UNIVERSIDADE DO PORTO

Faculdade de Belas Artes e Faculdade de Engenharia

Mestrado em Design Industrial e de Produto

Design Sustentável na Impressão 3D: Reutilização de Resíduos de PLA para o Desenvolvimento de Novos Produtos

Mihaela Sandu

Orientadora | **Professora Doutora Ligia Lopes**

Coorientador | **Professor Doutor Jorge Lino Alves**

(Porto), 2024/2025

MESTRADO EM DESIGN INDUSTRIAL E DE PRODUTO
UNIVERSIDADE DO PORTO

O JÚRI

PRESIDENTE

Doutor José Joaquim da Mota Machado

PROFESSOR AUXILIAR DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ORIENTADOR

Doutora Lígia Maria Pinto Lopes

PROFESSORA AUXILIAR DA FACULDADE DE BELAS ARTES DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ARGUENTE

Doutor João Francisco Machado Gomes da Silva

PROFESSOR COORDENADOR DO INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO IPP

17

03 NOVEMBRO 2025

MESTRE MIHAELA SANDU
MDIP/**179**

Agradecimentos

Quero começar por agradecer a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, aos meus pais e ao meu irmão, por estarem sempre presentes em todo o percurso e por tornarem esta etapa possível.

À minha orientadora Professora Lígia Lopes, gostava de agradecer pelo apoio prestado e pelas sugestões que tornaram este projeto possível.

Ao meu coorientador, Professor Jorge Lino Alves, gostaria de agradecer pela disponibilidade e apoio prestado.

Aos meus amigos, queria agradecer por me terem acompanhado neste processo e estarem sempre disponíveis para me ouvir.

Queria agradecer aos meus colegas de casa que sempre me apoiaram, em especial ao Eduardo e à Carolina pela disponibilidade e paciência.

Aos meus amigos de Évora que mesmo estando longe, sempre estiveram muito presentes.

Agradeço ainda ao Francisco pelas conversas de Design e Engenharia, as trocas de ideias e a ajuda prestada.

Queria fazer um agradecimento especial ao Martim, à Teresa, à Joana, à Rita e à Nana que fizeram com que este percurso fosse inesquecível, possível e nunca me deixaram desistir.

Por fim, um especial obrigado ao Pedro Alves e ao André Alves (técnicos da FEUP), ao Engenheiro Miguel Figueiredo e ao Rui Silva pelos ensaios de tração na FEUP e ao Tiago da Cruz (oficinas de madeira da FBAUP).

A todos, muito obrigada.

Resumo

O crescimento acelerado da indústria de materiais plásticos trouxe desafios significativos, nomeadamente o aumento exponencial dos resíduos plásticos e as dificuldades associadas à sua gestão e reciclagem (Charmin, 2019; Dennis, 2024; Dias, 2025). A impressão 3D, setor em rápida expansão, intensificou este cenário ao gerar grandes quantidades de desperdício, sobretudo de PLA (ácido polilático), um dos termoplásticos mais utilizados devido à sua biodegradabilidade e facilidade de processamento (Lanzotti et al., 2020; Mikula et al., 2020). No entanto, apenas uma pequena fração destes resíduos é efetivamente reciclada, em grande parte devido à condição de degradação do material e à falta de soluções acessíveis e eficazes na indústria de tratamento de resíduos (Moreno et al., 2020).

Neste contexto, este projeto explora a reciclabilidade do PLA descartado através de métodos simples de conformação. Foram também realizados testes que visam avaliar as propriedades mecânicas do material reprocessado. O projeto culminou no desenvolvimento de um produto interativo que combina maquinação CNC e o aproveitamento da translucidez do material, resultando num sistema de iluminação concebido como prova de conceito.

Os resultados obtidos demonstram que é possível reutilizar o PLA, através de abordagens de baixo custo e tecnologias acessíveis, de forma a reduzir o seu impacto ambiental e a valorizar resíduos descartados pela indústria da impressão 3D. O projeto contribui também para a discussão sobre design sustentável, demonstrando como práticas de reconfiguração de material podem gerar novas oportunidades para produtos inovadores e contribuir para uma economia mais circular.

Palavras-chave

Bioplásticos, Estratégias de reciclagem, PLA, Resíduos, Sustentabilidade

Abstract

The accelerated growth of the plastics industry has brought significant challenges, namely the exponential increase in plastic waste and the difficulties associated with its management and recycling (Chalmin, 2019; Dennis, 2024; Dias, 2025). The rapidly expanding 3D printing sector has intensified this scenario by generating large amounts of waste, particularly PLA (polylactic acid), one of the most widely used thermoplastics due to its biodegradability and ease of processing (Lanzotti et al., 2020; Mikula et al., 2020). However, only a small fraction of this waste is effectively recycled, largely due to material degradation and the lack of accessible and efficient solutions within the waste treatment industry (Moreno et al., 2020).

In this context, this project explores the recyclability of discarded PLA through simple forming methods. Tests were also carried out to evaluate the mechanical properties of the reprocessed material. The project culminated in the development of an interactive product that combines CNC machining with the exploitation of the recycled material's translucency, resulting in a lighting system designed as a proof of concept.

The results demonstrate that PLA can be reused through low-cost approaches and accessible technologies, reducing its environmental impact and adding value to waste generated by the 3D printing industry. Furthermore, the project contributes to the ongoing discussion on sustainable design, showing how material reconfiguration practices can generate new opportunities for innovative products and foster a more circular economy.

Key words

Bioplastics, Recycling Strategies, PLA, Sustainability, Waste

Índice

Agradecimentos V
Resumo VII
Abstract IX
Índice XI
Lista de Figuras XIV
Lista de Tabelas XVIII
Abreviaturas e Siglas XIX
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO 3
1.1. Enquadramento 3
1.2. Objetivos 4
1.3. Metodologias 5
1.4. Estrutura da dissertação 6
CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE 9
2.1. Evolução Histórica 9
2.2. Impactos e Desafios Derivados da Utilização de Plásticos 10
2.3. Benefícios do Plásticos na Sociedade Atual 11
2.3.1. Iniciativas para reduzir o impacto do Plástico 11
2.4. Gestão de Resíduos de Impressão 3D 13
2.5. Impacto Ambiental da Impressão 3D 14
2.6. Biodegradação de Plásticos 15
2.6.1. Degradação Abiótica 15
2.6.2. Biodegradação 16
2.7. Ácido Poliláctico 17
2.8. Reciclagem do PLA 18
2.9. Sustentabilidade 20
2.9.1. Economia Circular 21
2.10. Métodos de Reciclar PLA 21
2.10.1. Reciclagem Mecânica 22
2.10.2. Reciclagem Térmica 22
2.10.3. Reciclagem Química 23
2.11. Biodegradação de Bioplásticos 23
2.12. Propriedades do PLA 24

2.13. Métodos de Transformação do PLA 25
2.13.1. Extrusão por Fusão a Quente (HME) 25
2.13.2. Moldação por injeção 26
2.13.3. Moldação por sopro 29
2.13.4. Termoformação 30
2.14. Vantagens dos Bioplásticos 31
Capítulo 3. CASOS DE ESTUDO 35
3. Introdução 35
3.1. Eco'r Wood 35
3.2. Beach Kids 37
3.3. Gibada 38
3.4. Smashing Plastic 39
3.5. Sea Chair by Studio Swine 40
3.6. Conclusões 41
Capítulo 4. DESENVOLVMENTO EXPRIMENTAL 45
4.1. Material 45
4.2 Processos de fabricação 48
4.3. Experiências de amolecimento 54
4.3.1. Descrição experimental 54
4.3.2 Analise de acabamentos 59
4.3.3. Experiências com azulejos 60
4.3.4. Experiências com compressão 62
4.3.4. Deformação do material 65
4.4. Caracterização do material 65
4.4.1. Densidade 65
4.4.2. Dureza 67
4.4.3. Ensaios de Tração 67
Capítulo 5. DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO 79
5.1. Análise do projeto e objetivos 79
5.2. Exploração de forma 79
5.3. Exploração do padrão 81
5.4. Renderização 84
5.5. Maquete 86

5.6. Produção do protótipo final 86
5.6.1. Produção da moldura metálica de compactação final 86
5.6.2. Produção das peças 87
5.6.3. Montagem do sistema elétrico 93
5.6.4. Montagem das placas frontais 95
5.6.5. Funcionamento do sensor 97
5.6.6. Possíveis variações de montagem 98
5.7. Proposta final – Protótipo 99
5.8. Estimativa de custos 105
Capítulo 6. CONCLUSÕES 109
6.1. Conclusões gerais 109
6.2. Trabalhos futuros 110
Referências Bibliográficas 112
Anexos 115

Lista de Figuras

Figura 1: Produção do plástico de 1950 até 2019 (Ritchie et al., 2023)..... 10

Figura 2: Conceito de economia circular adaptado de (Mikula et al., 2020). 15

Figura 3: Degradação de plásticos caracterizada pela presença de ligações hidrolisáveis adaptado de (Narancic & O'Connor, 2018)..... 17

Figura 4: Ciclo do PLA na natureza adaptado de (Taib et al., 2022)..... 18

Figura 5: Processo de fabricação de filamento a partir de resíduos, adaptado de (Mikula et al., 2020). 19

Figura 6: Esquema de uma máquina de moldação por extrusão adaptado de (Taib et al., 2022). 26

Figura 7: Esquema de um dispositivo de moldação por injeção adaptado de (Taib et al., 2022). 27

Figura 8: - Ciclo de injeção de plástico por molde adaptado de (Taib et al., 2022). 28

Figura 9: Processo de produção a partir de termoformação adaptado de Taib et al. (2022) (Figura de autor, 2025). 31

Figura 10: Proposta de etiqueta especificidades do material (Oliveira, 2014). 36

Figura 11: Produto final (Oliveira, 2014). 36

Figura 12: Beach kids e Beach kids formas (Butunoi, 2019). 37

Figura 13: Teste de usabilidade (Butunoi, 2019). 37

Figura 14: Resultado (Silva, 2018). 38

Figura 15: Mesa montável (Smashing Plastic. (n.d.)). 39

Figura 16: Candeeiro (Smashing Plastic. (n.d.)). 40

Figura 17: Sea Chair (Dezeen, 2013). 41

Figura 18: Resíduos recolhidos (Dezeen, 2013)..... 41

Figura 19: (a) Material recolhido na FEUP, (b) Material fornecido pela 3D Maker (Figura de autor). 46

Figura 20: Forno elétrico (Figura de autor). 48

Figura 21: (a) Multímetro UT58 Series UNI-T, (b) Termopar tipo K (Figura de autor). 49

Figura 22: Durómetro Shore D analógico, modelo Sauter HBD 100-0 (Figura de autor). 49

Figura 23: Balança analítica de precisão Mettler Toledo H31Ar (Figura de autor). 50

Figura 24: (a) Amostra seca mais fio, (b) Amostra imersa, (c) amostra parcialmente seca mais fio, (d) Fio (Figura de autor). 51

Figura 25: (a) Serra de fita da Metalurgica (b) Fresadora CNC HEIDENHAIN (Figura de autor)..... 52

Figura 26: (a) Transdutor de força, (b) Extensómetro axial (Figura de autor). 52

Figura 27: Fresadora CNC (Figura de autor)..... 53

Figura 28: (a) Rebarbadora angular, (b) Serra de corte (Figura de autor). 53

Figura 29: Mola curva tubos (Figura de autor). 54

Figura 30: Primeiro processo (Figura de autor). 55

Figura 31: Segundo processo (Figura de autor). 56

Figura 32: (a) Esquema do primeiro processo, (b) Esquema do segundo processo (Figura de autor)..... 57

Figura 33: Termopar em contacto com o material (Figura de autor)..... 57

Figura 34: Amostras de diferentes possibilidades de cores (Figura de autor). 58

Figura 35: (a) Amostra com mais uniformidade de espessura, (b) Zona onde se encontrava um dos clipes (Figura de autor). 59

Figura 36: (a) Tapete de silicone, (b) Relevo transferido na amostra (Figura de autor). 59

Figura 37: (a) Segundo papete de silicone, (b) Amostra com acabamento brilhante uniforme (Figura de autor). 60

Figura 38:(a) Seleção de recortes, (b) Amostras no processo de amolecimento no forno sobre os azulejos (Figura de autor)..... 61

Figura 39: Amostras Após arrefecimento (Figura de autor). 61

Figura 40: Azulejos após corte de excesso (Figura de autor). 62

Figura 41: (a) Moldura, (b) Placa para a prensagem, (c) Moldura completa, (D) Perfis de aço (Figura de autor)..... 63

Figura 42: Etapas do processo de realização de amostras na moldura (Figura de autor). 63

Figura 43: Amostras resultantes do processo com moldura (Figura de autor). 63

Figura 44: (a) Moldura, (b) Placa para a prensagem com relevos, (c) Moldura completa, (d) Perfis de alumínio (Figura de autor). 64

Figura 45: Amostras resultantes do processo em molduras (Figura de autor)..... 64

Figura 46: Material após três ciclos de processamento (Figura de autor). 65

Figura 47: Amostras utilizadas para determinar a densidade e dureza (Figura de autor). 66

Figura 48: Desenho técnico do provete para realização de ensaios de tração (Figura de autor)..... 68

Figura 49: Amostras realizadas para corte de provetes (Figura de autor). 68
Figura 50: Provetes utilizados nos ensaios de tração (Figura de autor). 69
Figura 51: Provetes após ensaios de tração (Figura de autor). 70
Figura 52: Diagrama tensão de rotura-deformação provete A1 (Figura de autor). 70
Figura 53: Diagrama tensão de rotura-deformação provete A2 (Figura de autor). 71
Figura 54: Diagrama tensão de rotura-deformação provete A3 (Figura de autor). 71
Figura 55: Diagrama tensão de rotura-deformação provete B1 (Figura de autor). 72
Figura 56: Diagrama tensão de rotura-deformação provete B2 (Figura de autor). 72
Figura 57: Diagrama tensão de rotura-deformação provete B3 (Figura de autor). 73
Figura 58:Diagrama tensão de rotura-deformação provete C1 (Figura de autor). 73
Figura 59: Diagrama tensão de rotura-deformação provete C2 (Figura de autor). 74
Figura 60: Diagrama tensão de rotura-deformação provete C3 (Figura de autor). 74
Figura 61: (a) placa realizada com 7 mm, (b) amostra com translucidez (Figura de autor). 80
Figura 62: Exemplos de padrões de preenchimento para impressão 3D (Loja 3D, 2025). 81
Figura 63: Processo de impressão de suportes em árvore (Figura de autor). 81
Figura 64: (a) Padrão inspirado nos suportes em árvore, (b) teste de validação do padrão (Figura de autor). 82
Figura 65: Desenho técnico utilizado na maquinação de uma placa (Figura de autor).. 83
Figura 66: Placa após a maquinação (Figura de autor). 84
Figura 67: Render horizontal com 8 módulos (figura de autor). 85
Figura 68: Render horizontal com 12 módulos (figura de autor). 85
Figura 69: Maquete com aplicação de fita LED (Figura de autor). 86
Figura 70: (a) Moldura realizada com a cantoneira já acoplada à base, (b) Placas entre as quais o material é prensado, (c) Placa de prensagem com um perfil para facilitar o seu manuseamento quando quente, (d) Perfis utilizados para garantir a uniformidade da prensagem. (e) Moldura completa (Figura de autor). 87
Figura 71: (a) Amolecimento de 600 g de material, (b) Utilização da primeira moldura para evitar que o material escorra, (c) Excedente de material que fica na moldura, (d) Material após ser manualmente amassado, (e) Material na moldura final (Figura de autor). 88
Figura 72: (a) Material no início do processo de amolecimento, (b) Material amolecido, (c) Material após a mistura manual e amolecimento durante 15 minutos, (d) Material a ser prensado, (e) Placa resultante do processo (Figura de autor). 89

Figura 73: Desenho técnico utilizado na maquinação de 8 placas (Figura de autor). 90

Figura 74:Desenho técnico utilizado na maquinação de 1 placas (Figura de autor). 91

Figura 75: (a) Estrutura do painel, (b) placas frontais (Figura de autor). 92

Figura 76: (a) Serra de fita para metal, (b) Furadeira de coluna, (c) Perfis de alumínio anodizado após o corte (Figura de autor). 92

Figura 77: Suporte da estrutura modular (Figura de autor). 93

Figura 78: Suporte modular montado e planeamento de zonas para soldadura (Figura de autor)..... 94

Figura 79: (a) Processo de soldadura dos segmentos, (b) Conexão sensor e fita, (c) Sistema elétrico finalizado (Figura de autor). 95

Figura 80: Aberturas emissor e recetor (Figura de autor)..... 96

Figura 81: Vista explodida do painel (Figura de autor). 96

Figura 82: Movimento de ligar o desligar o painel (Figura de autor). 97

Figura 83: Movimento de ajustar a intensidade de luz (Figura de autor). 97

Figura 84: Possíveis variações de painel com 9 módulos (figura de autor). 98

Figura 85 : Painel sem luz ambiente e com a iluminação no máximo (Figura de autor). 100

Figura 86: Painel com pouca luz ambiente e com a iluminação no máximo (Figura de autor)..... 101

Figura 87: Painel com luz ambiente e com a iluminação no mínima (Figura de autor). 102

Figura 88: Painel com luz ambiente e com a iluminação desligada (Figura de autor). 103

Figura 89: Painel no ambiente (Figura de autor). 104

Lista de Tabelas

Tabela 1: Passos do processo de injeção por molde adaptado de (Taib et al., 2022). 28

Tabela 2: Comparação dos métodos de produção adaptado de (Taib et al., 2022). 30

Tabela 3: Comparação das propriedades mecânicas dos diferentes fornecedores (Tabela de autor). 47

Tabela 4: Comparação das propriedades físicas dos diferentes fornecedores (Tabela de autor). 47

Tabela 5: Registo temperaturas, tempos e pesos dos primeiros processos (Tabela de autor). 56

Tabela 6: Resultados obtidos para cada uma das 6 amostras estudadas (Tabela de autor). 66

Tabela 7: Valores obtidos durante a medição da dureza das amostras (Tabela de autor). 67

Tabela 8: Medições realizadas aos provetes e as suas áreas (Tabela de autor) 69

Tabela 9: Valores resultantes dos ensaios de tração (Tabela de autor). 75

Abreviaturas e Siglas

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

AM – Manufatura Aditiva

ASTM – Sociedade Americana para Ensaios e Materiais

CNC – Controlo Numérico Computorizado

CO_2 – Dióxido de Carbono

DLP – Processamento Digital de Luz

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FFF – Fabrico por Filamento Fundido

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

HME – Extrusão por Fusão a Quente

ISO – Organização Internacional de Normalização

MIG – Soldadura a Gás Inerte de Metal

PC – Policarbonato

PCL – Policaprolactona

PE – Polietileno

PET – Polietileno Tereftalato

PHA – Polihidroxialcanoato

PLA – Ácido Polilático

PM – Plasty Mladeč

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PVC - Policloreto de Vinilo

ONU – Organização das Nações Unidas

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SLA – Estereolitografia

SLS – Sintetização Seletiva a Lazer

TA – Ácido tereftálico

TPS – Amido termoplástico

3D – 3 Dimensões

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Nos últimos 60 anos, poucas indústrias registaram uma evolução tão significativa quanto a do plástico, tanto em termos de quantidade utilizada como na sua integração em diversos aspetos do quotidiano (Chalmin, 2019).

Contudo, este sucesso trouxe desafios significativos como o aumento dos resíduos plásticos, a dificuldade dos sistemas de recolha em acompanhar esta necessidade e os custos crescentes da reciclagem. Face a estes desafios, o plástico passou a ocupar um papel central nos debates sociais, sendo amplamente discutido em países desenvolvidos, onde a consciencialização é maior. Já nas economias emergentes e em desenvolvimento, problemas de gestão urbana associados ao rápido crescimento das cidades grandes dificultam essa perceção (Chalmin, 2019).

O plástico tem vindo a ser condenado ao longo dos anos devido ao seu crescente e excessivo uso e ao impacto ambiental que gera após o fim da sua vida útil. Essa perceção negativa resulta sobretudo da fraca gestão dos resíduos plásticos, que contribuí para que frequentemente este seja visto com um material de baixo custo, descartável e com pouco valor (Dennis, 2024).

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) são produzidas, a nível mundial, cerca de 460 milhões de toneladas de plástico anualmente, dos quais aproximadamente metade, 46 %, acabam em aterros (Dias, 2025)

Por outro lado, apesar dos desafios, este material é também frequentemente escolhido para fabricação de diversos produtos devido à sua versatilidade e características como resistência mecânica, leveza, baixo custo e facilidade de processamento, tornando-o aplicável a uma vasta gama de contextos (Mikula et al., 2020).

> *"Product invented in the early 20th century, reached its peak some 100 years later and whose eradication will be one of the major challenges of the 21st century."* (Chalmin, 2019, p.6).

Nesse cenário, a impressão em 3 dimensões (3D) aparece como um setor de rápido crescimento. Esta tecnologia popularizou-se devido ao seu baixo custo e simplicidade, sendo inicialmente aplicada na prototipagem e produção em pequena escala. Nos últimos anos, a sua utilização expandiu-se para diversas

indústrias, como a aeroespacial, militar, automóvel, médica e de construção (Lanzotti et al., 2020).

Os materiais mais frequentemente utilizados na impressão 3D são termoplásticos como Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e Ácido Polilático (PLA), além de outros como Policarbonato (PC), Polietileno (PE) e os seus derivados. Esses materiais são amplamente utilizados para produzir itens como peças automóveis, instrumentos médicos, embalagens, brinquedos e outros produtos de uso quotidiano (Mikula et al., 2020).

Apesar das vantagens da impressão 3D, esta tecnologia também gera uma quantidade significativa de resíduos, resultante de falhas e defeitos durante o processo de impressão. Assim, é essencial desenvolver estratégias para lidar com esses resíduos, garantindo a sustentabilidade desse setor (Moreno et al., 2020).

Embora a reciclagem mecânica de resíduos de impressão 3D apresente um grande potencial, ainda enfrenta desafios. Apenas uma pequena percentagem do PLA gerado é reciclado, sendo a maioria descartada em aterros sanitários. Entre as barreiras identificadas encontram-se a degradação do material durante o seu processo de reciclagem, que compromete as suas propriedades mecânicas e térmicas, afetando o desempenho do novo filamento produzido a partir dos resíduos e a carência de informações sobre as características dos resíduos (Moreno et al., 2020).

1.2. Objetivos

Os objetivos desta dissertação centram-se na exploração de novas abordagens para a reutilização de resíduos de termoplásticos (PLA) provenientes do processo de Fabrico por Filamento Fundido (FFF). Pretende-se otimizar o aproveitamento deste material sem recorrer ao método da re-extrusão, sendo o foco a utilização de processos de design circular e sustentável, de modo a conferir valor e reduzir as limitações associadas ao processo convencional. Pretende-se assim otimizar o aproveitamento do PLA, promover soluções inovadoras e contribuir para a redução do impacto ambiental, desenvolvendo um produto durador e ambientalmente responsável.

1.3. Metodologias

A metodologia considerada para o desenvolvimento desta dissertação abrangeu três fases principais: uma revisão de literatura, ensaios preliminares com o material e, por fim, a prototipagem.

A revisão da literatura constitui uma etapa fundamental para o desenvolvimento desta dissertação, uma vez que o foco principal recai sobre o PLA. Sendo um material complexo e altamente suscetível a alterações na sua estrutura e propriedades, torna-se essencial analisar informações sobre o seu comportamento, bem como as suas aplicações atuais e potenciais para o futuro. Considerando que o PLA é um material amplamente investigado e estudado, é crucial consultar os testes realizados para aprofundar o conhecimento e a compreensão sobre o mesmo.

Os ensaios com o material são fundamentais, uma vez que é necessário realizar diversos testes para identificar o melhor comportamento e a forma mais eficaz de trabalhar com o material, aproveitando todas as suas vantagens. O processo de reutilizar e transformar um bioplástico em algo novo é longo e envolve um ciclo contínuo de tentativa e erro, sendo impossível alcançar um resultado que cumpra todos os objetivos sem uma exploração intensiva do material. É através deste processo que se aprende a identificar tanto as limitações como as oportunidades do material, permitindo otimizar a sua utilização.

Por fim, a prototipagem é uma etapa essencial para validar os resultados da experimentação e analisar o comportamento do novo produto. É através da prototipagem que se torna possível identificar possíveis falhas, bem como oportunidades de melhoria, após o uso e manuseamento do produto. Este processo permite testar o desempenho do protótipo em condições reais de utilização, possibilitando ajustes e refinamentos que garantam a funcionalidade, a durabilidade e a eficácia do produto final. Além disso, a prototipagem fornece dados valiosos sobre a interação do utilizador com o produto, o que é crucial para a otimização do design e para a avaliação das suas propriedades em diferentes contextos. Desta forma, a prototipagem não só valida as hipóteses testadas durante a experimentação, como também contribui para o desenvolvimento contínuo e aprimorado do produto, assegurando que ele cumpra os objetivos estabelecidos e responda às necessidades do mercado.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, seguindo uma sequência lógica e clara que integra as etapas de investigação, experimentação, análise e desenvolvimento do produto.

Ao longo do primeiro capítulo é apresentado o enquadramento do tema, evidenciando a relevância do reaproveitamento de resíduos de impressão 3D, destacando o ácido poliláctico (PLA), assim como os plásticos convencionais e alguns dos termoplásticos mais utilizados no processo de impressão com impactos ambientas significativos. Ainda neste capítulo é referida a abordagem adotada e a organização da dissertação.

No segundo capítulo é apresentada a informação teórica e científica utilizada para posteriormente sustentar a problemática do tema em estudo. Inicialmente é descrita a evolução histórica dos plásticos convencionais, assim como dos termoplásticos utilizados para impressão 3D, e consequentemente os seus impactos ambientais, sociais e económicos. Ainda neste capítulo são referidos os seus benefícios e as iniciativas implementadas para reduzir os seus efeitos negativos. Posteriormente é realizada uma análise da gestão dos resíduos gerados pelo processo de FFF, e é abordada a biodegradação dos materiais e os bioplásticos. São referidas as suas propriedades, métodos de produção, processamento e reciclagem integrada na economia circular, as suas vantagens e as suas limitações.

No terceiro capítulo são apresentados e analisados diferentes projetos que exploram o reaproveitamento de plásticos, destacando soluções inovadoras e abordagens aplicáveis ao presente estudo.

O quarto capítulo aprofunda em detalhe o material (PLA), métodos e equipamentos utilizados para a sua análise. São ainda avaliadas as propriedades do material e acabamentos de modo a avaliar o impacto do processo de reaproveitamento nas suas propriedades.

O quinto capítulo aborda o desenvolvimento do produto, incluindo a sua conceção, prototipagem e validação. Por fim no sexto e último capítulo é realizada uma reflexão sobre os resultados, destacando os seus contributos e sugerindo investigações futuras.

CAPÍTULO 2
ESTADO DA ARTE

CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE

2.1. Evolução Histórica

O termo “materiais plásticos” foi utilizado pela primeira vez em 1909 por Leo Hendrik Baekeland para descrever produtos derivados de macromoléculas, como resinas, elastómeros e fibras artificiais. Em 1907, Baekeland desenvolveu o primeiro plástico sintético, o polímero baquelite, que se tornou bastante utilizado na produção de telefones. No entanto, o início da história do plástico remonta a 1833, quando Henri Braconnot produziu nitrocelulose. Este material foi posteriormente utilizado pelos irmãos Hyatt para fabricar industrialmente bolas de bilhar nos Estados Unidos, marcando os primeiros passos do plástico como substituto do marfim, embora os métodos para produzir plásticos sintéticos a partir de celulose ainda não estivessem plenamente dominados (Chalmin, 2019).

As inovações mais relevantes no campo dos plásticos ocorreram entre as duas Guerras Mundiais. Entre elas destacam-se o celofane (1913), o policloreto de vinilo (PVC, 1927), o poliestireno e o nylon (1938), e o polietileno (1942).

Entre 1950 e 1970, a produção de plásticos cresceu vinte vezes, atingindo mais de 25 milhões de toneladas. Esse crescimento foi impulsionado principalmente pelo Ocidente, com os Estados Unidos a liderar a produção, seguidos por países como Japão, Alemanha, Reino Unido, Itália e França. Durante este período de prosperidade económica, os plásticos tornaram-se uma parte fundamental da vida quotidiana, simbolizando o "American way of life" com produtos como os Tupperware, lançados em 1946 (Chalmin, 2019).

A produção mundial de plásticos continuou a crescer exponencialmente: de 60 milhões de toneladas em 1980, para 187 milhões em 2000, 265 milhões em 2010, e 348 milhões em 2017 (Chalmin, 2019).

Atualmente, a produção mundial de plástico ultrapassa os 450 milhões de toneladas métricas, representando um aumento de cerca de 230 vezes desde a década de 1950, conforme ilustrado no gráfico da Figura 1 (Ritchie et al., 2023).

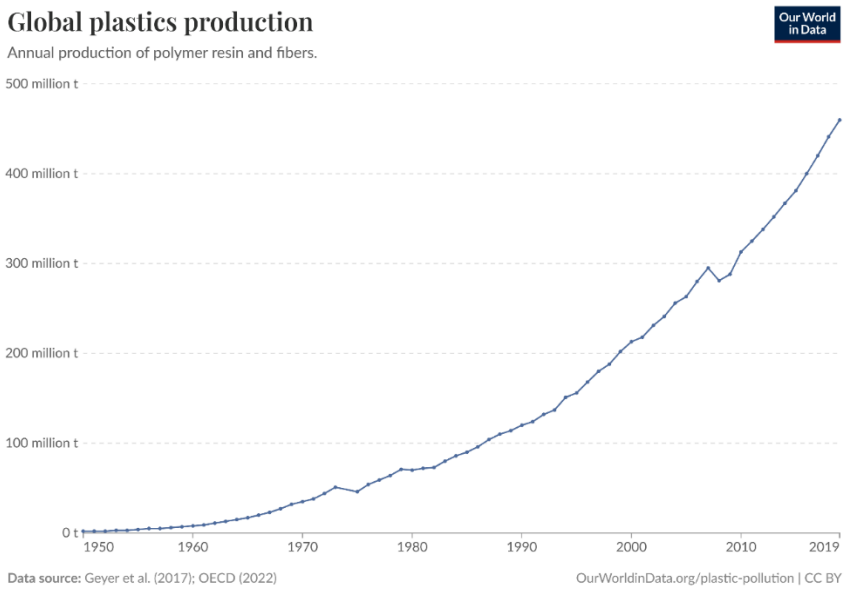


Figura 1: Produção do plástico de 1950 até 2019 (Ritchie et al., 2023)

2.2. Impactos e Desafios Derivados da Utilização de Plásticos

Os plásticos, na sua maioria derivados da indústria petroquímica, são produzidos a partir de petróleo refinado em nafta ou de gás natural. Em 2016, o setor petroquímico consumiu aproximadamente 17,4 milhões de barris de petróleo por dia, representando cerca de 20 % do consumo global dessa fonte de energia. O plástico tem como principal destino o setor de embalagens, que utiliza cerca de 150 milhões de toneladas anualmente. Outros setores significativos incluem construção civil (60 milhões de toneladas), têxteis, bens de consumo, automóveis e eletrónicos (55 milhões de toneladas) (Chalmin, 2019).

Apesar de suas vantagens, o plástico apresenta desafios significativos relacionados com a gestão de resíduos. Estudos realizados por Roland Geyer, da Universidade da Califórnia indicam que, das 8,3 bilhões de toneladas métricas produzidas desde 1950, 5,8 bilhões foram descartadas, mas apenas uma pequena fração foi reciclada ou incinerada. Isso deixa 4,6 bilhões de toneladas métricas de plástico acumuladas no meio ambiente (Chalmin, 2019).

Esse problema é agravado por sistemas de recolha de resíduos ineficientes, em que, devido à mistura dos resíduos, a taxa de recuperação é baixa, comparativamente às outras indústrias como o papel, o metal ou o vidro. Esta situação é particularmente notória em regiões ditas em desenvolvimento, onde rios como o Yangtse são responsáveis pelo transporte de grandes volumes de resíduos plásticos até aos oceanos (Chalmin, 2019).

A presença destes resíduos em oceanos, rios e outros corpos hídricos representa uma ameaça crescente para os organismos aquáticos e para os ecossistemas em que estes habitam. Existe uma discrepância significativa entre a vida útil dos produtos fabricados com estes materiais e o longo período em que estes persistem no ambiente, sob a forma de plásticos e microplásticos (Shekh & Kumar, 2025).

Estima-se que cerca de 80 % dos resíduos poluentes dos ecossistemas aquáticos tenham origem terrestre, sendo transportados através de rios, ventos, desastres naturais e atividades humanas (Landrigan et al., 2020).

Os plásticos de uso único representam uma parte significativa deste problema, especialmente no setor das embalagens. (Narancic & O'Connor, 2018).

2.3. Benefícios do Plásticos na Sociedade Atual

Embora o plástico seja amplamente criticado, não é possível ignorar os seus benefícios. Este permite economizar energia no transporte e reduzir emissões de gases de efeito estufa, além de substituir materiais como madeira, papel e metal em algumas aplicações, muitas vezes com uma pegada de carbono mais baixa. No entanto, o uso excessivo de plásticos virgens, especialmente para produtos descartáveis, acentua os desafios ambientais e evidencia a necessidade de aprimorar sistemas de reciclagem e limitar o uso de plásticos não essenciais (Chalmin, 2019; Narancic & O'Connor, 2018).

Produtos como sacos de plástico, cujo uso é fortemente desencorajado em vários países, exemplificam a necessidade de regulamentação para combater a poluição. Assim, embora seja impossível eliminar completamente o plástico, o seu uso deve ser mais sustentável e voltado para aplicações onde sua eficiência ambiental e económica seja comprovada (Chalmin, 2019; Narancic & O'Connor, 2018).

2.3.1. Iniciativas para reduzir o impacto do Plástico

Da mesma forma que se compreende a importância da análise dos impactos (positivos e negativos) do uso de plástico, torna-se também imprescindível reconhecer e explorar as iniciativas adotadas para diminuir os impactos negativos. Algumas destas iniciativas serão então desenvolvidas em seguida.

Primeiramente é importante referir que o plástico em si não é o problema, mas sim a forma como é usado e descartado. Como é mencionado por Petr Schmied (2019) no texto de Genon et al. (2022, p.67) *"(...)"reusable bags," which are more durable and environmentally beneficial than cotton or paper bags (...)".*

Além disso, conforme argumenta Fortuna (2020), o plástico oferece vários benefícios em termos de sustentabilidade quando comparado com outros tipos de embalagens. Este material consome menos energia e recursos naturais durante a sua produção e uso, emite menos gases de efeito estufa, prolonga a vida útil dos produtos e facilita o transporte, com menor consumo de combustível e menor emissão de poluentes.

Quando se procura reduzir o impacto ambiental dos plásticos, a reciclagem surge como uma das primeiras alternativas a considerar sendo identificada como a mais adequada para gerir o fim de vida deste material (Nunes, 2018).

Mesmo as embalagens menos complexas trazem desafios na sua reciclagem, afinal "a complexidade da efetivação da reciclagem também é vinculada às diferentes fontes de pós-consumo, pois os resíduos gerados apresentam perfis heterogêneos, provenientes de materiais sujos e contaminados" (Nunes, 2018, p.32) quando acrescentamos ainda a forma incorreta como este material é descartado, muitas vezes enviados para locais inadequados, como menciona ainda Nunes (2018), este processo torna-se muitas vezes pouco eficiente.

Atualmente o uso de embalagens é fundamental, não só é um meio de proteção e prolongamento da vida útil do produto, como também é um instrumento da nossa sociedade para ter acesso a bens de consumo de forma segura, prática e economicamente viável. Devido a estas condicionantes públicas, é importante perceber que há áreas em que o uso de embalagens é imprescindível (Fortuna, 2020).

Para além disso, a substituição de embalagens plásticas por outros materiais nem sempre é mais sustentável. No entanto, tendo em consideração os desafios associados à reciclagem e os efeitos nocivos da incineração de embalagens plásticas, a Bioeconomia apresenta-se como um modelo promissor, tendo como base a implementação de bioplásticos no setor de embalagens plásticas (Fortuna, 2020).

Estes materiais pretendem imitar as funcionalidades do plástico sintético, com a vantagem de serem biodegradáveis, resolvendo assim a questão da poluição vinda do pós-consumo. Estes materiais em condições ideais podem ser degradados mais rapidamente (Calegari & Oliveira, 2015; Nunes, 2018).

Por fim, é importante compreender que, qualquer que seja a solução que esteja a ser falada, a responsabilidade da sua execução não pode ser limitada ao cidadão

individual. É indispensável que existam políticas públicas que acompanhem as preocupações ambientais: desde a democratização da informação em relação a este assunto, passando pela consciencialização, até medidas legislativas de punição das indústrias, assim como o desenvolvimento de materiais menos persistentes na natureza (Nunes, 2018).

2.4. Gestão de Resíduos de Impressão 3D

A impressão 3D apresenta um elevado potencial como método de produção de produtos personalizados e económicos, uma vez que proporciona uma ampla liberdade de criação. Este método, também designado por manufatura aditiva (AM), baseia-se na adição sucessiva de camadas de material. O processo surgiu na década de 1980 e era inicialmente conhecido por prototipagem rápida, abrangendo diferentes tecnologias, como a Estereolitografia (SLA), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e o Processamento Digital de Luz (DLP-Digital Light Processing). Os materiais mais utilizados nestes processos são termoplásticos, como ABS e o PLA, e ligas metálicas, resinas, cerâmicas, entre outros (D'Orey Leal, 2023).

Embora a impressão 3D ofereça diversas vantagens tecnológicas, esta também gera volumes consideráveis de resíduos. Esses resíduos resultam de impressões malsucedidas e de estruturas de suporte rejeitadas. A capacidade de fabricar componentes sem a necessidade de maquinação ou ferramentas específicas contribui para o aumento de protótipos descartáveis, intensificando o problema da gestão de resíduos em decorrência do crescimento contínuo das aplicações de impressão termoplástica impulsionadas pelo avanço da tecnologia aditiva (Mikula et al., 2020).

A produção de filamentos para impressão 3D é predominantemente realizada por meio do processo de extrusão. Neste processo são inseridos no extrusor grãos ou pós de polímeros onde, sob ação do calor, são transformados numa massa homogénea. Esta massa é, posteriormente, convertida num fio, com diâmetro padronizado de acordo com as medidas dos componentes de impressão, garantindo compatibilidade e uniformidade. (Anderson, 2017).

Entre os resíduos gerados, o PLA representa um problema menor, embora ainda significativo. A sua origem natural e o menor impacto ambiental são vantagens importantes, mas as suas limitações mecânicas e de durabilidade desencorajam o uso mais amplo por fabricantes. Outro desafio associado ao seu reaproveitamento é a perda de propriedades e estabilidade após múltiplos ciclos de reciclagem (Mikula et al., 2020).

Esses desafios reforçam a necessidade de desenvolver soluções eficazes para a gestão de resíduos na impressão 3D, incentivando o uso de materiais mais duráveis e sistemas de reciclagem mais eficientes.

2.5. Impacto Ambiental da Impressão 3D

A reutilização de materiais poliméricos oferece uma oportunidade significativa de valorização dos resíduos, permitindo a transformação dos mesmos em novos produtos consumíveis, visando uma economia circular dos materiais. Este conceito está especialmente presente no crescente mercado de impressão 3D, onde filamentos podem ser fabricados a partir de diversos termoplásticos, incluindo os provenientes da reciclagem (Mikula et al., 2020).

Este processo de produção alinha-se com os princípios da economia circular, que visa substituir o antigo modelo linear, baseado na lógica "adquirir–produzir–descartar", por um sistema mais sustentável e regenerativo, que promova a redução de resíduos, a reutilização e a reciclagem de materiais (Mikula et al., 2020).

A implementação da economia circular responde aos desafios ambientais e sociais gerados pelo uso excessivo de recursos e a poluição descontrolada, forçando a adoção de práticas mais responsáveis no uso de materiais. As abordagens tradicionais da economia circular incluem os 3Rs (Reduzir, Reutilizar e Reciclar), mas também se expandem para incluir as práticas de Recuperar, Redesenhar e Remanufacturar, como está representado na Figura 2. O objetivo é minimizar os impactos ambientais, promover a recuperação de materiais e reduzir a dependência de recursos naturais, criando um sistema benéfico tanto para a sociedade quanto para a economia (Jawahir & Bradley, 2016).

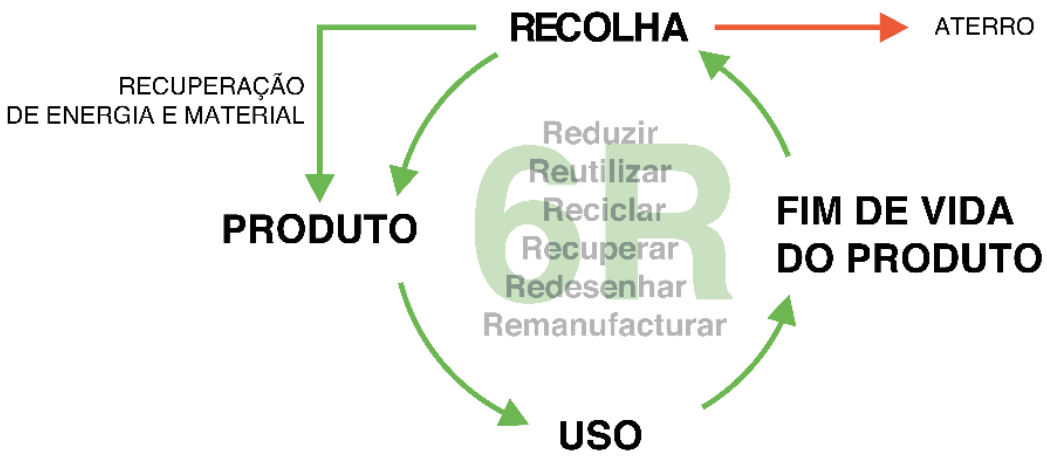


Figura 2: Conceito de economia circular adaptado de (Mikula et al., 2020).

Além disso, a geração de resíduos de PLA na impressão 3D tem aumentado devido à maior adoção da tecnologia, com os resíduos sendo originados principalmente no processo de pré e pós-impressão. A gestão desses resíduos pode ser feita de diversas formas, incluindo compostagem, reciclagem mecânica e incineração. No entanto, métodos como incineração e disposição em aterros são indesejáveis devido ao impacto ambiental negativo, como a proliferação de PLA nos aterros e a contaminação da cadeia de reciclagem de plásticos (Agbakoba et al., 2024).

2.6. Biodegradação de Plásticos

Um dos grandes obstáculos para a degradação do plástico no ambiente é a sua alta durabilidade. Alguma degradação ocorre ao longo do tempo, nomeadamente nos plásticos derivados de petróleo, gerada por transformações de fatores bióticos e abióticos (Narancic & O'Connor, 2018).

2.6.1. Degradação Abiótica

A degradação abiótica é o processo que altera as propriedades mecânicas, óticas e elétricas do plástico através de processos físicos e químicos. Estes resultam em mudanças intramoleculares no polímero, como a quebra de ligações e a formação

de novos grupos químicos. Para que esta degradação aconteça, é necessário a adição de foto ou termo-oxidantes. (Narancic & O'Connor, 2018).

2.6.2. Biodegradação

A biodegradação, por sua vez, é o processo pelo qual microrganismos utilizam o polímero como a única fonte de carbono e energia. Embora a biodegradação de plásticos tradicionais tenha sido amplamente estudada, a mineralização desses plásticos tem sido limitada (Narancic & O'Connor, 2018).

O processo de biodegradação é fortemente influenciado pelas características do polímero e pela presença de microrganismos no ambiente. Fatores como cristalinidade, peso molecular, hidrofobicidade e a presença de aditivos e plastificantes no processo de fabricação afetam significativamente a taxa de degradação (Agbakoba et al., 2024).

No que diz respeito aos plásticos, o Polietileno Tereftalato (PET) é mais suscetível à biodegradação em comparação com outros plásticos como Polietileno (PE), Poliestireno (PS), Polipropileno (PP) e Policloreto de Vinilo (PVC), devido à presença de ligações hidrolisáveis na sua estrutura. A hidrólise do PET, que ocorre com a ajuda de fungos como Fusarium oxysporum e Fusarium solani, resulta na libertação de ácido tereftálico (TA), um dos monómeros do PET, como é possível constatar na Figura 3. No entanto, ainda não está comprovado se o TA libertado sustenta o crescimento desses fungos. A biodegradabilidade de plásticos à base de petróleo enfrenta desafios adicionais, como a limitada biodisponibilidade e a insolubilidade em água, dificultando o acesso das enzimas de degradação ao polímero (Narancic & O'Connor, 2018).

Plásticos como o PS são muito mais resistentes à degradação. Estudos, como o liderado por Otake et al. (1995), demonstraram que o PS não sofreu biodegradação no solo durante 32 anos. Outro estudo demonstra que a degradação foi de apenas 1% em 90 dias (Narancic & O'Connor, 2018).

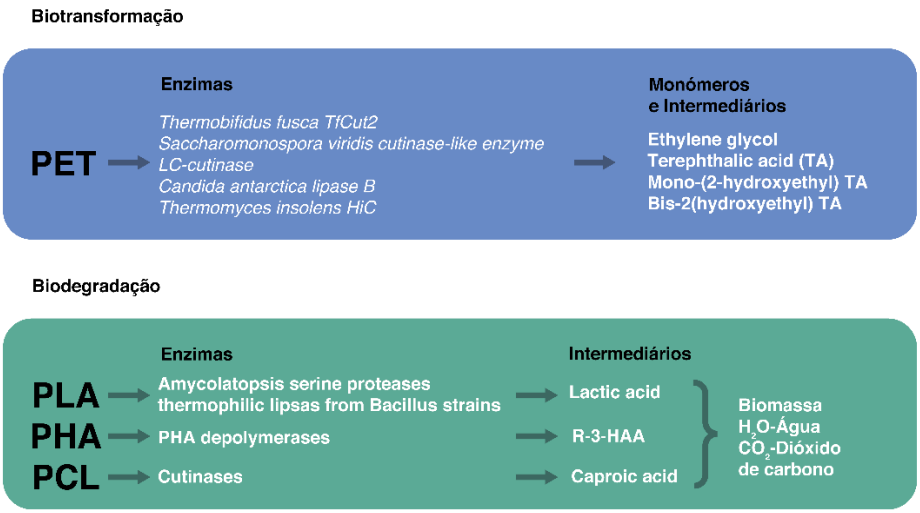


Figura 3: Degradação de plásticos caracterizada pela presença de ligações hidrolisáveis adaptado de (Narancic & O'Connor, 2018).

2.7. Ácido Poliláctico

O ácido poliláctico (PLA) é um dos bioplásticos mais relevantes no mercado. É produzido através de uma combinação de fermentação de açúcares de base biológica, que gera ácido láctico, e processos químicos, para converter o ácido lático em PLA. Este processo encontra-se descrito na Figura 4. Devido à sua alta cristalinidade, este material encontra uma aplicação importante no setor de embalagens. Porém, para que o PLA seja biodegradável, é necessária a exposição a altas temperaturas (Taib et al., 2022).

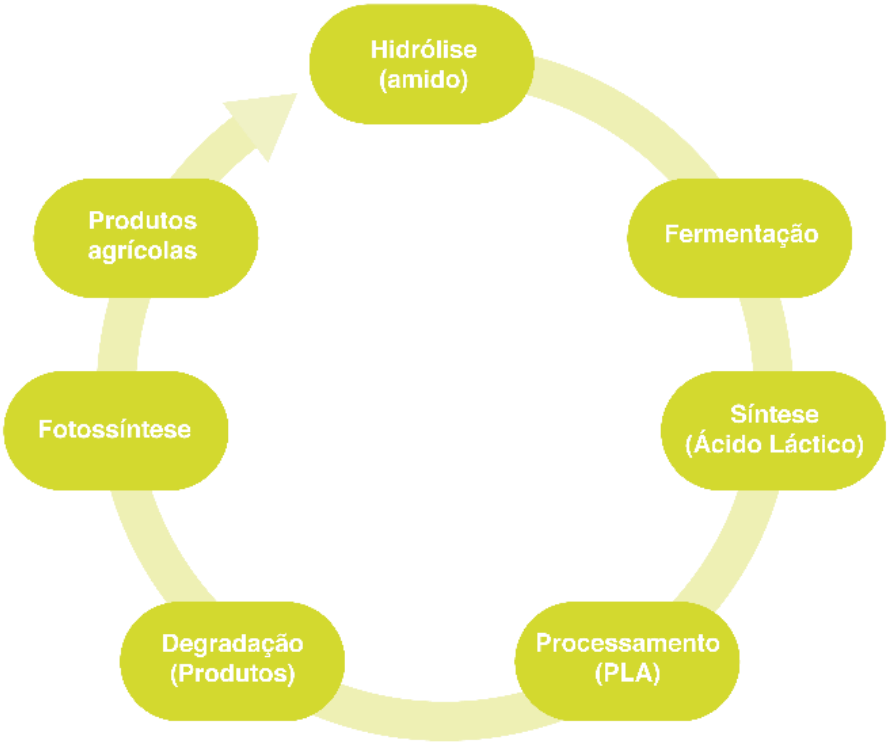


Figura 4: Ciclo do PLA na natureza adaptado de (Taib et al., 2022).

Ainda que os micro-organismos e enzimas envolvidos na degradação do PLA sejam bem conhecidos, a hidrólise não enzimática é uma das principais formas de degradação. Estudos recentes sobre diversos plásticos biodegradáveis, tanto de origem biológica como fóssil, analisaram a sua biodegradabilidade em sete ambientes diferentes. Os resultados demonstram que o PLA atende aos padrões internacionais de biodegradabilidade em compostagem industrial e digestão anaeróbica. No entanto, a degradação do PLA no solo é muito lenta, com um tempo de biodegradação estimado em mais de trinta anos. (Taib et al., 2022).

2.8. Reciclagem do PLA

Existem diversos métodos para gerir a crescente quantidade de resíduos plásticos, sendo as abordagens mais comuns a reciclagem primária, reciclagem mecânica, reutilização química e processos térmicos (Mikula et al., 2020), processos que serão explorados mais à frente.

O processo de reciclagem de materiais poliméricos para impressão 3D envolve várias etapas, como a separação seletiva de materiais, descontaminação, purificação, moagem, fusão e extrusão. No entanto, obstáculos logísticos e económicos representam desafios significativos para a eficácia desse processo (Mikula et al., 2020).

O material é inicialmente separado, lavado e moído, seguido de uma extrusão a altas temperaturas, sendo o filamento preparado posteriormente para a impressora 3D. Durante esse processo, o material é testado quanto às propriedades mecânicas, reológicas e estruturais, sendo, se necessário, moído novamente, como está representado na Figura 5. Se houver modificação do material, é adicionada uma substância adicional, como um aglutinante, e o material é novamente extrudido (Mikula et al., 2020).

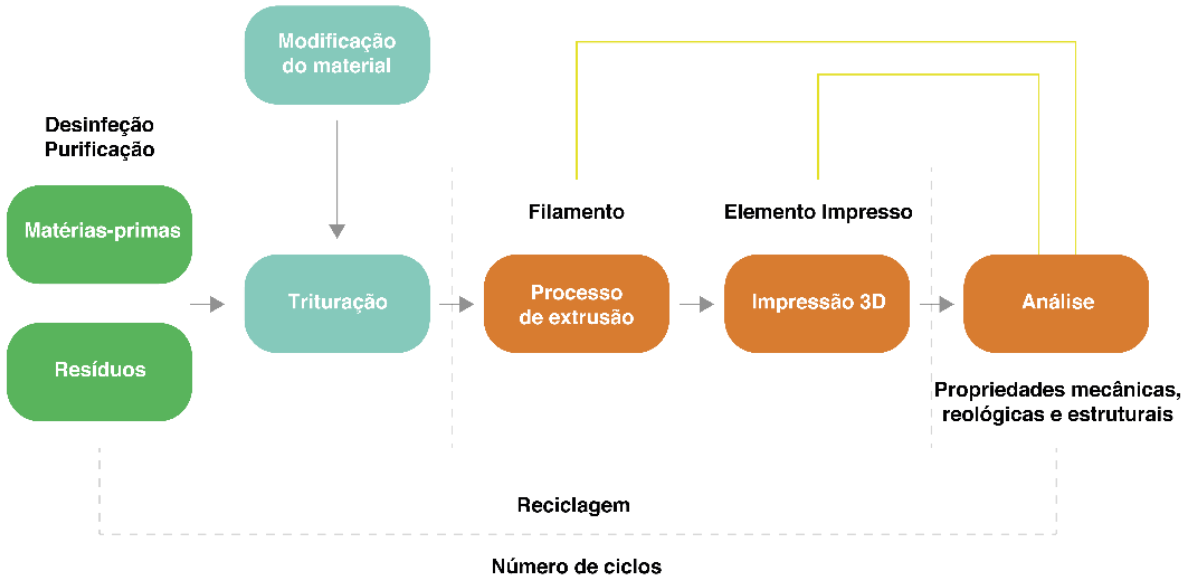


Figura 5: Processo de fabricação de filamento a partir de resíduos, adaptado de (Mikula et al., 2020).

A degradação dos polímeros pode ser provocada por diversos fatores como a temperatura, a tensão e a presença de oxigénio durante o seu processo de extrusão, afetando também materiais mais resistentes como o PE e não apenas os polímeros sensíveis como o PLA. Qualquer alteração nas propriedades físicas do polímero limita diretamente a qualidade do produto resultante da extrusão, sendo que a repetida extrusão tem um papel determinante na resistência à rutura, peso molecular e na viscosidade dos polímeros, sendo assim o número de extrusões determinantes para essas alterações nas propriedades do material (Mikula et al., 2020).

A reciclagem direta do PLA consiste nas etapas de trituração e re-extrusão para a impressão 3D. Embora as suas propriedades mecânicas apresentassem algumas deteriorações, após dois ciclos de extrusão e um processo de impressão 3D, o filamento mantinha o diâmetro e acabamento superficial do original. (Anderson, 2017)

A principal dificuldade enfrentada foi a redução da viscosidade do material, causada pela divisão das cadeias poliméricas durante o processo de reciclagem, o que dificultou o uso do filamento de PLA reciclado para novas impressões 3D. Adicionalmente, a reorganização da estrutura lamelar do material evidenciou a aleatoriedade das cadeias poliméricas, como consequência da redução do peso molecular. Posteriormente verificou-se que a adição de PLA virgem ao material melhorou significativamente as suas propriedades mecânicas e térmicas (Zenkiewiczet al., 2009).

O impacto da reciclagem nas propriedades dos polímeros utilizados para impressão 3D é uma questão importante, uma vez que o processo de reciclagem envolvendo etapas de lavagem resulta numa diminuição de aproximadamente 20 % no peso molecular do PLA. Embora a reciclagem de filamentos seja uma área de interesse crescente, é reconhecido que a fusão e re-extrusão repetidas do filamento levam a uma degradação maior do polímero (Mikula et al., 2020).

A viabilidade de reciclar resíduos de PLA produzidos através de impressão 3D FFF foi analisada, a partir do teste de diferentes percentagens de filamento virgem com adição de 25 %, 50 % e 75 % de PLA reciclado. Através deste estudo tornou-se possível verificar uma melhoria na resistência à tração, bem como alterações pouco significativas na estabilidade térmica das amostras nas adições de 25 % e 50 % em comparação com as amostras que continham mais percentagem de adição de material reciclado. Já na adição de 75 % a amostra apresentava sinais de fragilidade (Bergaliyeva et al., 2023).

Durante a análise executada por Peeters et al. (2019), citado por (Agbakoba et al., 2024), este reconhece que a variação da composição do PLA reciclado representa um obstáculo para a reciclagem mecânica, uma vez que, dependendo da marca, e dos aditivos por esta utilizados, a fabricação do material não contem um processo universal.

2.9. Sustentabilidade

Em termos de sustentabilidade e alinhamento com os princípios da economia circular, o tratamento de plásticos e o fabrico de filamentos para impressoras 3D

desempenham um papel relevante, contribuindo para a redução da contaminação antrópica por plásticos. Contudo, a reciclagem mecânica de resíduos à base de PLA resultante de atividades de impressão 3D em filamentos reciclados disponibiliza uma opção à incineração e ao descarte nos aterros sanitários. Esse processo não apenas contribui para a redução dos custos associados ao descarte de resíduos plásticos, mas também permite o reprocessamento em grande escala de resíduos de PLA, gerando produtos de valor acrescentado (Agbakoba et al., 2024).

Contudo, a reciclagem mecânica enfrenta desafios logísticos e custos adicionais associados à recolha, limpeza, triagem, transporte e armazenamento dos resíduos. Existe então a necessidade de analisar estes desafios de maneira multidisciplinar para que a reciclagem mecânica se torne numa solução eficaz (Kreiger et al., 2014).

2.9.1. Economia Circular

A economia circular é um modelo de produção que procura manter os materiais no ciclo produtivo, ao invés de os descartar após o seu uso. Este processo é possível através da reutilização, recuperação e reciclagem. O modelo circular promove então a diminuição dos resíduos e a diminuição da sua libertação descontrolada na natureza (Narancic & O'Connor, 2018).

Por vezes persiste uma perceção incorreta relativamente ao papel dos plásticos biodegradáveis no contexto de economia circular. Na realidade, é possível que estes sejam reciclados tanto de forma mecânica como através de processo biológicos. Estes processos permitem que o carbono seja devolvido à natureza através, por exemplo, da compostagem. (Narancic & O'Connor, 2018).

2.10. Métodos de Reciclar PLA

A reciclagem de polímeros residuais pode ser realizada através de diferentes métodos, que podem ser agrupados em três categorias principais: mecânica, térmica e química. O processo de reciclagem inclui várias etapas, como recolha, separação, processamento e comercialização. Cada uma dessas etapas desempenha um papel importante no tratamento e reaproveitamento dos resíduos plásticos (Taib et al., 2022).

2.10.1. Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica é o processo mais simples e amplamente utilizado para os resíduos plásticos uma vez que é um processo que não requer uma tecnologia complexa. Nesse processo, os plásticos residuais são separados, fundidos, extrudidos e granulados novamente para fabricar novos produtos. Polímeros monotipo, ou seja, plásticos compostos por um único tipo de polímero, são mais adequados para a reciclagem mecânica do que plásticos feitos com multicamadas. Contudo, compósitos e termoendurecíveis não podem ser reciclados por este método. A reciclagem mecânica é ideal para a fabricação de compósitos reforçados com fibras de vidro ou fibra de carbono uma vez que este processo contém um impacto ambiental menor em termos de consumo de energia quando comparado com outros métodos de reciclagem (Scalenghe, 2024).

No entanto, um dos problemas principais deste processo é a degradação dos materiais durante a reciclagem, causada pela reação química, polimerização e policondensação. A moagem dos resíduos também pode diminuir significativamente o valor dos materiais, além de gerar uma maior heterogeneidade e dificuldades na manutenção da qualidade dos produtos finais. A foto-oxidação, por exemplo, pode ocorrer com a aplicação de calor ou energia, alterando a estrutura das cadeias poliméricas (Taib et al., 2022).

2.10.2. Reciclagem Térmica

A reciclagem térmica é realizada por meio da pirólise, onde os resíduos plásticos são aquecidos a uma temperatura de 300 °C a 700 °C num ambiente sem oxigénio. Este processo gera gases sintéticos, óleos e carvão, que podem ser reutilizados em diferentes aplicações industriais. O gás ou óleo obtido pode ser usado para a recuperação de energia, e o carvão pode ser aproveitado como fertilizante na agricultura (Delvere et al., 2019).

A pirólise é especialmente útil para o processamento de resíduos plásticos complexos, como aqueles compostos por materiais misturados, e reduz o impacto ambiental ao diminuir o volume de resíduos nos aterros e as emissões de dióxido de carbono (CO2). No entanto, as fibras recuperadas podem ser danificadas de forma significativa dependendo da temperatura de aquecimento, o que limita a reutilização das mesmas. Apesar destas limitações, a pirólise é vantajosa pela sua capacidade de gerar produtos rápidos, que podem ser usados para gerar eletricidade e calor, tornando-a numa alternativa interessante para o tratamento de plásticos mais difíceis de reciclar (Delvere et al., 2019).

2.10.3. Reciclagem Química

A reciclagem química é um processo mais avançado, no qual os plásticos são transformados em moléculas menores, como líquidos ou gases, que podem ser reutilizados para fabricar novos produtos petroquímicos e plásticos (Awasthi et al., 2017).

Monómeros ou oligómeros podem ser obtidos através de uma reação química que quebra as cadeias dos polímeros. A reciclagem química é considerada vantajosa para as indústrias sustentáveis pois gera menos resíduos e permite uma produção mais eficiente de novos materiais. Embora este método produza produtos de alta qualidade, ainda está em desenvolvimento e não se encontra amplamente disponível para uso comercial (Taib et al., 2022).

A principal vantagem da reciclagem química é a possibilidade de processar materiais heterogéneos e poluídos, o que não é possível na reciclagem mecânica, que exige plásticos mais puros para garantir a qualidade dos produtos reciclados (Awasthi et al., 2017).

2.11. Biodegradação de Bioplásticos

Como é mencionado por Narancic & O'Connor (2018), os polímeros de base biológica, conhecidos como bioplásticos, são parcialmente ou totalmente derivados de biomassa. Estes podem contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que o CO2 é consumido durante o crescimento das culturas utilizadas para fornecer os açúcares presentes na biomassa, que são utilizados na produção desses plásticos. Contudo, a origem biológica de um plástico não implica que ele seja biodegradável. A biodegradabilidade depende da natureza química do polímero e das condições ambientais em que o plástico se encontra.

Em contrapartida, plásticos biodegradáveis como Amido termoplástico (TPS), PLA e Polihidroxialcanoato (PHA) podem ser produzidos a partir de recursos renováveis, tendo assim a vantagem de serem não só biodegradáveis, mas também de origem biológica. Além disso, existem materiais biodegradáveis derivados do carbono fóssil, como o Policaprolactona (PCL) e o PBAT. Os diversos tipos de plásticos apresentam variações significativas na sua biodegradabilidade e impacto ambiental, sendo crucial diferenciar entre os que são apenas de origem biológica e os que realmente são biodegradáveis (Narancic & O'Connor, 2018).

A biodegradação completa (ou seja, a mineralização) de um material num determinado ambiente depende de vários fatores. Entre eles destacam-se a cristalinidade do material, a presença de aditivos, a disponibilidade de microrganismos adequados e as condições ambientais, como temperatura, humidade e pH. Isto significa que um plástico pode ser biodegradável em certos ambientes, mas não em outros. Por conseguinte, é fundamental avaliar o comportamento de diferentes plásticos biodegradáveis em uma gama de ambientes para determinar se esses plásticos realmente se biodegradam completamente e sob quais condições (Narancic & O'Connor, 2018).

2.12. Propriedades do PLA

É possível otimizar as propriedades mecânicas do PLA através da sua incorporação com outros polímeros, como amido, o metacrilato-butadieno-estireno, a borracha natural, o poliestireno (PS) e o PHA. Adicionalmente, a produção de compósitos de PLA reforçados com diferentes fibras revela-se uma estratégia eficaz para melhorar o seu desempenho estrutural e ampliar o leque de aplicações possíveis. Por outro lado, a adição de PCL, para além de melhorar as suas propriedades, possibilita que este seja compostável em casa (Chen et al., 2018).

A compostagem doméstica pode ser uma alternativa vantajosa, pois evita a necessidade de recolher e transportar resíduos para instalações industriais, reduzindo as emissões de gases com efeito de estufa associadas a esse transporte (Narancic & O'Connor, 2018).

No entanto, é fundamental reconhecer que, apesar dos seus benefícios, os plásticos biodegradáveis não devem ser encarados como uma solução simples em substituição aos plásticos derivados de combustíveis fósseis. Estes exigem uma gestão responsável e adequada.

A mistura de PLA/PCL, por exemplo, embora seja compostável em ambiente doméstico, não apresenta o mesmo grau de biodegradabilidade quando exposta a condições de solo ou ambientes aquáticos. Este facto reforça a importância das condições ambientais no processo de degradação dos plásticos e evidencia a necessidade de uma gestão eficiente dos resíduos (Sangeetha et al., 2016).

É importante salientar que, embora os plásticos biodegradáveis tenham capacidade de degradação no ambiente, não devem ser descartados em ecossistemas já afetados pela poluição, uma vez que podem gerar impactos semelhantes aos dos plásticos não biodegradáveis (Narancic & O'Connor, 2018).

De acordo com as normas internacionais em vigor em 2018 (ISO e ASTM), o prazo estabelecido para a biodegradação em ambientes aquáticos é de cerca de 56 dias, enquanto no solo este prazo prolonga-se até 2 anos. Em condições controladas, como a compostagem industrial, a compostagem doméstica e a digestão anaeróbica, os períodos são, respetivamente, 180 dias, 1 ano e 15 dias (Narancic & O'Connor, 2018).

No processo de compostagem os microrganismos decompõem o material num sistema fechado, produzindo biogás rico em metano e um fertilizante rico em nutrientes, conhecido como "digestato".

2.13. Métodos de Transformação do PLA

Para processar o PLA são utilizadas técnicas já previamente utilizadas na produção de polímeros, por sua vez adaptadas de técnicas utilizadas no fabrico de plásticos.

Contudo, para que as características do biopolímero sejam preservadas, é fundamental seguir regras específicas e protocolos incontornáveis. Entre os métodos mais comuns de fabricação de biopolímeros, destacam-se a extrusão por fusão a quente, moldação por injeção, moldação por sopro e termoformação (Taib et al., 2022).

2.13.1. Extrusão por Fusão a Quente (HME)

No processo de extrusão por fusão a quente (HME), o calor transforma as matérias-primas plásticas numa massa amolecida antes de serem moldadas em produtos com formas e densidades uniformes. A alta viscosidade é crucial para o correto funcionamento da extrusão, pois garante que a matéria-prima derretida mantenha a sua forma por tempo suficiente para ser moldada (Mali A.S et al., 2019).

O equipamento utilizado no processo de HME é, por norma, composto por uma extrusora, equipamentos auxiliares, ferramentas para o processamento consecutivo e instrumentos de monitorização da qualidade do produto. Durante o processo, variáveis como temperatura, pressão, taxa de alimentação e velocidade do parafuso são controladas para garantir que o polímero derretido adquira a forma desejada. Este processo pode resultar em diferentes produtos, como folhas, sacos plásticos e tubos, conforme ilustrado no diagrama do equipamento de extrusão da Figura 6 (Taib et al., 2022).

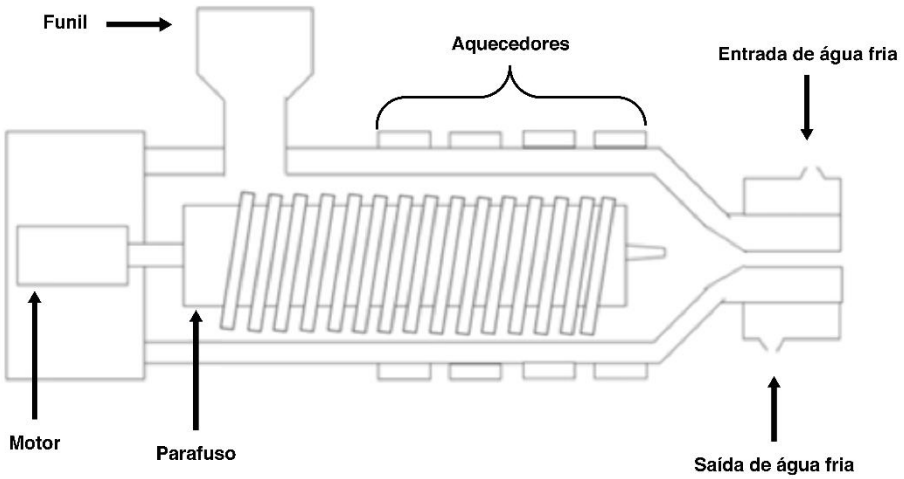


Figura 6: Esquema de uma máquina de moldação por extrusão adaptado de (Taib et al., 2022).

O processo de extrusão pode ser dividido em quatro etapas principais: "alimentação das matérias-primas por um funil, mistura, moagem, redução do tamanho das partículas, desgaseificação e amassamento, fluxo através do molde e extrusão antes do processamento adicional." Taib et al. (2022, p.7) Este processo pode ser executado com dois tipos de extrusoras diferentes, a de parafuso único e a de parafuso duplo. A primeira, sendo mais simples e de menor custo, é a mais utilizada globalmente. Ela realiza a alimentação, fusão, extração de gases e vapores e bombeamento dentro do cilindro, podendo operar com alimentação por fluxo máximo ou limitado, dependendo do processo de fabricação pretendido. Devido á elevada capacidade de gerar alta pressão durante os processos de fusão e mistura, esta extrusora facilita a moldação do material dentro do molde (Taib et al., 2022).

Por outro lado, a extrusora de parafuso duplo é mais complexa, com mecanismos de fluxo que variam conforme o design do parafuso e o tipo de operação, sendo possível que estes tenham uma rotação no mesmo sentido ou em sentidos opostos. As vantagens dessa extrusora incluem uma alimentação e dispersão de material mais eficientes, menor tendência ao superaquecimento e tempos de trânsito mais curtos (Mali A.S et al., 2019).

2.13.2. Moldação por injeção

A moldação por injeção é um dos processos mais eficientes para a produção em grande escala de produtos a partir de termoplásticos, e frequentemente não requer acabamentos adicionais. No início do processo, o polímero termoplástico é aquecido além de seu ponto de fusão para que, posteriormente, seja injetado no

molde onde assume a forma desejada. A pressão do fluxo e a transferência de calor são os mecanismos principais deste processo (Taib et al., 2022).

O diagrama esquemático de uma máquina de moldação por injeção, apresentado na Figura 7, ilustra o processo que inicia com a alimentação de pellets plásticos no parafuso a partir do funil de alimentação. O plástico é completamente derretido após passar pelo parafuso e encontra-se amolecido e seco, sob alta pressão. De seguida, o material fundido preenche o molde, com uma adição de material para compensar o encolhimento. As duas metades do molde são pressionadas para formar a cavidade. Após o arrefecimento, uma das metades do molde é aberta para libertar o componente. Desmoldastes podem ser usados no molde para evitar a aderência do componente (Taib et al., 2022).

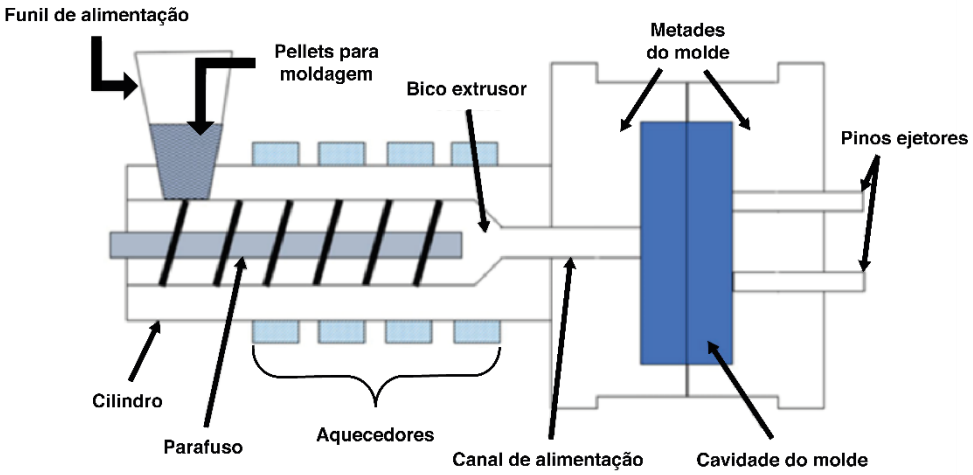


Figura 7: Esquema de um dispositivo de moldação por injeção adaptado de (Taib et al., 2022).

Em geral, quando seguidas as boas práticas durante a produção, os itens gerados por esse método não necessitam de acabamentos adicionais, permitindo a fabricação em massa de pequenos componentes a um custo acessível. A Figura 8 mostra o ciclo do processo de moldação por injeção plástica, evidenciando que, por ser um processo cíclico, as peças são fabricadas de forma contínua, mas em intervalos regulares. A Tabela 1 resume as etapas do ciclo do processo de moldação por injeção (Taib et al., 2022).

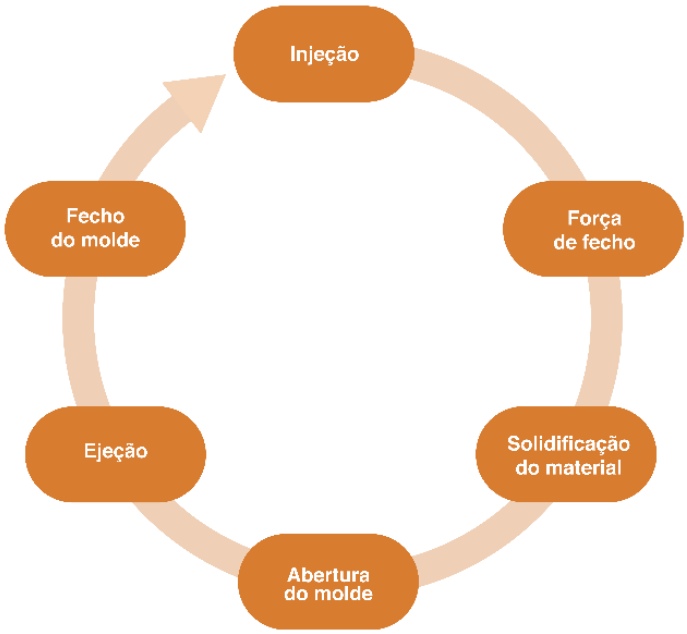


Figura 8: - Ciclo de injeção de plástico por molde adaptado de (Taib et al., 2022).

Tabela 1: Passos do processo de injeção por molde adaptado de (Taib et al., 2022).

Etapa	Unidade de injeção	Molde	Unidade de fecho
1. Fecho do molde	A dose é preparada, o parafuso roda, a válvula de retenção está aberta	Fechado	Fechado
2. Injeção	O parafuso, sem rodar, avança, a válvula de retenção está fechada	Fechado, o molde está a encher	Fechado
3. Compactação	O parafuso continua a avançar, a válvula de retenção está fechada	Fechado, a compactação continua, o polímero está a solidificar	Fechado
4. Preparação da dose e arrefecimento	O parafuso recua e começa a rodar, a válvula de retenção está aberta	Fechado, o polímero está solidificado, em arrefecimento	Fechado
5. Ejeção	O parafuso continua a rodar, a válvula de retenção está aberta	Aberto, a peça é ejetada	Aberto

2.13.3. Moldação por sopro

A técnica de moldação por sopro é amplamente utilizada para a produção de produtos tridimensionais ocos, especialmente garrafas na indústria de embalagens alimentícias. Nesse processo, um tubo termoplástico fundido é insuflado ou soprado para assumir a forma da cavidade do molde, resultando na formação do objeto oco. Uma vez que o sopro é concluído, o termoplástico fundido mantém a forma do molde ao ser retirado (Maddah, 2016).

Existem três principais processos termoplásticos usados na moldação por sopro: a moldação por sopro, a moldação por sopro por extrusão e a moldação por sopro por injeção. A moldação por sopro é empregue para produzir jarros e garrafas biaxialmente orientados, que apresentam maior resistência, transparência e propriedades de barreira. A moldação por sopro por extrusão é usada para fabricar garrafas de PP com boa transparência e capacidade de preenchimento a quente, e é destes três o processo mais utilizado. Já a moldação por sopro por injeção é indicada para a produção de garrafas pequenas e jarros de boca larga (Taib et al., 2022).

Independentemente do tipo de material utilizado, o processo de moldação por sopro consiste em três etapas principais. Primeiramente, o termoplástico fundido é formado a partir de uma quantidade controlada de material. Em seguida, aplica-se força para moldar o material conforme o molde desejado. Por fim, o objeto moldado é arrefecido para manter a sua forma. A escolha do processo entre moldação por injeção ou extrusão depende do objetivo do produto final. O processo de moldação por sopro por extrusão é mais económico, sendo ideal para a produção de recipientes e vasos que não exigem precisão. Para aplicações mais exigentes, como garrafas de bebidas carbonatadas, utiliza-se a moldação por sopro por injeção, que oferece melhores propriedades mecânicas e de barreira. As características dos diferentes processos de moldação são apresentadas na Tabela 2 (Taib et al., 2022).

Tabela 2: Comparação dos métodos de produção adaptado de (Taib et al., 2022).

Processo	Extrusão	Moldação por Injeção	Moldação por Sopro
Tipo de processo	Contínuo	Cíclico	Cíclico
Tipo de produto	Perfil extrudido	Complexo, mas não oco	Oco
Complexidade do design	Baixa	Alta	Média
Mecanismo de conformação	Fluxo viscoso	Fluxo viscoso	Expansão (inflation)
Pressão de conformação	Média	Alta	Baixa
Mecanismo de arrefecimento	Convecção/condução de ambos os lados	Condução de ambos os lados	Condução de um lado
Taxa de arrefecimento	Média	Alta	Baixa
Variação dimensional	Média	Baixa	Alta
Custo da ferramentaria	Baixo	Alto	Médio

2.13.4. Termoformação

A termoformação é um processo utilizado para formar peças que requerem recursos simples, como as embalagens. Nesse processo, o material é aquecido até atingir uma temperatura em que se torna maleável, permitindo que o plástico adquira a forma final desejada. O diagrama do processo de produção de uma peça por termoformação está ilustrado na Figura 9. Inicialmente, as lâmpadas infravermelhas são usadas para aquecer a película do material. Posteriormente, as folhas de material são prensadas em moldes de alumínio onde o produto final será então construído (Jabeen et al., 2015).

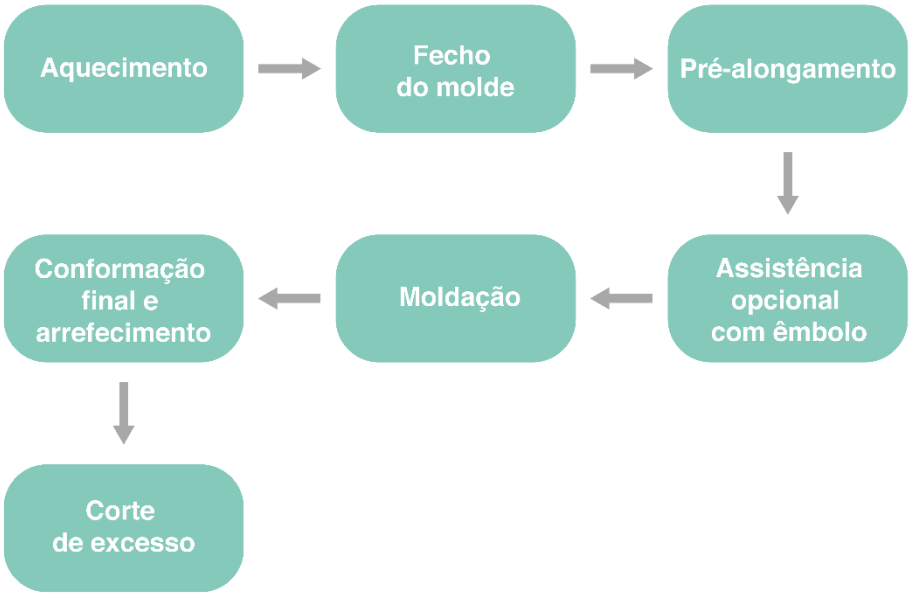


Figura 9: Processo de produção a partir de termoformação adaptado de Taib et al. (2022) (Figura de autor, 2025).

2.14. Vantagens dos Bioplásticos

Ultimamente, os biopolímeros e bioplásticos ganharam destaque na pesquisa e desenvolvimento devido à sua alternativa ecológica aos plásticos convencionais derivados do petróleo. O PLA é um bioplástico amplamente utilizado, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, estruturais, térmicas e físicas. A sua versatilidade nos processos de extrusão, moldação por injeção e termo moldação torna-o uma opção atraente para o fabrico de diversos produtos, incluindo aqueles nas indústrias biomédica, de embalagens e automotiva. À medida que essas indústrias continuam a se expandir, tanto o PLA quanto o mercado de bioplásticos devem crescer. Ao combinar as propriedades técnicas dos materiais com o potencial de negócios, podem ser realizados avanços significativos nas aplicações industriais do PLA, como em embalagens de alimentos biodegradáveis, materiais biocompatíveis para a medicina e peças automotivas leves. No entanto, é essencial destacar que o desenvolvimento de bioplásticos envolve tanto a pesquisa académica quanto a colaboração com a comunidade científica. Assim, o PLA tem sido amplamente utilizado como substituto dos plásticos convencionais, contribuindo para a proteção ambiental por ser biodegradável (Qi et al., 2017).

CAPÍTULO 3
CASOS DE ESTUDO

Capítulo 3. CASOS DE ESTUDO

3. Introdução

Este capítulo é direcionado para a análise dos casos de estudo. O objetivo é compreender as aplicações atuais do material em questão nas áreas de design e engenharia. Essa investigação assim como a avaliação de conceitos e abordagens relacionadas à sustentabilidade e ao eco design.

A investigação iniciou-se com a seleção de projetos que envolvem a reutilização de plásticos, não se limitando apenas ao PLA, mas abrangendo também outros termoplásticos. Com o intuito de orientar de forma mais eficaz o desenvolvimento do produto final, após a análise das propriedades do material, bem como das suas vantagens e desvantagens, é essencial compreender os potenciais campos de aplicação.

A reutilização de plásticos na criação de peças de mobiliário e artefatos têm vindo a ser cada vez mais utilizada, promovendo valores como a economia circular e evidenciando as vantagens da reutilização deste material na conceção de novos produtos, com valor e significado acrescidos (Mikula et al., 2020).

3.1. Eco'r Wood

O projeto Eco'r Wood foi desenvolvido em 2014 por Ana Oliveira no âmbito da Dissertação de grau de Mestre em Design Industrial e de Produto (Oliveira, 2014). Este projeto consiste no reaproveitamento de madeira de qualidade inferior, em parceria com a empresa, Boa Safra de modo a dar uma "segunda vida" a uma peça de mobiliário que seria descartada.

A autora utilizou desperdícios de impressão 3D, mais concretamente PLA, para personalizar uma peça de mobiliário não só reutilizando um bioplástico de um modo criativo e pouco convencional como a valorizar esteticamente os defeitos da madeira promovendo em simultâneo a sustentabilidade, tradição e inovação.

Este projeto demonstra a efetividade de combinar métodos tradicionais e modernos de modo a obter peças de mobiliário tendo em consideração fatores de identidade cultural e ambiental (Oliveira, 2014).



Figura 10: Proposta de etiqueta especificidades do material (Oliveira, 2014).



Figura 11: Produto final (Oliveira, 2014).

3.2. Beach Kids

Beach Kids é um projeto desenvolvido por Camélia Butunoi, no âmbito do projeto We Won't Waste You, como projeto de dissertação (Butunoi, 2019).

Este projeto consiste na criação de brinquedos utilizando resíduos de HDPE recolhidos em Matosinhos, com o intuito de promover a consciencialização sobre sustentabilidade, com o objetivo de demonstrar a viabilidade da introdução de plástico reutilizado no desenvolvimento de produtos apelativos e funcionais.

Na sua dissertação, a autora investiga métodos de produção económicos, acessíveis e sustentáveis, concebidos para viabilizar a fabricação em pequena escala sem depender de mão de obra especializada. Também são apresentadas estratégias de design que visam aprimorar os processos de reciclagem e promover a conscientização sobre a reutilização de plásticos. O trabalho enfatiza os benefícios ambientais, económicos e sociais, alinhando-se às diretrizes europeias para a promoção da economia circular (Butunoi, 2019).



Figura 12: Beach kids e Beach kids formas (Butunoi, 2019).



Figura 13: Teste de usabilidade (Butunoi, 2019).

3.3. Gibada

O produto Gibada desenvolvido por Alexandro Silva, no âmbito da sua dissertação de mestrado (Silva, 2018), baseia-se na criação de um banco sustentável desenvolvido utilizando Polietileno de Alta Densidade (HDPE) reciclado e pernas de madeira de faia sólida.

O intuito deste projeto visa demonstrar a possibilidade de integrar plástico reciclado no design para desenvolver produtos sustentáveis de modo a diminuir o impacto ambiental negativo destes resíduos descartados.

O autor na sua dissertação pretende consciencializar sobre os benefícios da reutilização deste material para a criação de mobiliário resistente, e aumentar a vida útil de produtos de plástico, evidenciando a importância de desenvolver um design ecológico.

O material utilizado para a criação deste protótipo foi fornecido por empresas locais de reciclagem facilitando as etapas de recolha, triagem e processamento.

O banco "Gibada" é uma manifestação concreta dessa filosofia, utilizando materiais reciclados na fabricação de móveis visualmente atraentes e resistentes, que agradam aos consumidores conscientes sobre a preservação ambiental (Silva, 2018).



Figura 14: Resultado (Silva, 2018).

3.4. Smashing Plastic

A Smashing Plastic é uma organização criada em 2020, fruto da união de experiência no setor de impressão 3D e da participação na grande comunidade Precious Plastic (Smashing Plastic. (n.d.)).

O seu objetivo é mudar a perceção das pessoas sobre o plástico, um material muitas vezes alvo de críticas.

From Waste to Resource

Foram desenvolvidas pelos designers Andrea e Tommaso, mesas e candeeiros de polímeros reciclados. Estes produtos não só simbolizam a renovação e esperança como a transformação de plástico, antes de ser descartado, e um compromisso com a sustentabilidade (Smashing Plastic. (n.d.)).



Figura 15: Mesa montável (Smashing Plastic. (n.d.)).



Figura 16: Candeeiro (Smashing Plastic. (n.d.)).

3.5. Sea Chair by Studio Swine

O Studio Swine em colaboração com Kieren Jones desenvolveu uma cadeira concebida através de plástico recolhido nas praias e nas redes de pesca.

A sua fabricação consiste no corte do material em pedaços pequenos e na sua fusão a 130 °C em fornos domésticos (Dezeen, 2013).

A parte do assento é fabricada através da pressão do material entre placas metálicas planas ou pedras e as pernas através de um molde de alumínio.

Após estes processos são efetuados os furos para posteriormente ser aparafusado.



Figura 17: Sea Chair (Dezeen, 2013).



Figura 18: Resíduos recolhidos (Dezeen, 2013).

3.6. Conclusões

Os diferentes projetos – Eco'r Wood, Beach Kids, Gibada, Smashing Plastic e Sea Chair –, mencionados neste capítulo, são exemplos atuais de práticas sustentáveis e abordagens de eco design, ilustrando como é possível a reutilização de materiais

plásticos (incluindo PLA e HDPE), de forma criativa e funcional, em setores como o Design e a Engenharia.

Cada iniciativa demonstrou não apenas a viabilidade técnica e estética da reutilização de plásticos, mas também o seu potencial em agregar valor simbólico e ambiental aos produtos. Seja no mobiliário, em brinquedos ou objetos decorativos, a reutilização de resíduos plásticos contribui para a promoção da economia circular, redução do impacto ambiental e fortalecimento da consciência ecológica. Esses projetos revelam o papel crucial do design como agente transformador, capaz de integrar inovação, sustentabilidade e responsabilidade social no desenvolvimento de novos produtos.

CAPÍTULO 4
DESENVOLVIMENTO EXPRIMENTAL

Capítulo 4. DESENVOLVMENTO EXPRIMENTAL

4.1. Material

Para efeitos de pesquisa e recolha de informação sobre desperdício de PLA gerado por impressão 3D, a partir de erros de impressão ou suportes, foram contactadas 3 empresas de zonas distintas do país (Porto, Lisboa e Évora).

Nos contactos efetuados foram feitas as mesmas perguntas a todas as empresas:

1) Qual o peso (kg) mensal utilizado de PLA, numa média anual?

2) Em comparação com o valor utilizado, qual a percentagem concreta ou estimada de desperdício gerado em impressão 3D?

Às perguntas mencionadas, a empresa 3DPLX, localizada em Lisboa, refere que "São utilizados, em média, entre 60 e 70 kg mensais de PLA, de onde cerca de 5% desse peso total acaba por ser desperdício de material." A empresa Invicta 3D, no Porto, menciona que "O peso médio mensal de PLA utilizado são cerca de 300kg, de onde 1% a 2% são desperdício, sendo que existe um cuidado acrescido no planeamento e na modelagem 3D para reduzir ao máximo a necessidade de existência de suportes nas peças". Já a empresa 3D Factory, localizada em Évora, que apresenta um volume de trabalho mais reduzido em comparação com as duas anteriores, afirma que "São utilizados, em média, cerca de 10kg mensais de PLA, dos quais cerca de 2,5% são desperdício".

O material utilizado para o desenvolvimento deste projeto teve duas origens. A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto disponibilizou aproximadamente 10 kg de desperdícios provenientes de processos de impressão realizados (Figura 19 (a)), o restante material, cerca de 6 kg, foi fornecido pela empresa 3D Maker (Figura 19 (b)).



Figura 19: (a) Material recolhido na FEUP, (b) Material fornecido pela 3D Maker (Figura de autor).

A Faculdade de Engenharia forneceu maioritariamente filamentos de dois fornecedores, Filament PM (Plasty Mladeč) e PolyTerra, registando-se a presença, ainda que em pouca percentagem, de filamento proveniente da FormFutura. Por sua vez, a empresa 3D Maker disponibilizou filamento oriundo do Bambu Lab Filament.

Adicionalmente, importa salientar que o material foi processado tal como recolhido, impressões incompletas ou defeituosas e suportes, não tendo sido sujeito ao processo de trituração com o objetivo de minimizar perdas e, consequentemente, maximizar a quantidade de material reaproveitado.

As propriedades mecânicas dos materiais procedentes dos diferentes fornecedores foram comparadas na Tabela 3 e as físicas na Tabela 4, de modo a determinar o intervalo de valores que definem o desempenho esperado do material. Esta análise permitiu avaliar, durante o processo de reaproveitamento, se o material apresenta perdas, mantém as características iniciais ou se este permanece dentro do intervalo de referência do material comercializado, uma vez que, durante o processo de reciclagem para fabricação de novo filamento, o material tente a perder propriedades cada vez que é reprocessado.

Tabela 3: Comparação das propriedades mecânicas dos diferentes fornecedores (Tabela de autor).

Propriedades	Método	Filament PM	PolyTerra	FormFutura	Bambu Lab	Intervalo
Módulo de Young (X-Y) (MPa)	ISO 527, GB/T 1040	-	1882 ± 141	2971	2580 ± 220	1741 - 2971
Módulo de Young (Z) (MPa)		-	1869.7± 38	-	2060 ± 170	1831.7-2230
Resistência à tracção (X-Y) (MPa)		-	20.9 ± 2.0	68	35 ± 4	18.9-68
Resistência à tração (Z) (MPa)		-	18.0 ± 0.3	-	31 ± 3	17.7-34
Alongamento na rotura (X-Y) (%)		-	34.5 ± 8.1	52	12.2 ± 1.8	10.4-52
Alongamento na rotura (Z) (%)		-	2.51 ± 0.83	-	7.5 ± 1.3	1.68-8.8
Módulo de flexão (X-Y) (MPa)	ISO 178, GB/T 9341	3500	2695 ± 541	-	2750 ± 160	2154-3500
Módulo de flexão (Z) (MPa)		-	-	-	2370 ± 150	2220-2520
Resistência à flexão (X-Y) (MPa)		-	39.6 ± 1.1	192	76 ± 5	38.5-192
Resistência à flexão (Z) (MPa)		-	-	-	59 ± 6	53-65
Resistência ao impacto (X-Y) (kJ/m^2)	ISO 179, GB/T 1043	64.5	5.7 ± 0.4	30	26.6 ± 2.8; 7.9 ± 1.2 (entalhe)	5.3-64.5
Resistência ao impacto (Z) (kJ/m^2)		-	-	-	13.8 ± 0.9	12.9-14.7
Dureza (Shore D)	Shore D	78.3	-	-	-	78.3

Tabela 4: Comparação das propriedades físicas dos diferentes fornecedores (Tabela de autor).

Propriedades	Método	Filament PM	PolyTerra	FormFutura	Bambu Lab	Intervalo
Massa específica (g/cm^3)	ISO 1183, GB/T1033	1.24	1.31±0.02	1.27	1.24	1.24-1.33
Índice de fusão (g/10 min)	210 °C, 2.16 kg	6	14-20	2.13	23.2 ± 3.5	6-26.7

4.2 Processos de fabricação

Ao longo do desenvolvimento do projeto, foi necessária a utilização de diversos equipamentos disponíveis na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Estes serão, se seguida, descritas, indicando-se a etapa do processo em que cada um foi utilizada.

Para a execução do processo e a realização dos testes de viabilidade do método adotado, recorreu-se a um forno elétrico com prensa (M. J. Amaral, Equipamentos Industriais, Vale de Cambra, Portugal), representado na Figura 20. Este equipamento permitiu amolecer e, em seguida, prensar o material, inicialmente na forma de placas circulares e, posteriormente, em molduras quadradas de modo a obter placas 20cm por 20cm.

O processo utilizado para a reutilização do PLA foi a moldagem por compressão, em que o aquecimento torna o material maleável e a pressão permite a sua compactação. A temperatura aplicada neste processo variou entre 200 °C e 250 °C, mantendo-se uma pressão contante sobre uma área de 300x300 mm^2.



Figura 20: Forno elétrico (Figura de autor).

Para monitorizar e determinar a temperatura real do material no interior do forno, foi utilizado um multímetro UT58 Series UNI-T (Figura 21(a)), juntamente com um termopar tipo K (Figura 21 (b)). Para a sua utilização, a extremidade metálica do termopar foi colocada em contacto direto com o PLA, mantendo o forno fechado, enquanto o conector oposto foi ligado ao multímetro, permitindo assim a leitura da temperatura instantânea real do material.

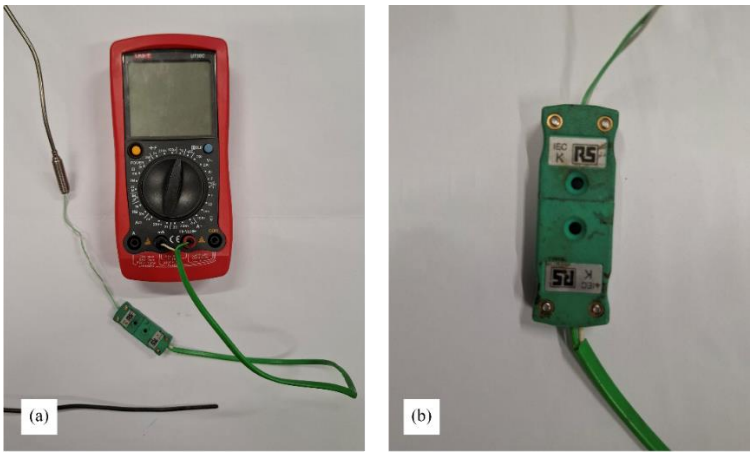


Figura 21: (a) Multímetro UT58 Series UNI-T, (b) Termopar tipo K (Figura de autor).

A caracterização da dureza do material foi realizada com recurso a um durómetro Shore D analógico, modelo Sauter HBD 100-0 (Figura 22), utilizado especificamente para determinar a dureza de polímeros. A medição inicia-se com a colocação do ponteiro vermelho na posição zero, em seguida, o durómetro é pressionado verticalmente, mantendo a pequena agulha, em contacto com material até que não seja possível exercer mais força. Este processo leva a que o ponteiro vermelho desloque o ponteiro preto e, desta forma, seja possível obter um valor em cada medição. Cada amostra é submetida a este processo entre 5 e 10 vezes, e posteriormente é calculada a média dos valores obtidos, determinando assim, a dureza do material.



Figura 22: Durómetro Shore D analógico, modelo Sauter HBD 100-0 (Figura de autor).

A determinação da massa especifica do material foi realizada com recurso a uma balança analítica de precisão Mettler Toledo H31Ar (Figura 23), com a capacidade máxima de 160 g e precisão de 0,1 mg, seguindo os procedimentos definidos na

norma ISO 1183-1, referente aos métodos de determinação da densidade de plásticos.



Figura 23: Balança analítica de precisão Mettler Toledo H31Ar (Figura de autor).

Para a realização das medições, é necessário envolver as amostras com um fio de náilon, utilizado posteriormente para as suspender, e um recipiente com água. O processo inicia-se com a calibração do equipamento em função do peso da amostra e, em seguida, são realizadas quatro medições por amostra. Inicialmente, pesa-se a amostra seca juntamente com o fio (Figura 24 (a)), em seguida a amostra imersa no recipiente, suspensa pelo fio que é colocado no gancho que se encontra no interior da balança (Figura 24 (b)), depois, a amostra parcialmente seca, mantendo o fio e (Figura 24 (c)), por último, apenas o fio (Figura 24 (d)). Anterior a cada etapa de pesagem a balança foi desligada e ligada novamente, recorrendo-se à roda lateral para ajustar e obter o valor correto. Após as medições é calculada a massa especifica utilizando o princípio de Arquimedes.

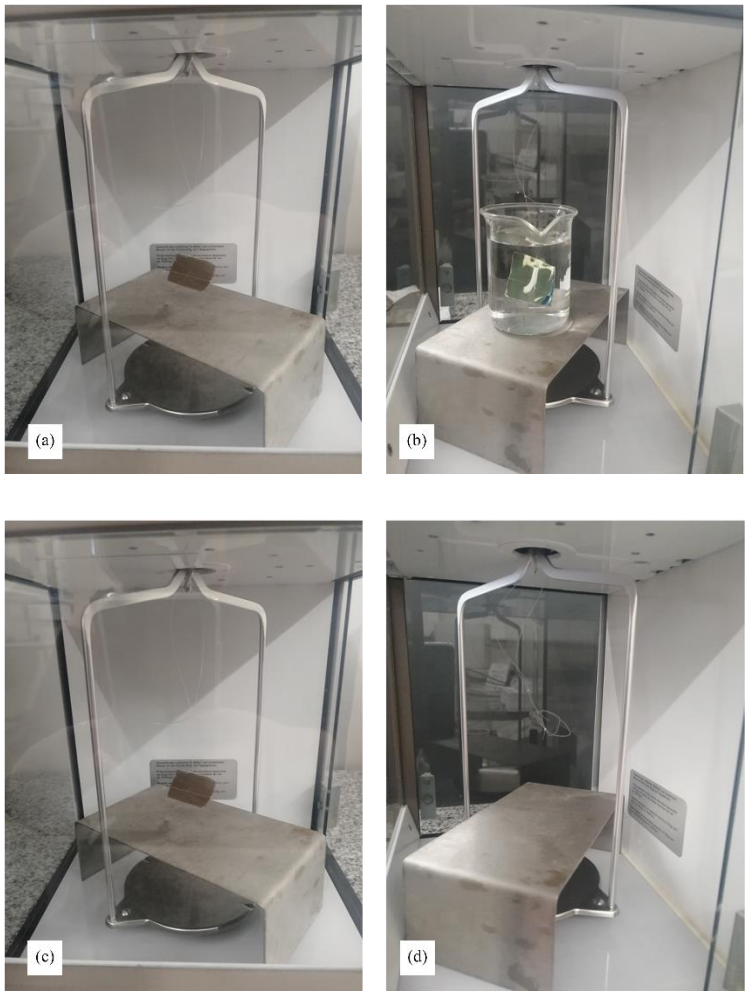


Figura 24: (a) Amostra seca mais fio, (b) Amostra imersa, (c) amostra parcialmente seca mais fio, (d) Fio (Figura de autor).

Para a determinação das espessuras, quer dos provetes preparados para os ensaios de tração, quer das placas analisadas em termos de uniformidade, recorreu-se a um paquímetro Mitutoyo™ (±0.05 mm de resolução).

Na preparação dos provetes para os ensaios de tração foram utilizadas duas máquinas distintas. As placas, obtidas através do amolecimento, mistura e prensagem do material, que foram utilizadas para os provetes, apresentavam cerca de 20cm de diâmetro e um peso entre 150 g e 200 g. Numa primeira etapa, estas foram divididas em tiras menores, com recurso a uma Serra de fita da Metalurgica Ideal das Fontainhas, Portugal (Figura 25 (a)). Posteriormente, procedeu-se ao recorte dos provetes numa Fresadora CNC HEIDENHAIN (Figura 25 (b)). Estes processos foram executados pelos técnicos responsáveis das oficinas de mecânica da FEUP.

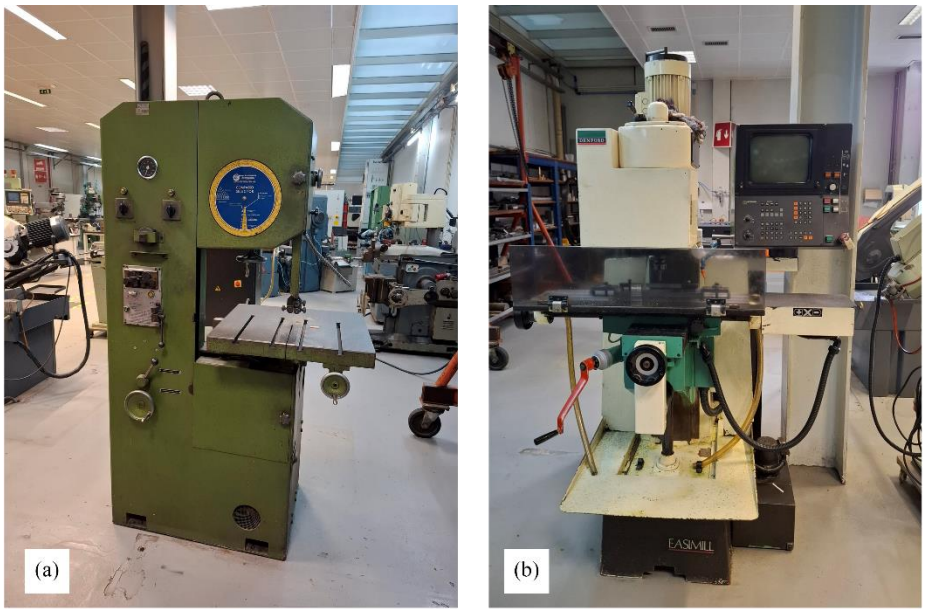


Figura 25: (a) Serra de fita da Metalurgica (b) Fresadora CNC HEIDENHAIN (Figura de autor).

Os ensaios de tração forma realizados com recurso a um transdutor de força (MTS) (Figura 26 (a)), e um extensómetro axial L0=50 mm, (MTS 634.25F-24), (Figura 26 (b)), integrados numa máquina servo-hidráulica de 250 kN (MTS 312.31, equipada com uma célula de carga de 10 kN (MTS 661.19F 02). No total, foram testados nove provetes, tendo sido os ensaios conduzidos a uma velocidade de 5mm/min. Os resultados foram analisados para calcular a média e o desvio padrão.

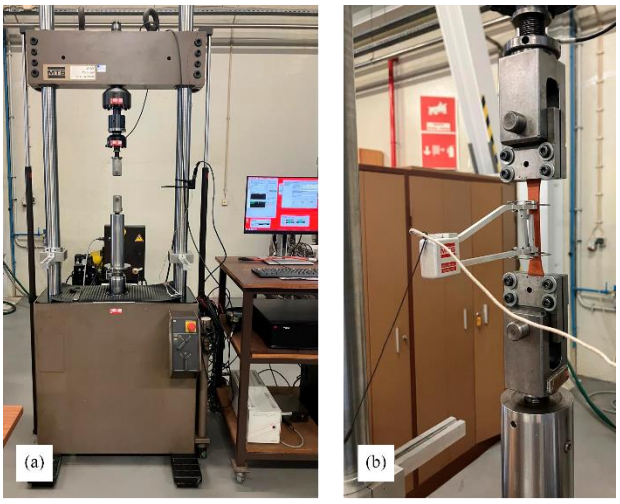


Figura 26: (a) Transdutor de força, (b) Extensómetro axial (Figura de autor).

Para a execução das reentrâncias nas placas quadradas de PLA, com dimensões de 20cm por 20cm, recorreu-se a uma fresadora CNC Haas Série VF-2 (Figura 27), a partir de um desenho técnico previamente definido. O procedimento foi

executado pelos técnicos das oficinas de mecânica da FEUP, tendo sido inicialmente realizado numa placa de teste e posteriormente repetido em nove placas adicionais.



Figura 27: Fresadora CNC (Figura de autor).

Na construção das molduras metálicas de compactação, tanto ao longo do processo como na produção da moldura metálica de compactação final, recorreu-se a diversas ferramentas. Para o corte das placas utilizadas no interior da moldura, como da moldura e do perfil redondo destinado à execução das nervuras de uma delas, foi necessária a utilização de uma rebarbadora angular sem fios INGCO 20V MAX, equipada cum disco de corte inox 115 mm Einhell (Figura 28 (a)), assim como uma serra de corte para ferro 2300 W com ângulo de corte ajustável (0-45º), da marca VITO, equipada com um disco de corte de 355 mm (Figura 28 (b)).



Figura 28: (a) Rebarbadora angular, (b) Serra de corte (Figura de autor).

Para a soldadura das molduras recorreu-se a uma máquina de soldadura MIG inverter monofásica de 230 V, modelo Monomig 176, da marca Helvi, conectada a uma botija de gás comprimido N.E.P. Para curvar o perfil redondo referido anteriormente, utilizou-se uma mola curva tubos INTERIOR 10 mm por 900 mm, da marca DEXTER (Figura 29).



Figura 29: Mola curva tubos (Figura de autor).

4.3. Experiências de amolecimento

4.3.1. Descrição experimental

O PLA, por se tratar de um polímero termoplástico, permite a alteração da sua forma através da temperatura, podendo ser aquecido, moldado e posteriormente arrefecido, mantendo assim a conformação desejada. Durante esta etapa da dissertação, realizaram-se diversas experiências com o objetivo de avaliar o comportamento do material e a viabilidade de o reutilizar utilizando este método.

Após a recolha do material na FEUP e do fornecido pela 3D Maker, este foi, contrariamente ao processo habitual de reciclagem abordado anteriormente, diretamente amolecido, realizando-se apenas uma pequena seleção de cores de modo a obter maior homogeneidade possível dentro das limitações impostas pela quantidade e variedade de resíduos disponíveis.

Inicialmente, o material foi amolecido no forno com uma temperatura definida de 250 °C, sendo a temperatura real do material era cerca de 130 °C, durante 15

minutos. Devido à sua tendência para aderir a superfícies no ponto de fusão, utilizou-se papel vegetal para impedir que o PLA aderisse às placas metálicas utilizadas na prensagem. Nesta fase, foram testados dois processos de fusão do material, considerando que este não foi previamente triturado.

O primeiro processo consistiu na prensagem do material durante 5 minutos após o amolecimento durante 15 minutos, sem proceder à sua mistura como demonstrado na Figura 30.



Figura 30: Primeiro processo (Figura de autor).

No segundo processo, o material foi amolecido durante 15 minutos, sendo posteriormente misturado manualmente com o auxílio de luvas resistentes ao calor (Heatbeater: 8 - 40). Seguiu-se um novo aquecimento durante 10 minutos, após o qual o material foi prensado durante mais 5 minutos como demonstrado na Figura 31.



Figura 31: Segundo processo (Figura de autor).

Nesta fase inicial, foram testados diferentes tempos de processamento e algumas variações nas etapas. Foram registadas as temperaturas e os tempos utilizados, bem como o processo e foi realizada a pesagem do material antes e após cada ensaio, como se pode consultar na Tabela 5, verificando-se que a perda de material durante estes procedimentos é nula ou muito reduzida.

Tabela 5: Registo temperaturas, tempos e pesos dos primeiros processos (Tabela de autor).

	1º. Processo monocolor		2º. Processo monocolor		1º. Processo multicolor		2º. Processo multicolor	
Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8
Análise de material	+fino	normal	+fino	normal	normal	+fino	normal	+fino
Temp. controlador do forno (Cº)	200	250	180	200	200	250	180	250
Tempo (min)	Amolecer 20 Prensar 8	Amolecer 15 Prensar 5	Amolecer 35 Amassar 5 Amolecer 15 Prensar 8	Amolecer 15 Amassar 5 Amolecer 20 Prensar 5	Amolecer 15 Prensar 5	Amolecer 10 Prensar 8	Amolecer 25 Amassar 5 Amolecer 30 Prensar 5	Amolecer 15 Amassar 5 Amolecer 10 Prensar 7
Peso Inicial (g)	35.2	33.5	47.4	41.2	53.8	51	45.5	46.8
Peso Final (g)	35.1	33.4	47.3	41.1	53.7	50.9	45.2	46.7

Durante estas experiências, foi possível verificar que o segundo processo (Figura 32 (a)), em que após o amolecimento do material este é amassado, representa a forma mais eficaz de reduzir a presença bolhas de ar, em comparação com o primeiro processo (Figura 32 (b)), não sendo possível eliminá-las completamente. Observou-se também uma maior uniformidade do material, sem zonas com menos espessura ao longo das placas, o que permitiu obter uma mistura mais homogénea. Adicionalmente, constatou-se que o tempo de prensagem influencia diretamente a espessura final da placa. A analise das experiências permitiu, assim, compreender melhor os fatores que afetam a qualidade do material.

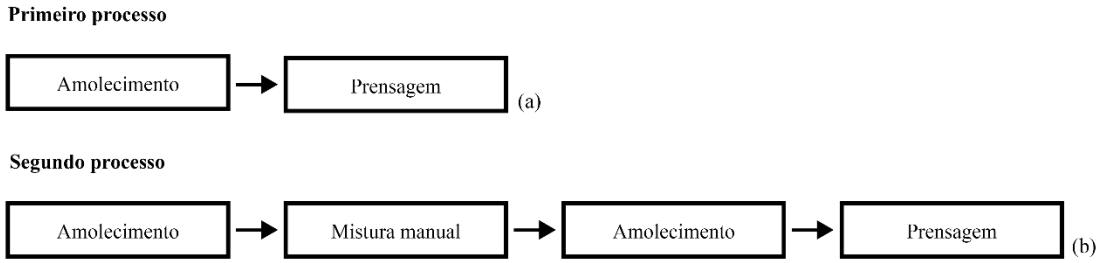


Figura 32: (a) Esquema do primeiro processo, (b) Esquema do segundo processo (Figura de autor).

Para determinar a temperatura real do material no interior do forno, foi utilizado um multímetro em conjunto com um termopar. Esta experiência permitiu verificar que, apesar da temperatura do forno estar regulada para 200 °C, a temperatura real do material, já em estado amolecido, era de aproximadamente 94 °C (Figura 33). Após mais 5 minutos, a temperatura atingiu 123 °C e, decorridos mais 5 minutos, quando material já se encontrava completamente amolecido registou-se um valor de 167 °C. Durante todo este processo não foram observados indícios de degradação do material.



Figura 33: Termopar em contacto com o material (Figura de autor).

Uma vez identificado o processo mais adequado de processamento do material, foram produzidas várias amostras com o objetivo de analisar as possibilidades cromáticas disponíveis, como é possível verificar na Figura 34.

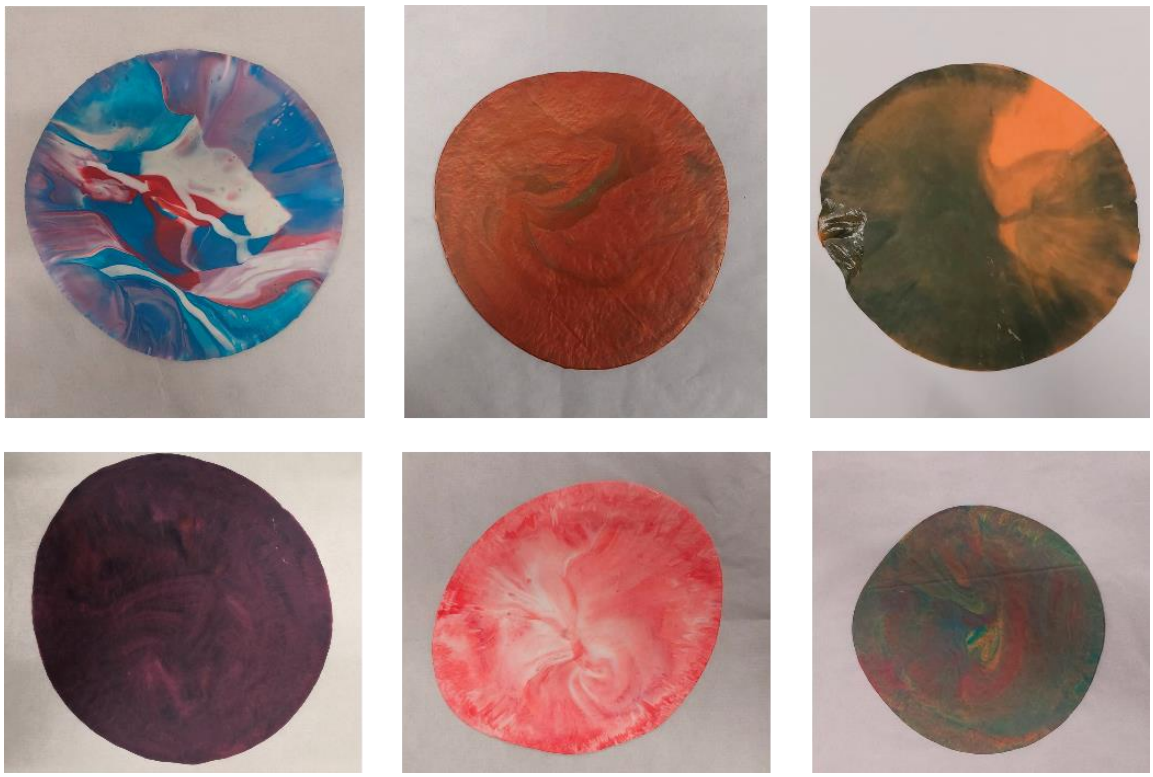


Figura 34: Amostras de diferentes possibilidades de cores (Figura de autor).

Durante o processo experimental verificou-se que, embora seja possível a reutilização deste material através do processo adotado, é difícil garantir uma espessura uniforme, a qual se revelou vaiável ao longo das amostras. Como tentativa de solucionar esta limitação, foram utilizados quatro clipes metálicos com o objetivo de manter a uniformidade da espessura em todas as amostras. Contatou-se que a introdução de uma barreira durante a prensagem, contribui para a redução das variações de espessura (Figura 35 (a)), contudo, para ser eficaz, a barreira teria de ser continua, caso contrário o material apresentaria ainda irregularidades. Nesta experiência, observou-se que os clipes de papel acabaram por ser incorporados no material (Figura 35 (b)).

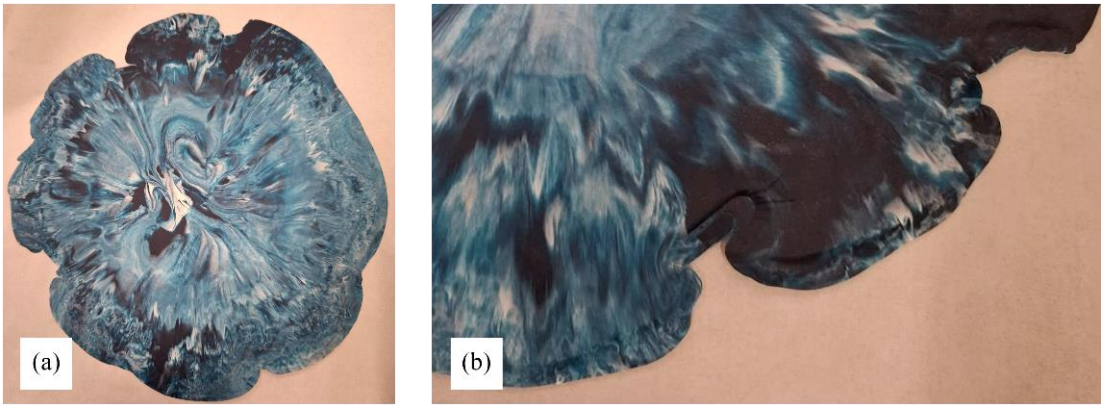


Figura 35: (a) Amostra com mais uniformidade de espessura, (b) Zona onde se encontrava um dos clipes (Figura de autor).

4.3.2 Analise de acabamentos

Numa fase inicial, o material foi prensado entre duas folhas de papel vegetal, o que resultou em placas com superfície fosca após o arrefecimento, perdendo assim o brilho original. Como alternativa, testou-se a utilização de um tapete de silicone com o intuito de preservar o brilho da superfície (Figura 36 (a)). Contudo, verificou-se que o relevo presente no tapete foi transferido para a amostra, originando brilho apenas em algumas zonas (Figura 36 (b)), o que evidenciou não ser esta a abordagem mais adequada.

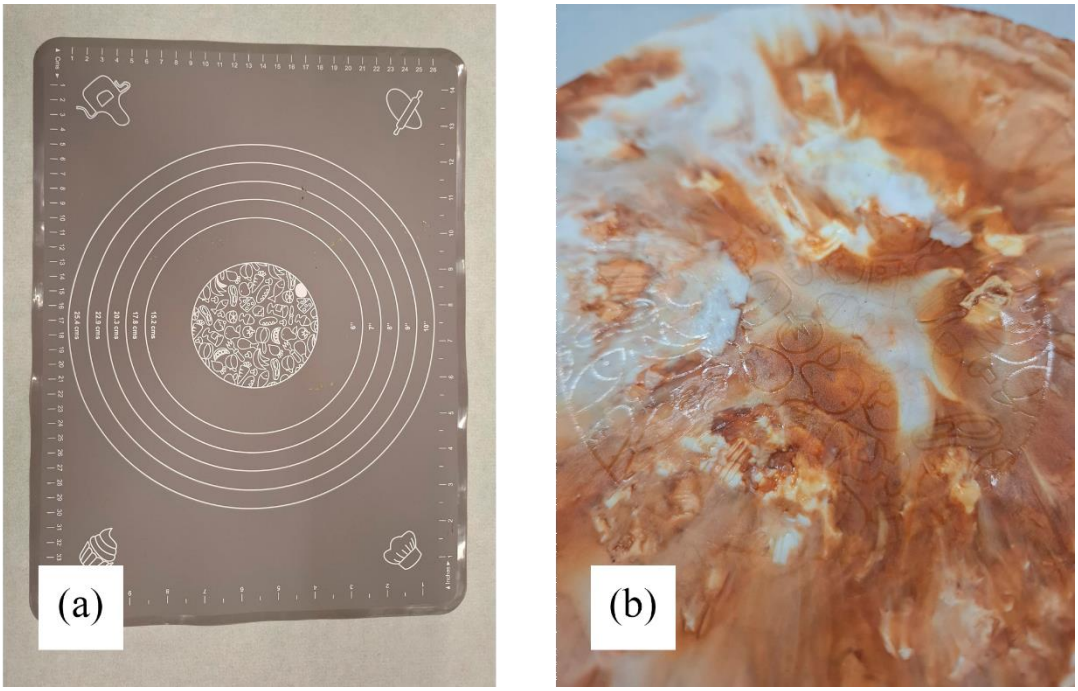


Figura 36: (a) Tapete de silicone, (b) Relevo transferido na amostra (Figura de autor).

Numa segunda fase, foi testado outro tapete de silicone, desta vez com uma superfície totalmente lisa e brilhante (Figura 37 (a)). Esta solução permitiu obter uma placa com um brilho uniforme em toda a sua superfície (Figura 37 (b)), superando as limitações verificadas na abordagem anterior, em que o relevo do tapete interfere no acabamento. Assim demonstrou-se que a escolha adequada do material de contacto durante a prensagem tem um papel determinante na qualidade estética final das placas produzidas.

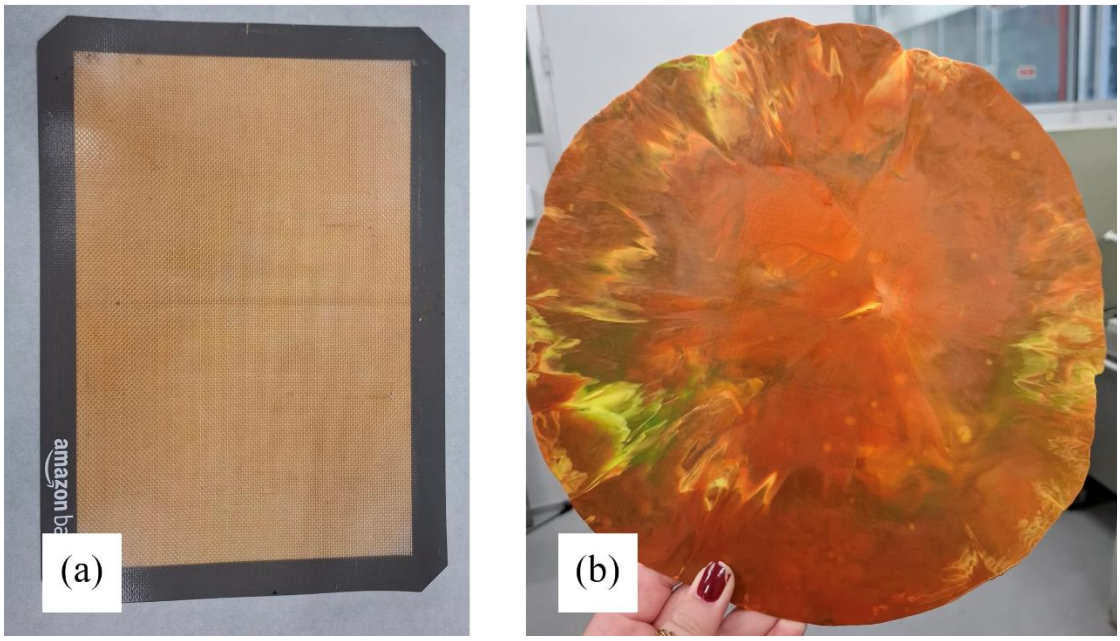


Figura 37: (a) Segundo papete de silicone, (b) Amostra com acabamento brilhante uniforme (Figura de autor).

4.3.3. Experiências com azulejos

Após o processamento de algumas amostras, testou-se a possibilidade de colocar recortes das placas já prensadas e arrefecidas sobre a superfície porosa de um azulejo sem vidrado (Figura 38 (a)). Para a realização deste ensaio, os azulejos foram previamente colocados sobre a placa metálica fria, de modo a evitar a sua fratura devido ao choque térmico. Em seguida, posicionou-se a amostra sobre o azulejo, permitindo que esta amolecesse e assumisse a sua forma (Figura 38 (b)), posteriormente foi colocado o tapete para que a superfície mantivesse o seu brilho e uma placa metálica para que estes fossem levemente prensados.

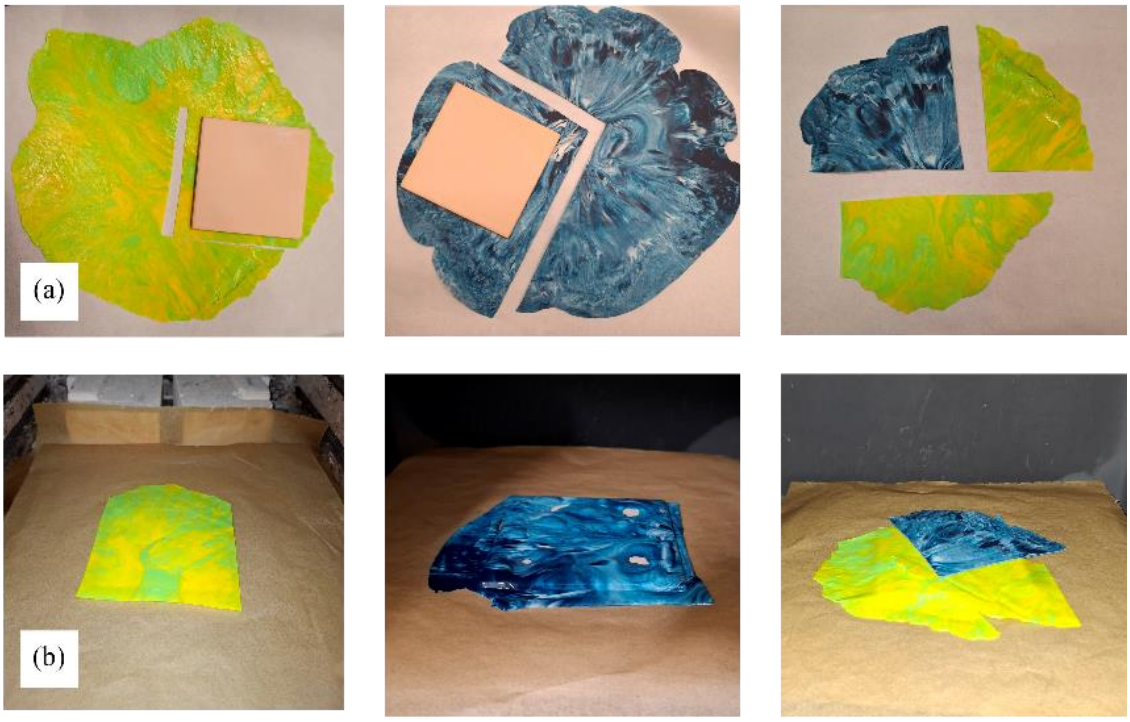


Figura 38:(a) Seleção de recortes, (b) Amostras no processo de amolecimento no forno sobre os azulejos (Figura de autor).

Após analisar os resultados foi possível verificar que o material não aderia permanentemente aos azulejos, podendo ser removido após o arrefecimento. Verificou-se ainda, a formação de grandes bolhas de ar entre o material e a superfície do azulejo o que impediu que o material cobrisse integralmente e uniformemente o mesmo. Assim, ainda que os recortes de placas prensados tenham assumido parcialmente a forma do suporte, este método revelou limitações na obtenção de uma cobertura uniforme como é possível observar na Figura 39.

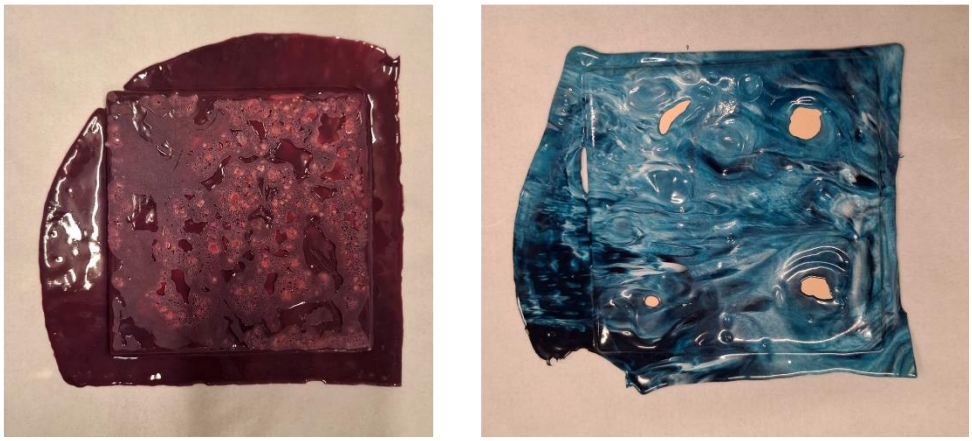


Figura 39: Amostras Após arrefecimento (Figura de autor).

Na Figura 40 é possível observar os resultados após o corte do excesso de material em torno dos azulejos.

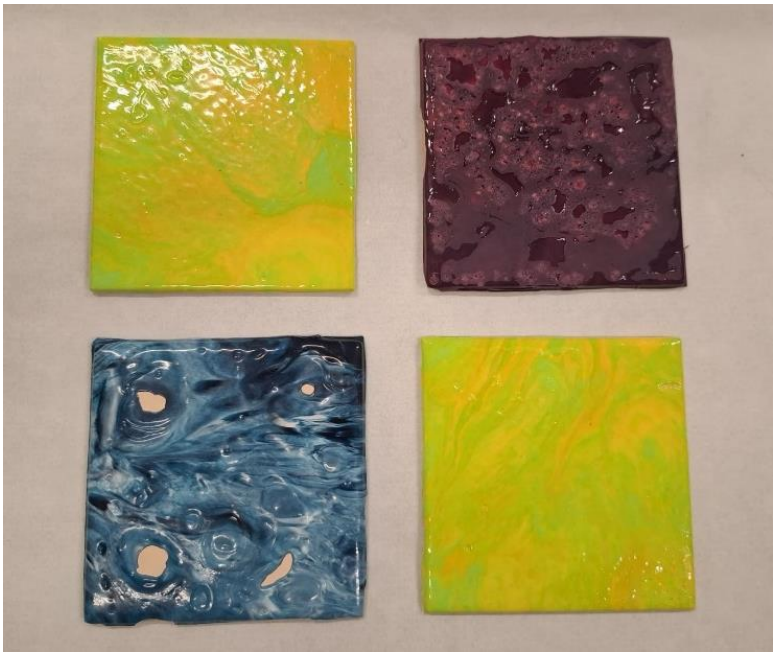


Figura 40: Azulejos após corte de excesso (Figura de autor).

4.3.4. Experiências com compressão

Para permitir a produção de placas com alguma espessura, foi desenvolvido uma moldura metálica de compactação. Esta consiste numa moldura quadrada de 20 cm por 20 cm e altura de 3 cm, desenvolvida a partir de uma tira de aço quinada e posteriormente soldada (Figura 41 (a)), e numa placa quadrada com 2 mm de espessura (Figura 41 (b)), cortada de modo a encaixar na moldura (Figura 41 (c)), sob a qual o material foi prensado. Uma vez que o material não preenchia totalmente a altura da moldura, foram utilizados perfis de aço para permitir a prensagem completa do material (Figura 41 (d)), para que assim a placa entrasse em contacto com a prensa.

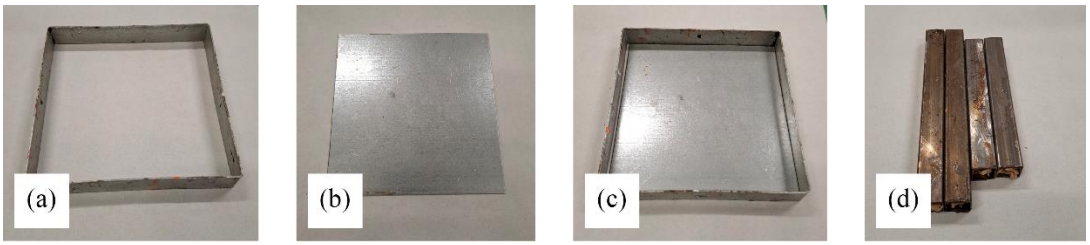


Figura 41: (a) Moldura, (b) Placa para a prensagem, (c) Moldura completa, (D) Perfis de aço (Figura de autor).

Para a utilização desta moldura, seguiu-se o mesmo processo de amolecimento, mistura manual e prensagem anteriormente descrito. Sob a moldura foi colocada uma folha de papel vegetal, enquanto a placa de prensagem foi coberta com spray de silicone, de modo a evitar que o material aderisse á superfície e facilitar assim, a sua desmoldação. É possível observar este processo na Figura 42 que segue a sequência do processo.



Figura 42: Etapas do processo de realização de amostras na moldura (Figura de autor).

A utilização desta moldura permitiu verificar que é possível produzir placas com maior espessura, embora o seu controlo se revele difícil, demonstrando, no entanto, a viabilidade desta técnica como é possível observar na Figura 43, que se refere às placas obtidas.



Figura 43: Amostras resultantes do processo com moldura (Figura de autor).

Após a realização da primeira moldura, procedeu-se à construção de uma segunda, reutilizando a moldura da primeira (Figura 44 (a)), mas desenvolvendo uma placa de

prensagem com relevos (Figura 44 (b)), de modo a avaliar a possibilidade a produção de placas com reentrâncias após o arrefecimento do material. Para a execução desta, recorreu-se novamente a uma placa cortada de 2 mm de espessura, adequada ao encaixe da moldura, mas que incorpora quatro perfis de alumínio redondo, com 16 mm de diâmetro. Estes perfis foram dobrados com recurso a uma mola curva tubos, amassados ligeiramente com um martelo até adquirirem uma forma oval e fixados à placa mediante rebites (Figura 44 (c)). Para garantir uma espessura aproximada de 1,8 cm na placa resultante, utilizaram-se perfis de 1 cm de altura de liga de alumínio (Figura 44 (d)).

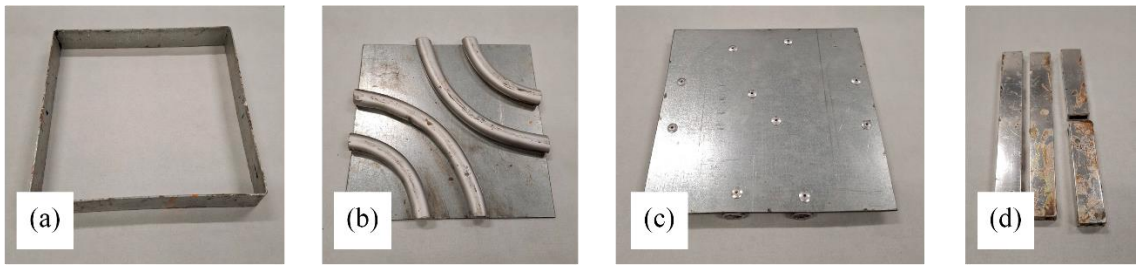


Figura 44: (a) Moldura, (b) Placa para a prensagem com relevos, (c) Moldura completa, (d) Perfis de alumínio (Figura de autor).

Com a utilização desta moldura verificou-se que o material não preenchia uniformemente todas as áreas desta e que, nas zonas correspondentes às nervuras, as placas apresentavam menor espessura que a desejada, tornando-se frágil e quebradiça. Observou-se também que a desmoldação da placa de revelou difícil, devido à geometria das nervuras, como é possível observar na Figura 45.

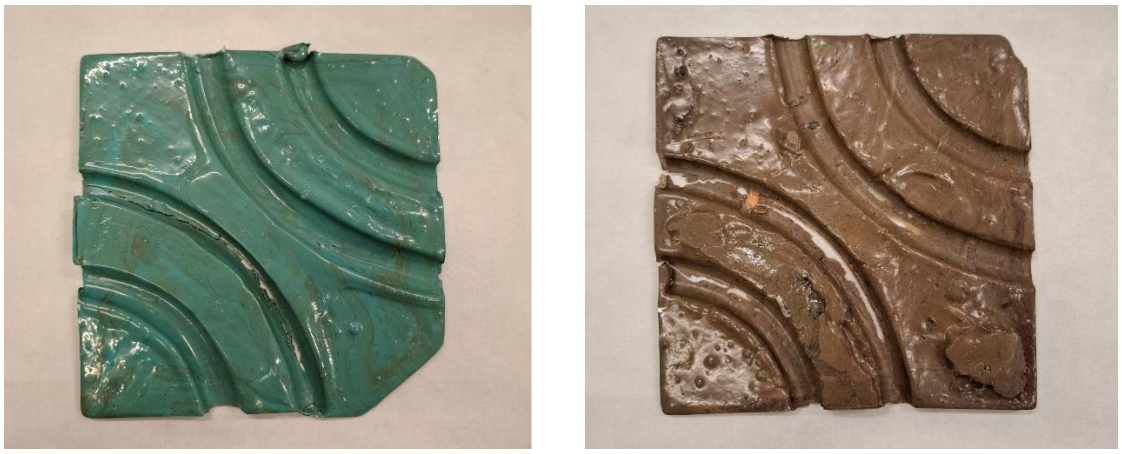


Figura 45: Amostras resultantes do processo em molduras (Figura de autor).

4.3.4. Deformação do material

Durante a utilização da primeira moldura, verificou-se que, quando o material, aproximadamente 600 g, era submetido a um terceiro ciclo completo de processamento – amolecimento, mistura manual, amolecimento e prensagem – apresentava maior fragilidade, tornando-se mais suscetível à rutura como é possível verificar na Figura 46.

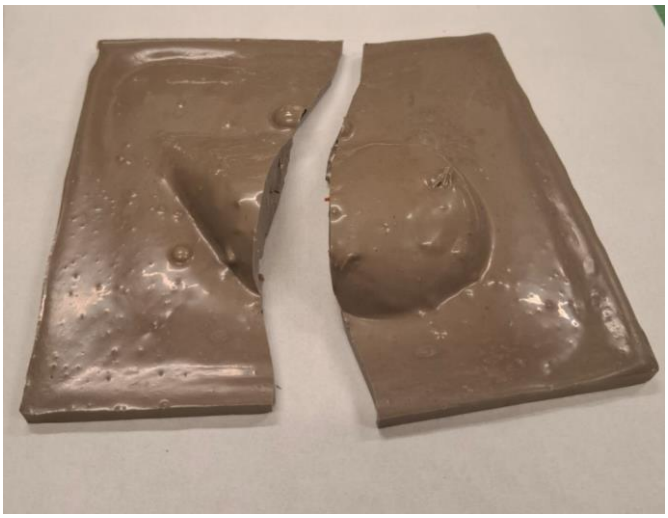


Figura 46: Material após três ciclos de processamento (Figura de autor).

4.4. Caracterização do material

4.4.1. Densidade

Ao longo do processo de investigação, procedeu-se a medições de massa especifica e dureza, com o objetivo de comparar as propriedades do material processado com as dos desperdícios fornecidos, provenientes de diferentes fornecedores. Deste modo, é possível avaliar a viabilidade do método de processamento adotado. Com esse propósito, recorreu-se a diversos equipamentos disponíveis na FEUP.

Para determinar a massa específica, foram utilizadas pequenas amostras quadradas, com aproximadamente 25 mm por 25 mm (Figura 47), retiradas de placas previamente produzidas. Os valores foram obtidos através da pesagem das amostras na balança Mettler Toledo H31Ar analítica de precisão, anteriormente referida.

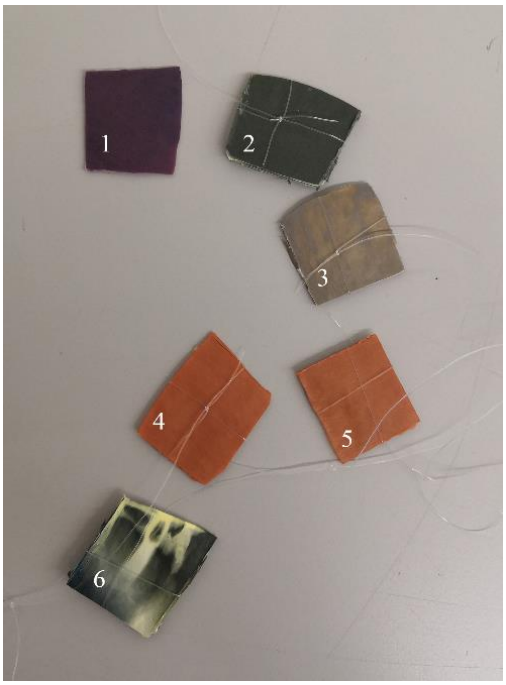


Figura 47: Amostras utilizadas para determinar a densidade e dureza (Figura de autor).

A densidade da amostra, $\rho_{amostra}$, é determinada através da Equação 1, com base no princípio de Arquimedes (Ferreira, 2014), segundo o qual um corpo imerso num fluido sofre um impulso igual ao peso do volume de fluido deslocado. Na fórmula (1), PS é o peso da amostra seca mais o fio (Figura 24 (a)), PF é o peso do fio (Figura 24 (d)), PM é o peso da amostra molhada mais o fio (Figura 24 (c)), PI é o peso da amostra imersa mais o fio (Figura 24 (b)) e, $\rho_{água}$ é a densidade da água (0,9982 g/cm^3) à temperatura em que se encontrava no momento dos testes (20 °C).

$$\rho_{amostra} = \frac{PS-PF}{PM-PI} \times \rho_{água} \quad (1)$$

Tabela 6: Resultados obtidos para cada uma das 6 amostras estudadas (Tabela de autor).

Número da amostra	PS (g)	PI (g)	PM (g)	PF (g)	Massa e específica (g/cm^3)	Densidade média (g/cm^3)
1	0.7529	0.1637	0.7555	0.0318	1.22	
2	1.999	0.4371	2.004	0.0333	1.25	
3	1.1881	0.2548	1.1938	0.0347	1.23	1.23
4	0.9231	0.1894	0.9242	0.0341	1.21	
5	0.7848	0.1675	0.7857	0.0324	1.21	
6	1.4502	0.3177	1.4505	0.0355	1.25	

Os dados revelam que o material não apresenta uma diminuição significativa de propriedades físicas após o método de processamento adotado. A massa específica média obtida, 1,23 g/cm^3, desvia-se do intervalo indicado pelos fornecedores (1,24 a 1,33 g/cm^3), relativamente ao material virgem, em 0,01 g/cm^3 (diferença de 0,8 %) devido à porosidade existente nas amostras.

4.4.2. Dureza

Para calcular a dureza das amostras foi utilizado um o durómetro Shore D analógico Sauter HBD 100-0. Foram analisadas seis amostras, seguindo o procedimento previamente descrito, tendo-se obtido um valor médio de 82,7 Shore D (Tabela 7). Os dados obtidos indicam que o material sofreu um aumento da sua dureza, quando comparado ao valor tabelado pelos fornecedores (78,3 Shore D).

Tabela 7: Valores obtidos durante a medição da dureza das amostras (Tabela de autor).

Número da amostra	Dureza (Shore D)	Dureza média (Shore D)
1	83.2	82.7
2	83.4	
3	85	
4	80.2	
5	79.8	
6	84.6	

4.4.3. Ensaios de Tração

Para determinar a resistência à tração do material após o mesmo passar pelo processo anteriormente descrito, foram realizados ensaios de tração. Para estes testes foram utilizados provetes de ensaios, com o desenho técnico representado na Figura 48, segundo a norma ASTM D638-10. Foram realizados 9 ensaios, onde foram analisadas três variações do processo utilizado.

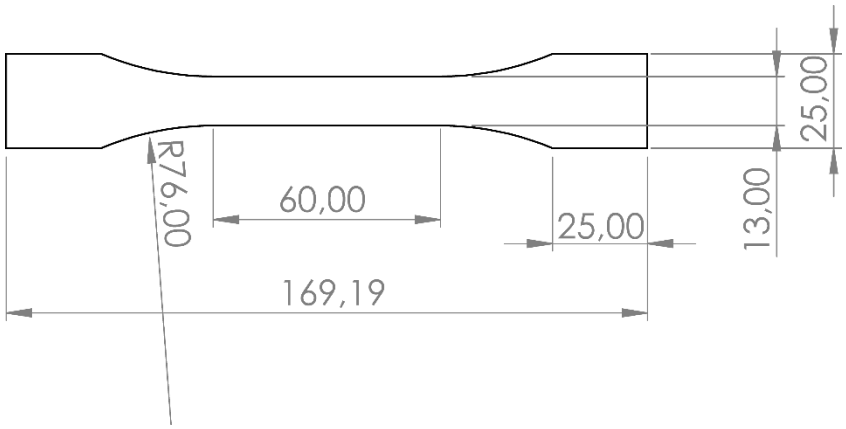


Figura 48: Desenho técnico do provete para realização de ensaios de tração (Figura de autor).

A primeira variação do processo consistiu numa mistura de duas cores do material onde este foi manualmente misturado apenas uma vez (Figura 49 e 50 (a)). A segunda variação do processo envolveu apenas uma cor, onde o material foi manualmente misturado duas vezes (Figura 49 e 50 (b)). A terceira e última variação do processo consistiu numa mistura de três cores do material onde este foi manualmente misturado apenas uma vez (Figura 49 e 50 (c)).

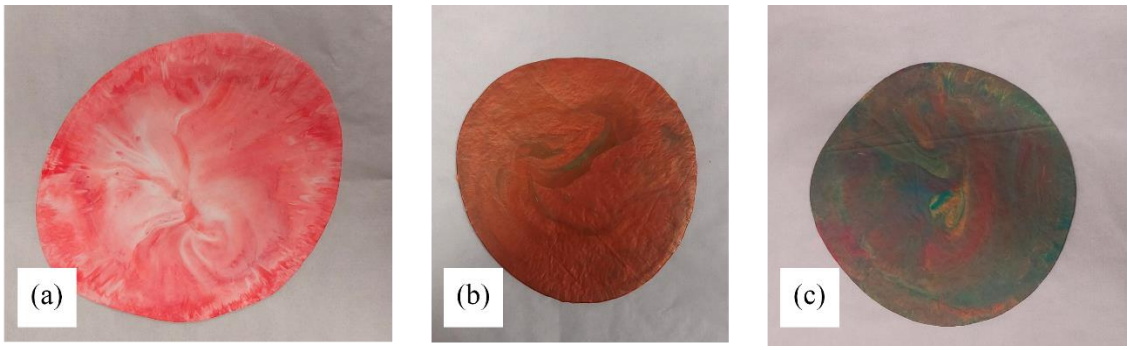


Figura 49: Amostras realizadas para corte de provetes (Figura de autor).

Utilizando um paquímetro Mitutoyo™, foi realizada a medição da largura e da espessura dos provetes (Figura 50). Devido à presença de irregularidades dimensionais foram efetuadas cinco medições de largura e três de espessura em diferentes pontos. Em seguida, foi calculada a área correspondente. As medições estão apresentadas na Tabela 8.

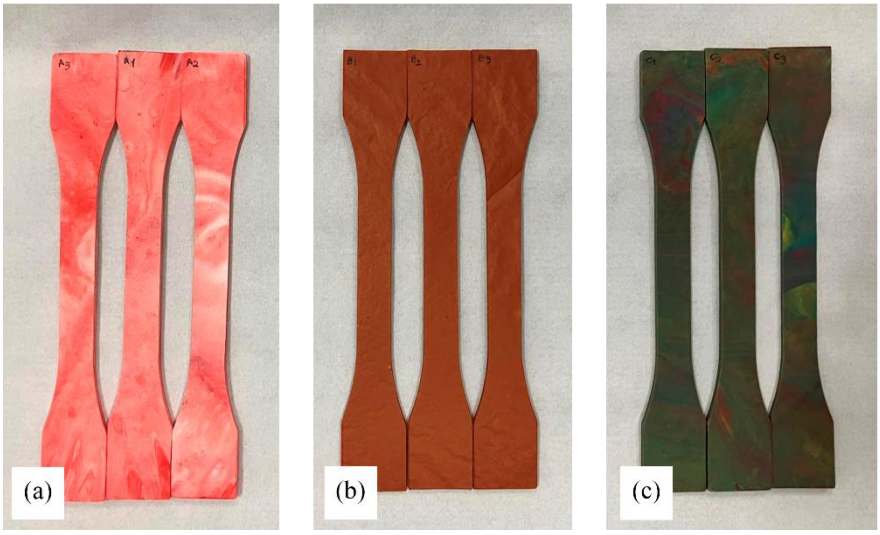


Figura 50: Provetes utilizados nos ensaios de tração (Figura de autor).

Tabela 8: Medições realizadas aos provetes e as suas áreas (Tabela de autor)

Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm2)
A 1	13.23	3.20	44.34
A 2	13.20	2.98	39.34
A 3	13.20	3.20	42.24
B 1	13.20	2.54	33.53
B 2	13.23	2.86	37.84
B 3	13.23	3.08	40.75
C 1	13.26	3.14	41.64
C 2	13.13	3.56	46.74
C 3	13.20	3.94	38.81

Para cada provete foi realizado um ensaio com uma célula de carga de 10 kN (MTS 661.19F 02), com uma velocidade de 5 mm/min. Os ensaios realizados para os provetes A1, A2 e A3 – produzidos com duas cores e misturados manualmente uma vez – apresentaram falhas devido à baixa homogeneidade do material, que resultou em defeitos internos. Como consequência, ocorreram ruturas fora da zona do extensómetro (Figura 51 (a)), durante os ensaios. Os restantes seis provetes das amostras B e C, apresentaram rutura dentro da zona do extensómetro (Figura 51 (b) e (c)).

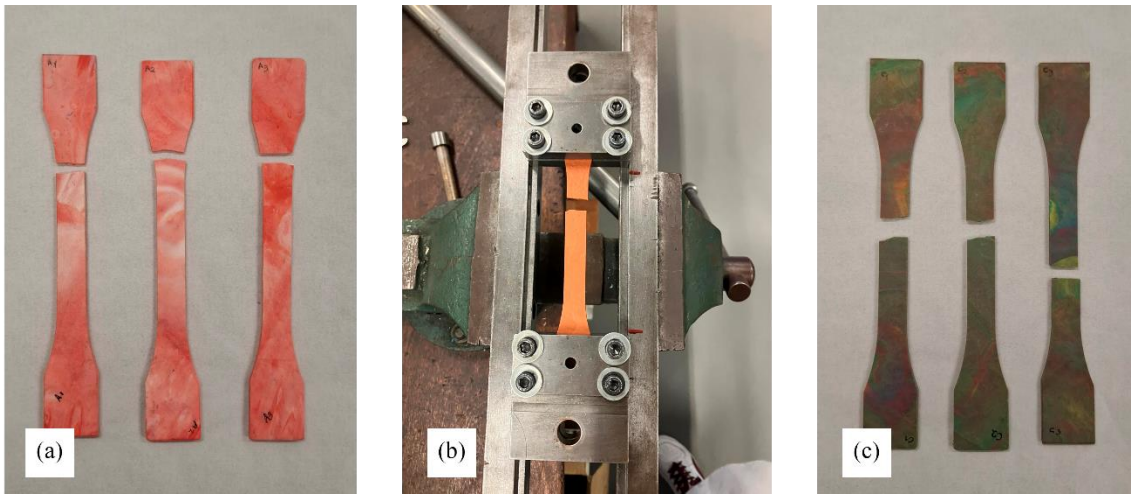


Figura 51: Provetes após ensaios de tração (Figura de autor).

Os gráficos seguintes apresentam a tensão de rutura de cada provete, obtida por meio da aplicação de uma deformação (*Strain*), através de uma força de tração, até a falha completa do material durante os ensaios.

A tensão de rutura (MPa), σ, foi calculada através da Equação 2, onde F é a força aplicada (N) e A é a área do provete (mm2).

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2}$$

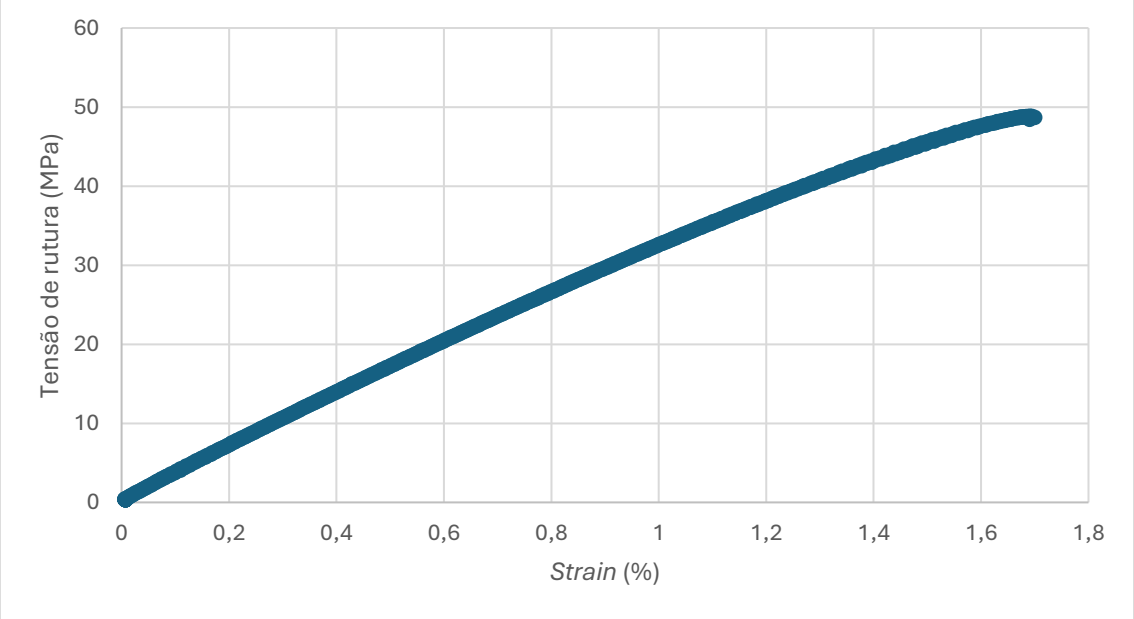


Figura 52: Diagrama tensão de rotura-deformação provete A1 (Figura de autor).

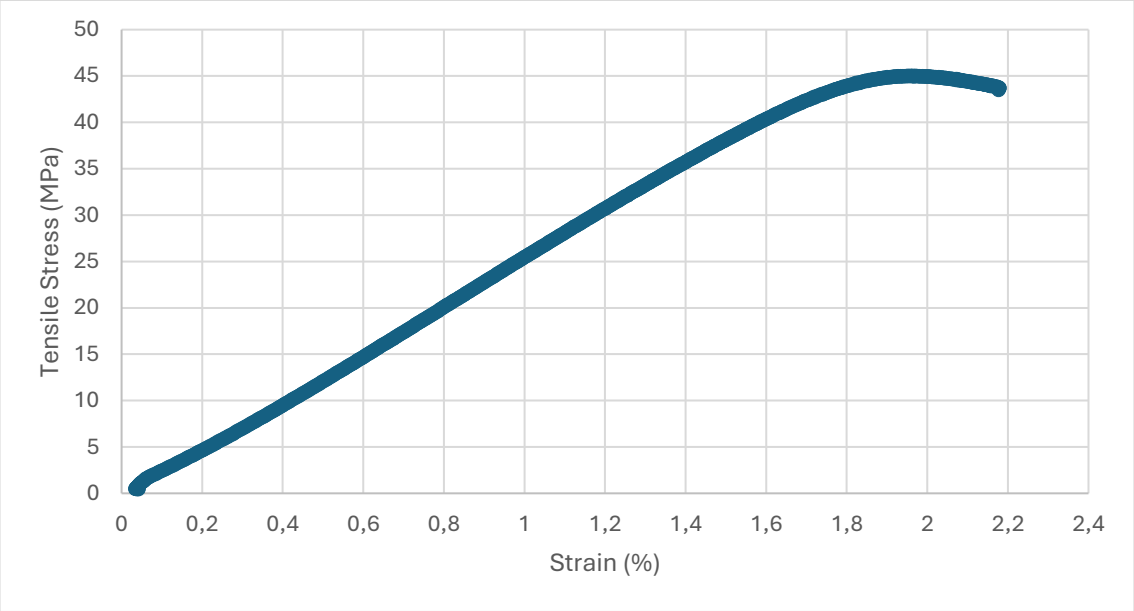


Figura 53: Diagrama tensão de rotura-deformação provete A2 (Figura de autor).

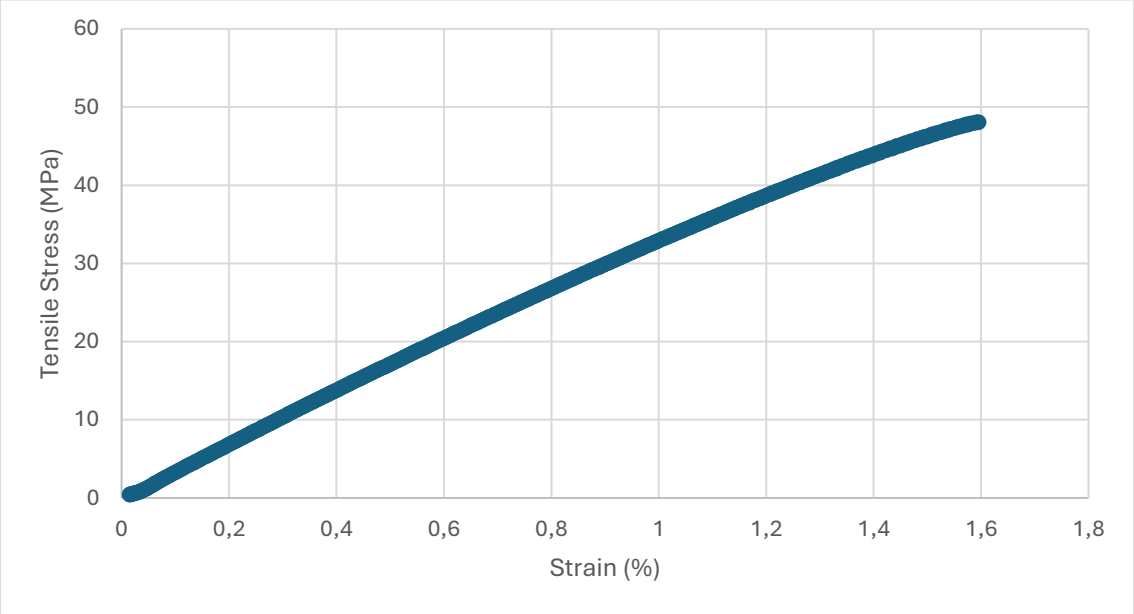


Figura 54: Diagrama tensão de rotura-deformação provete A3 (Figura de autor).

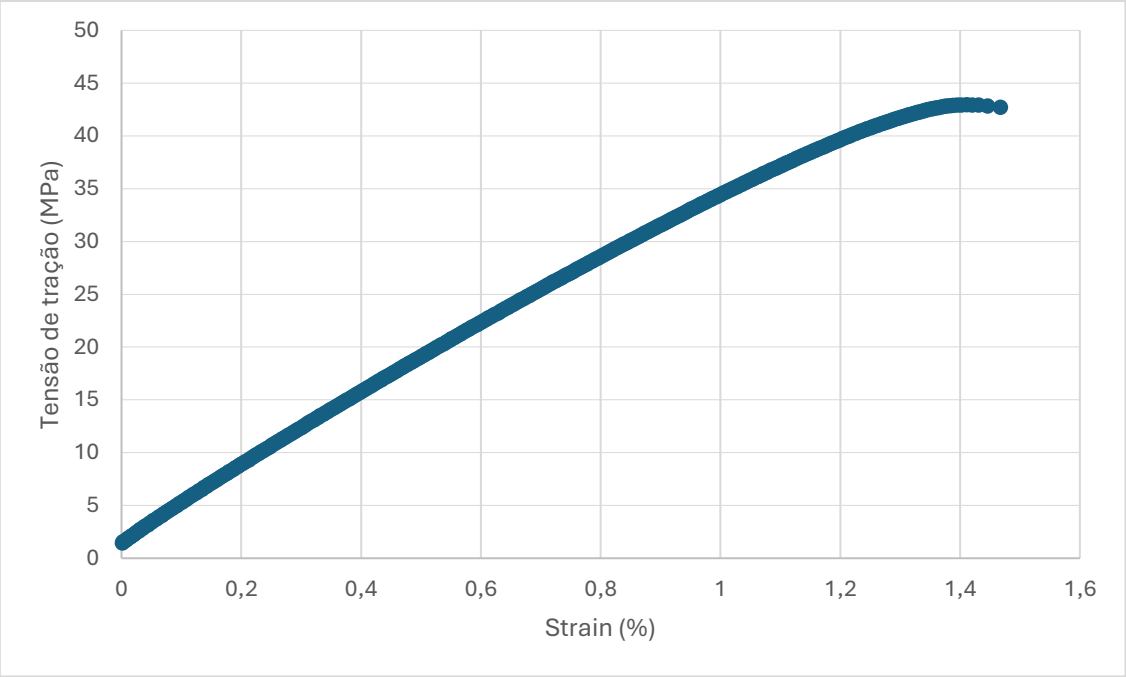


Figura 55: Diagrama tensão de rotura-deformação provete B1 (Figura de autor).

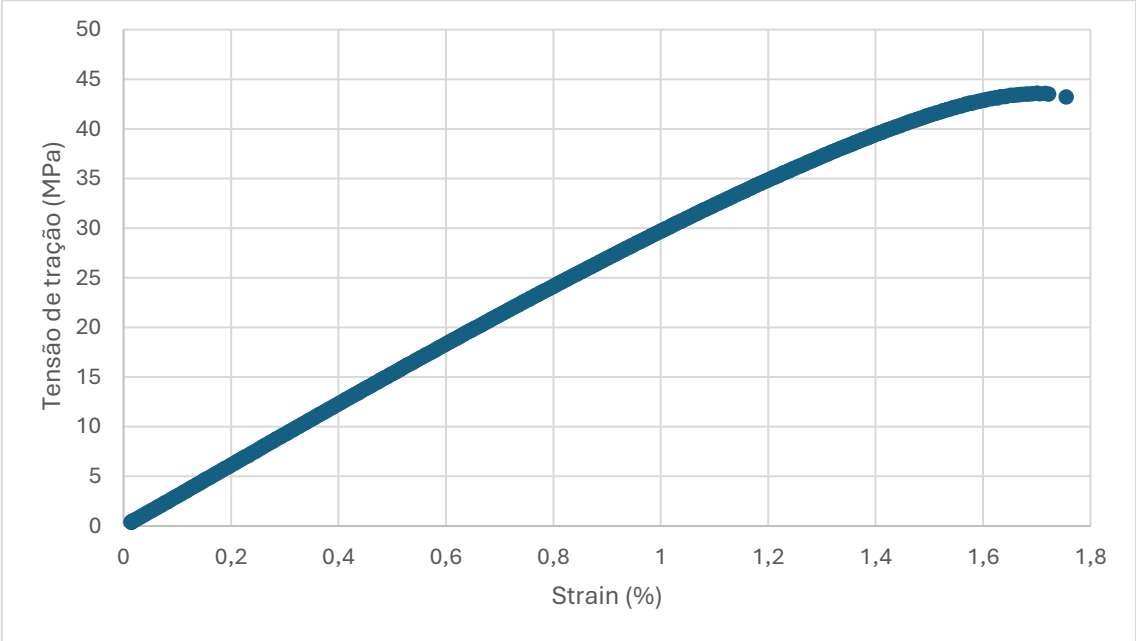


Figura 56: Diagrama tensão de rotura-deformação provete B2 (Figura de autor).

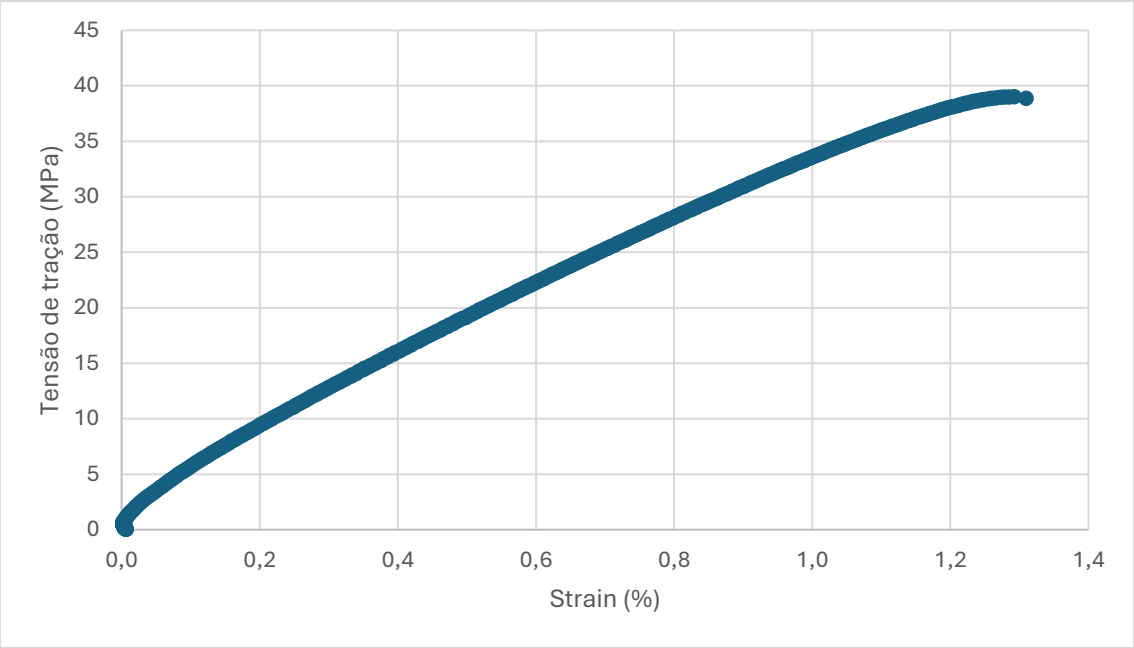


Figura 57: Diagrama tensão de rotura-deformação provete B3 (Figura de autor).

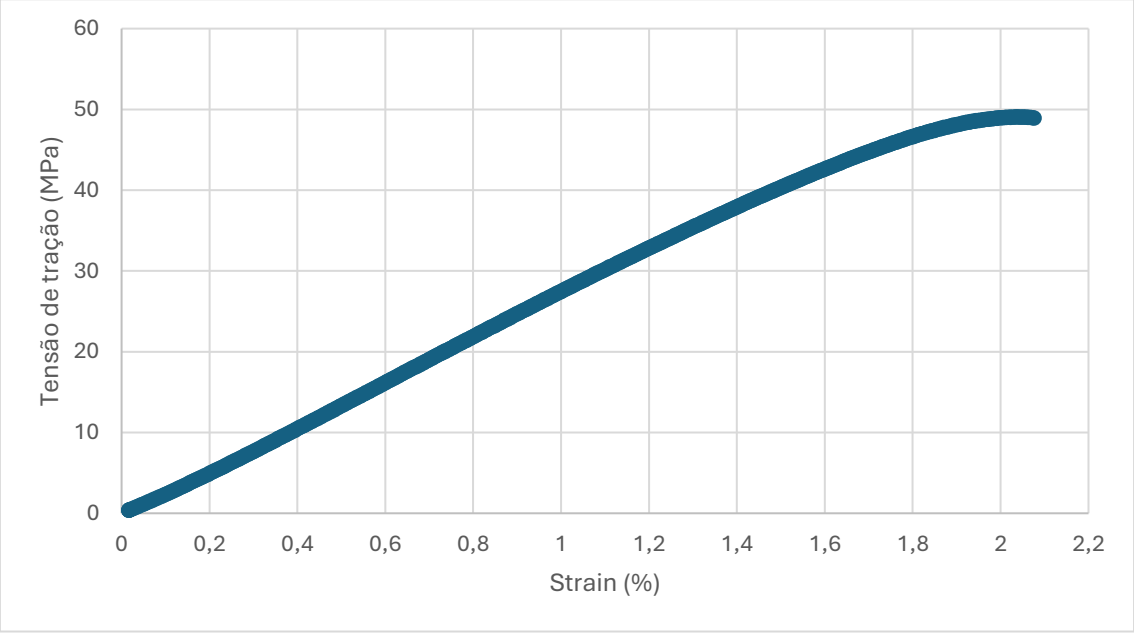


Figura 58:Diagrama tensão de rotura-deformação provete C1 (Figura de autor).

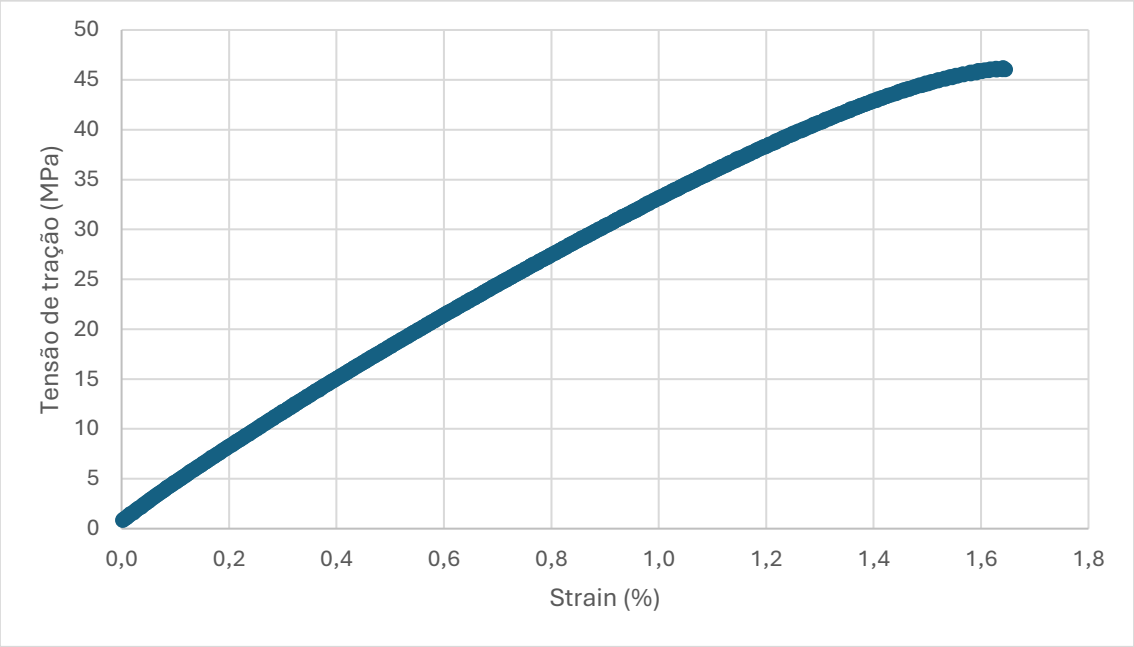


Figura 59: Diagrama tensão de rotura-deformação provete C2 (Figura de autor).

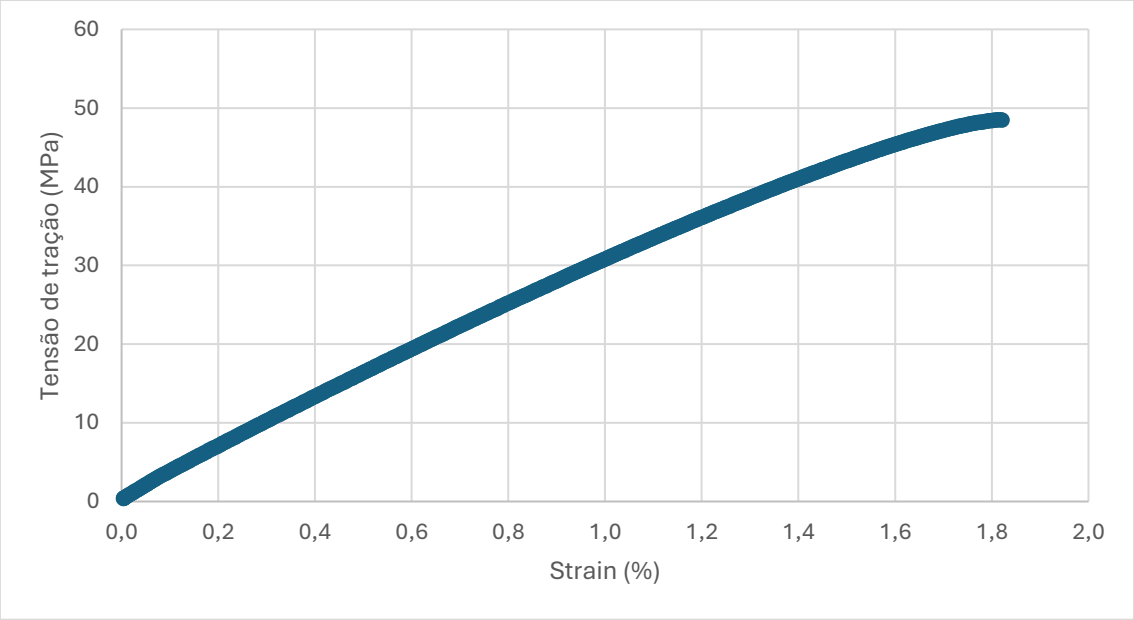


Figura 60: Diagrama tensão de rotura-deformação provete C3 (Figura de autor).

A tabela 9 apresenta a força máxima aplicada à amostra até ao momento de rutura, a tensão de rutura e o Módulo de Young que caracteriza a rigidez do material.

O Módulo de Young (MPa), E , foi determinado através da Equação 3, onde σ é a tensão de rutura (MPa) e δ é a deformação (%).

$$E = \frac{\sigma}{\frac{\delta}{100}} \quad (3)$$

Tabela 9: Valores resultantes dos ensaios de tração (Tabela de autor).

Amostra	Força máxima (N)	Tensão de rotura (MPa)	Deformação (%)	Módulo de Young (MPa)
A1	2067.45	48.83	1.69	2889.35
A2	2067.45	48.83	1.69	2889.35
A3	2029.98	48.05	1.59	3022.01
B1	1441.07	42.98	1.41	3048.23
B2	1649.96	43.61	1.70	2565.29
B3	1590.23	39.03	1.29	3025.58
C1	2042.56	49.06	2.04	2404.90
C2	2159.41	46.20	1.64	2817.07
C3	1883.52	48.53	1.82	2666.48
Média	**-**	**46.12±7.09**	**1.65**	**2814.25±409.35**
Valor de referência	**-**	**18.9 - 68**	**-**	**1741 - 2971**

Nota: O valor de referência é o valor tabelado pelos fornecedores relativamente ao material virgem.

O valor médio obtido para a tensão de rutura no momento da força máxima que o material é capaz de suportar antes da rutura encontra-se dentro do intervalo dos valores tabelados pelos fornecedores relativamente ao material virgem (18,9 a 68 MPa). Isto mostra que o material, depois dos processos aos quais foi submetido, mantém bons valores de resistente à rutura sob tração.

Assim como o valor médio obtido para o Módulo de Young, este também se encontra dentro do intervalo dos valores tabelados pelos fornecedores relativamente ao material virgem (1741 a 2971 MPa). Demonstrando novamente, que o material, depois dos processos aos quais foi submetido, mantém a sua característica de rigidez.

Concluindo, as amostras estudadas mantiveram o seu nível de rigidez (resistência à deformação plástica) assim como o seu nível de resistência à rutura por tração.

CAPÍTULO 5
DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

Capítulo 5. DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

Neste capítulo é descrito o processo de desenvolvimento do produto final a partir da reutilização dos desperdícios de PLA. Os principais objetivos consistem em demonstrar a viabilidade da criação de um produto comercial, recorrendo ao método anteriormente apresentado, garantindo simultaneamente um processo de produção simples e economicamente acessível. Pretende-se, ainda, evidenciar a possibilidade de reutilizar o PLA proveniente de um processo distinto do convencional, preservando, contudo, a característica intrínseca que possibilita a ampla liberdade criativa deste material.

5.1. Análise do projeto e objetivos

Após as experiências apresentadas no Capítulo 4, verificou-se que o material não sofreu alterações significativas nas propriedades físicas e mecânicas avaliadas. Embora tenha sido observada alguma deformação, que dificulta o seu processamento a partir da terceira repetição, o excedente resultante da fabricação de uma placa pode ser reutilizado em novas produções, desde que a quantidade incorporada não seja excessiva, permitindo assim a sua reintegração no ciclo de processamento.

Para o desenvolvimento do produto final, aplicou-se o conhecimento adquirido ao longo deste projeto, sendo o capítulo anterior – dedicado às experiências – um elemento crucial para o seu desenvolvimento. Este capítulo representa a síntese entre o percurso de investigação desenvolvido e o estudo experimental do material.

5.2. Exploração de forma

Durante a fase experimental, foi possível observar a viabilidade de desenvolver placas quadradas com maior espessura, 7 mm (Figura 61 (a)). Verificou-se também que, dependendo desta e, considerando que o PLA é um polímero semicristalino (Yang & Du, 2024), este pode ser processado de forma a apresentar diferentes níveis de translucidez. Esta característica pode ser confirmada na Figura 61 (b), que apresenta uma amostra produzida durante a fase experimental e que evidencia esta propriedade.

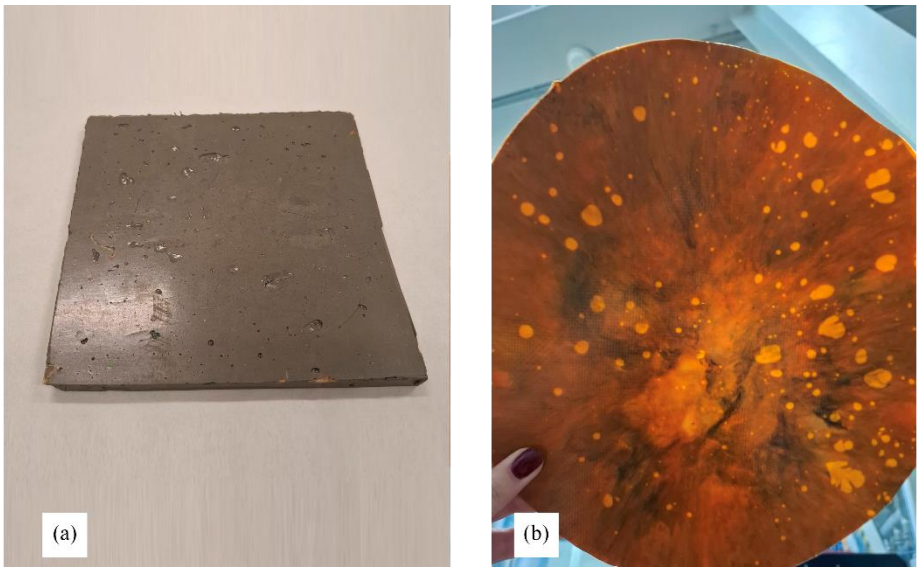


Figura 61: (a) placa realizada com 7 mm, (b) amostra com translucidez (Figura de autor).

Após a perceção da translucidez do material, se assim processado, foi aconselhado pelo professor Joaquim Gabriel da FEUP, a possibilidade de introduzir no produto um sensor de movimento, acrescentado assim ao produto, para além da vertente de reaproveitamento, um conceito de interatividade.

Optou-se por desenvolver uma estrutura constituída por um painel modular, concebido para oferecer diversas possibilidades de organização, permitindo assim preservar parte da liberdade criativa característica da impressão 3D. Neste painel seriam integradas fitas LED, e a estrutura seria posteriormente coberta por placas com espessura reduzida, de modo a tornar visível o padrão modular subjacente.

Considerando que o material, após o processo de produção, apresenta uma aparência distinta do PLA virgem, tornou-se necessário incorporar no design elementos que remetessem para o processo de impressão 3D.

Inicialmente, procedeu-se à exploração dos padrões de preenchimento de uma peça de impressão 3D, conforme representado na Figura 62.

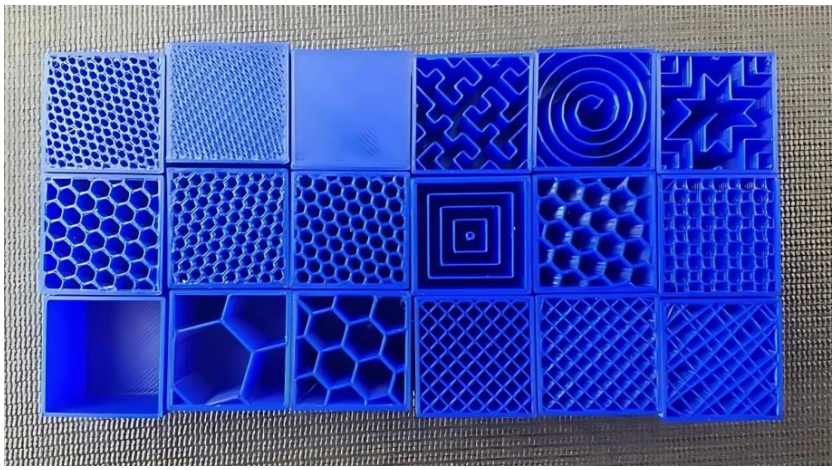


Figura 62: Exemplos de padrões de preenchimento para impressão 3D (Loja 3D, 2025).

Após esta análise, concluiu-se que, para que fosse possível obter uma solução simples e que facilitasse a componente modular, seria necessário recorrer a uma abordagem mais orgânica. Procedeu-se, então, à análise do padrão gerado pelo bico extrusor durante a impressão de suportes em árvore no programa Ultimaker Cura, como é possível observar na Figura 63.

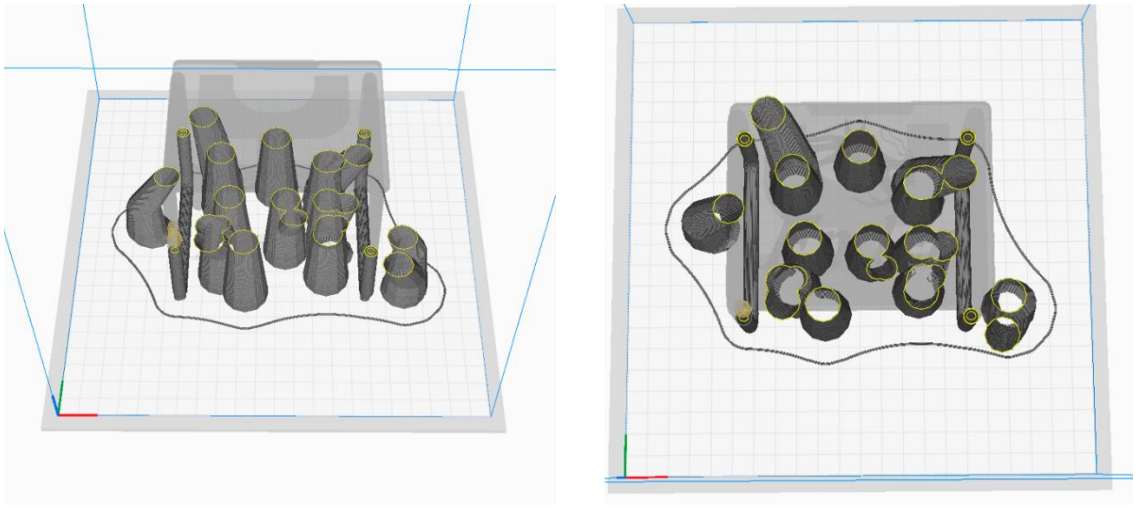


Figura 63: Processo de impressão de suportes em árvore (Figura de autor).

5.3. Exploração do padrão

Com base na análise do desenho dos suportes em árvore, desenvolveu-se um padrão inspirado na componente orgânica destes, conforme representado na Figura 64 (a). Posteriormente foram realizados testes para avaliar as uniões do padrão, como ilustrado na Figura 64 (b).

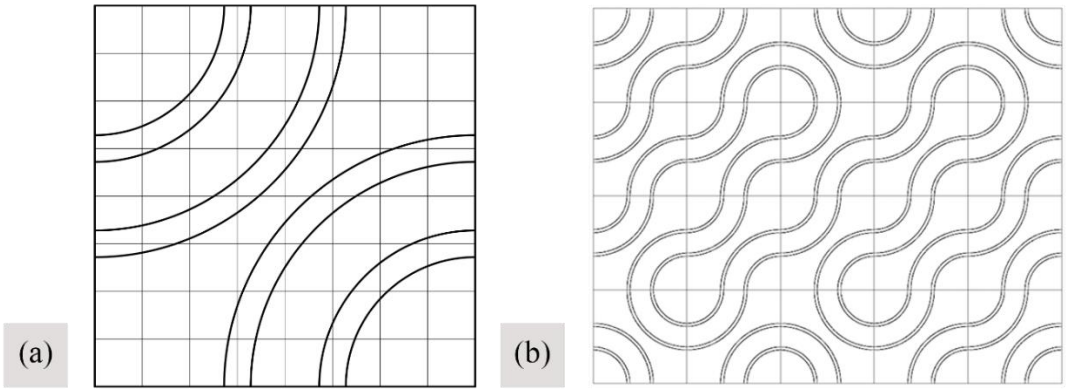


Figura 64: (a) Padrão inspirado nos suportes em árvore, (b) teste de validação do padrão (Figura de autor).

Em seguida, procedeu-se à validação do padrão utilizando uma máquina CNC Haas Série VF-2 da FEUP. O teste foi realizado numa placa de 7 mm de espessura para criar reentrâncias destinadas à instalação da fita LED. O desenho técnico, representado na Figura 65 em escala 1:3 (mm), apresenta duas reentrâncias circulares – uma maior e uma menor, com um raio de 10 mm e profundidade de 4 mm – dispostas simetricamente na placa.

Durante o processo, esta sofreu uma rutura no canto devido à sua espessura e à pressão necessária para a manter fixa durante o corte. O processo de maquinação foi realizado pelos técnicos das oficinas (Figura 66).

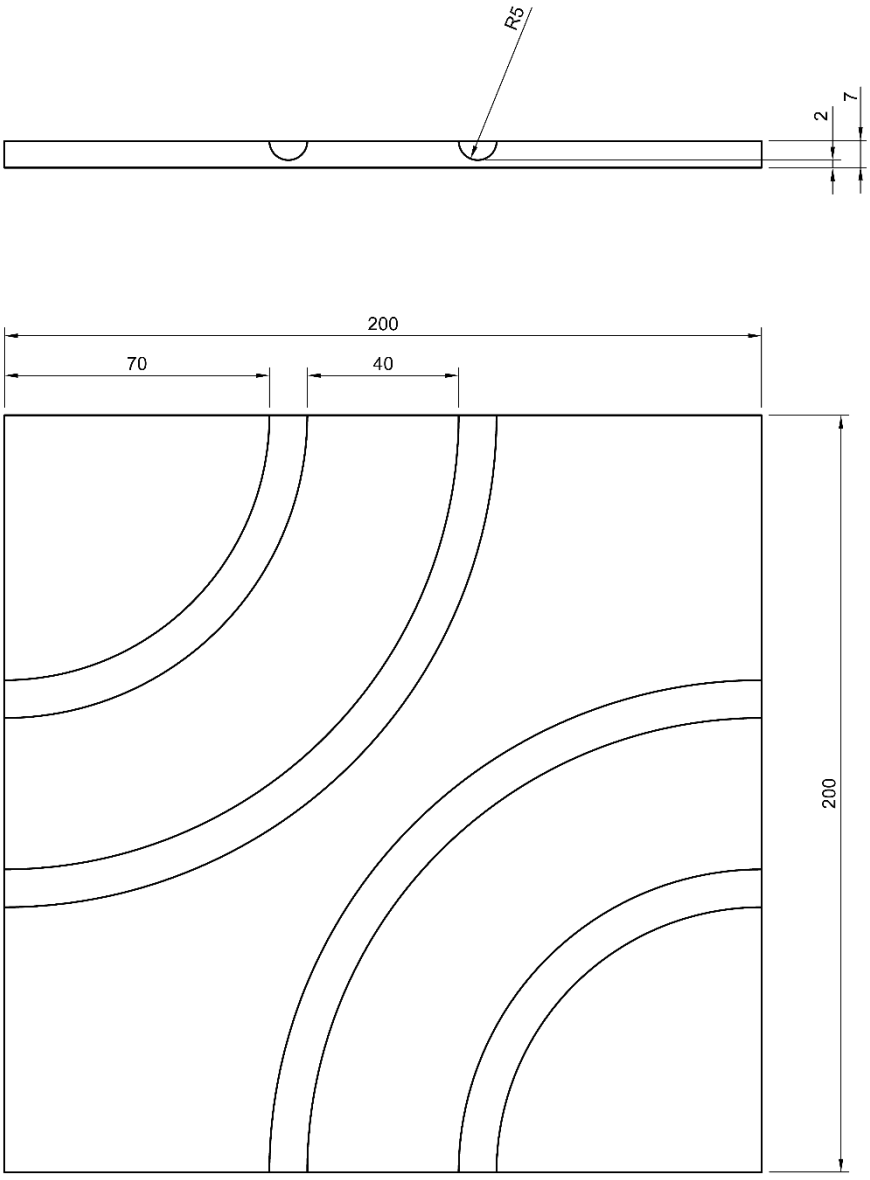


Figura 65: Desenho técnico utilizado na maquinação de uma placa (Figura de autor).



Figura 66: Placa após a maquinação (Figura de autor).

Concluída a fase experimental com o material reciclado e a exploração das diversas formas, definiu-se uma proposta de produto final que responde aos objetivos previamente estabelecidos e aproveita as propriedades do material.

5.4. Renderização

Os renders apresentados nas Figuras 67 e 68, foram realizados como exercícios exploratórios para testar formas de disposição dos módulos e avaliar os métodos de produção necessários para o fabrico do painel. Estes foram obtidos no Keyshot Studio software.



Figura 67: Render horizontal com 8 módulos (figura de autor).



Figura 68: Render horizontal com 12 módulos (figura de autor).

5.5. Maquete

Para a análise do funcionamento da estrutura do painel modular e da transparência do material, foi desenvolvida uma maquete em cartão (Figura 69), à qual foi aplicada uma fita LED RGB de 24 V, desta forma, confirmou-se assim a viabilidade do desenvolvimento do painel.

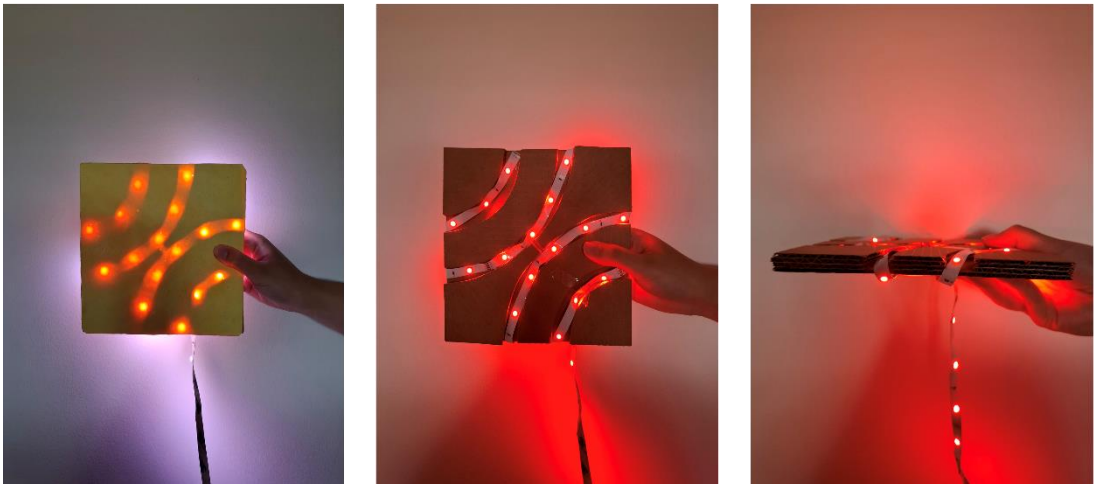


Figura 69: Maquete com aplicação de fita LED (Figura de autor).

5.6. Produção do protótipo final

Para a produção do protótipo final, foi necessária a fabricação de uma nova moldura, de modo a evitar que o material escoasse por baixo, uma vez que a anteriormente utilizada não continha fundo. Após esta etapa, procedeu-se à produção das placas de suporte, responsáveis por alojar as fitas LED e o sensor e, posteriormente, à produção das placas frontais.

5.6.1. Produção da moldura metálica de compactação final

Para a produção da moldura metálica de compactação destinado à fabricação da estrutura do produto final, recorreu-se a uma cantoneira de aço, com secção de 30 mm por 30 mm e comprimento de um metro, de modo a garantir que as laterais mantivessem o ângulo correto. Para o corte da cantoneira em segmentos de 20 cm, utilizou-se uma serra de corte para ferro de 2 300 W, com ângulo de corte ajustável (0–45º), da marca VITO, equipada com disco de corte de 355 mm, uma vez que era necessário efetuar cortes angulares nos cantos. Esta moldura foi posteriormente

fixada numa placa de alumínio de 28 cm por 28 cm, da qual se retirou um quadrado central de 30 cm por 30 cm (Figura 70 (a)), seguindo o mesmo procedimento de corte das molduras anteriores, de modo a permitir a desmoldação das peças.

Para a etapa da prensagem, foram produzidas duas placas adicionais que encaixam na moldura entre as quais o material seria prensado (Figura 70). Numa destas placas, foi incorporado um perfil de aço de 10 mm por 10 mm, soldado por uma máquina MIG, referida anteriormente, para facilitar a sua colocação na moldura quando esta se encontrava quente (Figura 70 (c)). Adicionalmente, foram desenvolvidos quatro perfis complementares (Figura 70 (d)), posicionados em redor, de modo a garantir uma prensagem uniforme do material (Figura 70 (e)).

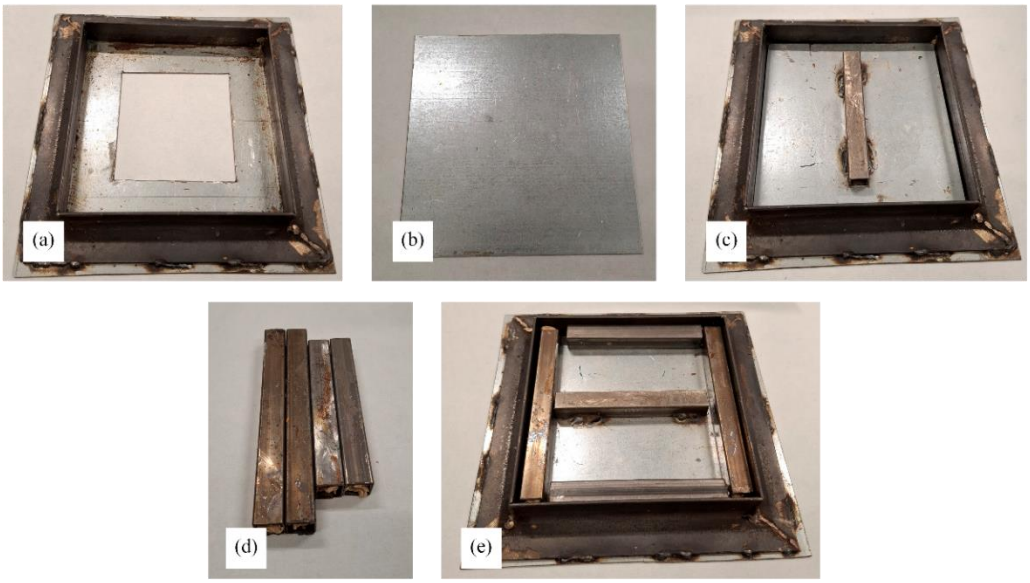


Figura 70: (a) Moldura realizada com a cantoneira já acoplada à base, (b) Placas entre as quais o material é prensado, (c) Placa de prensagem com um perfil para facilitar o seu manuseamento quando quente, (d) Perfis utilizados para garantir a uniformidade da prensagem. (e) Moldura completa (Figura de autor).

5.6.2. Produção das peças

No processo de produção das peças, inicialmente foram colocados 600 g de material no forno para amolecimento durante aproximadamente 40 minutos (Figura 71 (a)), a uma temperatura de 250 °C. Devido à grande quantidade de material, este foi amolecido dentro da primeira moldura e foram colocados alguns perfis ao longo desta para impedir, que devido à dimensão da área de prensagem do forno, o material escorresse pelas laterais (Figura 71 (b)). Após o amolecimento, o material foi manualmente misturado (Figura 71 (d)), e o excedente que ficou agarrado à moldura foi reservado para utilização na produção das peças seguintes (Figura 71 (c)).

Seguidamente, o material foi transferido para a moldura metálica de compactação final, na qual se intercalou papel vegetal entre a parte inferior da moldura e a placa de prensagem (Figura 71 (e)), de modo a facilitar a desmoldação. Após, aproximadamente, mais 30 minutos de aquecimento dentro da moldura, colocou-se a placa de prensagem superior e os perfis ao seu redor, procedendo-se então à prensagem do material.

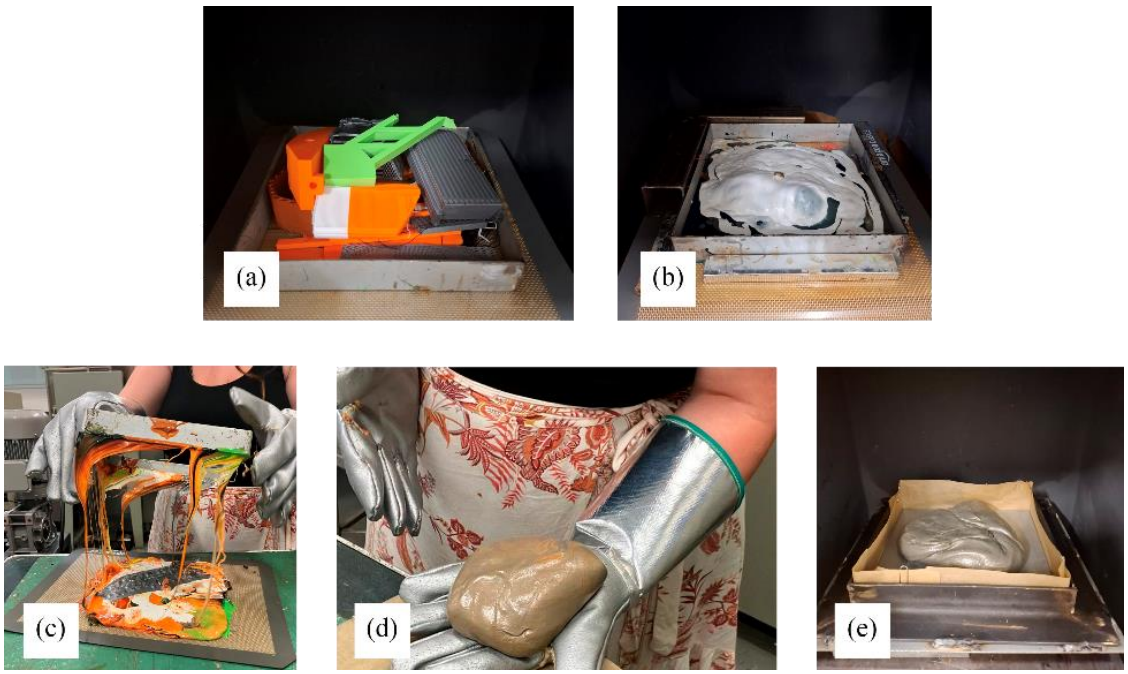


Figura 71: (a) Amolecimento de 600 g de material, (b) Utilização da primeira moldura para evitar que o material escorra, (c) Excedente de material que fica na moldura, (d) Material após ser manualmente amassado, (e) Material na moldura final (Figura de autor).

Após o arrefecimento da moldura, a placa foi removida, uma vez que, se esta for retirada com a moldura ainda quente, ocorre a deformação da mesma. A aplicação deste processo permitiu a produção de nove placas.

Para a produção das placas frontais do painel, mantendo uma uniformidade, foi utilizada, em todas, a mesma percentagem de cores de material: 37,9 % de castanho; 25,1 % de verde pastel; 18,3 % de amarelo pastel; 15,6 % de laranja; 4,5 % de verde e 4,5 amarelo.

O processo de desenvolvimento segue o descrito anteriormente onde foram colocadas 100 g de material no tapete de silicone (Figura 72 (a)), para amolecer durante 15 minutos (Figura 72 (b)), após o qual, foi manualmente misturado e amolecido mais 15 minutos (Figura 72 (c)), e, por fim, foi colocado outro tapete de silicone onde finalmente o material foi prensado durante 5 minutos (Figura 72 (d)), de modo a obter uma placa com uma área maior (Figura 72 (e)).

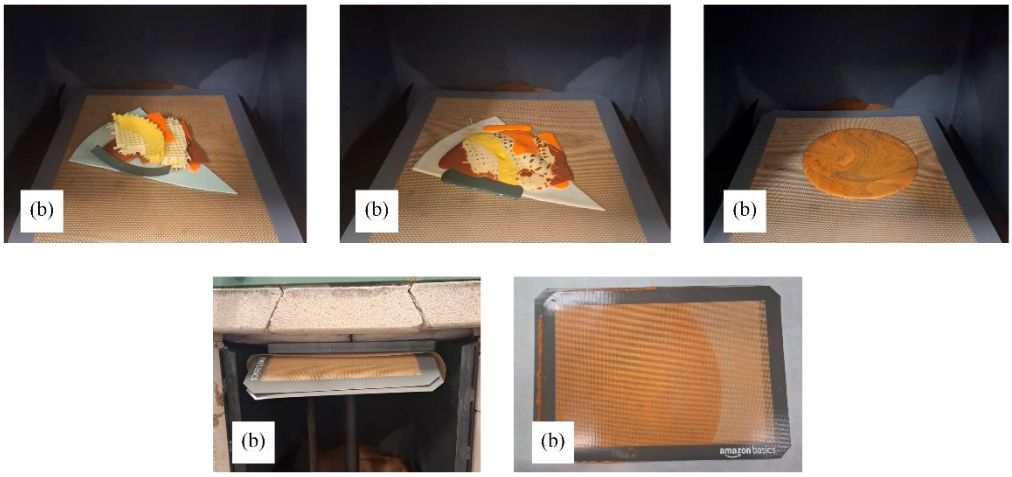


Figura 72: (a) Material no início do processo de amolecimento, (b) Material amolecido, (c) Material após a mistura manual e amolecimento durante 15 minutos, (d) Material a ser prensado, (e) Placa resultante do processo (Figura de autor).

Este processo foi repetido dez vezes de modo a produzir dez placas com uma espessura de aproximadamente 10 mm.

Concluída a produção de todas as peças que compõem a estrutura modular do painel, as nove placas foram maquinadas seguindo o processo previamente descrito. Destas placas, oito foram maquinadas de acordo com o desenho técnico da Figura 73 em escala 1:3 (mm), enquanto uma foi maquinada segundo o desenho técnico representado na Figura 74 em escala 1:3 (mm).

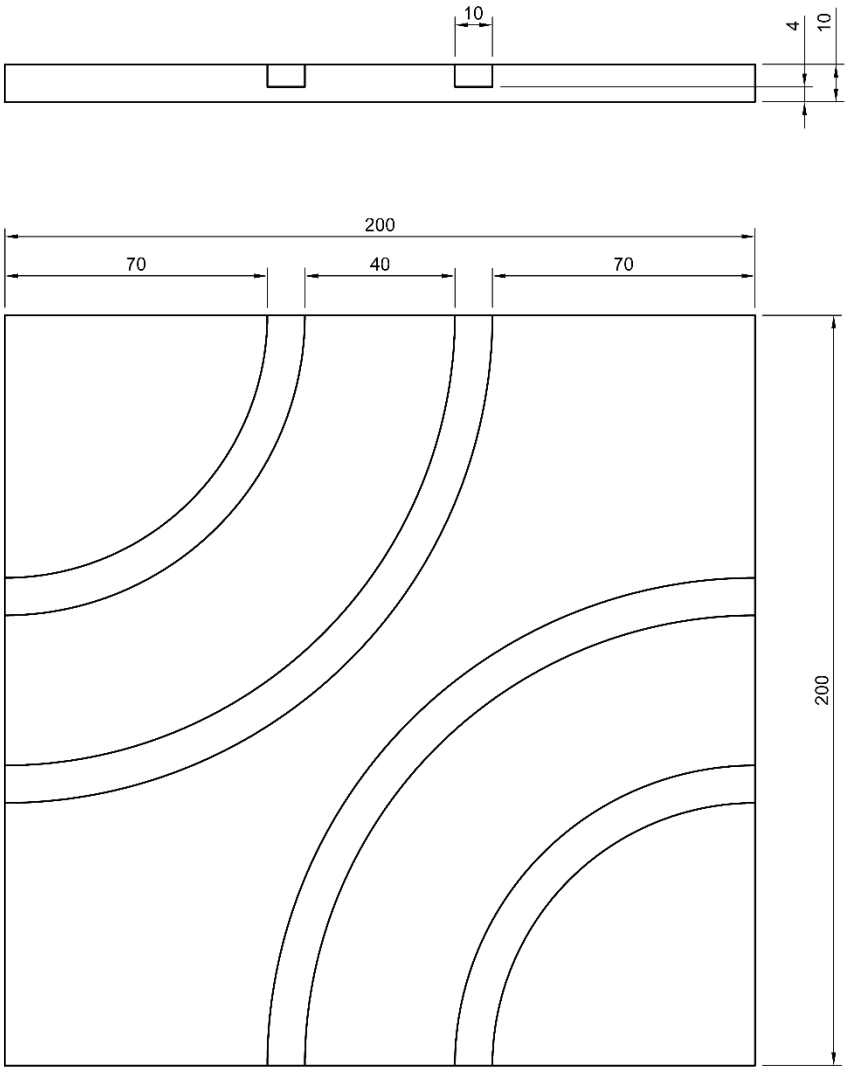


Figura 73: Desenho técnico utilizado na maquinação de 8 placas (Figura de autor).

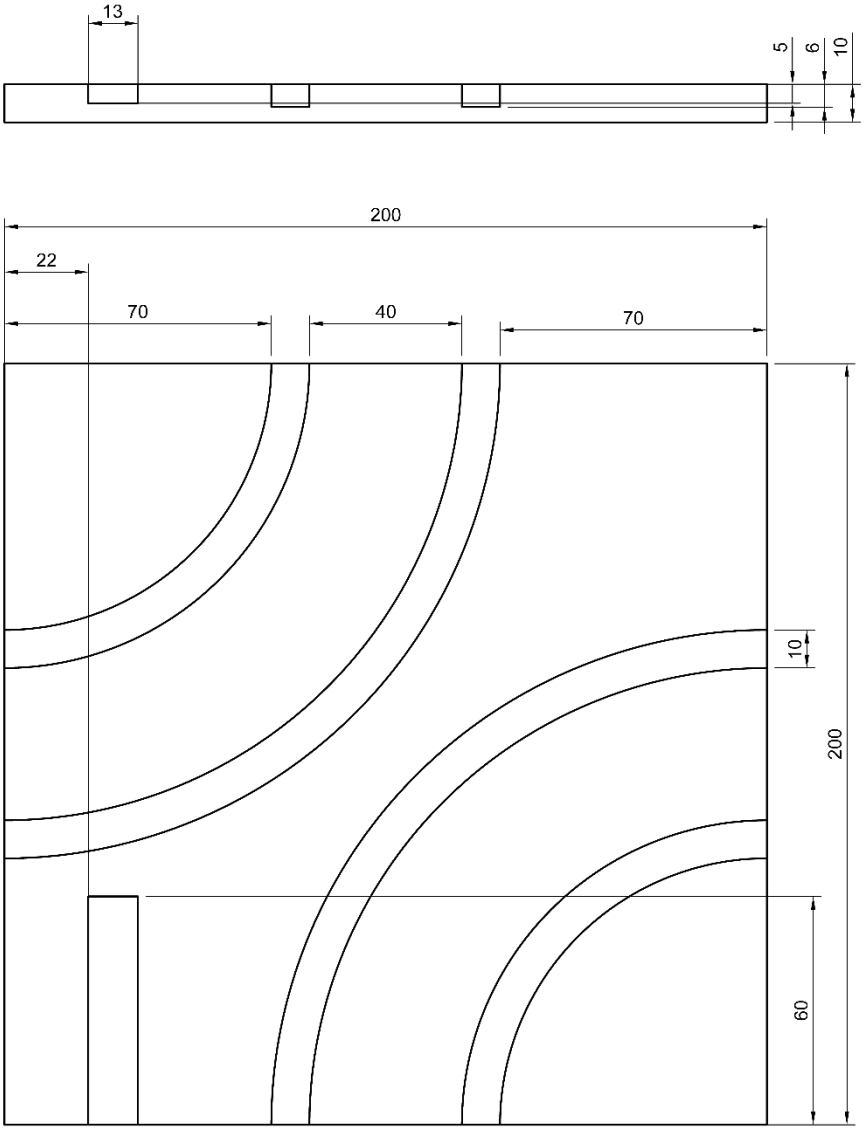


Figura 74:Desenho técnico utilizado na maquinação de 1 placas (Figura de autor).

Com a maquinação das peças que compõem a estrutura modular do painel finalizada (Figura 75 (a)), procedeu-se ao corte manual das placas frontais (Figura 75 (b)), obtendo-se assim todas as partes necessárias à montagem do painel.

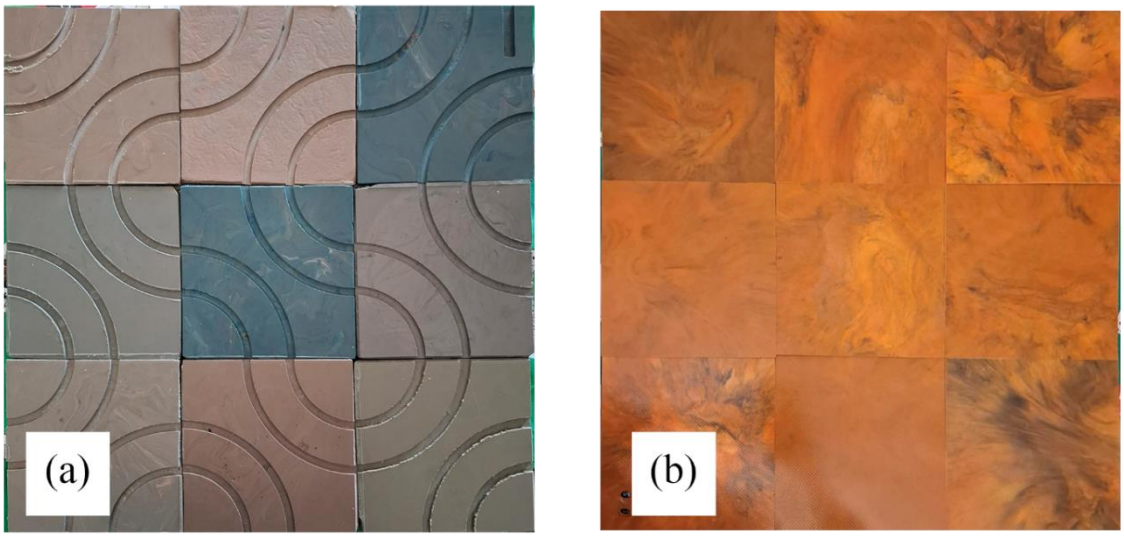


Figura 75: (a) Estrutura do painel, (b) placas frontais (Figura de autor).

Para a execução da estrutura de suporte dos módulos do painel, foram cortados três perfis de alumínio anodizado de 20 mm por 2 mm por 100 mm em seis perfis de 40 cm (Figura 76 (a)), utilizando uma serra de fita de metal (Figura 76 (c)). Nestes perfis, bem como na parte traseira de cada placa, foram efetuados furos com uma furadeira de coluna (Figura 76 (b)), de modo que os módulos pudessem ser posteriormente aparafusados aos perfis, formando uma esquadria que serve de suporte ao painel. Todos estes processos foram realizados nas oficinas da FBAUP.



Figura 76: (a) Serra de fita para metal, (b) Furadeira de coluna, (c) Perfis de alumínio anodizado após o corte (Figura de autor).

Após a seleção do padrão a utilizar, as peças modulares foram montadas, intercalando entre estas e a esquadria, anilhas de 4 mm. Por fim foram utilizados parafusos de 4 mm para garantir a sua fixação, como é possível visualizar na Figura 77.

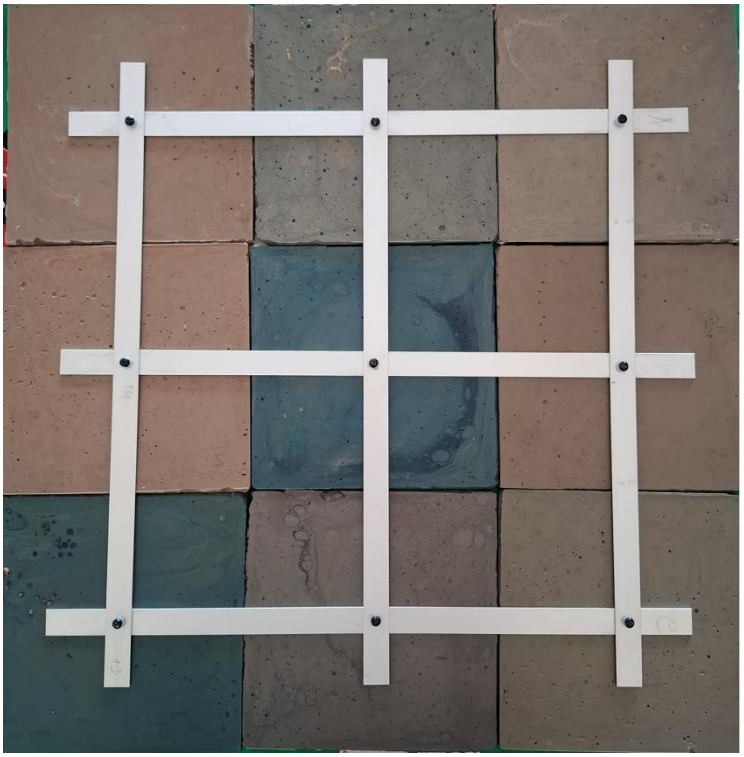


Figura 77: Suporte da estrutura modular (Figura de autor).

5.6.3. Montagem do sistema elétrico

Para a implementação do sistema elétrico, utilizou-se uma fita LED COB de 8 mm com 10 m e 24 V. De modo a aumentar a flexibilidade, as margens da fita foram recortadas. Em seguida esta foi posicionada no suporte, permitindo o recorte de segmentos com o tamanho das reentrâncias, como é possível observar na Figura 78.

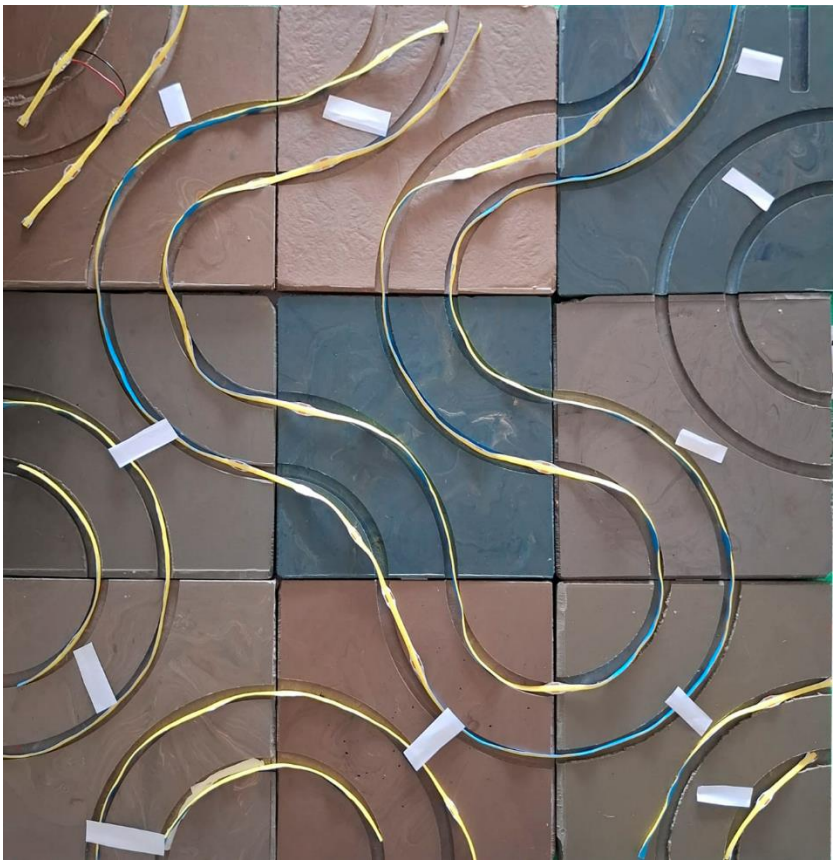


Figura 78: Suporte modular montado e planeamento de zonas para soldadura (Figura de autor).

Os segmentos de fita que não se encontravam diretamente ligados ao circuito principal foram soldados em paralelo, utilizando um ferro de solda para componentes (Figura 79 (a)). No total, realizaram-se 26 soldas – 11 com fios unifilares vermelhos nos polos positivos e 11 com fios pretos nos negativos. Após o processo de solda dos segmentos, foi ainda soldado um cabo DC fêmea a um dos lados do sensor Proximidade RAIL + Dimming (Figura 79 (b)), utilizando o mesmo processo. De seguida, foi repetido o processo em mais dois fios unifilares na outra extremidade do sensor, que foram unidos à fita LED através de um conector de 2 pinos.

Por fim, os segmentos de fita foram fixados ao suporte utilizando a cola já presente nos mesmos (Figura 79 (c)). O processo de soldadura foi auxiliado por alumnis da FEUP.

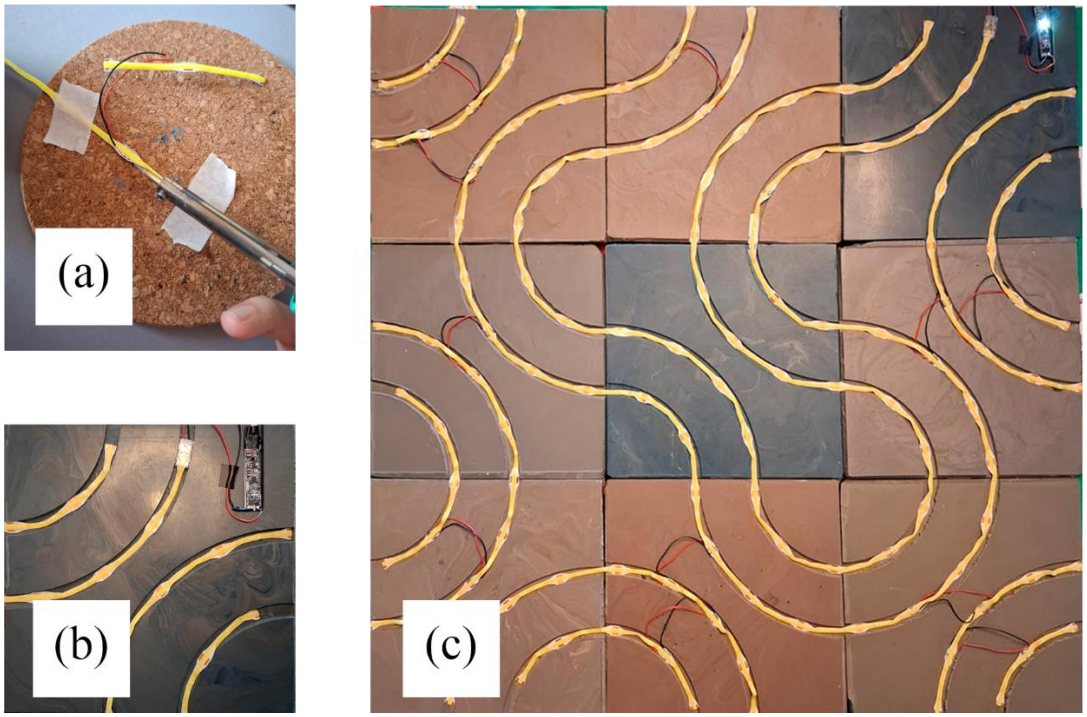


Figura 79: (a) Processo de soldadura dos segmentos, (b) Conexão sensor e fita, (c) Sistema elétrico finalizado (Figura de autor).

5.6.4. Montagem das placas frontais

Finalizada a instalação do sistema elétrico no painel, procedeu-se à fixação das placas frontais utilizando cola para PLA (Cola de cianoacrilato ultrarrápida). Foram executados na placa posicionada sobre o sensor, duas aberturas de modo a manter exposto o emissor e o recetor, para que este conseguisse detetar movimento (Figura 80).

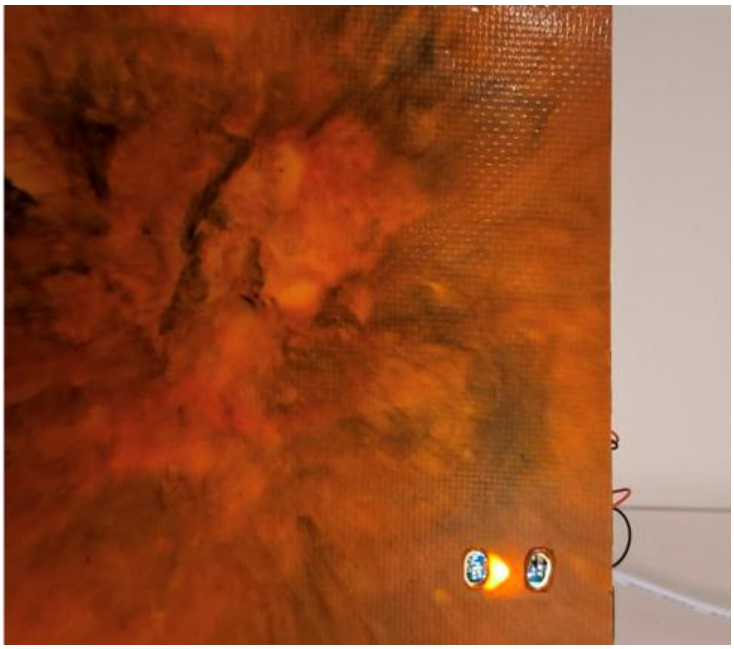


Figura 80: Aberturas emissor e recetor (Figura de autor)

Na Figura 81, é possível observar um render da vista explodida do painel, onde estão representados os diferentes componentes.

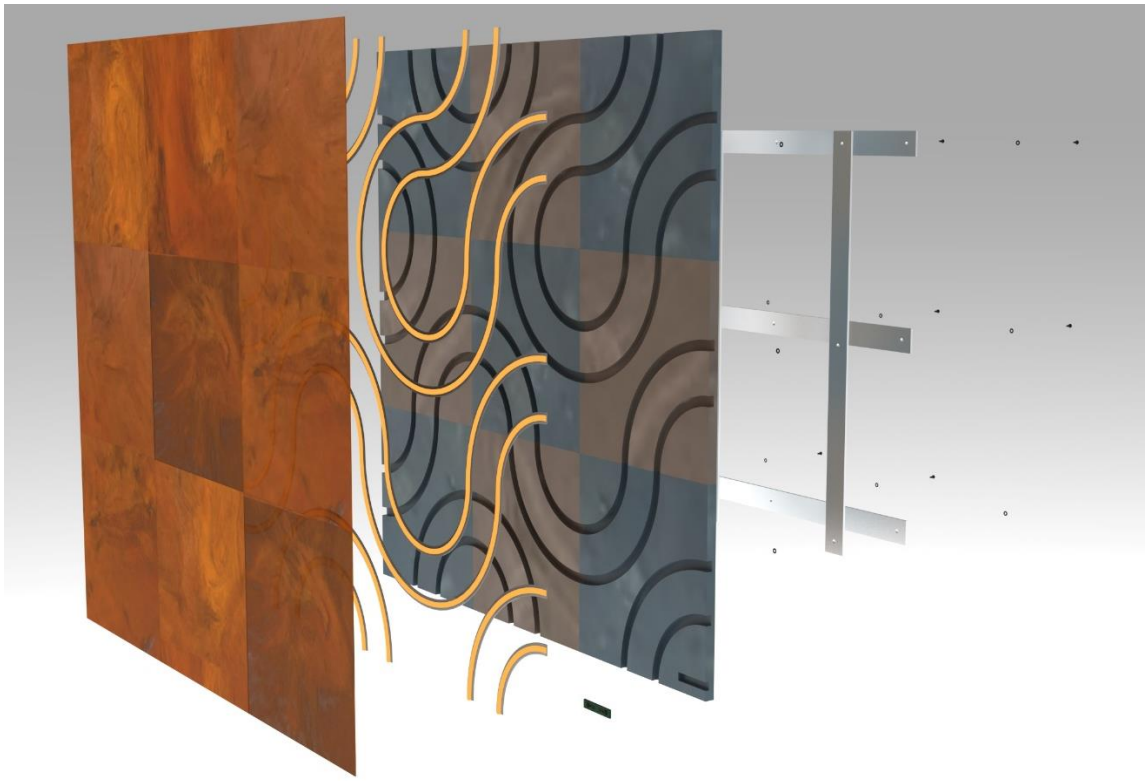


Figura 81: Vista explodida do painel (Figura de autor).

5.6.5. Funcionamento do sensor

O sensor de movimento utilizado no painel é ativado mediante dois gestos. O movimento lateral da mão (Figura 82) liga ou desliga o painel e a permanecia da mão em frente ao sensor (Figura 83) ajusta a sua intensidade de luz.

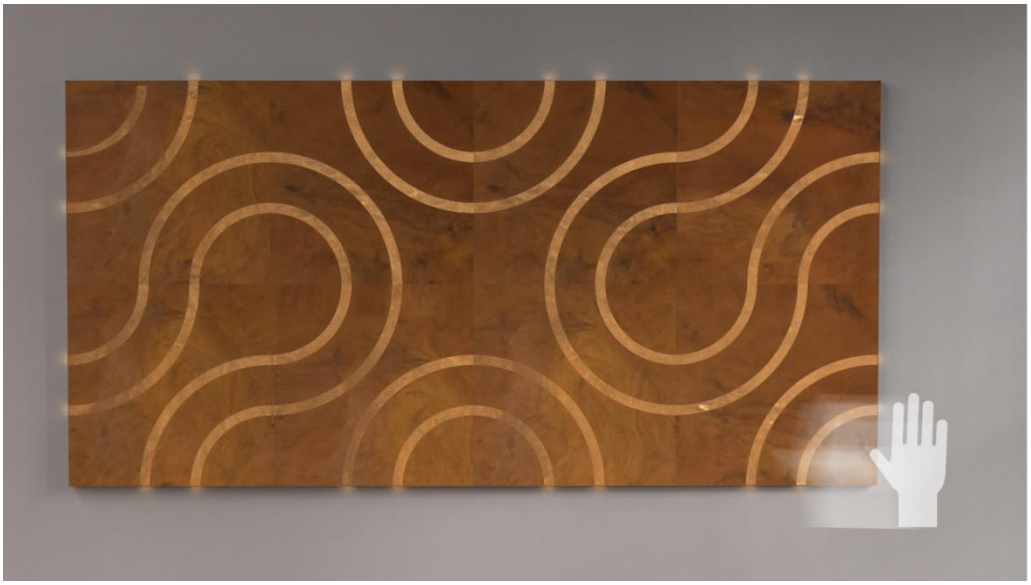


Figura 82: Movimento de ligar o desligar o painel (Figura de autor).



Figura 83: Movimento de ajustar a intensidade de luz (Figura de autor).

5.6.6. Possíveis variações de montagem

Foi realizada uma exploração de diversas variações possíveis de montagem do padrão do painel, conforme representado na Figura 84, evidenciando-se uma ampla variedade de configurações possíveis.

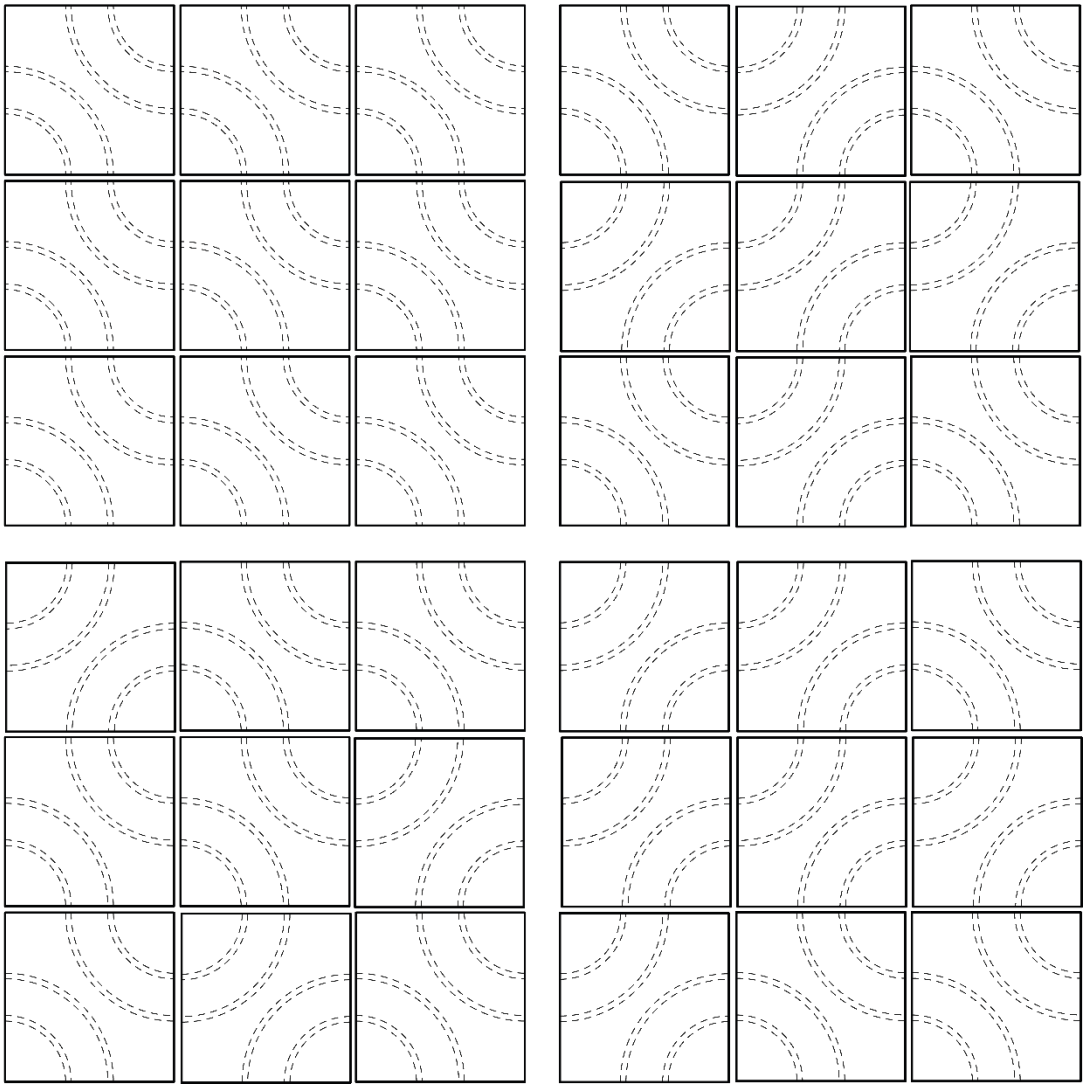


Figura 84: Possíveis variações de painel com 9 módulos (figura de autor).

5.7. Proposta final – Protótipo

O sensor utilizado no painel reconhece dois movimentos: um movimento na horizontal, liga ou desliga o painel, e um movimento de aproximação que regula a intensidade da luz.

Nas figuras seguintes estão representadas algumas variações de luz, tanto do painel como do ambiente.

Na Figura 85, o painel encontra-se sem nenhuma luz ambiente com a iluminação no máximo; na Figura 86 com alguma luz ambiente e iluminação do painel no máximo; na Figura 87 e 88 o ambiente está iluminado e o painel com iluminação no mínimo e desligado respetivamente e na Figura 89 o painel está representado em ambiente.

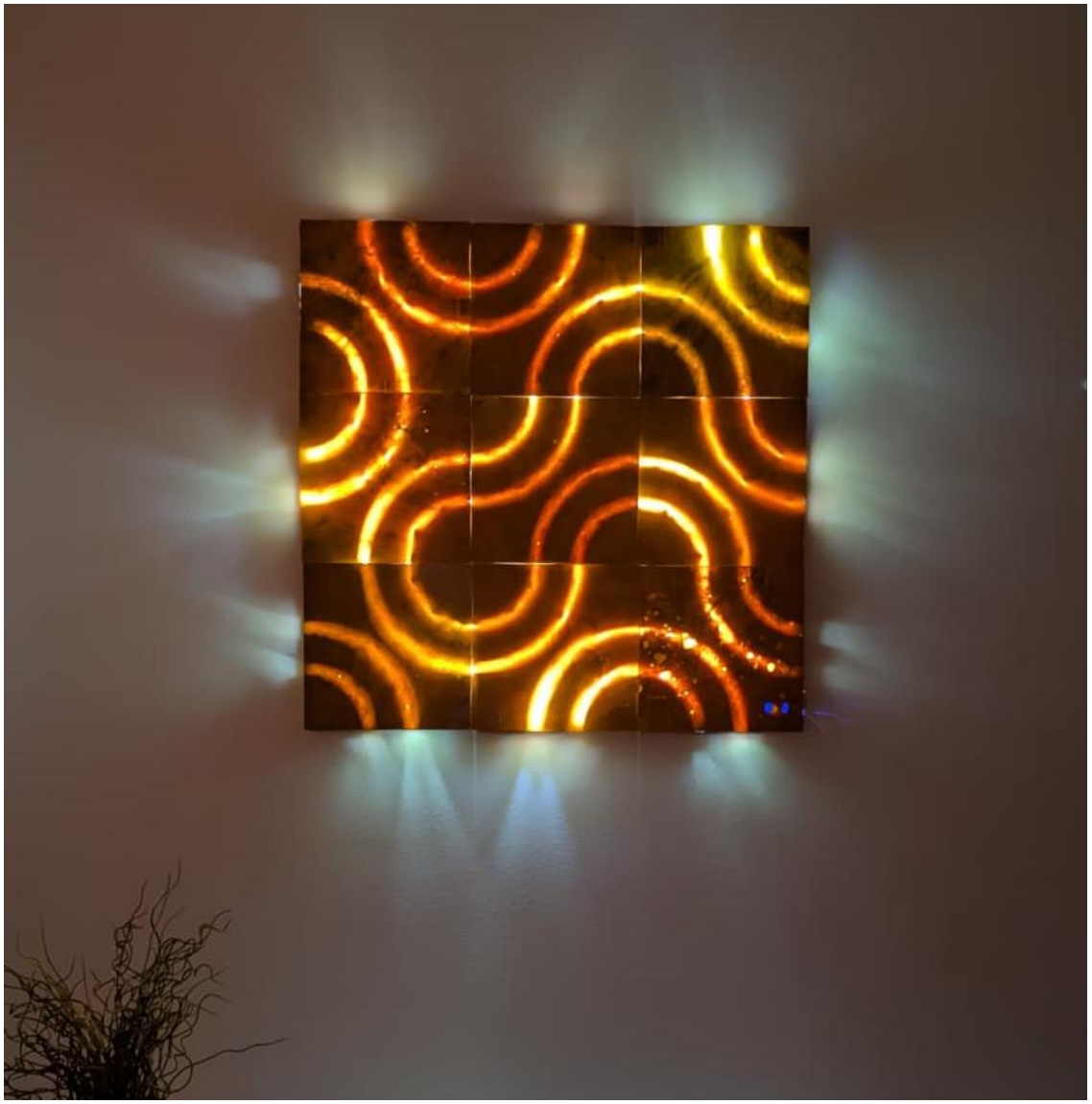


Figura 85 : Painel sem luz ambiente e com a iluminação no máximo (Figura de autor).



Figura 86: Painel com pouca luz ambiente e com a iluminação no máximo (Figura de autor).



Figura 87: Painel com luz ambiente e com a iluminação no mínima (Figura de autor).



Figura 88: Painel com luz ambiente e com a iluminação desligada (Figura de autor).

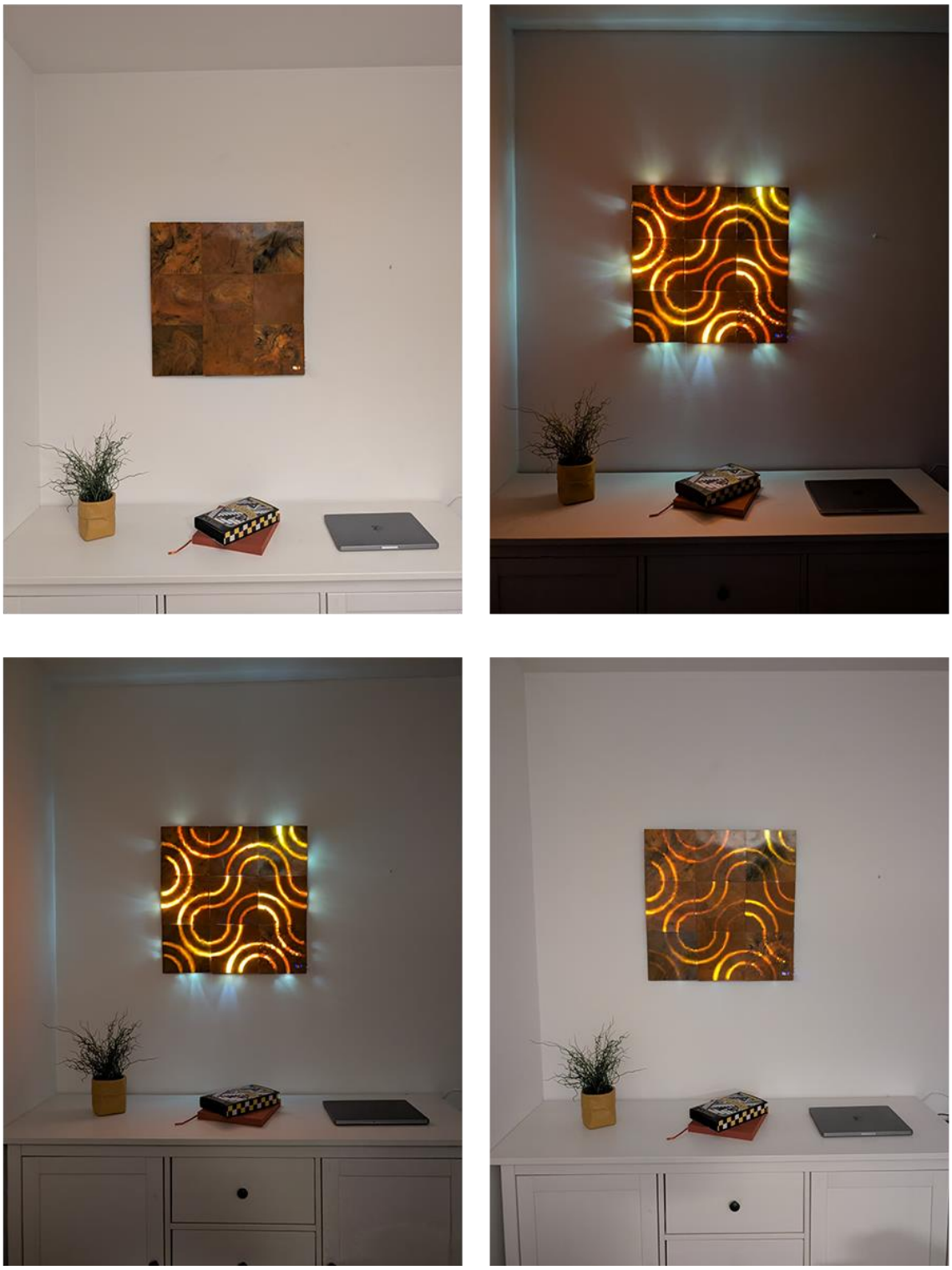


Figura 89: Painel no ambiente (Figura de autor).

5.8. Estimativa de custos

Após a produção do painel, desenvolvido neste projeto foi realizada uma estimativa de custos. Uma vez que a sua produção não é industrial os valores são baseados em utilização de pequena escala.

Materiais utilizados para as molduras:

- Perfis para uniformizar a espessura na prensagem – Gratuito
  Foram obtidos através de sobras
- Placas de prensagem – 6,16 €
  Uma placa de 2,50 m por 1,50 m tem um valor de 70,00 €. Para a fabricação das molduras foram utilizados 1 quadrado de 50 cm por 50 cm e dois de 20 cm por 20 cm. As placas utilizadas ficam por um valor de 6,16 €
- Cantoneira – 12,00 €
  É vendida ao metro e foi utilizada por inteiro

Materiais utilizados no suporte:

- 1 parafusos – 0,10 €
  Embalagem de 20 unidades por 2,00 €. Cada módulo requer 1 parafuso.
- Perfis de alumínio – 0,30 €
  Cada perfil de 1 m tem o valor de 3,00 €. Cada modulo é unido por 2 perfis de 10 cm.

Material:

- PLA reciclado – Gratuito.
- Fita LED de COB – 0,74 €
  Uma fita LED de 10 m tem o valor de 10,00 €. Para cada módulo é utilizado 0,67 cm, que dá o valor de 0,74 € por módulo.
- 1 Conector – 0,25 €
  Embalagem de 10 unidades por 2,50 € cada conjunto de módulos requer 1 conector.
- Fio unifilar – 0,35 €
  Cada 5 m de fio tem o valor de 17,50 €. Cada módulo requer aproximadamente 10 cm, o valor é de 0.35 €.

Processamento:

- Prensagem em forno de pratos quentes – 7,50 €
  Cada modulo requer aproximadamente 1 hora e 20 minutos e a placa frontal 25 minutos. Assumindo que a utilização é 10,00 € por hora, cada módulo é produzido por 7,50 €.
- Maquinação em CNC- 1,67 €
  Cada modulo leva aproximadamente 2 minutos a ser maquinado. Assumindo que 1 hora tem o valor de 50,00€, cada módulo pode ser maquinado por 1,67
- Restantes máquinas de fabricação das molduras e realização de perfurações- 0,57 €
  Cada modulo requer aproximadamente 10 minutos para realizar as perfurações e a produção da moldura levou aproximadamente 3 horas. Assumindo que o aluguer de espaços que dispõem de todas estes equipamentos é de 70,00 € mensais e a utilização diária de 8 horas, o valor por hora é de 0,29 € e fabricação da moldura mais as perfurações de 1 módulo é de 0,57 €.

Com esta análise é possível estimar, que fora do contexto industrial, o custo direto da moldura para produção dos módulos é de 18,73 € e um módulo é de 11,48 €, estimando apenas custos de produção.

CAPÍTULO 6
CONCLUSÕES

Capítulo 6. CONCLUSÕES

6.1. Conclusões gerais

A presente dissertação permitiu demonstrar que a produção de resíduos provenientes da impressão 3D, em particular os resultantes da utilização de PLA, constitui um desafio relevante no âmbito da sustentabilidade e da gestão de materiais. Embora este seja um bioplástico com vantagens ambientais face aos polímeros de origem petroquímica, a sua reciclagem continua a enfrentar limitações devido à degradação das suas propriedades mecânicas e térmicas ao longo do seu reprocessamento.

Ao longo da investigação ficou comprovado que é possível reutilizar o PLA descartado através de métodos acessíveis e de baixo custo, explorando alternativas ao processo convencional de re-extrusão. A realização de ensaios experimentais e a etapa de prototipagem permitiu não apenas identificar limitações, nomeadamente ao número de reprocessamentos que o material pode ser sujeito até apresentar deformação, como também valorizar as suas potencialidades, evidenciando a pertinência de o integrar em novas soluções de design sustentável.

O desenvolvimento de um sistema de iluminação interativo constituiu uma prova de conceito particularmente relevante, uma vez que confirmou a aplicabilidade prática do PLA reciclado. A utilização conjunta de técnicas como a maquinação CNC com as propriedades de translucidez do material, que são possíveis de obter a partir do processamento do material, permitiu demonstrar a possibilidade de criar objetos funcionais e esteticamente apelativos a partir de resíduos, de forma a agregar valor e reforçar a importância de práticas de design circular sustentável.

O desenvolvimento do produto a partir de molduras que podem ser produzidas com processos simples e acessíveis demonstra a vasta amplitude de criação que este material dispõe. Para a criação de cada módulo foram utilizadas 500 g de material para o suporte e 100 g para a placa frontal após os processos de acabamento. Os excedentes podem voltar a ser incluídos no ciclo de reprocessamento, em pequenas quantidades, quando é realizado o primeiro processamento do modulo seguinte, o que evita que ocorra desperdício de material.

A intenção por detrás do design desta peça de iluminação interativa baseou-se no potencial visual proporcionado pela impressão 3D, dos suportes em árvore, em particular no efeito criado pelos suportes em árvore. Assim, consoante a orientação e disposição de cada módulo, é possível obter diferentes composições visuais.

A incorporação de fitas LED nas reentrâncias do suporte, visíveis apenas quando o painel está ligado, faz referência ao processo de impressão, lembrando que o interior da peça só se torna percetível durante a impressão.

O presente projeto concretizou os objetivos estabelecidos e demonstrou a viabilidade da reutilização do PLA em contextos alternativos ao seu uso convencional. A investigação apresentou uma abordagem inovadora para o reaproveitamento deste material, que frequentemente acaba em aterro, evidenciando não só o seu potencial para novas aplicações além da impressão 3D, mas também a facilidade do seu processamento através de métodos simples. Desta forma, reforça-se a relevância destas estratégias no âmbito do design sustentável.

6.2. Trabalhos futuros

Apesar do projeto ter alcançado os objetivos definidos, a investigação permanece aberta e é necessária uma investigação contínua para aprimorar o processo de fabrico, melhorar a recolha do material e efetuar mais testes de caracterização das propriedades do material reprocessado. Algumas das perspetivas que podem ser exploradas são:

- Implementação de um processo de recolha que resolva o problema das más práticas de descarte deste material e que o acesso a este seja tanto acessível a empresas como a qualquer utilizador dos processos de FFF.
- Consciencialização dos utilizadores à cerca deste material e da sua correta reciclagem.
- Exploração de diferentes formatos de molduras de modo a obter novas formas.
- Análise de quantidade de reprocessamentos até deformar por completo o material.
- Exploração de molduras com aberturas laterais de modo a obter um melhor acabamento nas laterais.

- Exploração do desenvolvimento de uma moldura por encaixe que facilite a instalação da alimentação elétrica aos LEDs.

Referências Bibliográficas

A. S., M., K. V., G., R. G., C., V. P., A., & Y. N., G. (2019). Review on Hot Melt Extrusion Technology and it's Application. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 253–260. https://doi.org/10.32628/ijsrst196653

Agbakoba, V. C., Webb, N., Jegede, E., Phillips, R., Hlangothi, S. P., & John, M. J. (2024). Mechanical Recycling of Waste PLA Generated From 3D Printing Activities: Filament Production and Thermomechanical Analysis. *Macromolecular Materials and Engineering*, *309*(8). https://doi.org/10.1002/mame.202300276

Ana Cristina Tavares Nunes. (n.d.).

Anderson, I. (2017). Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid. *3D Printing and Additive Manufacturing*, *4*(2), 110–115. https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0054

Awasthi, A. K., Shivashankar, M., & Majumder, S. (2017). Plastic solid waste utilization technologies: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *263*(2). https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/2/022024

Bergaliyeva, S., Sales, D. L., Delgado, F. J., Bolegenova, S., & Molina, S. I. (2023). Manufacture and Characterization of Polylactic Acid Filaments Recycled from Real Waste for 3D Printing. *Polymers*, *15*(9). https://doi.org/10.3390/polym15092165

Calegari, E. P., & Oliveira, B. F. de. (2016). Compósitos a partir de materiais de fontes renováveis como alternativa para o desenvolvimento de produtos. *Sustainability in Debate*, *7*(1), 140–155. https://doi.org/10.18472/sustdeb.v7n1.2016.17623

Chalmin, P. (n.d.). *Field Actions Science Reports The history of plastics: from the Capitol to the Tarpeian Rock KEY WORDS*.

Chen, C.-C., Chueh, J.-Y., Tseng, H., Huang, H.-M., & Lee, S.-Y. (2003). Preparation and characterization of biodegradable PLA polymeric blends. In *Biomaterials* (Vol. 24).

D', D., & Leal, O. (n.d.). *Recycling External Prostheses' Waste to Create a 3D Printing Filament Design and Manufacture of a Mechanical Hand*.

Delvere, I., Iltina, M., Shanbayev, M., Abildayeva, A., Kuzhamberdieva, S., & Blumberga, D. (2019). Evaluation of polymer matrix composite waste recycling methods. *Environmental and Climate Technologies*, *23*(1), 168–187. https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0012

Dennis, L. (2024). A brief history of the use of plastics. In *Cambridge Prisms: Plastics* (Vol. 2). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/plc.2024.17

Jabeen, N., Majid, I., & Nayik, G. A. (2015). Bioplastics and food packaging: A review. *Cogent Food and Agriculture*, *1*(1). https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1117749

Jawahir, I. S., & Bradley, R. (2016). Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, *40*, 103–108. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.067

Kreiger, M. A., Mulder, M. L., Glover, A. G., & Pearce, J. M. (2014). Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. *Journal of Cleaner Production*, *70*, 90–96. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009

Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C., Brucker-Davis, F., Chevalier, N., Corra, L., Czerucka, D., Bottein, M. Y. D., Demeneix, B., Depledge, M., Deheyn, D. D., Dorman, C. J., Fénichel, P., Fisher, S., Gaill, F., Galgani, F., … Rampal, P. (2020a). Human health and ocean pollution. *Annals of Global Health*, *86*(1), 1–64. https://doi.org/10.5334/aogh.2831

Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C., Brucker-Davis, F., Chevalier, N., Corra, L., Czerucka, D., Bottein, M. Y. D., Demeneix, B., Depledge, M., Deheyn, D. D., Dorman, C. J., Fénichel, P., Fisher, S., Gaill, F., Galgani, F., … Rampal, P. (2020b). Human health and ocean pollution. *Annals of Global Health*, *86*(1), 1–64. https://doi.org/10.5334/aogh.2831

Lanzotti, A., Martorelli, M., Maietta, S., Gerbino, S., Penta, F., & Gloria, A. (2019). A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. *Procedia CIRP*, *79*, 143–146. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.030

Luísa Lobo Fortuna, A., Mendes Viana, M., Ana Mehl, Ds., Jacqueline Gisele Silva, Ds., & Campelo de Melo Ferraz, C. (n.d.). *IMPACTOS AMBIENTAIS DOS PLÁSTICOS: BIOPOLÍMEROS COMO ALTERNATIVA PARA A REDUÇÃO DO ACÚMULO DE EMBALAGENS FLEXÍVEIS DE POLIPROPILENO NO MEIO AMBIENTE*.

Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science*, *6*(1), 1–11. https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01

Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., Warchoł, J., Moustakas, K., Chojnacka, K., & Witek-Krowiak, A. (n.d.). *3D printing filament as a second life of waste plastics-a review*. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8/Published

Moreno, E., Beltrán, F. R., Arrieta, M. P., Gaspar, G., Muneta, L. M., Carrasco-Gallego, R., Yáñez, S., Hidalgo-Carvajal, D., Orden, M. U. de la, & Urreaga, J. M. (2021). *Technical Evaluation of Mechanical Recycling of PLA 3D Printing Wastes*. 19. https://doi.org/10.3390/cgpm2020-07187

Narancic, T., & O'Connor, K. E. (2019). Plastic waste as a global challenge: Are biodegradable plastics the answer to the plastic waste problem? In *Microbiology (United Kingdom)* (Vol. 165, Issue 2, pp. 129–137). Microbiology Society. https://doi.org/10.1099/mic.0.000749

Qi, X., Ren, Y., & Wang, X. (2017). New advances in the biodegradation of Poly(lactic) acid. In *International Biodeterioration and Biodegradation* (Vol. 117, pp. 215–223). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.01.010

Sangeetha, V. H., Deka, H., Varghese, T. O., & Nayak, S. K. (2018). State of the art and future prospectives of poly(lactic acid) based blends and composites. *Polymer Composites*, *39*(1), 81–101. https://doi.org/10.1002/pc.23906

Scalenghe, R. (2018). Resource or waste? A perspective of plastics degradation in soil with a focus on end-of-life options. *Heliyon*, *4*, 941. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018

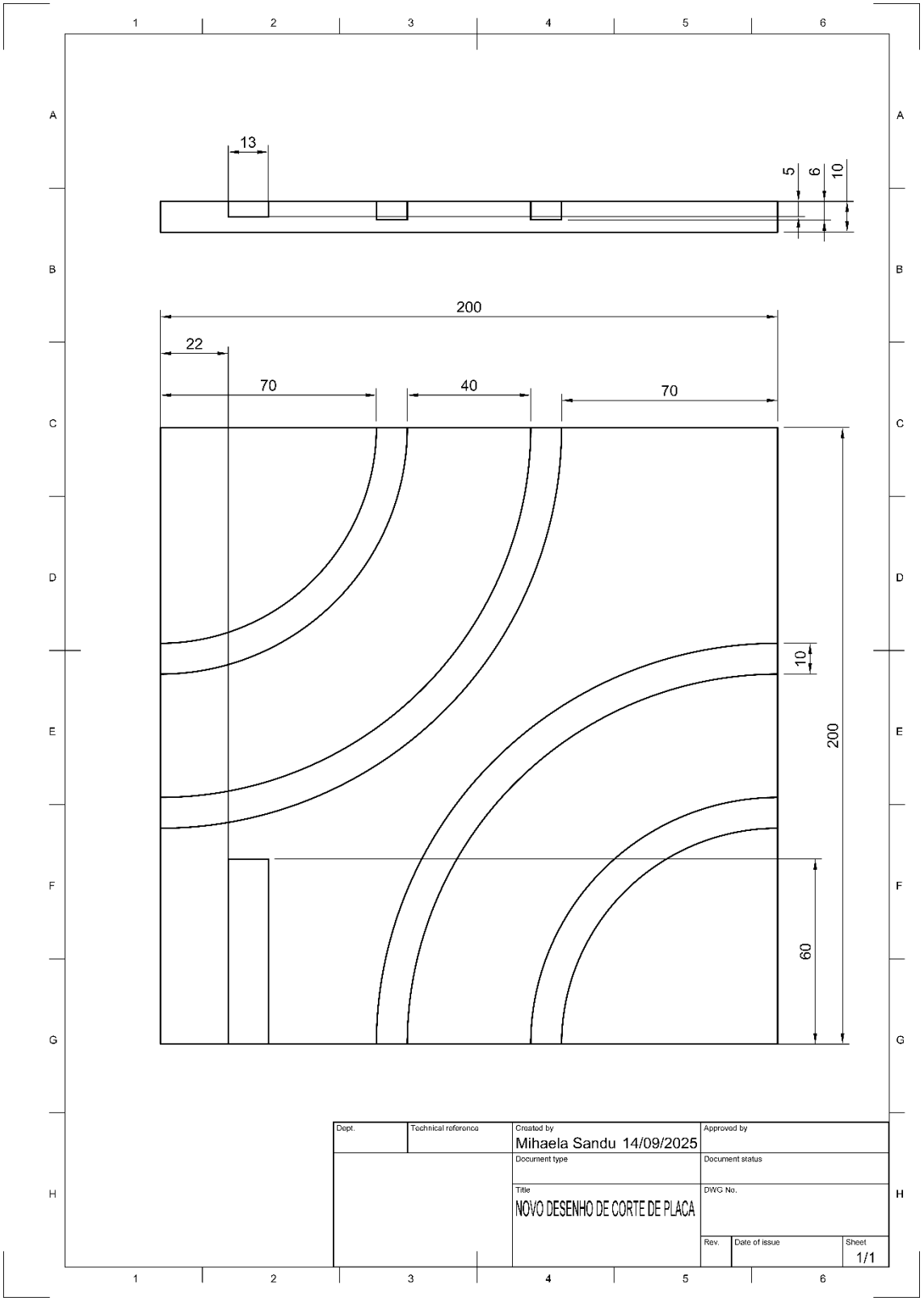
Shekh, M. R., & Kumar, V. (2025). Impact of plastic pollution on ecosystems: a review of adverse effects and sustainable solutions. In *Environmental Monitoring and Assessment* (Vol. 197, Issue 3). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s10661-025-13723-1

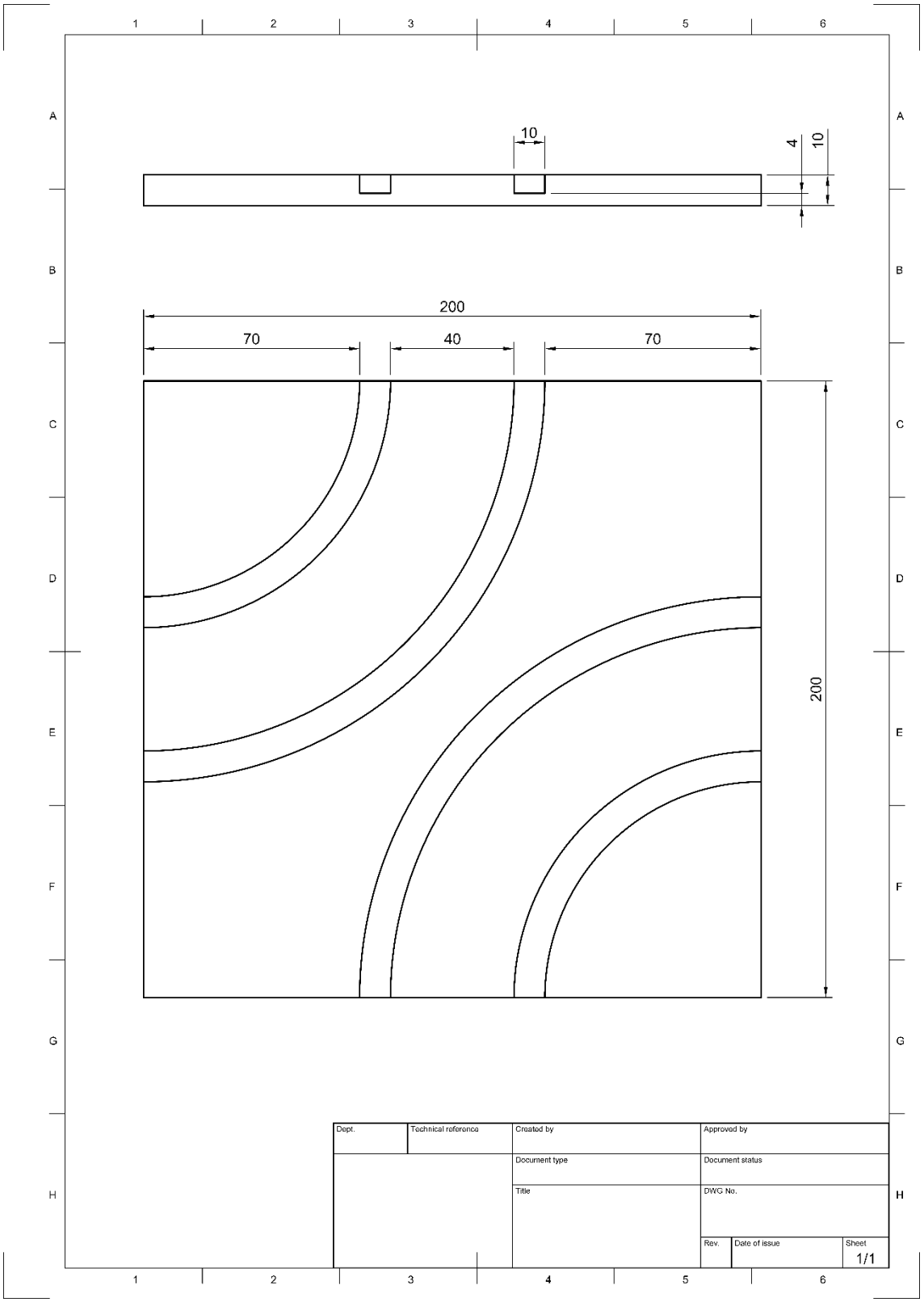
Taib, N. A. A. B., Rahman, M. R., Huda, D., Kuok, K. K., Hamdan, S., Bakri, M. K. Bin, Julaihi, M. R. M. Bin, & Khan, A. (2023). A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer. In *Polymer Bulletin* (Vol. 80, Issue 2, pp. 1179–1213). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s00289-022-04160-y

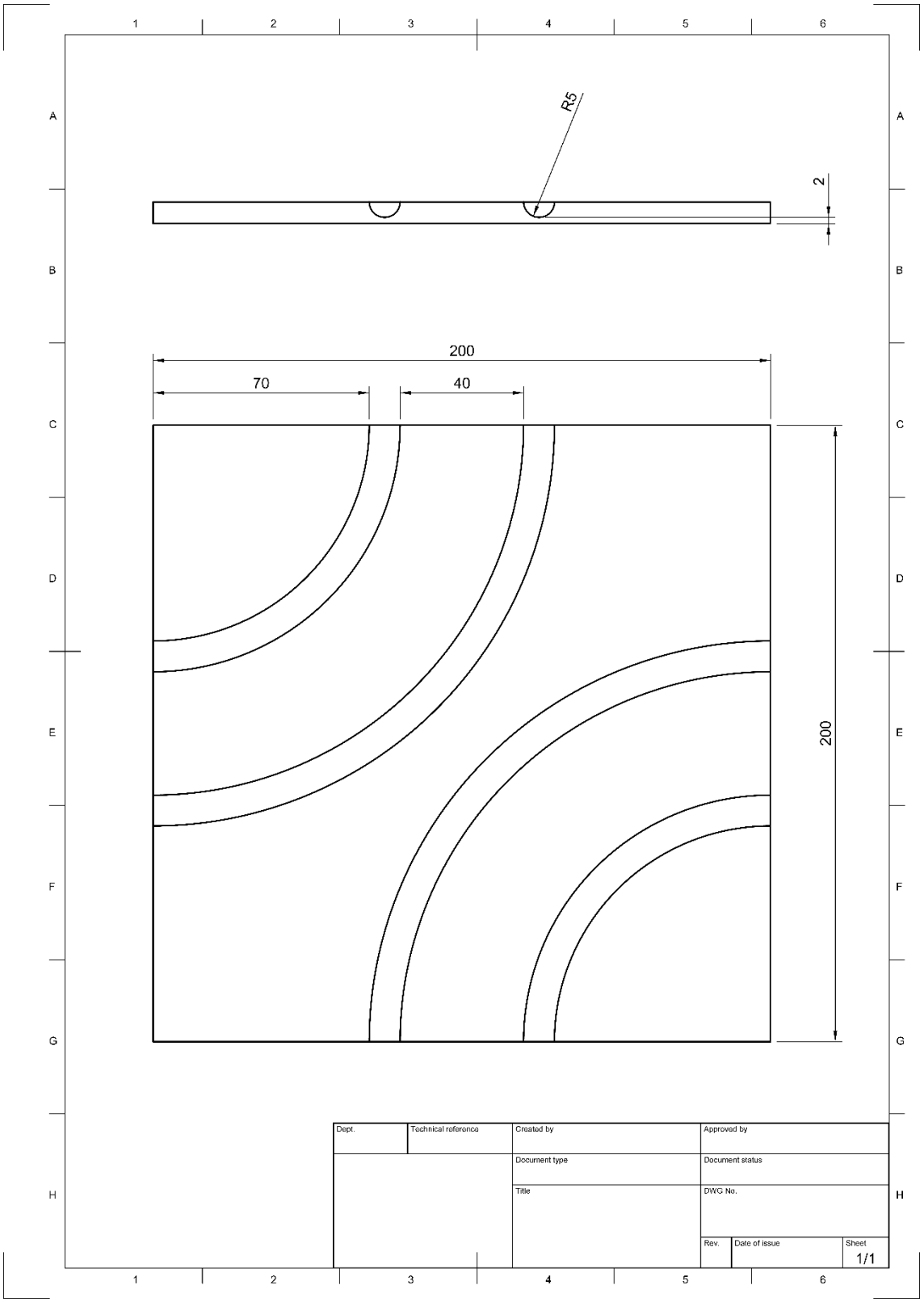
Zenkiewicz, M., Richert, J., Rytlewski, P., Moraczewski, K., Stepczyńska, M., & Karasiewicz, T. (2009). Characterisation of multi-extruded poly(lactic acid). *Polymer Testing*, *28*(4), 412–418. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.01.012

Anexos

Anexo 1 – Desenhos técnicos




1
2
3
4
5
6
A
B
C
D
E
F
G
H
10
4
10
200
70
40
70
200
Dept.
Technical reference
Created by
Approved by
Document type
Document status
Title
DWG No.
Rev.
Date of issue
Sheet
1/1


1
2
3
4
5
6
A
B
C
D
E
F
G
H
R5
2
200
70
40
200
Dept.
Technical reference
Created by
Approved by
Document type
Document status
Title
DWG No.
Rev.
Date of issue
Sheet
1/1

UNIVERSIDADE DO PORTO

Faculdade de Belas Artes e Faculdade de Engenharia

Mestrado em Design Industrial e de Produto

Design Sustentável na Impressão 3D: Reutilização de Resíduos de PLA para o Desenvolvimento de Novos Produtos

Mihaela Sandu

Orientadora | **Professora Doutora Ligia Lopes**

Coorientador | **Professor Doutor Jorge Lino Alves**

U.PORTO
FACULDADE DE BELAS ARTES
UNIVERSIDADE DO PORTO

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO