



**Figura 30.** Kit MK5 da Recreator 3D (ReCreator3D, 2024).



**Figura 31.** Peças necessárias de uma impressora Ender 3 (ReCreator3D , 2023).

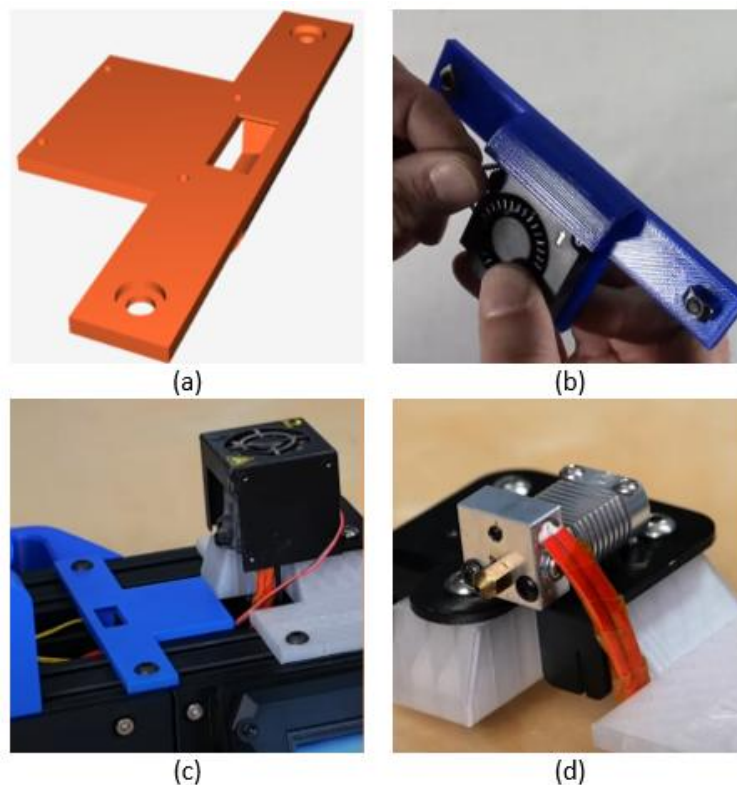
Uma das principais vantagens desta máquina é a sua simplicidade de montagem. Isso deve-se ao facto de podermos utilizar todo o software de controlo da impressora para regular a temperatura do bloco de aquecimento e a velocidade de extrusão do filamento, simplesmente refazendo as conexões iniciais para os componentes reaproveitados sem necessidade de qualquer programação mais complexa. Quanto à mecânica a única alteração a fazer é aumentar o furo do bocal de extrusão para 1,75 mm ou o mais perto possível desse valor, uma vez que as impressoras podem aceitar pequenas variações no diâmetro do filamento.

A Extrusora da ReCreator 3D apresenta um processo de corte automatizado para transformar a garrafa PET na tira de plástico que vai ser usada pelo equipamento. O corte é realizado por meio de dois rolamentos previamente limados para que ao colocar um sobre o outro funcione como uma tesoura, e permita o corte do plástico, conforme podemos ver na Figura 32. Não há opção para ajustar o tamanho da tira, que fica determinado pela profundidade da fenda que está entre os dois rolamentos. Para garantir a consistência do tamanho das tiras, uma peça é presa na base do mecanismo e no topo da garrafa, exercendo pressão para manter a garrafa alinhada durante o corte. Após o corte, as tiras são direcionadas diretamente para a extrusora, eliminando a necessidade de armazenamento.



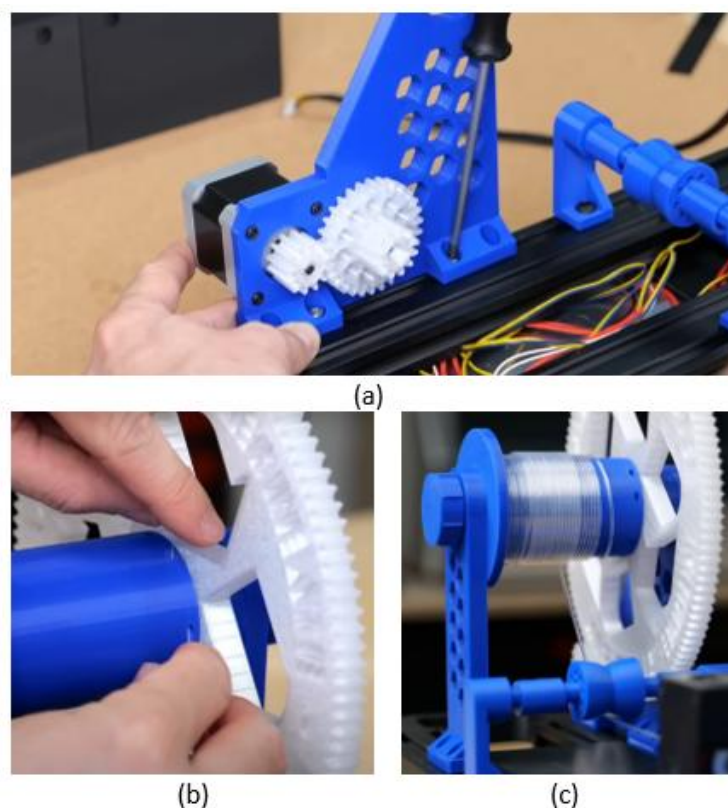
**Figura 32.** Processo de corte da ReCreator 3D (ReCreator3D, 2023).

O sistema de arrefecimento utiliza dois ventiladores que foram também eles retirados da impressora 3D. Um deles é montado na base da máquina e direcionado para o filamento à saída do bocal de extrusão, como vemos nas Figura 33 (a) e (b), enquanto o outro é montado sobre o bocal para evitar o contacto direto com o bloco de aquecimento como mostrado na Figura 33 (c), garantindo a segurança do utilizador durante o processo. Para prevenir a fusão precoce do filamento antes de alcançar o bloco de aquecimento, a máquina utiliza o dissipador original da impressora da Figura 33 (d).



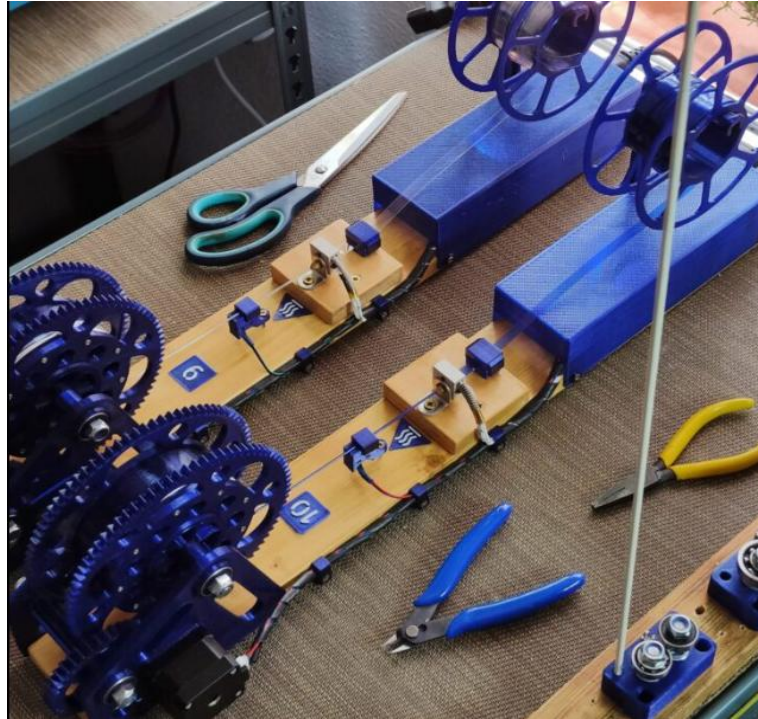
**Figura 33.** Sistemas de arrefecimento da ReCreator 3D (a) Desenho CAD do suporte do ventilador (b) Montagem do ventilador (c) Ventilador usado para proteger do bloco de aquecimento (d) Dissipador de calor (ReCreator3D, 2023).

Na Figura 34 (a), é possível observar que a tira de plástico é tracionada por um sistema de engrenagens desmultiplicadoras conectado a um dos motores da impressora 3D. Esse mesmo sistema é ligado a uma bobina, que como pode ser observado na Figura 34 (b), conta com dois furos, que permitem prender o filamento, que à medida que é tracionado, e com auxílio do sistema da Figura 34 (c), permite que o filamento se mova lateralmente, conseguindo obter uma bobina pronta a usar na impressora 3D.



**Figura 34.** Sistema de Enrolamento do filamento (a) Sistema de polias (b) Mecanismo para controlar o enrolamento (c) Furos para prender a ponta do filamento (ReCreator3D,2023).

Outro exemplo, é a extrusora PETALOT do site Function 3D que é montada sobre uma tábua de madeira, como se constata na Figura 35, proporcionando assim uma estrutura robusta para todos os componentes. Também disponível por 290€, destaca-se como uma opção acessível para a reciclagem de garrafas PET. Além disso, o fabricante disponibiliza todas as informações necessárias para a construção da máquina.



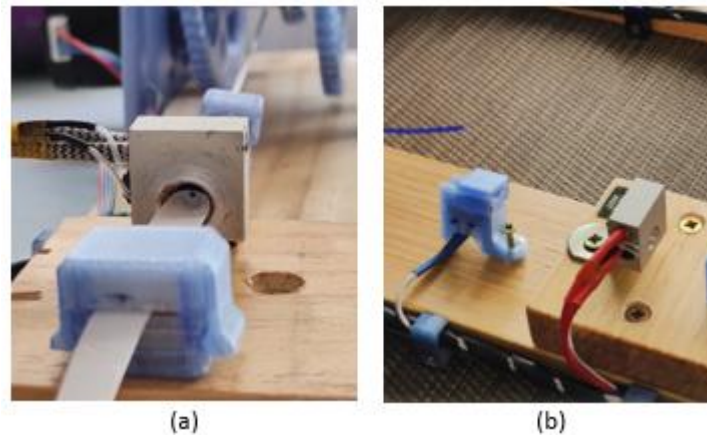
**Figura 35.** Extrusora Petalot (Function3D, 2024).

Na Figura 36, é possível observar o mecanismo de corte da garrafa, que é manual e separado do resto do processo. Permite ajustar o tamanho da tira de plástico girando a peça que tem o varão roscado cortado ao meio, onde passa a tira de plástico. O método de corte utiliza dois rolamentos, semelhante à máquina anterior. Após o corte da garrafa, o fabricante fornece o arquivo STL de uma bobina que pode ser acoplada a uma aparafusadora, facilitando o processo de armazenamento da tira que pode depois ser colocada na máquina principal.



**Figura 36.** Sistema de corte da Petalot (Function3D, 2024).

Ao contrário da primeira máquina, esta não possui um sistema de arrefecimento. Antes de passar pelo bico de extrusão, o filamento atravessa uma pequena caixa com uma esponja e uma fenda para limpeza da tira de plástico, evitando contaminação e garantindo a qualidade do filamento, como é mostrado na Figura 37 (a). Além disso, após sair da matriz de extrusão, o filamento passa por outra caixa equipada com um *Microswitch*, que se encontra na Figura 37 (b) que quando não pressionado interrompe a máquina para que esta seja desligada após acabar o filamento.



**Figura 37.** Componentes para Otimização do Processo (a) Sistema de limpeza da tira de plástico (b) Sistema de paragem quando acaba o filamento (Function3D,2024).

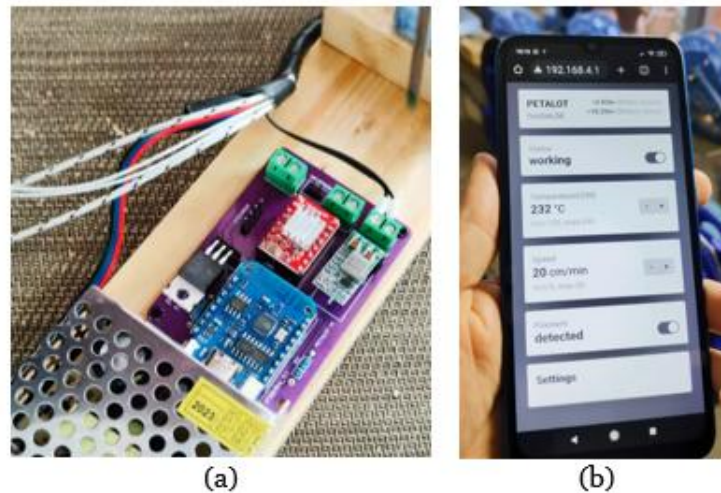
O sistema de tração da tira de plástico é semelhante à anterior, usando um sistema de engrenagens para fazer passar o plástico pelo bocal de extrusão, como podemos ver na Figura 38.



**Figura 38.** Sistema de engrenagens (Function3D, 2024).

Como é visível na Figura 35, a máquina não tem qualquer LCD ou controlador para poder variar a velocidade do motor, ou a temperatura do bocal de extrusão. Isto deve-se ao

facto de que o criador desta máquina desenhou uma placa de circuitos impressos, que podemos ver na Figura 39 (a) que controla todo o sistema via wifi com o auxílio de um smartphone, como podemos perceber Figura 39 (b).



**Figura 39.** Sistema de controlo (a) Placa de Circuitos (b) Layout do controlador no smartphone (Function3D,2024).

A máquina da Figura 40 é outro modelo DIY cujo processo de montagem, ficheiros STL das peças que a constituem e ainda os detalhes das peças que precisamos adquirir para a construção estão disponíveis no website Cults 3D.



**Figura 40.** Extrusora PETmachine (Cults 3D, 2023).

Diferenciando-se das máquinas anteriores, para o corte da garrafa, esta máquina utiliza uma lâmina de x-ato. Este sistema possui fendas com diferentes profundidades, como observado na Figura 41, proporcionando alguma flexibilidade na largura da tira de plástico. O fabricante incorpora o sistema de corte à máquina principal, utilizando o seu próprio motor para cortar as garrafas, semelhante à primeira máquina de corte de garrafas que foi analisada.



**Figura 41.** Sistema de corte da garrafa (Cults 3D,2023).

No processo de extrusão, a tira de plástico passa diretamente pelo bocal de extrusão, sem um dissipador de calor. Após adquirir a forma do filamento, é arrefecido por um ventilador localizado na saída do bocal de extrusão. O enrolamento do filamento é semelhante ao das máquinas anteriores, utilizando uma bobina onde a ponta do filamento é presa com um simples nó. Para evitar que o filamento seja mal armazenado na bobina, usamos um sistema com uma polia capaz de ser mover lateralmente, como já visto anteriormente.

O sistema de controlo de temperatura do bocal de extrusão e a velocidade do motor de extrusão são distintos, como se percebe na Figura 42. O motor é controlado por um potenciômetro que com um PWM ajusta a velocidade. Já a temperatura do bocal de extrusão é regulada por um painel de controlo de temperatura REX-C100FK02-M, permitindo a regulação da temperatura do bloco de aquecimento.



**Figura 42.** Sistema de controlo (Cults 3D, 2023).

Embora todas as máquinas que usam as garrafas PET, compartilhem o mesmo conceito fundamental de produção de filamento, é importante ressaltar que cada uma apresenta características distintas que influenciam a sua autonomia, eficiência, preço e complexidade de construção. Ao analisar estas máquinas, foi possível perceber quais as suas nuances e identificar as suas contribuições individuais para cada uma das etapas do processo onde usam técnicas diferentes, tais como o corte da garrafa, o armazenamento da tira, o arrefecimento do filamento, o armazenamento do filamento pronto e o sistema de controlo. Dessa forma, o propósito é integrar as contribuições mais valiosas de cada uma das máquinas numa única solução.



## **4. Materiais e métodos**

### **4.1. Componentes e mecanismos usados**

Inicialmente, foi necessário decidir se o corte da tira uniforme da garrafa PET seria realizado por um sistema separado ou integrado na máquina principal, e se seria tracionado pelo motor ou efetuado manualmente. Após uma pesquisa, concluiu-se que ambas as abordagens seriam viáveis. No entanto, cortar a garrafa através da tração do motor, enquanto a tira passa pelo bocal de extrusão, criaria resistência, aumentando o desgaste do motor e das peças. Consequentemente, o consumo de energia também aumentaria. Além disso, este processo gera um ruído inconveniente e, se for tracionado pelo motor, acaba por se tornar um barulho prolongado. Por estas razões, e considerando que o corte manual é rápido e simples, optou-se por realizar o corte num mecanismo à parte. A tira cortada é depois armazenada numa bobina para, posteriormente, alimentar a máquina, como será visto mais à frente.

Foi também necessário selecionar o mecanismo de corte. Existem duas opções principais: corte com rolamentos ou com lâmina de x-ato, considerando ainda se o mecanismo permite ou não regular a largura da tira de plástico. Como é necessário testar diferentes larguras da tira para determinar a que melhor funciona, é essencial poder ajustar a altura. Embora seja possível optar por fazer fendas de vários tamanhos como foi visto na Figura 32 e na Figura 41, não seria possível experimentar todos os tamanhos. Por isso, o mecanismo ilustrado na Figura 36 parecia ser o mais adequado ao projeto. Desta forma, foi criada uma versão semelhante mas com alguns detalhes diferentes para conseguir usar alguns componentes disponíveis e assim conseguir usar material reciclado neste projeto. O cortador pode ser visto na Figura 43.



**Figura 43.** Cortador da tira de plástico.

Para facilitar o armazenamento da tira de plástico, foi impressa uma bobina, conforme mostrado na Figura 44, que permite enrolá-la rapidamente e, posteriormente, colocá-la na máquina, que vai desenrolando à medida que o motor traciona a tira pelo bocal de extrusão.



**Figura 44.** Bobina para armazenar a tira de plástico.

Para a montagem da máquina, foi considerada a disposição dos componentes e foi montado um modelo digital no SolidWorks para determinar a melhor posição de cada elemento e também as dimensões da base. Para a construção da base, optou-se pela utilização de uma placa de MDF. Esta escolha deve-se ao facto de ser robusta, económica e

permitir uma fixação simples dos componentes. Mais uma vez, foram utilizados restos de material aproveitados de outro projeto. A estrutura pode ser vista na Figura 45.



**Figura 45.** Base em MDF para o projeto.

Utilizou-se apenas um bloco de aquecimento (Figura 46 (a)) e um bocal de extrusão (Figura 46 (b)), cujo furo foi alargado com uma broca de 1,6 mm, por ser a broca comercial mais próxima de 1,75 mm. O furo foi alargado até que um filamento comercial conseguisse passar com esforço, considerando que o plástico tende a expandir ligeiramente após sair do bocal de extrusão. Desta forma, foi obtido um diâmetro aproximado de 1,75 mm.



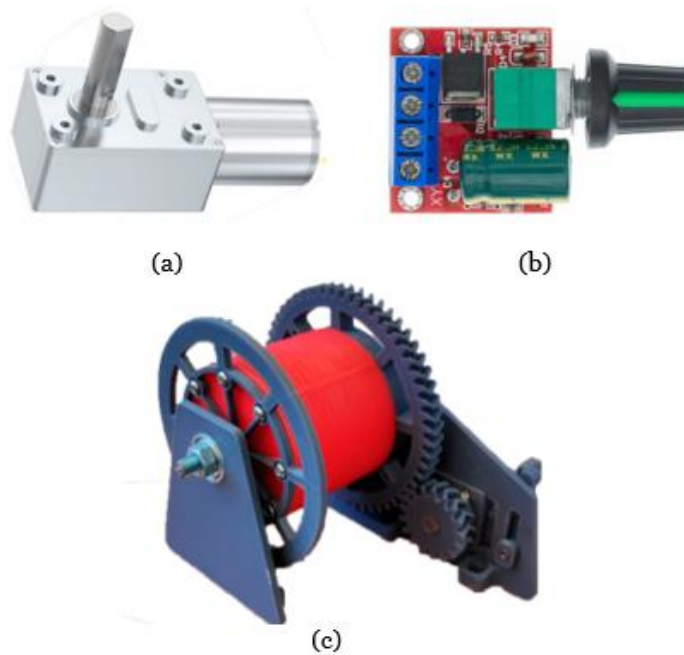
**Figura 46.** Sistema de extrusão (a) Bocal de extrusão (b) Bloco de aquecimento.

A temperatura do bloco é controlada com um controlador de temperatura W3230 (Figura 47(a)), conectado a um cartucho de aquecimento (Figura 47 (b)), e a um sensor termopar tipo K (Figura 47 (c)). Este aparelho permite aumentar ou diminuir a temperatura desejada do bloco de aquecimento.



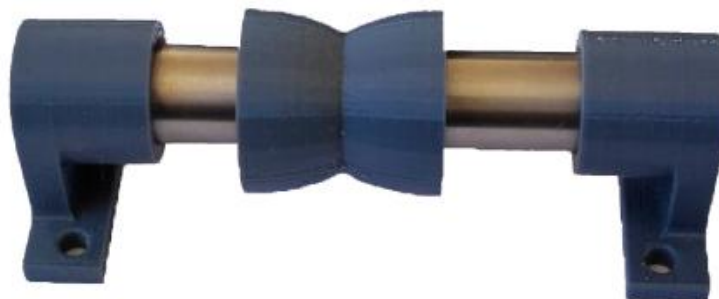
**Figura 47.** Sistema de Controlo de temperatura (a) W3230 (b) cartucho de aquecimento (c) sensor termopar tipo K.

Para determinar o binário necessário para tracionar o filamento pelo bocal de extrusão, foram analisados os sistemas das máquinas que vimos anteriormente, que já se mostraram eficazes. Constatou-se que um motor de 24 Volts com redutor, com 10 rpm (Figura 48 (a)), acoplado a um sistema de engrenagens helicoidais, seria o ideal. As engrenagens helicoidais foram escolhidas por garantirem maior resistência e capacidade de proporcionar operações mais suaves, reduzindo o ruído e o desgaste. Estas engrenagens foram fabricadas em PETG, garantindo assim boa resistência e durabilidade. Além disso, foi implementado um sistema que permite deslizar o motor e a engrenagem motora em relação à engrenagem movida, possibilitando o movimento livre da bobina onde o filamento é enrolado, mesmo com o motor travado. O motor é controlado por um sistema PWM com um potenciômetro (Figura 48 (b)). O sistema de tração do filamento pode ser visualizado na Figura 48 (c).



**Figura 48.** Sistema de tração (a) Motor JGY370 (b) Controlador PWM (c) Sistema de engrenagens.

Para assegurar que o filamento é enrolado de forma uniforme e bem tensionado, foi instalado o sistema mostrado na Figura 49, que permite o movimento lateral do filamento ao longo da bobina durante o processo de enrolamento.



**Figura 49.** Mecanismo para direcionar o filamento.

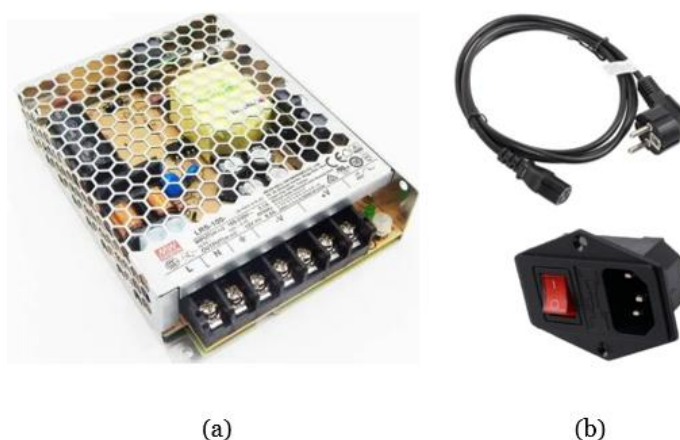
Para saber qual a fonte de alimentação necessária para alimentar todos os componentes, calculou-se o consumo energético, o consumo do motor, da resistência de aquecimento e do ventilador. Os restantes consumos consideraram-se desprezáveis devido ao baixo consumo energético. Para uma situação de máxima carga, considerou-se o motor a trabalhar na sua potência máxima. Como ilustrado na Figura 82 em anexo, o motor consome 2,40 W, a resistência de aquecimento consome até 50 W e o ventilador consome 2,16 W, logo:

$$Potência_{Total\ estimada} = 50W + 2,40 W + 2,16 W = 54,56 W$$

Fazendo a soma, sabemos que precisamos de uma fonte de alimentação de 54,56W, considerando o coeficiente de segurança de 125%:

$$Potência_{Total} = Potência_{Total\ estimada} * 1,25 = 54,56\ W * 1,25 = 68,2\ W$$

Tendo em conta que todos os componentes escolhidos são de 24 V, e que consomem até 68,2 W já com o coeficiente de segurança, selecionou-se uma fonte de alimentação Mean Well LRS-100-24, de 24 V e 100 W, conforme ilustrado na Figura 50 (a). A fonte será posteriormente conectada à rede elétrica através de uma ficha de alimentação AC, como mostrado na Figura 50(b).



**Figura 50.** Alimentação da máquina (a) Fonte Mean Well LRS-100-24 (b) Tomada Ficha de alimentação AC.

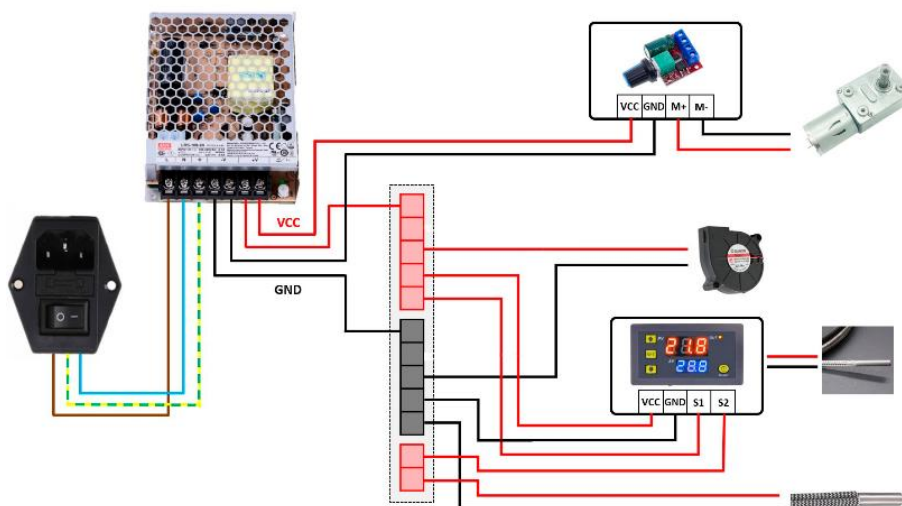
## 4.2. Montagem da máquina

A montagem do mecanismo é relativamente simples. Inicia-se com a colocação do mecanismo de tração numa extremidade da base de MDF, em seguida, deve-se garantir o alinhamento e proceder com a montagem do mecanismo que desloca o filamento lateralmente. O bloco de aquecimento é fixado a uma chapa metálica em formato de L, que, por sua vez, será fixada à base de MDF. Uma das vantagens de utilizar uma base deste tipo de material é que não há problemas com a temperatura da base do bloco de aquecimento.

Com os componentes fixos, procede-se à instalação do cartucho de aquecimento e do sensor de temperatura no bloco de aquecimento. Após a instalação do mecanismo de extrusão, o ventilador pode ser fixado e direcionado para a saída do bocal de extrusão para garantir que o filamento mantém a sua forma. Na extremidade oposta ao mecanismo de tração, é montada uma base para alocar a bobina onde será armazenada a tira de plástico

quando cortada. Para além de todos estes componentes é ainda colocado o mecanismo de corte para que tudo esteja numa só peça.

Fixados todos os componentes mecânicos, procede-se à instalação dos componentes elétricos na parte inferior da base, onde se coloca a fonte de alimentação e a base para os controladores de temperatura e de velocidade do motor. Na lateral da base da máquina, é feita uma abertura com as dimensões necessárias para a instalação da ficha de alimentação. Por fim, são realizadas as ligações elétricas conforme o esquema mostrado na Figura 51.



**Figura 51.** Esquema elétrico da máquina.

Primeiramente, realizam-se as ligações na ficha, utilizando conectores e mangas termoretráteis para garantir a segurança e a robustez das conexões. A ficha é então conectada à fonte de alimentação. Para assegurar uma ligação fiável, são usados conectores de terminais reutilizáveis, permitindo futuras modificações, se necessário.

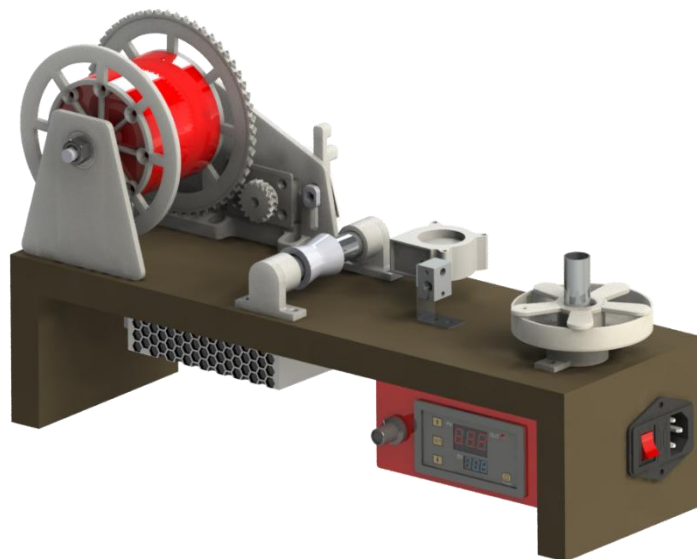
As ligações ao motor são realizadas da mesma forma, utilizando conectores e mangas termoretráteis, e a proteção do motor é montada. Para evitar a exposição dos cabos, são feitos furos na base de madeira para permitir a passagem dos cabos para a parte inferior, onde estão localizados todos os componentes eletrónicos.

Todos os cabos elétricos são organizados e fixados à base com pequenas peças também produzidas por impressão 3D. A montagem pode ser observada na Figura 52.



**Figura 52.** Vista inferior da máquina.

Todas as peças impressas foram modeladas individualmente no SolidWorks e, posteriormente, foi criado o modelo CAD de toda a máquina para perceber quais incompatibilidades dimensionais e de montagem antes de montar qualquer peça. Na Figura 53 é apresentado o modelo da máquina em SolidWorks.



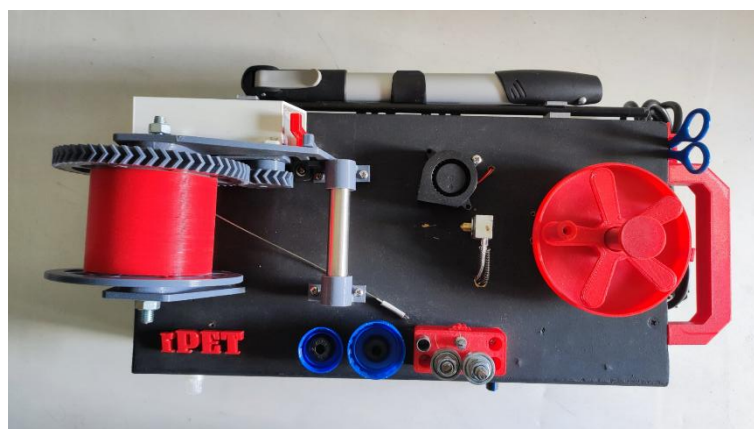
**Figura 53.** Modelo CAD da Máquina.

Com o objetivo de tornar a máquina o mais compacta e funcional possível, foram adicionados vários acessórios para integrar todos os utensílios necessários ao processo de fabrico que vai ser demonstrado no subcapítulo seguinte. Entre eles, incluem-se algodão e diluente, além de duas válvulas, uma com tampa de garrafão e outra com tampa de garrafa e uma tesoura. Adicionalmente, foram instalados dois suportes para guardar a vareta que mantém o garrafão na vertical durante o corte da tira quando não está a ser usado. Para

além disso, foi adicionada uma pega para ser mais fácil transportar a máquina, assim como a bomba manual de ar. A Figura 54 e a Figura 55 mostram o aspeto final da máquina.



**Figura 54.** Vista de perfil da Máquina.

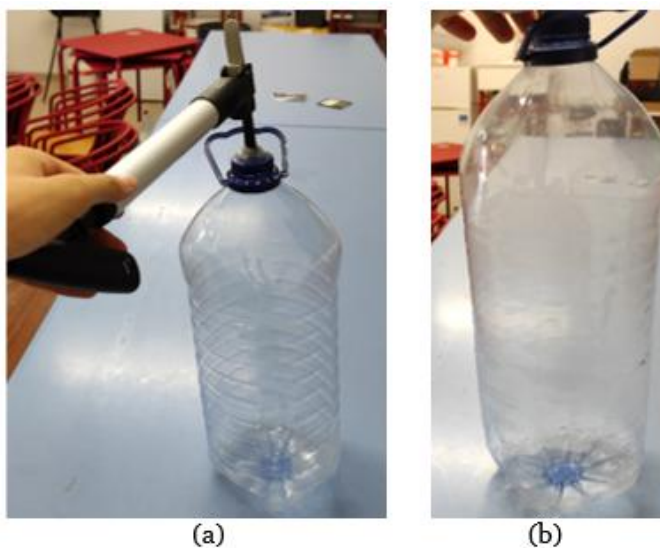


**Figura 55.** Vista de cima da Máquina.

### **4.3. Processo de fabrico do filamento**

No processo de fabrico do filamento, a primeira etapa é seleccionar uma garrafa ou garrafão. Para facilitar o processo, faz sentido usar os que estão em melhor estado. Apesar de ser possível utilizar garrafões de qualquer marca, os apresentados serão apenas garrafões da marca Luso, para reduzir as variáveis nos testes. O primeiro passo é lavar bem o garrafão com água para remover a sujidade mais visível e deixar secar. Dado que muitas garrafas e garrafões possuem irregularidades, é necessário eliminá-las. Para isso, um furo na tampa do garrafão permitiu a aplicação de uma válvula de pressão, frequentemente usada em pneus, garantindo a correta selagem, impedindo a saída de ar. Usando uma bomba manual, aplica-se pressão no interior do garrafão através da válvula, como ilustrado na Figura 56 (a). Em seguida, com o auxílio de uma fonte de calor, gira-se o garrafão para que aqueça de

forma uniforme, sem remover a tampa. Com este processo, as estrias desaparecerão, e ficará com um aspeto semelhante ao da Figura 56 (b).



**Figura 56.** Preparação do garrafão (a) Antes (b) Depois

Após o garrafão estar o mais liso possível, retiram-se os restos de cola do rótulo com auxílio de algodão e diluente celuloso. Com um x-ato ou uma tesoura, retira-se a base, tentando sempre aproveitar as partes mais lisas. Depois, corta-se uma tira e passa-se pela ranhura. Como mostrado na Figura 57, há uma peça na base do cortador, que quando se coloca a tira de plástico na fenda previamente feita no varão roscado, permite controlar a largura da tira.



**Figura 57.** Cortador com regulação de largura da tira

A largura da tira vai influenciar a quantidade de material que existe na secção do filamento. Para determinar a largura da tira, foi realizada uma investigação da largura utilizada em outras máquinas semelhantes. Nestas máquinas, a largura varia sempre entre 7,5 mm e 9,5 mm. Por isso, optou-se por fazer tiras de plástico com larguras crescentes de 0,5 mm, começando em 6,5 mm e até 11 mm de largura.

Depois de ter as tiras com os tamanhos pretendidos, foi necessário garantir uma boa limpeza de ambos os lados da tira. Para isso, colocou-se spray de limpeza num papel absorvente e passou-se na tira até que esta fique completamente limpa. Depois, passou-se outro papel absorvente para garantir a remoção da humidade da tira.

Após testar as diferentes larguras de tiras, as observações e conclusões foram registadas na Tabela 1:

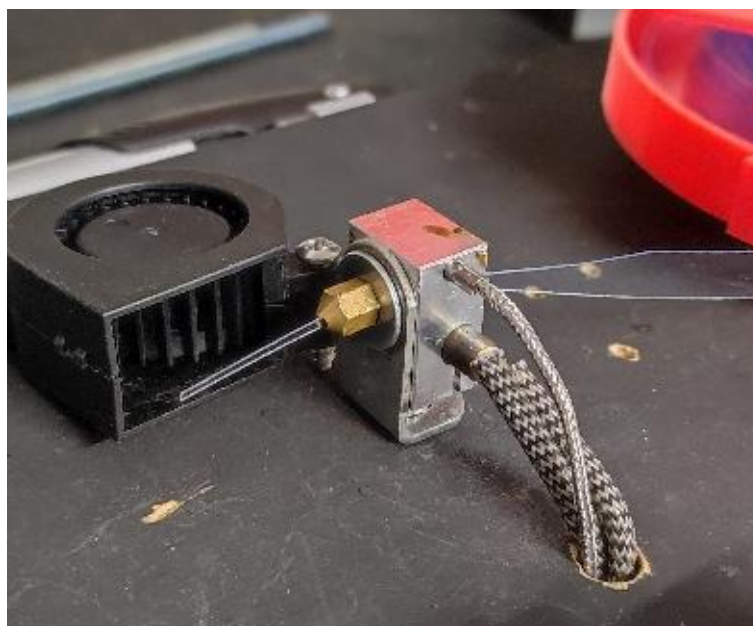
**Tabela 1.** Várias medidas para a tira de plástico e os resultados obtidos.

Largura da Tira (mm)	Diâmetro do filamento (mm)	Observações
6,5	n/d	O Filamento não fica completamente fechado
7	1,65	Em certas partes do filamento ficam partes que não fecham bem
7,5	1,72	O filamento fica fechado
8	1,74	
<b>8,5</b>	<b>1,75</b>	
<b>9</b>	<b>1,75</b>	
9,5	1,76	
10	1,76	
10,5	1,77	
11	1,78	
11,5	1,8	O motor começa a fazer muito esforço e por vezes abranda
12	n/d	O filamento parte

Como registado na tabela, a tira tem de ter um tamanho mínimo para garantir que o plástico, ao ser moldado em filamento, tenha material suficiente para formar um tubo completamente fechado. Mesmo com 7 mm, ainda não é possível obter material suficiente em certas zonas, devido a possíveis pequenas variações na largura da tira feitas durante o processo do corte. Por outro lado, se houver material a mais, ou seja, se a largura da tira for demasiado grande, surgem problemas ao extrudir o filamento no orifício de 1,75 mm, acabando este por partir no bloco de aquecimento. Isso ocorre porque a tira não passa pelo bocal e começa a derreter dentro do bloco acabando por partir. Como observado, a partir de 11,5 mm, o motor começa a parar por falta de força para puxar o material em excesso, e ao parar, cria zonas do filamento que derretem e geram irregularidades. Tendo em conta que o diâmetro comercial é na ordem dos 1,75 mm, e na tabela esse valor ocorre para tiras de

largura de 8,5 mm e 9,0 mm, considerou-se para ponto de partida o valor intermédio para começar os testes do filamento.

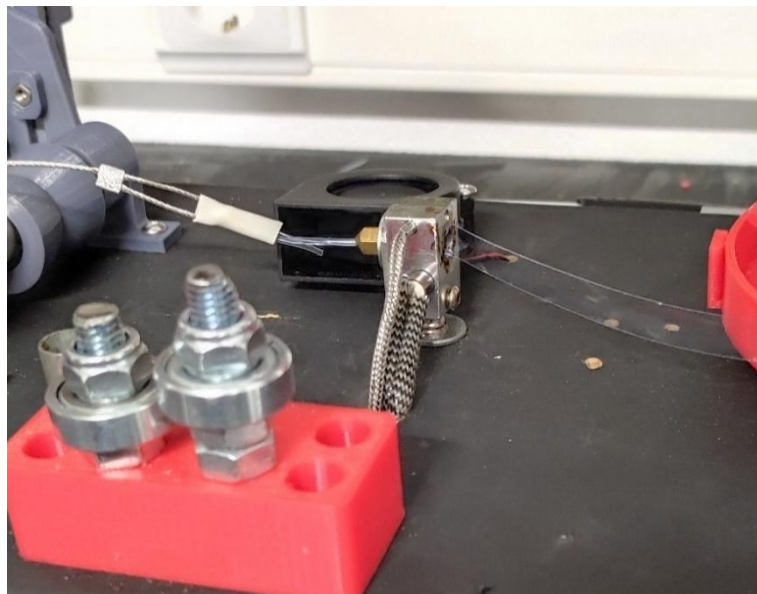
Posteriormente, cortou-se uma tira de plástico com 8,75 mm, que foi enrolada na bobina para colocar na máquina. A ponta da tira foi cortada de forma a ser suficientemente pequena para passar no bocal de extrusão, como mostrado na Figura 58 e foi inicialmente empurrada contra o bocal de extrusão, e puxada ligeiramente no lado oposto do bocal com um alicate.



**Figura 58.** Tira de plástico a passar no bocal de extrusão.

Após a tira estar bem presa, a máquina pode ser ligada e o controlador ajustado para a temperatura desejada. Segundo Kong (2003) o PET funde entre 255 °C e 265 °C, por isso a temperatura deve ser no máximo essa, enquanto a temperatura de moldagem é de 140 °C, por isso o bloco de aquecimento é ajustado para essa temperatura como ponto de partida, e depois aumenta-se gradualmente até que o filamento flua bem. Dependendo da espessura e largura da tira, pode ser necessário mais ou menos calor. Para determinar a temperatura ideal para o processo de extrusão do filamento, foi-se aumentando a temperatura de 10 °C em 10 °C, e a tira de plástico foi sendo puxada. Verificou-se que a partir dos 195 °C o filamento começa a passar pelo bocal de extrusão, mas ainda com algum esforço. Porém, aumentou-se a temperatura até que o filamento passasse facilmente pelo bocal sem estar derretido. Constatou-se que entre os 205 °C e os 220 °C, o filamento atinge a temperatura ideal para o que se pretende. Como há sempre alguma flutuação na temperatura, foi decidido que a temperatura mais favorável para o processo de extrusão será 215 °C. Como demonstrado na Figura 59, para começar o processo, um cabo que está fixo na bobina

acoplada à engrenagem motora foi preso à ponta de filamento na saída do extrusor, evitando que o filamento se solte, e garantindo que começa a enrolar na bobina sem problemas.



**Figura 59.** Filamento preso à bobina.

Após 30 minutos foi possível transformar o garrafão, que antes era lixo, em cerca de 10,50 m, ou 32 g de filamento, conforme se observa na Figura 60.



**Figura 60.** Filamento rPET pronto a usar.

## 4.4. Impressão com rPET

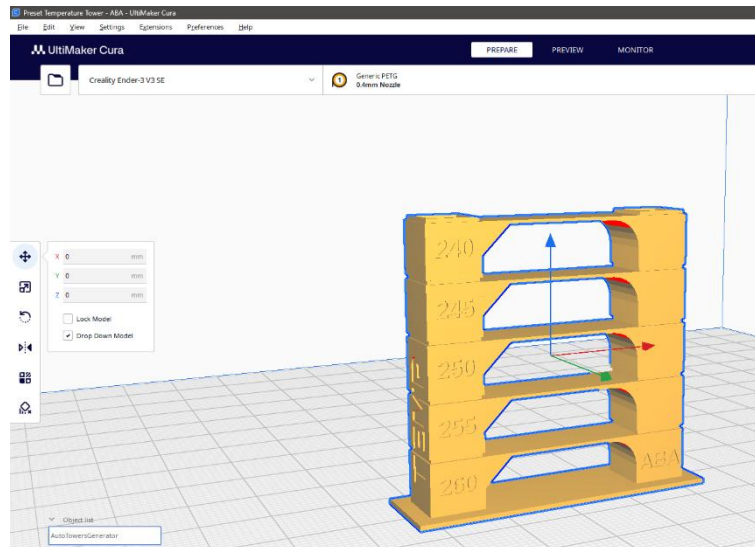
Com o filamento pronto, passou-se para a impressão por FDM. As configurações no fatiador são extremamente importantes, e, se não estiverem otimizadas para o material em questão, os resultados podem não ser satisfatórios. No entanto, a informação disponível em artigos científicos ou mesmo na internet sobre as configurações para imprimir com rPET refere-se sempre a filamento comercial, que acaba por não ter as mesmas propriedades. Ainda assim, é um ponto de partida.

Segundo Forward (2024), a temperatura de impressão deve variar entre os 225 °C e os 245 °C, e a temperatura da base entre os 65 °C e os 85 °C. Quanto à velocidade, Woern et al (2018), detalha valores de impressão entre 5 mm/s e 50 mm/s, com a velocidade ótima citada entre 20–30 mm/s. De acordo com Form Futura (2024), o ventilador da impressora deve operar entre 0% e 30%.

Os parâmetros de impressão inicialmente usados foram:

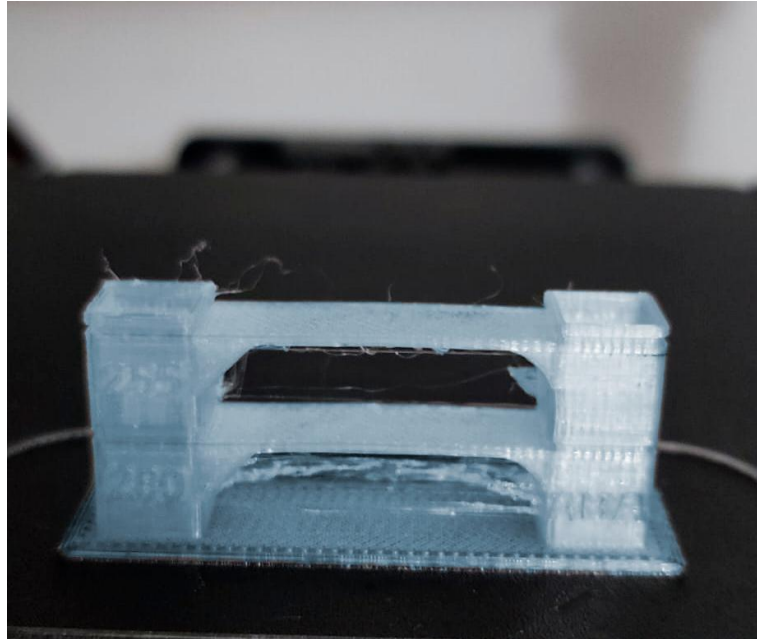
- Temperatura da base: 70 °C;
- Velocidade do ventilador: 30%;
- Velocidade de impressão: 30 mm/s.

Para determinar a temperatura ideal procedeu-se à impressão de uma torre de temperatura para determinar a mais favorável para a melhor qualidade de impressão. Utilizou-se o fatiador Ultimaker Cura, e foi usada a torre de temperatura destinada ao material ABS, pois o intervalo de temperatura analisado é o pretendido. Conforme apresentado na Figura 61, a torre começará em 260 °C, que é também o máximo que a impressora utilizada suporta, e descerá até aos 240 °C.



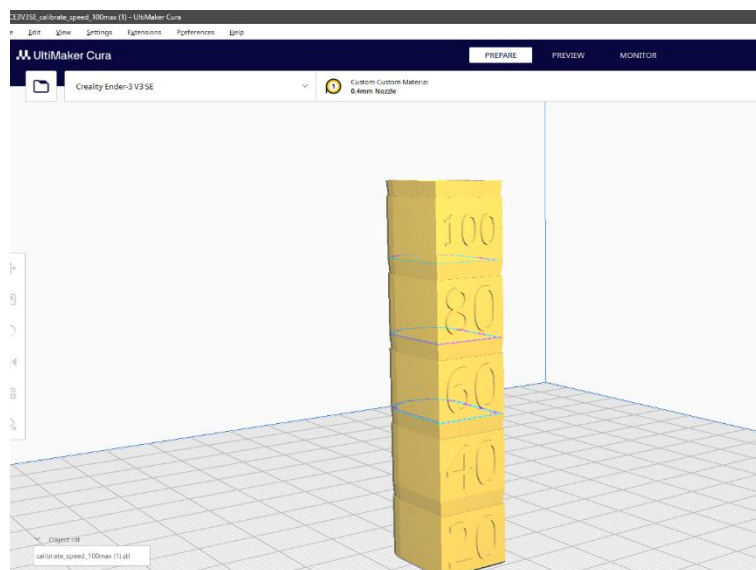
**Figura 61.** Torre de Temperatura no Ultimaker Cura.

O ficheiro foi então transferido para a impressora (Ender 3 V3 SE), e iniciou-se a impressão da torre. Como fica evidente na Figura 62, a impressão correu bem até à temperatura de 255 °C. No entanto, assim que atingiu os 250 °C, o bocal de extrusão deixou de conseguir derreter o material. Com isto, conclui-se que a temperatura mínima é 250 °C. Além disso, como se pode constatar, a 260 °C verificou a formação de *strings*, que ocorre devido a deposição excessiva de filamento onde não era suposto, o que indica uma temperatura excessiva, já que o filamento, ao movimentar-se, derrete e passa pelo bocal de extrusão quando não deveria. Assim, conclui-se que a temperatura ideal para a impressão com este filamento é de 255 °C. Quanto aos restantes parâmetros pré-selecionados, e de acordo com esta primeira impressão, consideraram-se adequados.



**Figura 62.** Torre de temperatura impressa.

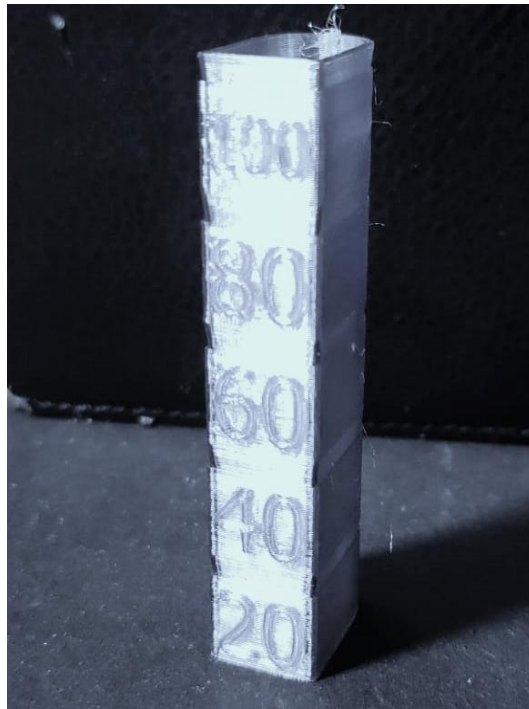
Quanto à velocidade existem também torres de calibração, a que está identificada na Figura 63, começa com uma velocidade mínima de 20 mm/s, e de 20 em 20 mm/s vai até a uma velocidade máxima de 100 mm/s.



**Figura 63.** Torre de velocidade no Ultimaker Cura.

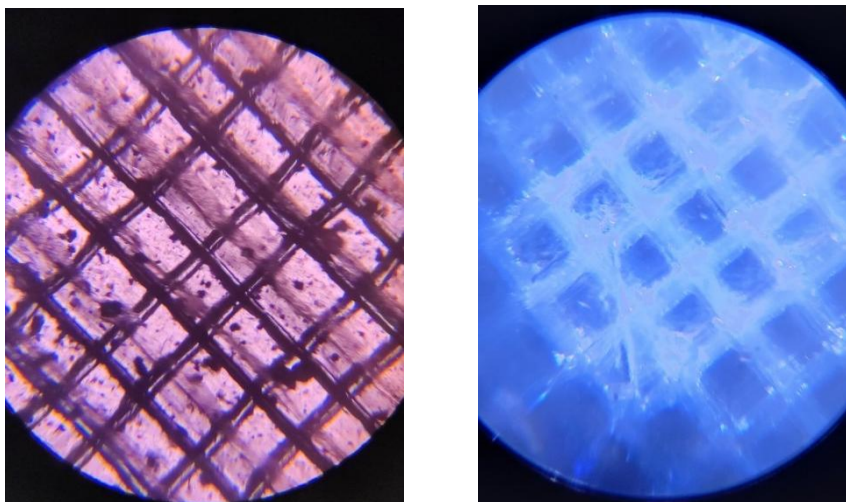
Mais uma vez, a peça é impressa na Ender 3 V3 SE, e o resultado pode ser visto na Figura 64, e conseguimos perceber que o material conseguiu imprimir mesmo na velocidade máxima de 100 mm/s, porém já se consegue notar algumas falhas nas camadas, a 80 mm/s, a impressão tem um bom resultado, porém para peças mais complexas poderá ser

necessário diminuir a velocidade. É na velocidade de 60 mm/s onde as camadas estão com melhor qualidade de impressão.



**Figura 64.** Torre de velocidade impressa.

Ao analisar com detalhe a base da torre de temperatura, é possível identificar algumas falhas de material. Com o auxílio de um microscópio, e como mostrado na Figura 65, à esquerda observa-se a camada superior de uma peça impressa com filamento comercial, enquanto à direita está a imagem da camada superior da base da torre de temperatura impressa com rPET, evidenciando uma clara diferença entre os dois materiais e na falta de material na peça de rPET.



**Figura 65.** Camadas superiores: filamento comercial (esquerda) vs. rPET (direita).

Verificou-se que com o filamento reciclado não foi possível obter um fluxo adequado. O filamento reciclado, ao contrário do comercial, é oco, o que poderá ser a causa deste problema. Na Figura 66, é apresentada uma imagem ampliada da secção do filamento.

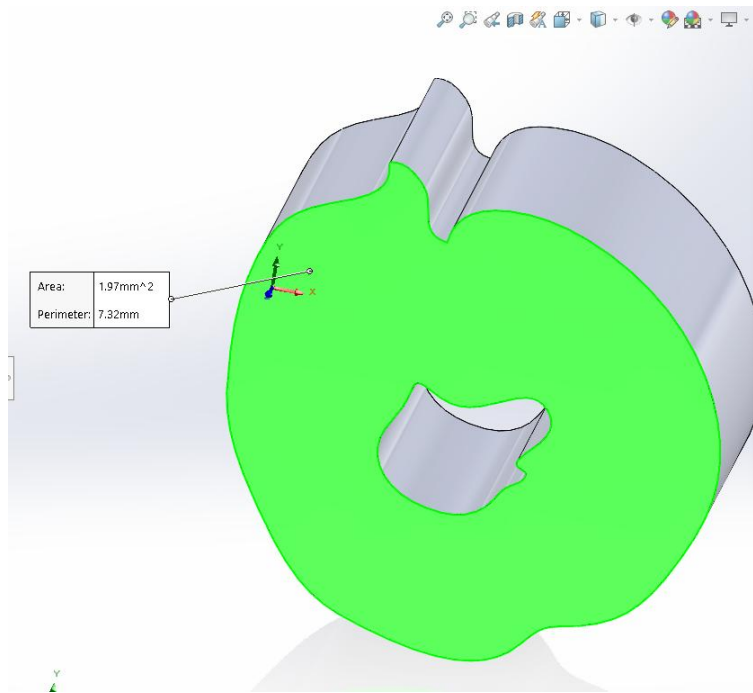


**Figura 66.** Secção ampliada do filamento rPET.

Mesmo com a tira mais larga, o filamento resultante era oco. Para testar, foi impresso um outro provete com um filamento feito a partir de uma tira de 10 mm, onde é visível a olho nu que a secção oca do filamento é menor. No entanto, logo na primeira camada, a impressora começou a entupir. Com uma impressora capaz de trabalhar a temperaturas superiores a 260 °C, os resultados poderiam ser melhores. Contudo, uma vez que não é o caso, e para garantir que o filamento seja compatível com qualquer impressora, o problema será corrigido de outra forma, aumentando o caudal para compensar a falta de material.

O caudal ou em inglês o *flow* é uma configuração que controla a quantidade de filamento extrudido pelo bocal da impressora 3D. Normalmente, é representado como uma percentagem ou valor decimal, onde 1 ou 100% corresponde à quantidade normal de filamento extrudido, sem qualquer compensação. Valores superiores ou inferiores indicam uma maior ou menor quantidade de filamento extrudido, respetivamente.

Foi necessário, portanto, determinar a quantidade de material em falta no filamento reciclado devido à presença do oco, para calcular o valor a compensar no caudal. Com a ajuda do Solidworks, e sabendo o diâmetro da secção do filamento, é possível desenhar por cima da imagem ampliada da secção do filamento produzido, e a partir daí estimar a área de secção aproximada do filamento, como mostrado na Figura 67.



**Figura 67.** Estimativa da área de secção do filamento no Solidworks.

Após determinar que a área de secção aproximada do filamento criado anteriormente é de 1,97 mm<sup>2</sup>, estimou-se a área do filamento comercial usando a equação seguinte:

$$A_{FC} = \pi * r_{FC}^2 = \pi * \left(\frac{1,75}{2}\right)^2 = 2.405 \text{ mm}^2$$

Onde:

- $A_{FC}$  representa a área da secção do filamento comercial;
- $r_{FC}$  significa o raio da secção do filamento comercial.

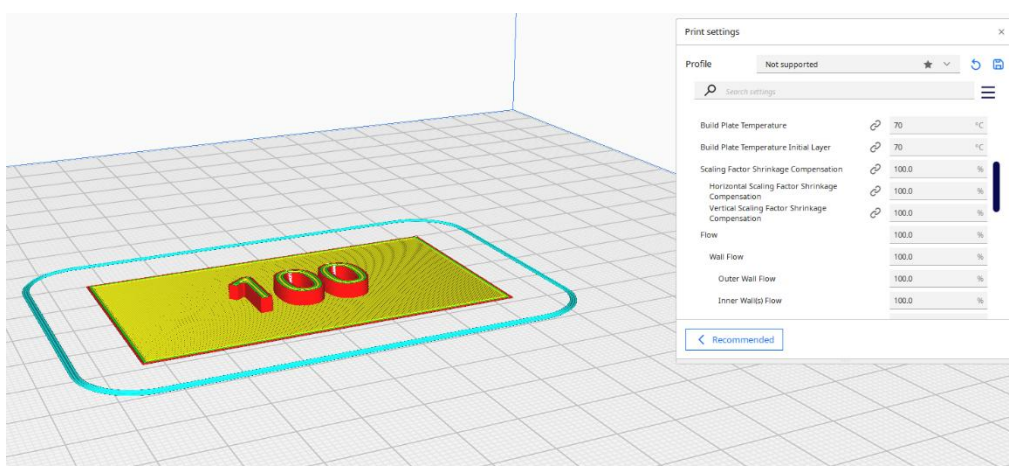
Sabendo a área que o filamento reciclado deveria ter, resta apenas realizar um cálculo simples para determinar o valor a compensar no caudal quando passamos a peça para software de fatiamento:

$$\text{Razão} = \frac{2.41}{1.97} = 1.22$$

$$\text{Flow}_{\text{normal}} = 100\%$$

$$\text{Flow}_{\text{corrigido}} = \text{Razão} * \text{Flow}_{\text{normal}} = 1.22 * 100\% = 122\%$$

Para compreender a diferença na primeira camada, foram realizados alguns ensaios. Começou-se por imprimir uma amostra com apenas uma camada, utilizando um caudal normal de 100%, conforme mostrado na Figura 68. Em seguida, imprime-se outra amostra variando apenas o caudal para 122%, que é o valor teórico para compensar o facto de o filamento ser oco. Para uma comparação mais precisa, foram impressas também duas amostras de teste com os valores de 115% e 130%.



**Figura 68.** Teste com um Flow de 100% no Ultimaker Cura.

Após a impressão de todas as peças, proceder-se-á à comparação dos resultados apresentados na Figura 69:



**Figura 69.** Amostras com os diferentes valores de Flows.

É fácil perceber que a peça impressa com o caudal padrão de 100% apresenta falhas na primeira camada, indicando que o material não está a ser extrudido na quantidade necessária para uma camada completa e sem imperfeições. Ao aumentar o caudal para 115%, observa-se uma melhoria significativa, com a eliminação das falhas e uma camada consistente. Com um caudal de 122%, que é o valor teórico adequado para este filamento, obtém-se uma camada ainda mais uniforme. O aumento para 130% já não proporciona

melhorias adicionais significativas a olho nu, por isso considera-se como 122% como valor para o caudal. Testes mais detalhados poderão ser feitos para chegar a um resultado melhor como indicado no capítulo dos trabalhos futuros.



## 5. Resultados

### 5.1. Introdução

Após determinar a temperatura ideal de impressão e o *Flow* correto, serão testadas as propriedades mecânicas do filamento.

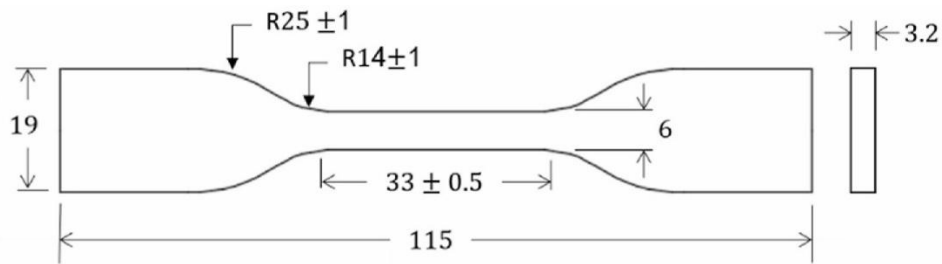
Para avaliar as propriedades mecânicas do filamento rPET produzido, serão realizados testes de tração para determinar a resistência do material sob carga. Os ensaios de tração medem a resistência de um material quando submetido a uma força que tenta esticá-lo até ao ponto de rutura (3devo, 2024). Este teste permite determinar parâmetros como a tensão máxima, a deformação e o módulo de elasticidade, fornecendo uma visão do comportamento do material sob carga.

No caso dos provetes impressos em 3D, os ensaios geralmente seguem a norma ASTM D638 ou a ISO 527-2, mas podem não fornecer dados completamente adequados para esta aplicação específica. Estas normas são normalmente aplicadas a provetes de materiais maciços e homogêneos, o que não se verifica na impressão 3D. Na impressão 3D, as propriedades do material dependem da mesoestrutura complexa criada pelo software de fatiamento e pelos parâmetros de impressão escolhidos. Essa mesoestrutura inclui fatores como a percentagem e padrão de preenchimento, a altura de camada e o número de paredes, entre outros (Impressoras3D, 2023). Para tentar aproximar os provetes impressos vamos definir um preenchimento de 100% e retirar as camadas de topo, de base e as paredes.

Segundo Foster (2015), o National Institute of Standards and Testing concluiu que as normas ISO 527-2 e ASTM D638 podem fornecer resultados aproximados para peças fabricadas por fabrico aditivo, mas devem ser usadas com cuidado até que sejam desenvolvidos padrões específicos para esta tecnologia.

Tanto a norma ISO 527-2 como a ASTM D638 utilizam provetes com um formato frequentemente referido como *dog-bone shape* ou osso de cão em português, devido à sua aparência. Neste caso, utilizou-se a norma ASTM D638 adaptada, e o provete tipo IV, uma vez que tem um tamanho menor, que é adequado para o teste e permite economizar material e tempo. O mais importante é garantir que todos os provetes independentemente do material usado apresentem as mesmas medidas, os parâmetros de impressão e serem impressas na mesma impressora, para reduzir ao máximo possíveis variáveis.

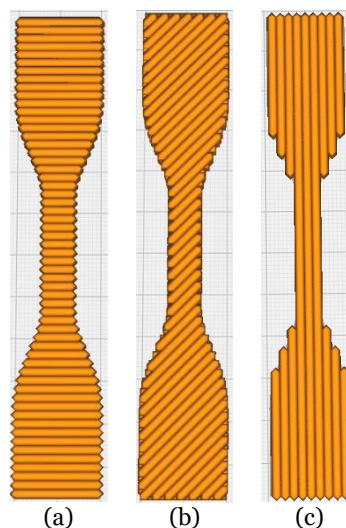
As dimensões dos provetes estão apresentadas na Figura 70.



**Figura 70.** Dimensões da peça de teste em milímetros.

A secção estreita dos provetes impressos em 3D é especialmente projetada para garantir que a rutura ocorra nessa área, proporcionando uma medição precisa da resistência à tração.

No caso do rPET, foram realizados testes de tração com variação na direção de impressão, usando  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  para avaliar o impacto da orientação das camadas nas propriedades mecânicas do material reciclado. Esta abordagem permite uma análise mais detalhada do comportamento anisotrópico dos provetes impressos, uma vez que a impressão 3D gera propriedades mecânicas distintas conforme a orientação das camadas. Testando a  $90^\circ$ , é possível avaliar diretamente a resistência do material à tração, a  $0^\circ$ , a análise foca-se mais na adesão entre camadas, enquanto a  $45^\circ$  permite observar o padrão de impressão e a interação entre essas duas variáveis. Como o rPET é um material reciclado, é crucial entender como essa variação afeta a resistência. As representações dos provetes no fatiador podem ser vistas na Figura 71.



**Figura 71.** Representação dos provetes no fatiador com os ângulos  $0^\circ$  (a),  $45^\circ$  (b) e  $90^\circ$  (c) respetivamente

Além disso, será feita uma comparação entre o rPET e o PETG da marca eSUN (eSUN, 2021) nos diferentes ângulos de impressão, para perceber as semelhanças e

diferenças entre os dois materiais, avaliando também como o PETG reage às diferentes orientações e se há algum padrão em comum com o rPET.

No ângulo padrão de 45°, serão comparados provetes feitos a partir de dois garrafões de marcas diferentes, mas com a mesma espessura, para avaliar se as propriedades mecânicas variam significativamente, mantendo todo o processo de fabricação do filamento e da impressão do provete constante.

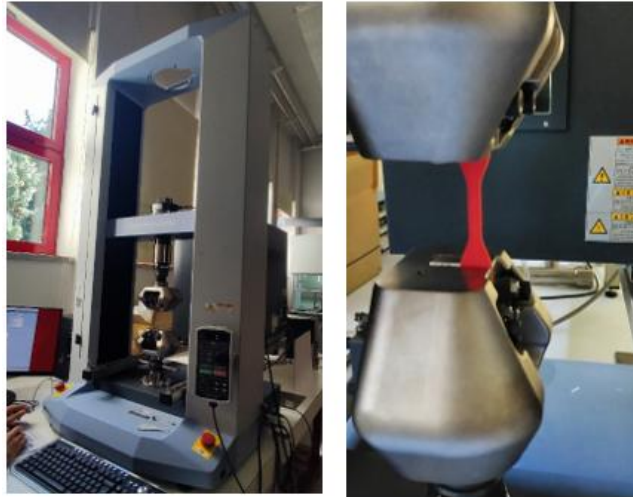
Por fim, será ainda feito um teste a um provete de PET recortado diretamente do garrafão Luso usado para o fabricação do filamento para tentar perceber o quanto todo o processo de reciclagem e impressão altera as propriedades mecânicas.

Após sabermos o provete que vamos testar, resta transformar o ficheiro STL para o formado G-code, usado na impressora. Para isso será usado o fatiador Ultimaker Cura, mudando apenas algumas configurações de um material para o outro. Podemos ver as configurações na Tabela 2:

**Tabela 2.** Alterações nas configurações usadas no Ultimaker.

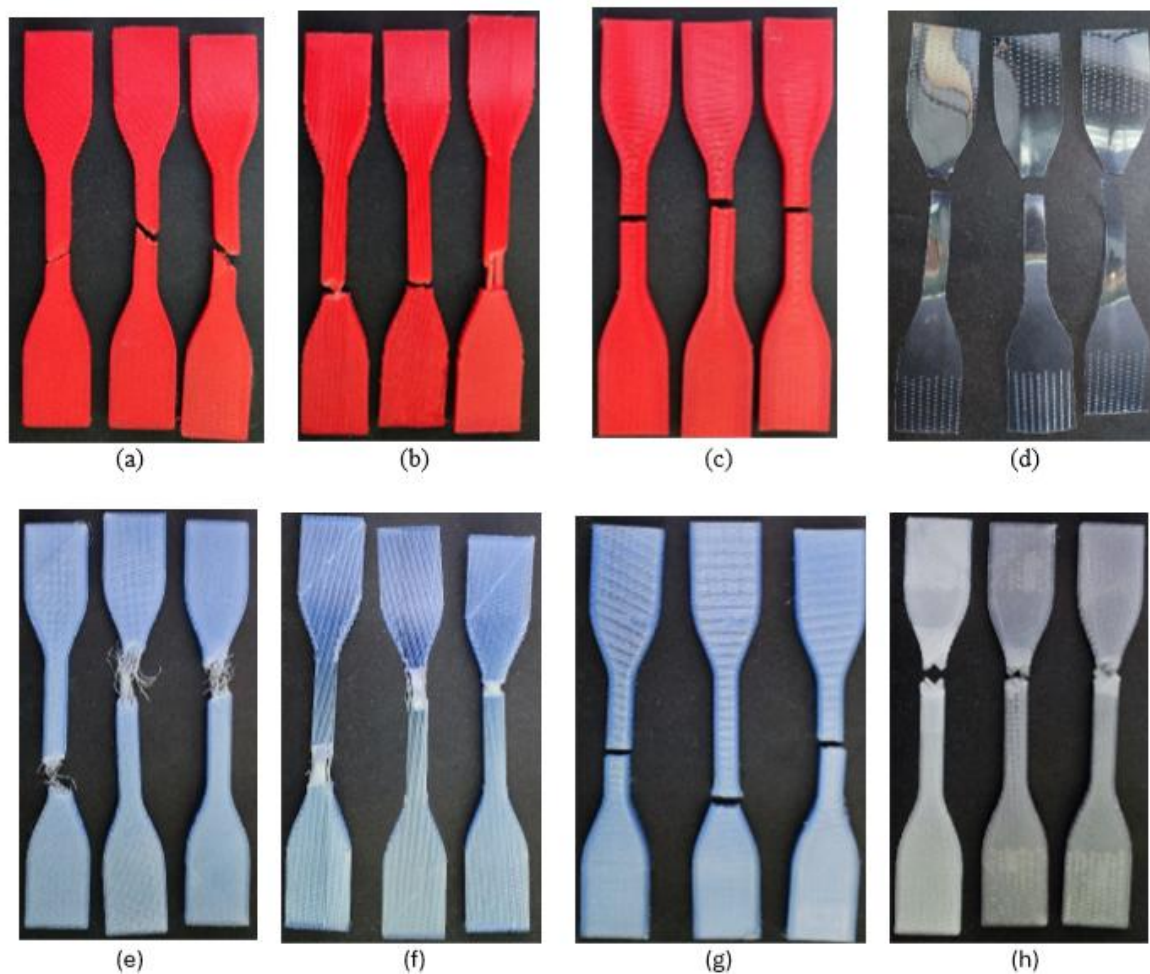
	<b>rPET</b>	<b>PETG</b>
Taxa de fluxo	122 %	100 %
Temperatura de extrusão	255 °C	240 °C
Temperatura da base	80 °C	70 °C
Velocidade do ventilador	30 %	
Número de paredes	0	
Número de camadas superiores	0	
Número de camadas inferiores	0	
Preenchimento	100 %	
Ângulo de impressão	0°/ 45°/ 90°	

O equipamento usado para realizar o ensaio de tração é a máquina de ensaios universal Shimadzu AGS -50 kN, mostrada na Figura 72, e será definida uma velocidade de 10 mm/min e uma distância inicial entre amarras de 65 mm.



**Figura 72.** Máquina de ensaios universal Shimadzu AGS-50kN

Foram feitos três provetes para cada teste e todos eles partiram de forma que os mesmos fossem válidos. Na Figura 73 temos todos os provetes já fraturados, divididos por material e teste:



**Figura 73.** Provetes após os testes (a) PETG 45° (b) PETG 90° (c) PETG 0° (d) PET (e) rPET 45° (f) rPET 90° (g) rPET 0° (h) rPET de uma marca diferente 45°

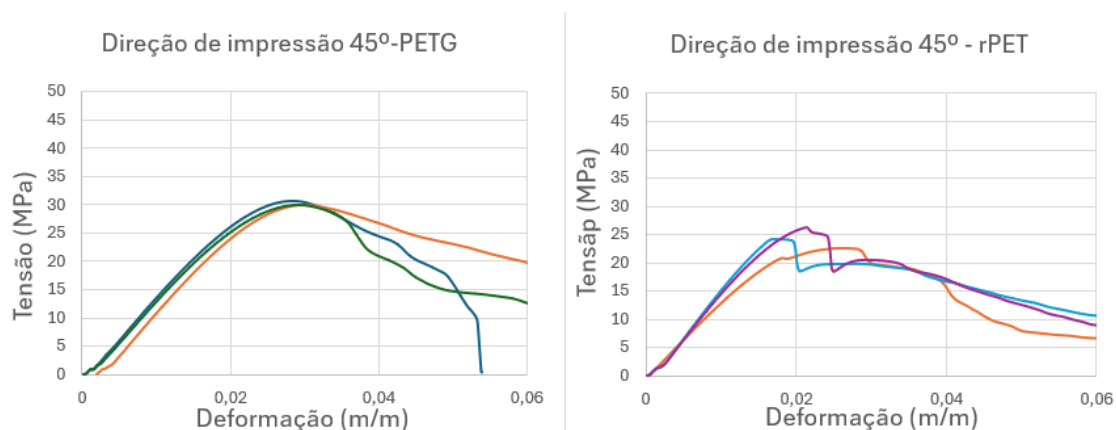
Com os testes realizados, foram adquiridos dados computacionais relativos à força e ao deslocamento da amarra móvel, que foram transformados em gráficos e tabelas, permitindo uma análise detalhada de cada provete. Esses recursos ajudarão a interpretar as características mecânicas de cada material, facilitando a identificação de padrões e comparações.

## 5.2. Discussão dos resultados

### 5.2.1. Comparação de rPET e PETG

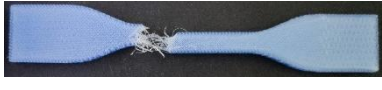

Para comparar melhor os resultados do rPET e do PETG, serão colocados lado a lado com o mesmo ângulo de impressão. Em seguida será apresentada também uma tabela com a resistência, o módulo de Young, a deformação na falha, o modo de falha e uma imagem da rotura aproximada. Todos os valores são feitos consoante o valor médio.

Na Figura 74 e na Tabela 3 é apresentada a comparação das propriedades mecânicas do PETG e do rPET a 45°.



**Figura 74.** Gráfico Tensão x Deformação do PETG e do rPET a 45°.

**Tabela 3.** Comparação das propriedades mecânicas do PETG e do rPET a 45°.

	Resistência (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na falha (mm/mm)	Modo de falha	Imagem da rotura
<b>rPET 45°</b>	24,23 ± 1,85	1,43 ± 0,29	0,02 ± 0,01	Fratura parcialmente dúctil	
<b>PETG 45°</b>	29,97 ± 0,48	1,44 ± 0,03	0,03 ± 0,01	Fratura parcialmente dúctil	

Ao analisar os gráficos de tensão deformação para o PETG e o rPET a 45°, é possível identificar semelhanças e diferenças importantes no comportamento dos materiais. Ambos apresentam curvas com um formato semelhante, caracterizado por um aumento inicial de tensão até atingir um pico, seguido por uma queda gradual. Este padrão sugere que ambos os polímeros têm um comportamento mecânico semelhante, com uma resistência inicial à deformação até atingirem o ponto de rotura. No entanto, o PETG apresenta uma queda mais acentuada na região após o pico em comparação ao rPET, cuja curva de decaimento é mais suave e prolongada.

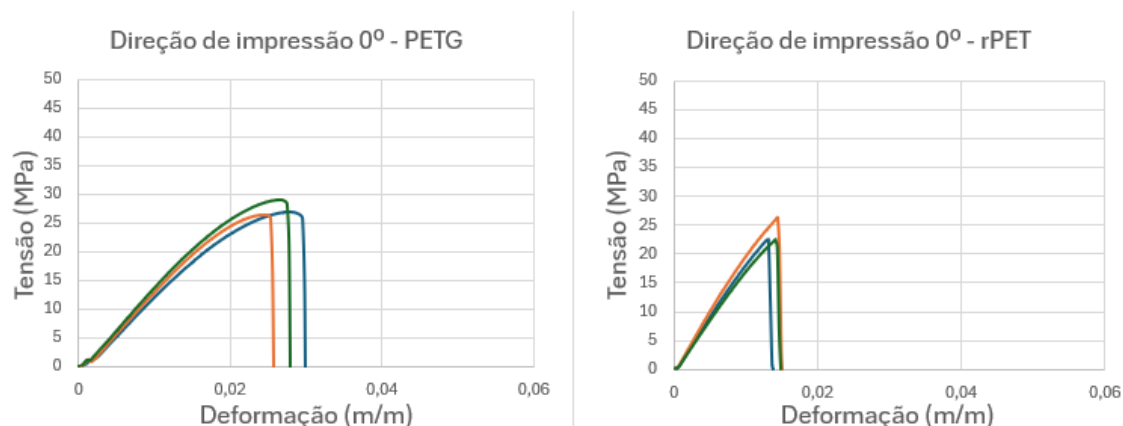
A diferença na resistência máxima entre os dois materiais não é grande, indicando que ambos possuem resistências semelhantes. O PETG demonstra valores superiores, situando-se em torno dos 30 MPa, enquanto o rPET registra aproximadamente 24 MPa.

O PETG também apresenta uma deformação ligeiramente maior na rotura, com 0,03 mm/mm comparado ao rPET com 0,02 mm/mm, que indica que o PETG é ligeiramente mais dúctil antes de atingir a falha completa, sendo capaz de suportar maior deformação. Esta diferença é visível no formato das curvas, com o PETG a apresentar uma zona de plasticidade maior.

Relativamente ao módulo de Young, os valores de PETG e rPET são praticamente os mesmos, com uma diferença de apenas 0,01 GPa, sendo o PETG ligeiramente mais rígido. Isto é evidenciado pela curva de tensão mais íngreme na fase inicial de deformação do PETG.



Ambos os materiais tiveram uma fratura parcialmente dúctil, o que significa que a rotura ocorreu de forma semelhante nos dois casos, e que o comportamento está entre a fratura frágil e dúctil. As imagens dos provetes mostram essa característica, embora o PETG apresente uma falha mais localizada, enquanto o rPET revela uma fratura mais distribuída.

Na Figura 75 e na Tabela 4 é apresentada a comparação das propriedades mecânicas do PETG e do rPET a 0°.



**Figura 75.** Gráfico Tensão x Deformação do PETG e do rPET a 0°.

**Tabela 4.** Comparação das propriedades mecânicas do PETG e do rPET a 0°.

	Resistência (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na falha (mm/mm)	Modo de falha	Imagem da rotura
<b>rPET</b> 0°	22,38 ± 2,26	1,87 ± 0,16	0,01 ± 0,0001	Fratura frágil	
<b>PETG</b> 0°	26,88 ± 1,33	1,38 ± 0,08	0,03 ± 0,001	Fratura frágil	

Ambos os provetes impressos a 0° apresentam curvas de tensão com um formato semelhante, caracterizado por um aumento inicial de tensão até atingir um pico, seguido por uma queda brusca, o que indica uma fratura frágil, quase sem patamar de plastificação. Este comportamento sugere que os materiais têm um comportamento mecânico semelhante, resistindo ao aumento de tensão até à rotura sem evidenciar grande deformação plástica. Também pela semelhança entre o comportamento dos dois materiais percebemos que o provete de rPET apresenta uma boa adesão entre camadas.

Apesar do formato parecido das curvas, o PETG atinge uma tensão máxima superior, situando-se em torno de 27 MPa, enquanto o rPET alcança aproximadamente 22 MPa. O que mostra que o PETG possui uma maior resistência à tração antes da fratura. Além disso, o PETG apresenta uma deformação ligeiramente maior na falha, apresentando 0,03 mm/mm, enquanto o rPET falha com uma deformação inferior de 0,01 mm/mm. Com isso pode-se dizer que o PETG tem ligeiramente uma maior capacidade de alongamento antes da falha, sendo um pouco mais flexível em comparação com o rPET.

Por outro lado, o rPET mostra um módulo de Young superior ao do PETG, o que indica que é um material mais propenso à deformação sob carga, o que justifica a maior deformação na rotura.

As imagens reforçam que, com um ângulo de impressão de 0°, tanto o PETG quanto o rPET demonstram um comportamento predominantemente frágil, com roturas a ocorrerem de forma rápida e sem sinais visíveis de deformação plástica.

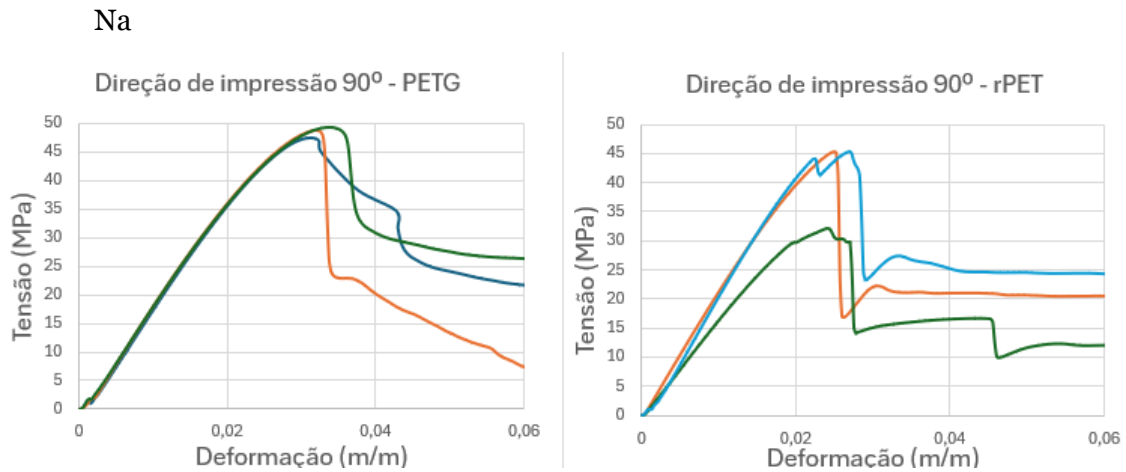
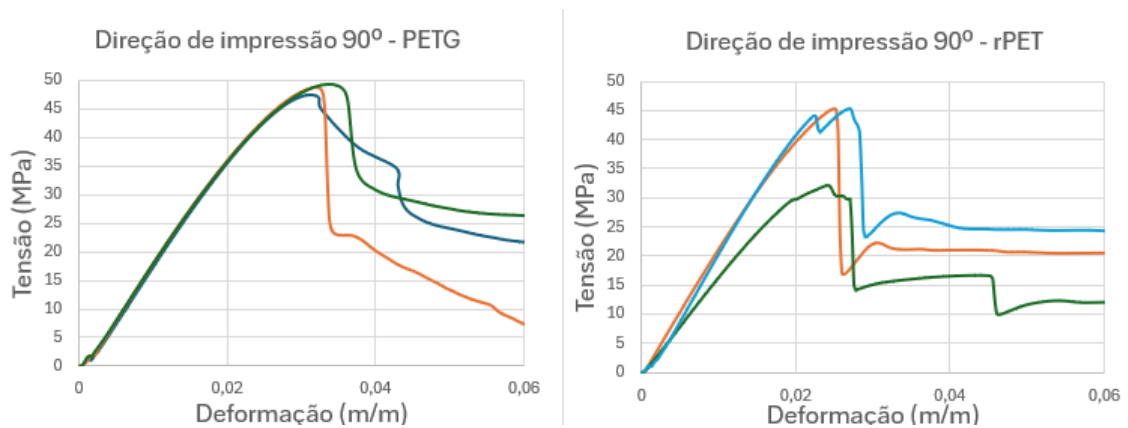




Figura 76 e na Tabela 5 é apresentada a comparação das propriedades mecânicas do PETG e do rPET a 90°.



**Figura 76.** Gráfico Tensão x Deformação do PETG e do rPET a 90°.

**Tabela 5.** Comparação das propriedades mecânicas do PETG e do rPET a 90°.

	Resistência (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na falha (mm/mm)	Modo de falha	Imagem da rotura
--	-------------------	-----------------------	-----------------------------	---------------	------------------

<b>rPET 90°</b>	45,20 ± 7,52	2,19 ± 0,01	0,02 ± 0,34	Fratura dúctil	
<b>PETG 90°</b>	48,68 ± 0,87	1,91 ± 0,01	0,03 ± 0,001	Fratura dúctil	

Para ambos os materiais, as curvas de tensão-deformação a 90° seguem um padrão semelhante ao observado nos testes a 45°, com um aumento de tensão até atingir o pico, seguido por uma queda. No entanto, em comparação com os gráficos a 45°, observam-se diferenças mais acentuadas no comportamento após o pico. No caso do rPET, a curva é mais irregular, apresentando flutuações de subida e descida, o que indica uma variabilidade maior na falha mecânica, que estará relacionada com o material e a sua orientação. No entanto, com esta orientação, os valores de tensão máxima são superiores em relação às restantes.

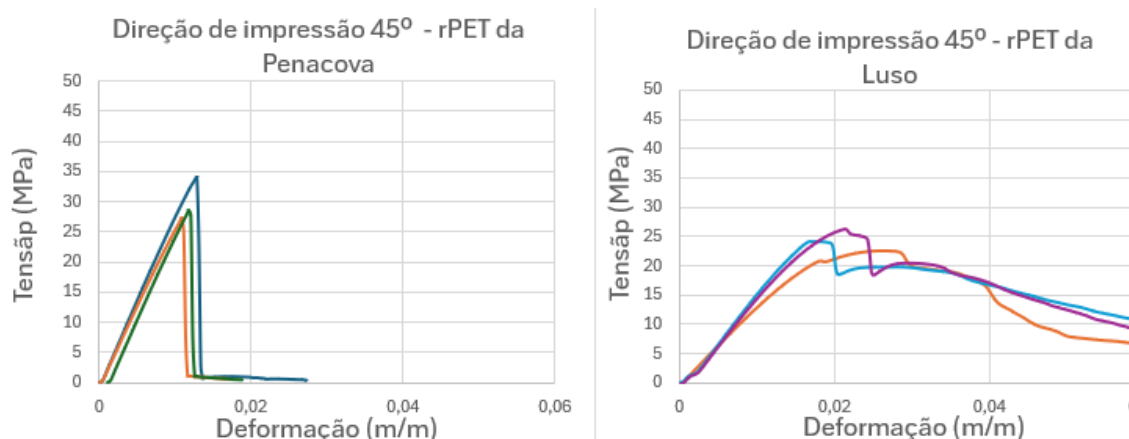
O PETG continua a demonstrar uma tensão máxima ligeiramente superior, atingindo cerca de 49 MPa, enquanto o rPET atinge um pico médio em torno de 45 MPa.

As curvas indicam que o PETG se deforma mais antes de falhar, apresentando uma deformação máxima de 0,03 mm/mm, enquanto o rPET tende a falhar com uma deformação em torno de 0,02 mm/mm. Isto sugere que o PETG é ligeiramente mais dúctil como já sido observado nos outros gráficos.

A falha dúctil é claramente visível em ambos os provetes, que mesmo após o pico de tensão as duas partes do provete nunca se separaram.

### **5.2.2. Comparação do rPET de dois garrafões de diferentes marcas**

Existem inúmeras marcas que utilizam garrafas e garrafões de PET, e embora muitas pareçam visualmente semelhantes, a tonalidade pode alterar-se quando o material é sobreposto em camadas, como acontece nas peças impressas. Além disso, há alguns valores de espessura padrão que são normalmente usados, tais como 0,30 mm, 0,25 mm, 0,20mm e ainda 0,15 mm. Para testar até que ponto as propriedades do material se alteram ao utilizar outra marca, foi escolhido um garrafão da Penacova que têm a mesma espessura que os da Luso para realizar um teste com o ângulo de impressão padrão. Os resultados podem ser vistos na Figura 77 e na Tabela 6.



**Figura 77.** Gráfico Tensão x Deformação de rPET de marcas diferentes.

**Tabela 6.** Comparação das propriedades mecânicas de rPET de marcas diferentes.

	<b>Resistência (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Deformação na falha (mm/mm)</b>	<b>Modo de falha</b>	<b>Imagem da rotura</b>
<b>rPET Luso 45°</b>	24,23 ± 1,85	1,43 ± 0,29	0,02 ± 0,01	Fratura parcialmente dúctil	
<b>rPET Penacova 45°</b>	27,38 ± 3,91	2,78 ± 0,1	0,01 ± 0,001	Fratura parcialmente frágil	

Tendo em conta que a espessura do material é a mesma, a tira de plástico foi cortada com as mesmas dimensões usadas anteriormente no filamento produzido a partir do garrafão da marca Luso, mantendo-se também todo o processo de fabrico do filamento e o de impressão, ao comparar dois materiais que diferem apenas na origem do PET, será possível analisar as diferenças entre usar PET de marcas diferentes.

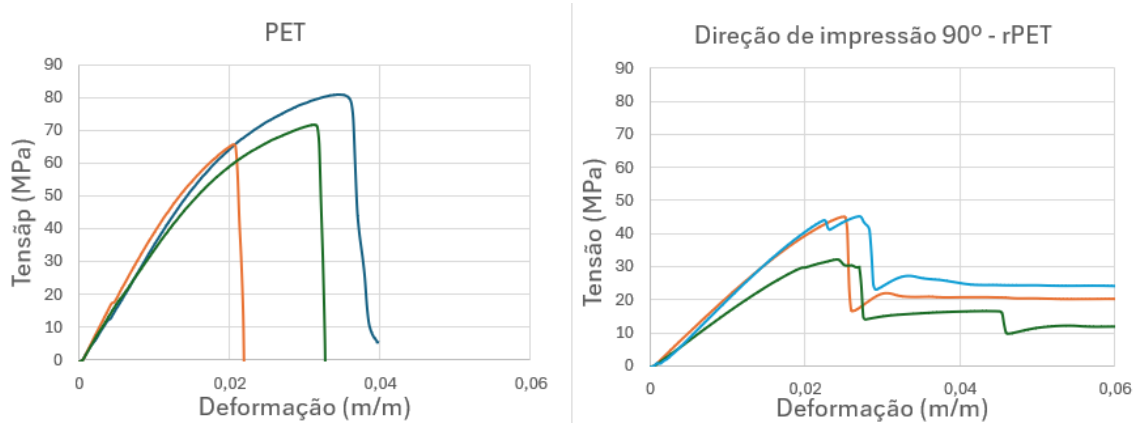
À primeira vista, parece que o provete de rPET da Penacova tem a orientação de impressão a 0°, uma vez que a curva apresentada é semelhante às anteriormente analisadas com essa mesma orientação.

Como se pode observar, e pela curva após o pico de tensão máxima, o material exibe uma falha frágil. Embora apresente um valor de resistência próximo ao do rPET inicial, com 27 MPa, a separação em duas partes do provete ocorreu logo após o pico de tensão, ao contrário dos testes realizados a 45°, onde o material demonstrou maior deformação após o pico.

Esta diferença mostra que o material proveniente da marca Penacova é consideravelmente mais rígido, o que se reflete nas suas curvas de tensão-deformação.



### 5.2.3. Resultados para PET cortado diretamente do garrafão

Quanto ao teste feito ao provete de PET recortado diretamente do garrafão usado para criar o filamento, os resultados são apresentados na Figura 78 e na Tabela 7.



**Figura 78.** Gráfico Tensão x Deformação do rPET e do PET.

**Tabela 7.** Comparação das propriedades mecânicas do rPET e do PET.

	Resistência (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na falha (mm/mm)	Modo de falha	Imagem da rotura
<b>rPET 90°</b>	45,20 ± 7,52	2,19 ± 0,01	0,02 ± 0,34	Fratura dúctil	
<b>PET Luso</b>	71,86 ± 7,81	3,64 ± 0,34	0,03 ± 0,01	Fratura frágil	

Como pode ser consultado na DesignerData (2024), os resultados obtidos com este teste estão de acordo, sendo que, para a resistência, o valor esperado seria em torno dos 55 MPa e para o Módulo de Young 2,9 GPa. Por isso, e tendo em conta que depende sempre da origem do PET, e considerando o processo de conformação plástica de moldação por sopro que vai provocar o estiramento do PET, foram obtidos resultados superiores para resistência e para o módulo de Young.

O gráfico do PET apresenta um comportamento típico, com um aumento gradual da tensão até um pico, seguido por uma queda acentuada. A resistência máxima atingida pelo PET é de cerca de 72 MPa, com um desvio padrão elevado, o que indica variações significativas entre os provetes, devido ao corte manual. No entanto, com a diferença de valores, percebemos claramente que a impressão 3D do rPET introduz camadas que enfraquecem a coesão interna.

O PET possui um módulo de elasticidade de 3,64 GPa, o que indica que o material é mais resistente à deformação elástica do que os provetes de rPET, demonstrando uma redução notável na rigidez do material após o processo de reciclagem e impressão.

A deformação na falha para o PET é de 0,03 mm/mm, o que mostra que, embora rígido, o material pode suportar uma pequena quantidade de deformação antes de falhar.

### **5.3. Discussão de resultados**

Concluiu-se que a principal diferença entre os dois materiais, PETG e rPET, está na previsibilidade e consistência dos resultados para provetes com a mesma orientação de impressão. Nos gráficos, os provetes de rPET exibem mais irregularidades e variações, mesmo quando teoricamente idênticas, em comparação com o PETG. Essas irregularidades são evidentes especialmente nos valores de resistência, onde o desvio padrão dos provetes de rPET é relativamente maior em todos os casos. As possíveis causas para essas discrepâncias incluem:

- Inconsistências no material: Durante o processo de corte das tiras de plástico, há sempre pequenas variações na largura da tira de plástico que podem resultar em regiões com núcleos ocos maiores no filamento o que vai afetar a impressão;
- Flutuações de temperatura na termoformagem: Durante a termoformagem das tiras, pequenas variações de temperatura podem alterar a qualidade e consistência do filamento, afetando as propriedades finais do rPET.

No entanto, o formato das curvas entre os testes de PETG e rPET são bastante semelhantes, embora a amplitude dos valores varie. Ambos os materiais mostram comportamentos similares em termos de resistência, módulo de Young, deformação na falha e até mesmo no modo de falha, com o PETG a apresentar quase sempre valores superiores em relação ao rPET. Na orientação de 90°, como esperado, observam-se os maiores valores de tensão máxima, confirmando a influência significativa da direção de impressão no comportamento mecânico dos provetes.

Quanto ao teste do provete feito ao rPET de uma marca diferente, conclui-se que diferentes origens de PET podem resultar em propriedades e comportamentos mecânicos significativamente distintos, o que justifica uma análise mais aprofundada para compreender as causas dessas variações.

A análise comparativa entre o PET e o rPET evidencia diferenças significativas nas propriedades mecânicas dos materiais, refletindo o impacto dos processos de reciclagem e impressão 3D. A introdução de camadas durante a impressão 3D cria pontos de fraqueza estrutural e diminui a coesão interna do material, resultando em menor resistência e rigidez. No entanto, é importante notar que esta diminuição de desempenho não se deve unicamente ao facto de o material ser reciclado, mas também ao processo de impressão 3D a que é submetido, pois comparando o rPET com o PETG, que é um material não reciclado, mas igualmente fabricado por impressão 3D, observam-se valores semelhantes de desempenho.

#### **5.4. Exemplos de impressões com rPET**

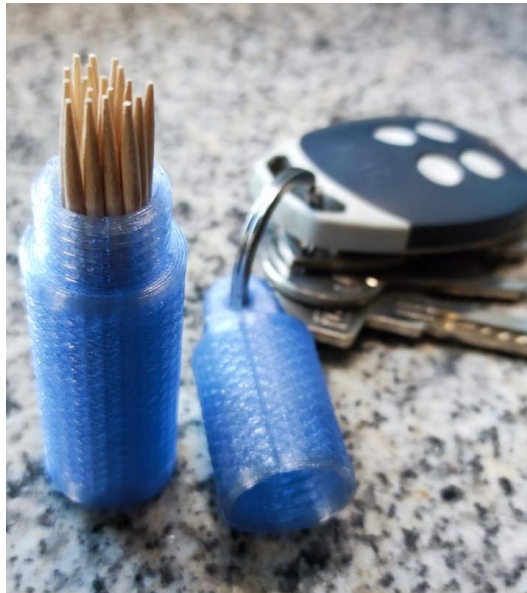
Após a conclusão do desenvolvimento da máquina, da fabricação do filamento e da calibração das configurações do fatiador, é fundamental explorar as potencialidades do filamento reciclado. Com este processo é possível transformar garrafas e garrafões que iam acabar no lixo, em produtos de valor acrescentado, demonstrando a viabilidade do processo e a qualidade das peças impressas com o material reciclado. Diversas peças foram impressas utilizando o filamento reciclado, com diferentes geometrias, tamanhos e aplicações práticas.

Na Figura 79, é apresentado um conjunto de duas peças fabricadas em rPET: uma capa para escova de dentes e um acessório que permite enrolar a embalagem, facilitando assim o uso total da pasta de dentes. Para a impressão dessas peças, foi utilizado aproximadamente um garrafão, equivalente a 10 metros de filamento.



**Figura 79.** Acessórios para pasta e escova de dentes impresso com rPET.

Na Figura 80, é mostrado um porta-chaves que funciona como uma pequena cápsula para transportar palitos. A peça foi impressa de uma só vez e apresentou um excelente desempenho, com as tolerâncias adequadas. Com um garrafão semelhante ao analisado, é possível produzir duas peças iguais a esta, restando aproximadamente dois metros de filamento.



**Figura 80.** Porta-chaves para transportar palitos impresso com rPET.

Como é possível perceber, este processo de fabrico de filamento tem uma grande desvantagem no que toca ao tamanho do filamento, para isso já existem máquinas que juntam pedaços de filamentos, até mesmo alguns modelos DIY, outra solução é reconfigurar quando possível as configurações do fatiador para usar menos preenchimento, ou variar

outros parâmetros para usar menos filamento por peça, ou então, com os restos que vão sobrando, como no caso que foi falado da Figura 80, existem peças que usam pouco filamento e permitem aproveitar por inteiro o filamento reciclado. Um exemplo deste aproveitamento, é a peça da

**Figura 81**, uma mola para fechar as embalagens, que para além de funcionar bastante bem, gasta apenas 24 centímetros de filamento.



**Figura 81.** Mola para fechar embalagens impresso com rPET.



## 6. Conclusões

### 6.1. Conclusões gerais

A presente dissertação abordou o desenvolvimento e a construção de uma máquina para a produção de filamento reciclado a partir de garrafas PET, com o objetivo de explorar uma alternativa sustentável e económica à produção de filamentos tradicionais para impressoras 3D FDM. Através da revisão de máquinas semelhantes e da implementação de um método de fabricação de filamento rPET, foi possível criar um sistema funcional que não só realiza o corte e a moldagem do PET em filamento, como também permite ajustar a máquina para qualquer tipo de garrafa PET, independentemente da espessura de parede.

Para simplificar o processo e minimizar variáveis, foram apenas utilizados garrafões da marca Luso. Cada garrafão de 5 litros transformou-se em pouco mais de 10 metros de filamento em aproximadamente meia hora, que se traduz em 32 gramas de filamento. A máquina utilizada para os testes de tração foi a Shimadzu AGS -50 kN, e todas as impressões foram realizadas com uma impressora Ender 3 V3 SE.

A maior diferença deste filamento ocorre no facto de ter um núcleo oco, isto porque a tira de plástico é termoformada para ganhar o formato circular com 1.75 mm de diâmetro, porém não tem material suficiente para ficar um filamento maciço. Aumentar a largura da tira até ter material suficiente para isso poderia ser uma solução, no entanto a máquina tal como foi projetada não consegue termoformar tanto material e acaba por partir a fita de plástico. Por isso para compensar foram feitos testes que concluíram que aumentar o *flow* para 122% iria compensar a falta de filamento. Porém, testes mais detalhados podem ser feitos para um melhor resultado.

Os testes realizados ao filamento reciclado rPET revelaram que, apesar de apresentar propriedades mecânicas um pouco inferiores em comparação com o PETG, este filamento reciclado oferece uma solução viável para a impressão 3D. No entanto, em aplicações mais exigentes, pode ser necessário utilizar filamentos comerciais, que passam por calibrações mais rigorosas. Esse resultado acaba por ser esperado, uma vez que a máquina desenvolvida não possui um controle de qualidade tão rigoroso como as que passam os filamentos comerciais, resultando em mais impurezas e menor uniformidade no filamento.

Contudo, a principal vantagem do filamento rPET reside na sua capacidade de transformar resíduos plásticos num produto de valor acrescentado, promovendo a reciclagem e reduzindo a quantidade de lixo plástico. A máquina desenvolvida é uma solução acessível que permite a produção de filamento a partir de garrafas PET com um investimento relativamente baixo, proporcionando uma alternativa económica às opções comerciais. Este filamento pode ser utilizado em impressoras 3D básicas, permitindo a criação de peças com um bom rendimento e aspeto.

Em suma, esta dissertação mostra que é possível criar uma máquina de reciclagem de filamento eficaz e acessível, que não só promove a sustentabilidade, mas também fornece uma alternativa prática e económica para a impressão 3D e reciclagem centralizada. A viabilidade do projeto é um passo importante para aumentar a independência dos utilizadores de impressoras 3D, enquanto se contribui para a redução dos resíduos plásticos. A lista dos materiais usados para construir a máquina estão detalhados na Tabela 8.

## **6.2. Sugestões de trabalhos futuros**

O objetivo principal desta dissertação foi testar a viabilidade mecânica de rPET produzido por processos de reciclagem descentralizados e em pequena escala usando uma máquina DIY. Com a máquina construída existem agora vários estudos que podem ser feitos, tais como:

As melhorias na máquina são sempre um passo importante a dar, como adicionar controladores mais precisos de temperatura ou velocidade, ou sensores para parar a máquina quando a fita de plástico acaba, ou mesmo colocar sensores de controlo de diâmetro. Outro aspeto importante a melhorar é a extrusão, uma vez que adicionando um bocal de extrusão maior a máquina poderá conseguir fabricar um filamento não oco. Outro fator a melhorar é na redução das variações de temperatura, que poderá ser reduzido se o bloco de aquecimento for melhor isolado.

Tendo em conta que existem garrafas PET com diferentes composições e espessuras, as propriedades mecânicas do filamento podem variar, como foi observado nos testes com o rPET da marca Penacova. Além disso, algumas garrafas já contêm uma percentagem de PET reciclado na sua composição, o que também pode influenciar as propriedades do filamento. Portanto, seria interessante realizar um estudo detalhado sobre o PET utilizado na fabricação do filamento e analisar as implicações que essas variações têm nas

propriedades mecânicas e químicas do filamento. Além disso, seria relevante estudar a influência da temperatura e da velocidade no processo de fabricação do filamento na qualidade final do produto. Também é importante investigar se a realização de um processo de desumidificação pode melhorar a qualidade da impressão.

Estudar a viabilidade econômica da produção de filamento reciclado em larga escala é fundamental para avaliar tanto a acessibilidade quanto o impacto financeiro da tecnologia, bem como a sua eficácia na redução da poluição. Este estudo deve incluir a análise dos custos energéticos associados à operação da máquina. Além disso, para garantir uma reciclagem completa, é importante considerar a inclusão das tampas e de todo o corpo da garrafa ou garrafão, que não são utilizados neste processo de reciclagem. É ainda fundamental explorar métodos para unir filamentos reciclados, pois a limitação de 10 metros de comprimento por filamento pode restringir a impressão de peças maiores.

Estudos futuros poderiam explorar a incorporação de fibras naturais ou sintéticas no filamento para aprimorar as suas características, criando materiais com propriedades mecânicas superiores. Uma abordagem interessante seria aproveitar o núcleo oco do filamento para introduzir fibras contínuas, potencializando ainda mais o desempenho do filamento.



## 7. Referências Bibliográficas

- 3D Printing from Scratch. (2015, março 14). Types of 3D printers or 3D printing technologies overview. <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>
- Allen, J. (2023, novembro 2). How to extrude 3D printer filament using Filabot from Dr. D-Flo. Filabot. <https://www.filabot.com/blogs/news/how-to-extrude-3d-printer-filament-using-filabot-from-dr-d-flo?srsltid=AfmBOoofGtKwV3TYhoq3IuuzHDuoHd6w8TuhsY7nlxxuocycQ98FlUq>
- Awad, A., Trenfield, S. J., Gaisford, S., & Basit, A. W. (2018). 3D printed medicines: A new branch of digital healthcare. *International Journal of Pharmaceutics*, 548(1), 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.07.024>
- Artme 3D. (2024). Hardware DIY Kit: Original Desktop Filament Extruder MK2.5. <https://artme-3d.shop/products/hardware-diy-kit-original-desktop-filament-extruder-mk2-5>
- Beyond Plastics (2024). Single-Use Plastic Water Bottles. <https://www.beyondplastics.org/fact-sheets/plastic-water-bottles>
- Boyd, G., Boyd, & Burr, E. (2023, março 16). 3D Printers & Recycled Plastic: Can They Print Recycled Plastic? All3DP. <https://all3dp.com/2/3d-printers-recycled-plastic/>
- Bremer, M., Janoschek, L., Kaschta, D., Schneider, N., & Wahl, M. (2022). Influence of plastic recycling—A feasibility study for additive manufacturing using glycol modified polyethylene terephthalate (PETG). *SN Applied Sciences*, 4(5), 156. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05039-3>
- Bucknall, D. (2020). Plastics as a materials system in a circular economy, 378(2176).
- Cults3D. (2023). PETmachine, make Your own filament from plastic bottles at home. [https://cults3d.com/en/3d-model/tool/pet-machine-make-your-own-filament-from-plastic-bottles-at-home-tylman\\_design-2?srsltid=AfmBOor26zRVrVYAv7Ff6RS\\_KNlGYYN7WMPuCm2RYKOUXWGNXVlSGSQO](https://cults3d.com/en/3d-model/tool/pet-machine-make-your-own-filament-from-plastic-bottles-at-home-tylman_design-2?srsltid=AfmBOor26zRVrVYAv7Ff6RS_KNlGYYN7WMPuCm2RYKOUXWGNXVlSGSQO)

Economia circular: definição, importância e benefícios (2023, setembro 27). Parlamento Europeu.

<https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios>

Ellen MacArthur. (2024). Designing out plastic pollution. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/plastics/overview>

Esun. (2021, novembro). PETG. [https://3d.nice-cdn.com/upload/file/eSUN\\_PETG-Filament\\_TDS\\_V4.0.pdf](https://3d.nice-cdn.com/upload/file/eSUN_PETG-Filament_TDS_V4.0.pdf)

European Commission. (2023, dezembro 20). Plastics. [https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics_en)

Form Futura. (2024). ReForm – rPET. <https://formfutura.com/product/reform-rpet/>

Forward. (2024). Ultrafuse® rPET. <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/standard-filaments/ultrafuse-rpet/>

Function3D. (2024). PETALOT. <https://function3d.xyz/en/product/petalot/>

Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>

Griffey, J. (2014). Capítulo 2: The Types of 3-D Printing. Library Technology Reports, 50(5), Artigo 5. [https://www.journals.ala.org/index.php/ltr/article/view/4796/5747https://www#top\\_fig2](https://www.journals.ala.org/index.php/ltr/article/view/4796/5747https://www#top_fig2)

Haas, J. (2022, fevereiro 11). Filabot: Closing the Plastic Loop. Green Energy Times. <https://www.greenenergytimes.org/2022/02/filabot-closing-the-plastic-loop/>

Impressoras3D. (2023, dezembro 20), O melhor padrão de preenchimento para impressão 3D. <https://www.impressoras3d.com/pt/o-melhor-padr%C3%A3o-de-preenchimento-para-impress%C3%A3o-3D/>

- Jain, P. K., & Jain, P. K. (2021). Use of 3D printing for home applications: A new generation concept. *Materials Today: Proceedings*, 43, 605–607. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.145>
- Jones, M. (2023, novembro 30). PETG/PLA Recycling: How to Recycle 3D Printer Waste. All3DP. [https://all3dp.com/2/3d-printer-recycled-plastic-tips-for-your-waste-plastic/#google\\_vignette](https://all3dp.com/2/3d-printer-recycled-plastic-tips-for-your-waste-plastic/#google_vignette) <https://all3dp.com/2/3d-printer-recycled-plastic-tips-for-your-waste-plastic/>
- Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C., & Bowyer, A. (2011). RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica*, 29(1), 177–191. <https://doi.org/10.1017/S026357471000069X>
- Kim, S., Chung, K., Yu, H., & Yang, S. O. (2017). G-code conversion from 3D model data for 3D printers on Hadoop systems. 2017 4th International Conference on Computer Applications and Information Processing Technology (CAIPT), 1–4. <https://doi.org/10.1109/CAIPT.2017.8320709>
- Kong, Y., & Hay, J.(fevereiro,2003). Multiple melting behaviour of poly(ethylene terephthalate), 44(3):623-633. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00814-5](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00814-5)
- Kristiawan, R., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639-649. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>
- Kumar, R., Sharma, H., Saran, C., Tripathy, T. S., Sangwan, K. S., & Herrmann, C. (2022). A Comparative Study on the Life Cycle Assessment of a 3D Printed Product with PLA, ABS & PETG Materials. *Procedia CIRP*, 107, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>
- Laville, S., & Taylor, M. (2017, junho 28). A million bottles a minute: World’s plastic binge “as dangerous as climate chang”. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/28/a-million-a-minute-worlds-plastic-bottle-binge-as-dangerous-as-climate-change>

- Lindner, J. (2023, dezembro 16). Reusable Water Bottle Statistics [Fresh Research]. Gitnux.  
<https://gitnux.org/reusable-water-bottle-statistics/>
- Motalebi, A., Khondoker, M. A. H., & Kabir, G. (2024). A systematic review of life cycle assessments of 3D concrete printing. *Sustainable Operations and Computers*, 5, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2023.08.003>
- Matias, E., & Rao, B. (2015). 3D printing: On its historical evolution and the implications for business. 2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), 551–558.  
<https://doi.org/10.1109/PICMET.2015.7273052>
- Morales-Caselles, C., Viejo, J., Martí, E., González-Fernández, D., Pragnell-Raasch, H., González-Gordillo, J. I., Montero, E., Arroyo, G. M., Hanke, G., Salvo, V. S., Basurko, O. C., Mallos, N., Lebreton, L., Echevarría, F., van Emmerik, T., Duarte, C. M., Gálvez, J. A., van Sebille, E., Galgani, F., ... Cózar, A. (2021). An inshore–offshore sorting system revealed from global classification of ocean litter. *Nature Sustainability*. 4(6), 484–493. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00720-8>
- Moura, K. (2022, junho 26). Como são feitas as garrafas PET? *Engenharia 360*.  
<https://engenharia360.com/como-sao-feitas-as-garrafas-pet/>
- Nace, T. (2017, julho 28). We're Now At A Million Plastic Bottles Per Minute - 91% Of Which Are Not Recycled. *Forbes*.  
<https://www.forbes.com/sites/trevornace/2017/07/26/million-plastic-bottles-minute-91-not-recycled/?sh=141ed674292>
- Ocean Care (2022, maio 3). Plastic: Harmful throughout its entire life cycle  
[https://www.oceancare.org/en/stories\\_and\\_news/plastic-harmful-throughout-its-entire-life-cycle/](https://www.oceancare.org/en/stories_and_news/plastic-harmful-throughout-its-entire-life-cycle/)
- O'Connell, J. (2020, outubro 4). How Is 3D Printer Filament Made? *All3DP*.  
<https://all3dp.com/2/how-3d-printer-filament-made/>
- Pearce, J., & Petsiuk, A. (2020, julho 13). RepRapable Recyclebot. *OSFHOMÉ*.  
<https://osf.io/9hsmb/>
- Plastics as a materials system in a circular economy (2020, julho 6). *The Royal Society*, 1–34. <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2019.0268>

- Plastics Europe (2023, julho). European Plastics Manufacturers Quarterly Report. In Plastics Europe, 1-8. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/quarterly-report-q1-2023/>
- Plastics Europe. (2024). Recycling technologies. <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/recycling-technologies>
- POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) 3D PRINTING FILAMENT REVIEW. (2023). JuggerBot 3d. <https://juggerbot3d.com/pet-filament-review>
- ReDeTech. (2024). ProtoCycler V3: The Most Advanced Filament Extrusion System for Education and R&D. <https://redetec.com/>
- Rashwan, O., Koroneos, Z., Townsend, T. G., Caputo, M. P., Bylone, R. J., Wodrig, B., & Cantor, K. (2023). Extrusion and characterization of recycled polyethylene terephthalate (rPET) filaments compounded with chain extender and impact modifiers for material-extrusion additive manufacturing. *Scientific Reports*, 13(1), 16041. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41744-8>
- ReCreator3D. (2024). The MK5IT: Ender 3. <http://recreator3d.com/mk5kitender3>
- Ritchie, H., Samborska, V. & Roser, M. (2023). Plastic Pollution. *Our World In Data*. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution#article-citation>
- Sadhukhan, J. (2022). Net zero electricity systems in global economies by life cycle assessment (LCA) considering ecosystem, health, monetization, and soil CO<sub>2</sub> sequestration impacts. *Renewable Energy*, 184, 960–974. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.024>
- Sam. (2017, novembro 9). FDM vs. SLA vs. SLS: How to Choose the Right 3D Printing Technology. Zeal3D. <https://www.zeal3dprinting.com.au/fdm-vs-sla-vs-sls-choose-right-3d-printing-technology/>
- Savini, A., & Savini, G. (2015). A short history of 3D printing, a technological revolution just started. 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HIST<sup>TELC</sup>ON), 1–8. <https://doi.org/10.1109/HIST<sup>TELC</sup>ON.2015.7307314>

- Shen, L., Pu, X., Sun, Y., & Chen, J. (2016). A study on thermoelectric technology application in net zero energy buildings. *Energy*, 113, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.038>
- Sukholthaman, P., & Shirahada, K. (2015). Evaluation of self-service technology on household waste management in emerging countries: A case of Bangkok, Thailand. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology* 21–27. <https://doi.org/10.1109/PICMET.2015.7273112>
- Team Xometry (2022, setembro 19). All About PET 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition. Xometry. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/pet-3d-printing-filament/>
- Thirdview (2023, abril 20). How Governments Can Support and Encourage Recycling Practices. <https://thirdview.info/2023/04/20/how-governments-can-support-and-encourage-recycling-practices/>
- Toor, R. (2020, julho 30). Why There isn't a Mainstream 3D Printing Waste Recycling Service. Filamentive. <https://www.filamentive.com/why-there-isnt-a-mainstream-3d-printing-waste-recycling-service/>
- Toor, R. (2023, janeiro 12). What is Recycled Filament? Sustainable 3D Printing Materials. Filamentive. <https://www.filamentive.com/what-is-recycled-filament-sustainable-3d-printing-materials/>
- Valvez, S., Silva, A., & Reis, P. (2022). Optimization of Printing Parameters to Maximize the Mechanical Properties of 3D-Printed PETG-Based Parts. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 14(13). <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/13/2564>
- Vashi, Y., Anand, R., Jayakrishna, K., Rajyalakshmi, G., & Raj, S. A. (2021). Design and analysis of 3D printed UAV wheel. *3rd International Conference on Materials, Manufacturing and Modelling*, 46, 8307–8312. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.298>
- Wang, D. D., Qian, Z., Vukicevic, M., Engelhardt, S., Kheradvar, A., Zhang, C., Little, S. H., Verjans, J., Comaniciu, D., O'Neill, W. W., & Vannan, M. A. (2021). 3D Printing, Computational Modeling, and Artificial Intelligence for Structural Heart Disease.

JACC. Cardiovascular imaging, 14(1), 41–60.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2019.12.022>

Welle, F. (2015). The Facts about PET. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3043.2726>

Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2011), 865–875.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.04.009>

Woern, A. L., McCaslin, J. R., Pringle, A. M., & Pearce, J. M. (2018). RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. *HardwareX*. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00026>

Woolven, J. (2021, janeiro 21). This article is not about plastic pollution. Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/artigos/este-nao-e-um-artigo-sobre-poluicao-por-plasticos>

World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation, & McKinsey & Company. (2016). *The New Plastics Economy: Rethinking the Future of plastics*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics>

World Economic Forum and Ellen MacArthur Foundation (2017). *The New Plastics Economy – Catalysing action* (2017, <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>).

Zhu, C., Li, T., Mohideen, M. M., Hu, P., Gupta, R., Ramakrishna, S., & Liu, Y. (2021). Realization of Circular Economy of 3D Printed Plastics: A Review. *Polymers. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 13(5), Artigo 5.  
<https://doi.org/10.3390/polym13050744>



## 8. Anexos

Model: JGY-370-2460									
Reduction Ratio	No-Load			Rated Load				Stall	
	Rated Voltage (V)	Speed (RPM ±10%)	Current (A)	Speed (RPM ±10%)	Current (A)	Torque (Kg.cm)	Power (W)	Torque (Kg.cm)	Current (A)
40	24	150	0.04	100	0.1	1.20	2.40	4	1.1
65	24	90	0.04	70	0.1	2.00	2.40	6	1.1
87	24	68	0.04	51	0.1	2.80	2.40	8	1.1
150	24	40	0.04	30	0.1	4.50	2.40	15	1.1
200	24	30	0.04	22	0.1	6.00	2.40	20	1.1
260	24	23	0.04	17	0.1	8.00	2.40	26	1.1
340	24	18	0.04	13	0.1	12.00	2.40	34	1.1
448	24	13	0.04	10	0.1	13.00	2.40	40	1.1
600	24	10	0.04	7	0.1	15.00	2.40	54	1.1
1000	24	6	0.04	4	0.1	23.00	2.40	91	1.1
1800	24	3.3	0.04	2.9	0.1	25.00	2.40	91	1.1
3000	24	2	0.04	1.5	0.1	25.00	2.40	91	1.1

Figura 82. Especificações do motor JGY-370

Tabela 8. Lista dos Materiais

Peça	Quantidade
fonte de alimentação 100w 24V	1 unidade
tomada de alimentação AC	1 unidade
Cabo para tomada de alimentação	1 unidade
Controlador de temperatura W3230	1 unidade
Rolamentos 608zz 4	1 unidade
Cartucho de aquecimento	1 unidade
Sensor termopar tipo k	1 unidade
cabo elétrico vermelho 18AWG	2 metros
cabo elétrico preto 18AWG	2 metros
Motor JGY370 24V 10rpm	1 unidade
Bloco de aquecimento V6	1 unidade
Ventilador 4020 24v	1 unidade
Controlador PWM 5A	1 unidade
Varão roscado M8	1 metro
Varão roscado M6	1 metro
Parafusos para madeira M3.5 20 mm	50 unidades
Parafusos de cabeça achatada M3 10mm	10 unidades
Porca M8	2 unidades
Porca M6	3 unidades
porca autoroscante M6	2 unidades