



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Fernanda Manuela Oliveira Gonçalves

Aplicabilidade de materiais reciclados em
Impressão 3D

Fernanda Manuela Oliveira Gonçalves Aplicabilidade de materiais reciclados em Impressão 3D

UMinho | 2016

janeiro de 2016



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Fernanda Manuela Oliveira Gonçalves

Aplicabilidade de materiais reciclados em
Impressão 3D

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor João Miguel de Amorim Novais da Costa
Nóbrega
Professor Hélder Manuel Teixeira Carvalho

DECLARAÇÃO

Nome: Fernanda Manuela Oliveira Gonçalves

Endereço Eletrónico: fernandagoncalves193@gmail.com

Telefone: 969484504

Número de cartão de cidadão: 13796060

Título da dissertação: Aplicabilidade de materiais reciclados em Impressão 3D

Orientadores: João Miguel de Amorim Novais da Costa Nóbrega; Helder Manuel Teixeira Carvalho

Ano de Conclusão: 2016

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o contributo de algumas pessoas às quais gostaria de expressar os meus agradecimentos.

Aos meus orientadores, os professores Miguel Nóbrega e Hélder Carvalho que sempre estiveram disponíveis para ajudar, aconselhar, e prestaram apoio nas várias etapas do trabalho efetuado.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Polímeros, que me prestaram auxílio na utilização dos diversos equipamentos e um especial agradecimento ao investigador Rui Gomes cujo apoio no processamento de materiais em FDM foi imprescindível.

Aos meus colegas e professores do Departamento de Engenharia de Polímeros que partilharam espaços, tempo e conhecimentos, ajudando das mais diversas formas.

Aos meus familiares e amigos, pelo incentivo e palavras de coragem no decorrer deste trabalho e durante o meu percurso no MIEP.

“Insiste, persiste, mas nunca desistas, pois, um dia tu conquistas.”

Desconhecido

RESUMO

A tecnologia de impressão 3D surgiu inicialmente como instrumento para a produção de protótipos, tendo, no entanto, rapidamente passado a ser utilizada como equipamento de produção. A FDM (*Fused Deposition Modelling*) é uma variante da impressão 3D que permite a produção de objetos sólidos em materiais termoplásticos. As máquinas FDM são pequenas, podendo operar em pequenos espaços como um escritório doméstico. O processo de FDM é caracterizado por uma taxa de produção muito reduzida e por uma qualidade modesta da superfície dos produtos finais. Os materiais utilizados para alimentar as máquinas são em forma de filamento e apresentam um custo relativamente elevado. Este custo poderá ser reduzido se os filamentos forem produzidos com base em materiais reciclados, a partir de embalagens pós-consumo. Futuramente, poderiam inclusive ser integrados sistemas de produção de filamento com base em materiais reciclados como acessório do equipamento de FDM.

Os objetivos desta investigação estão direcionados para a aplicabilidade de materiais reciclados de produtos de uso comum em FDM. Foi efetuada uma comparação das propriedades mecânicas entre peças moldadas por compressão e produzidas em FDM, ambos produzidos à base de materiais reciclados. Para permitir esta comparação foram efetuados estudos envolvendo vários processos: reciclagem mecânica, extrusão de mono filamento, moldação por compressão e produção por FDM. Os materiais resultantes foram caracterizados utilizando técnicas de caracterização mecânica, tais como ensaios de tração, flexão e impacto.

Foram utilizadas para o estudo embalagens de detergentes, champôs e garrafas de PET (*Polietileno Tereftalato*) e HDPE (*High Density Polyethylene*) em forma pura e em diversas misturas. A partir do estudo efetuado verificou-se ser possível aplicar materiais reciclados em FDM, tendo o 100% PET e a mistura (75%PET + 25%HDPE) fornecido os melhores resultados. O material que apresenta melhor qualidade superficial é o PET. Tal como esperado, os materiais moldados por compressão possuem, em geral, melhores propriedades que os materiais produzidos por FDM.

Tendo em conta as propriedades mecânicas limitadas dos materiais resultantes, deve considerar-se os esforços aos quais o produto final irá estar sujeito. Apesar das suas limitações, são materiais passíveis de utilização em diversas aplicações, tais como decorativas, objetos de uso diário – caixas para embalagem, guarda-joias, etc., ou produtos artísticos, entre outros.

ABSTRACT

3D printing technology has emerged initially as a tool for the production of prototypes. However, it quickly evolved as a technology for actual production. FDM (*Fused Deposition Modelling*) is a variant of 3D printing which allows the production of solid objects with thermoplastic materials. FDM machines are small and can operate in small spaces such as a home office. The FDM process is characterized by a very small production rates and a modest surface quality of the final products. The machines are fed by materials in filament shape that are relatively expensive. The cost of these materials may be reduced if they are produced based on recycled post-consumption packages. Furthermore, filament production systems based on recycled materials could in the future be integrated as an accessory for FDM equipment.

This investigation's objectives are directed to the applicability of recycled materials from commonly used products in FDM. A comparison of the mechanical properties was made between parts molded by compression and produced by FDM, both based on recycled materials. In order to achieve the goals of this investigation, studies were conducted involving various processes: mechanical recycling, monofilament extrusion, compression molding and FDM. The resulting materials were characterized using mechanical characterization techniques such as tensile, bending and impact testing.

Packages of detergent, shampoos, and bottles of PET (*Polyethylene Terephthalate*) and HDPE (*High Density Polyethylene*) were used, pure and in various mixtures. It has been found that it is possible to apply recycled materials in FDM, with 100% PET and the mixture (75% PET + 25% HDPE) having provided the best results. The material which shows better surface quality is PET. As expected, the compression molded materials exhibit, in general, better properties than those molded by FDM.

Taking into account the limited mechanical properties of the resulting materials, the mechanical requirements of the final products should be carefully considered. However, the produced materials may be used in decorative applications, daily use objects –packing boxes, jewelry guard, or artistic products, for example.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Prototipagem rápida	1
1.2	Modelação por Deposição de Fundido.....	7
1.3	Massificação da Modelação por Deposição do Fundido	10
1.4	Objetivos	15
1.5	Estrutura da dissertação.....	16
2	MATERIAIS E MÉTODOS	17
2.1	Materiais.....	17
2.2	Recolha e preparação dos materiais	19
2.3	Moldação por Compressão	24
2.4	Extrusão de Filamento	27
2.5	Deposição de Filamento Fundido	30
2.5.1	Equipamento de FDM utilizado.....	30
2.5.2	Descrição dos <i>softwares</i> de controlo	31
2.6	Caracterização Mecânica.....	37
2.6.1	Ensaio de flexão.....	37
2.6.2	Ensaio de tração	41
2.6.3	Ensaio de impacto	45
3	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	47
3.1	Reciclagem Mecânica.....	47
3.2	Secagem dos Materiais	48
3.3	Moldação por Compressão	50
3.4	Extrusão de Filamento.....	53
3.4.1	Apresentação e análise das condições operatórias	53
3.4.2	Problemas no processamento e defeitos do filamento produzido	55

3.5	Deposição de Filamento Fundido	57
3.5.1	Condições operatórias	57
3.5.2	Dificuldades associadas ao processamento por FDM	59
3.5.3	Apresentação e análise dos resultados	62
3.6	Caracterização Mecânica.....	63
3.6.1	Moldação por Compressão	63
3.6.2	Moldação por Compressão <i>vs.</i> FDM	68
4	CONCLUSÕES E PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	79
	Anexo I – Perfis de Temperaturas de Extrusão, Empresa Poliversal.....	83
	Anexo II – Força da mola do durómetro, Fonte: ASTM D 2240 (2005)	84
	Anexo III – Ficha Técnica de PET virgem	85
	Anexo IV – Ficha técnica de HDPE virgem	86
	Anexo V – Especificações da Impressora Prusa i3	87
	Anexo VI – Curvas Tensão – Deformação obtidas a partir de ensaios de Flexão	88
	Anexo VII – Curvas Tensão – Deformação obtidas a partir de ensaios de Tração	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo do equipamento de SLA [8]	3
Figura 2 – Esquema representativo do equipamento de SLS [9]	4
Figura 3 - Esquema representativo do equipamento de LOM [10]	5
Figura 4 - Esquema representativo do equipamento de FDM [5]	6
Figura 5 - Exemplo de Aplicação: impressão de armas com capacidade de disparo [17]	9
Figura 6 - - Exemplo de aplicação: Impressão de parte do rosto [19].....	9
Figura 7 - Aplicações de Impressão 3D [6]	11
Figura 8 - Mini Extrusoras Comerciais: FILABOT (873 €) [31], STROODER (345 €) [32] e FILASTRUER (276 €) [33]	12
Figura 9 - Impressora 3D EKOCYCLE CUBE [22].....	13
Figura 10 - Design do protótipo da Impressora 3D Re-Printer [25]	14
Figura 11 - Etapas do Processo de Reciclagem Mecânica. Adaptado de [37].....	20
Figura 12 - Códigos de Identificação de Plásticos [38]	20
Figura 13 - Tipos de embalagens recolhidas: a) HDPE e b) PET	21
Figura 14 - Procedimentos de Trituração de Embalagens: a) Redução do volume; b) Trituração	22
Figura 15 - Secagem de HDPE em Estufa	23
Figura 16 - Prensa G261/X George E. Moore & Son	25
Figura 17 - Esquema representativo da linha de extrusão utilizada [42]: (1) Tremonha; (2) Extrusora; (3) Fieira; (4) Sistema de refrigeração a ar; (5) Rolos de puxo.	27
Figura 18 - Etapas no processo de Extrusão de Filamento: a) Definição das condições operatórias; b) Extrusão de Filamento; c) Arrefecimento em câmara-de-ar; d) Estiramento	29
Figura 19 - Impressora Prusa i3 e esquema em corte da cabeça de impressão [4]	30
Figura 20 - Ambiente de trabalho do software Slic3r	32
Figura 21 - Ambiente de trabalho do software Pronterface	32
Figura 22 - Dimensões nominais dos provetes de tração impressos.....	33
Figura 23 - Dimensões nominais dos provetes de impacto e flexão impressos	33
Figura 24 - Ensaio de flexão a três pontos [44]	37
Figura 25 - Máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON 4505.....	39

Figura 26 - Metodologia de corte de provetes de impacto a partir de placas moldadas por compressão.....	40
Figura 27 - Leitura de valores de σ_{ced} , ϵ_{ced} e declive em gráficos força-deslocamento e tensão-deformação obtidos em ensaios de flexão	41
Figura 28 - Alongamento de provetes em ensaios de tração [43]	41
Figura 29 - Máquina universal de ensaios mecânicos ZWICK/ROELL Z005	42
Figura 30 - Corte de provetes de tração a partir de placas moldadas por compressão	43
Figura 31 – Leitura de valores de σ_{ced} , ϵ_{ced} e E em gráficos tensão-deformação obtidos em ensaios de tração	44
Figura 32 - Pendulo de impacto CEAST	45
Figura 33 – Sacos em HDPE após trituração.....	47
Figura 34 - Resultado de Trituração de PET, granulado com elevada variação de dimensões....	48
Figura 35 - Percentagem de massa perdida durante o processo de secagem em função do tempo	49
Figura 36 - Presença de bolhas de ar em filamento de PET: a) não sujeito a pré secagem; b) sujeito a pré secagem.....	50
Figura 37 – Material não fundido presente nas extremidades de uma Placa de HDPE.....	51
Figura 38 - Placa de PET com presença de espaços vazios e fissuras com origem na desmoldagem.....	52
Figura 39 - Placa de P75 moldada com qualidade.....	52
Figura 40 - Alimentação da Extrusora para produção de filamento de PET devido ao baixo peso do triturado	56
Figura 41 - Defeitos em Extrusão de Filamento (1.Mistura 1, 2.Mistura 2, 3.Mistura 3, 4.HDPE, 5.PET).....	56
Figura 42 – Deposição do filamento e orientação entre camadas nas impressões de FDM.....	57
Figura 43 - Solução para aperto por parte do sistema de engrenagem do filamento no equipamento de FDM	60
Figura 44 – Deformação do filamento pelo sistema de engrenagens: a) filamento flexível; b) filamento moído.....	61
Figura 45 - Dificuldades no processo de Impressão 3D de vários materiais.....	62
Figura 46 - Provetes produzidos em FDM	62

Figura 47 - Resultados de tensão e deformação de cedência em flexão dos materiais moldados por compressão.....	63
Figura 48 - Módulo de Elasticidade obtido em flexão dos materiais moldados por compressão	64
Figura 49 - Resultados de tensão e deformação de cedência em ensaios de tração de materiais moldados por compressão.....	65
Figura 50 - Módulo de Elasticidade em ensaios de tração de materiais moldados por compressão	66
Figura 51 - Energia absorvida por unidade de área dos materiais moldados por compressão ...	67
Figura 52 - Comparação da tensão de cedência obtida em ensaios de flexão dos produtos utilizados em MC e FDM.....	68
Figura 53 - - Comparação da deformação de cedência obtida em ensaios de flexão dos produtos utilizados em MC e FDM.....	69
Figura 54 - Comparação do módulo de elasticidade obtido em ensaios de flexão dos produtos utilizados em MC e FDM.....	69
Figura 55 - Comparação da tensão de cedência obtida em ensaios de tração dos produtos utilizados em MC e FDM.....	70
Figura 56 - Comparação da deformação de cedência obtida em ensaios de tração dos produtos utilizados em MC e FDM.....	71
Figura 57 - Comparação do módulo de elasticidade obtido em ensaios de tração dos materiais moldados por compressão e FDM.....	71
Figura 58 - Comparação da energia absorvida por m ² obtida em ensaios de impacto dos produtos utilizados em MC e FDM	72
Figura 63 - Curvas tensão-deformação da mistura P75 moldada por compressão	88
Figura 64 - Curvas tensão-deformação da mistura P75 utilizada na produção em FDM	88
Figura 65 - Curvas tensão-deformação de PET moldado por compressão.....	89
Figura 66 - Curvas tensão-deformação de PET utilizado na produção em FDM.....	89
Figura 59 - Curvas tensão-deformação da mistura P75 moldada por compressão	90
Figura 60 - Curvas tensão-deformação da mistura P75 utilizada na produção em FDM	90
Figura 61 - Curvas tensão-deformação de PET moldado por compressão.....	91
Figura 62 - Curvas tensão-deformação de PET utilizado na produção em FDM.....	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais utilizados em FDM e moldação por compressão	18
Tabela 2 – Variáveis Operatórias do Processo de FDM	34
Tabela 3 - Especificação das variáveis operatórias constantes em FDM	35
Tabela 4 – Parâmetros dos ensaios de flexão.....	39
Tabela 5 - Condições operatórias de moldação por compressão	51
Tabela 6 - Condições operatórias utilizadas para a produção de filamento reciclado.....	53
Tabela 7 - Condições operatórias para impressão de provetes de tração.....	58
Tabela 8 - Condições operatórias para impressão de provetes de impacto e flexão.....	58
Tabela 9 - Especificações da impressora Prusa i3	87

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

3D	Tridimensional
3DP	Impressão 3D (do inglês <i>3D printing</i>)
ϵ_{ced}	Deformação de Cedência
ϵ_{rot}	Deformação de Rótura
σ_{ced}	Tensão de Cedência
σ_f	Tensão de Flexão
σ_{rot}	Tensão de Rótura
ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
AM	Manufatura Aditiva (do inglês <i>Additive Manufacturing</i>)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	Desenho Assistido por Computador (do inglês <i>Computer Aided Design</i>)
DIY	Faça você mesmo (do inglês <i>Do It Yourself</i>)
DEP	Departamento de Engenharia de Polímeros
DMF	Dimetilformamida
E	Módulo de Elasticidade
EIE	Estação Internacional Espacial
FDM	Modelação por Deposição de Fundido (do inglês <i>Fused Deposition Modeling</i>)
HDPE	Polietileno de Alta Densidade (do inglês <i>High Density Polyethylene</i>)
LDPE	Polietileno de Baixa Densidade (do inglês <i>Low Density Polyethylene</i>)
LOM	Manufatura de objetos laminados (do inglês <i>Laminated Object Manufacturing</i>)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NP	Norma Portuguesa
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PET	Polietileno Tereftalato
PLA	Poli ácido láctico
PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoretileno ou <i>Teflon</i>

RP	Prototipagem Rápida (do inglês <i>Rapid Prototyping</i>)
RSU's	Resíduos Sólidos Urbanos
SLA	Estereolitografia (do inglês <i>Stereolithography</i>)
SLC	Ficheiro em formato de fatias (do inglês <i>SLiCe file format</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a laser (do inglês <i>Selective Laser Sintering</i>)
STL	Ficheiro em formato de Estereolitografia (do inglês <i>STereoLithography file format</i>)
UV	Ultra Violeta

1 INTRODUÇÃO

1.1 Prototipagem rápida

Prototipagem Rápida (RP), Manufatura Aditiva (AM) ou, atualmente denominada, impressão 3D (3DP) é uma tecnologia avançada e automatizada de produção de modelos físicos a partir de um modelo computacional tridimensional em CAD. Através do modelo computacional é feita uma divisão do objeto em fatias finas (de espessura definida pelo operador do equipamento) e posteriormente produzidas pelo equipamento de Impressão 3D, que constrói o objeto camada a camada. Para além da espessura das camadas, o operador pode controlar ainda muitas outras variáveis, tais como, temperaturas e velocidade de impressão. As tecnologias de Impressão 3D revolucionaram o mercado da prototipagem, sendo já possível, para além da produção de protótipos conceptuais, detalhados e funcionais, a produção de produtos finais em séries limitadas.

As técnicas de Impressão 3D permitem a visualização, verificação, iteração, otimização e fabrico de peças ao longo do processo de conceção [2-4]. Até há pouco tempo esta técnica tratava-se de um processo moroso, contudo, devido ao progresso tecnológico das técnicas de Impressão 3D alcançaram-se reduções do tempo de ciclo bem como a possibilidade de construção de peças com geometria complexa, incorporando diferentes materiais e cores. Porém, as propriedades mecânicas e precisão dimensional dos produtos finais ainda são limitadas [7].

As técnicas de impressão 3D proporcionaram ao mercado vantagens que outras técnicas de moldação convencionais seriam incapazes de disponibilizar, tais como:

- Necessidades e exigências individuais do cliente foram alcançadas através da capacidade de personalização. Esta permite a produção de séries numerosas, em que cada produto está de acordo com especificações do cliente final e sem qualquer tipo de custo adicional associado [1-4];
- Capacidade de obter geometria complexa, que permitiu a aplicação da tecnologia de impressão 3D em áreas diversificadas, tais como: joalheria, decoração, aeronáutica. Com

esta técnica de produção, foram eliminados os processos de montagem de peças, necessários quando se utilizam outras técnicas de moldação, reduzindo o prazo de entrega bem como os custos associados [1-7];

- Ausência de ferramentas auxiliares no processo favoreceu para além da redução de custos do equipamento, a facilidade de manuseamento [2-5];

- Responder melhor aos requisitos de sustentabilidade, pois os resíduos do processo são reduzidos [2-3, 5].

Todas as técnicas de impressão 3D têm 4 fases comuns: modelação CAD, pré-processamento no *software* de prototipagem rápida, construção da peça e acabamento da peça [2-7]. De entre as várias técnicas de Impressão 3D, iremos distinguir quatro principais:

- Estereolitografia (SLA – do inglês *Stereolithography*)

A técnica de SLA permite a construção de modelos físicos através da adição de sucessiva de camadas que resultam da solidificação de uma resina líquida que sob a ação de um feixe laser que a polimeriza e solidifica.

Como podemos observar na Figura 1, o equipamento consiste num tanque que contém fotopolímero líquido onde se encontra acoplado um laser Ultra Violeta (UV), de baixa potência, que desenha a primeira camada sobre a plataforma de construção situada ligeiramente abaixo da superfície do fotopolímero líquido. A passagem do laser nos locais definidos pelo *software* de controlo, solidifica a secção transversal do modelo, deixando a área exterior no estado líquido. A plataforma baixa e a camada solidificada é mergulhada em fotopolímero líquido, passando o laser a construir, do mesmo modo, a segunda camada sobre a anterior. O processo é repetido até ao modelo físico estar completo. De seguida o modelo é retirado do tanque e o fotopolímero líquido excedente é limpo, os suportes são removidos e o modelo é inserido numa câmara UV para terminar o processo de cura [3,8].

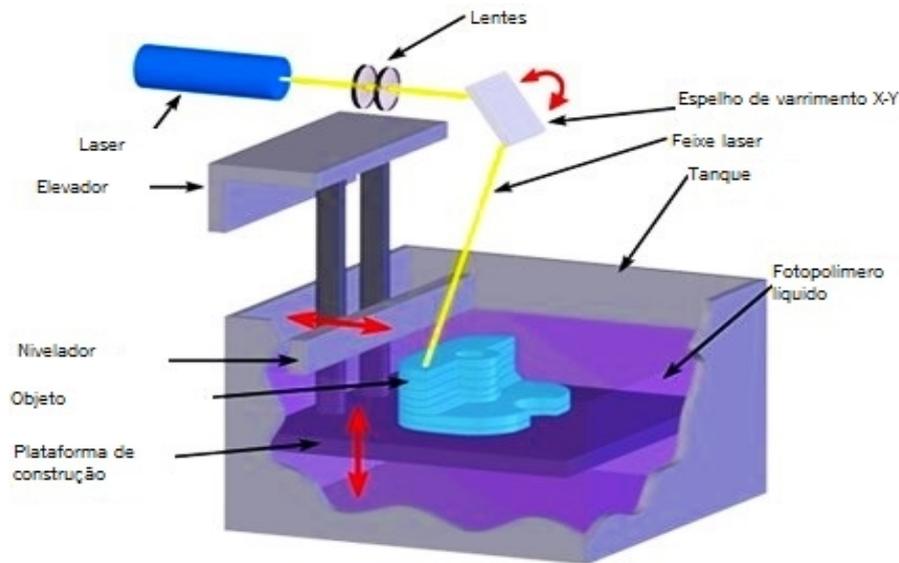


Figura 1 - Esquema representativo do equipamento de SLA [8]

Os modelos físicos obtidos com este processo possuem um aspeto de plástico translúcido, com uma elevada precisão, rigor dimensional e elevado grau de detalhe e pormenor [3,8]. Os materiais utilizados são dispendiosos, sendo a principal desvantagem desta técnica.

- Sinterização de Laser Seletiva (SLS – do inglês *Selective Laser Sintering*)

A técnica de SLS assemelha-se bastante à de SLA descrita anteriormente. A principal diferença entre estas é que o material utilizado para produção dos modelos físicos na técnica de SLS é um material polimérico em forma de grânulos de dimensão reduzida (em pó).

Nesta técnica, a matéria-prima é armazenada nos alimentadores localizados nas extremidades da área de construção do equipamento de SLS. O pó é elevado nos alimentadores e espalhado por auxílio de um rolo, sendo processado em ambiente inerte e termicamente controlado. O material funde devido à energia fornecida por um laser de dióxido de carbono de elevada potência, sendo sinterizado em cada camada uma secção transversal do modelo 3D. O modelo é sustentado pelo material envolvente não sinterizado, não sendo por isso necessária a criação de suportes. Após arrefecimento o material é sujeito a uma operação de limpeza. O modelo físico pode ser construído em qualquer tipo de material granulado cuja sua gama de temperaturas de processamento esteja dentro do campo de temperaturas abrangido pelo equipamento de SLS [3,9]. Na Figura 2 apresenta-se um esquema do equipamento de SLS.

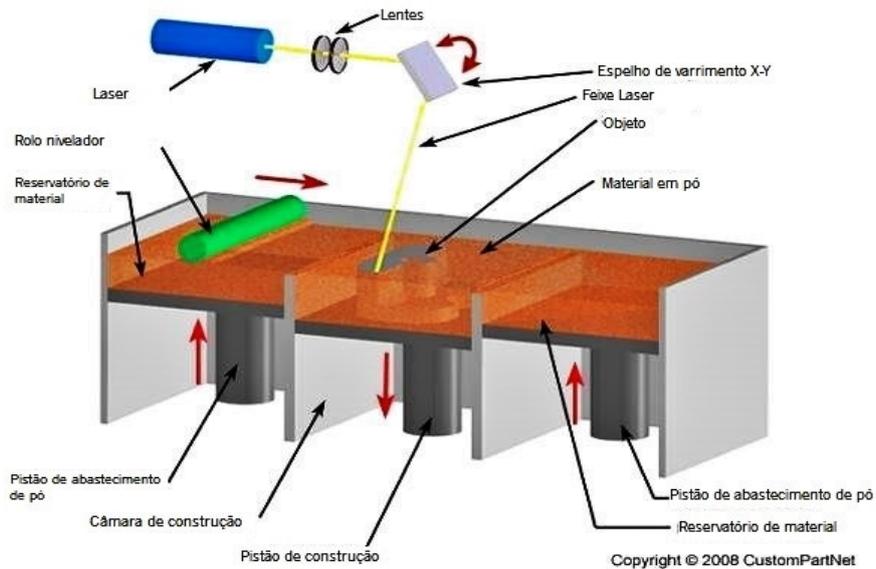


Figura 2 – Esquema representativo do equipamento de SLS [9]

Neste caso, podem ser utilizados para além de polímeros, materiais como cerâmicos e metais, sendo neste caso necessário impregná-los com resina [3,9]. O custo do equipamento e materiais é elevado e para além disso, caso sejam utilizados cerâmicos ou metais é necessária uma sinterização posterior para assegurar resistência mecânica adequada.

- Manufatura de Objetos Laminados (LOM—do inglês *Laminated Object Manufacturing*)

A técnica de LOM permite a criação de modelos físicos através da sobreposição de folhas de papel cuja superfície inferior possui uma cola térmica.

O modelo físico é obtido pela colocação sucessiva de folhas de papel onde cada folha corresponde a uma camada do modelo. O rolo de papel é desenrolado e aquecido a cerca de 300°C sobre a camada anterior ficando a colagem consolidada. De seguida passa um laser eletromecânico de 25 – 50 W que com o auxílio de espelhos efetua o corte do contorno da secção transversal na folha. Após o corte, a plataforma de construção baixa e é desenrolado mais material. Seguidamente a plataforma sobe uma altura ligeiramente inferior à anterior, o rolo promove a colagem e o laser corta a última camada. O processo é repetido até à construção final do modelo. Durante a construção o material excedente fornece um excelente suporte para as paredes de pequena espessura [3,10]. Na Figura 3 apresenta-se um esquema do equipamento de LOM.

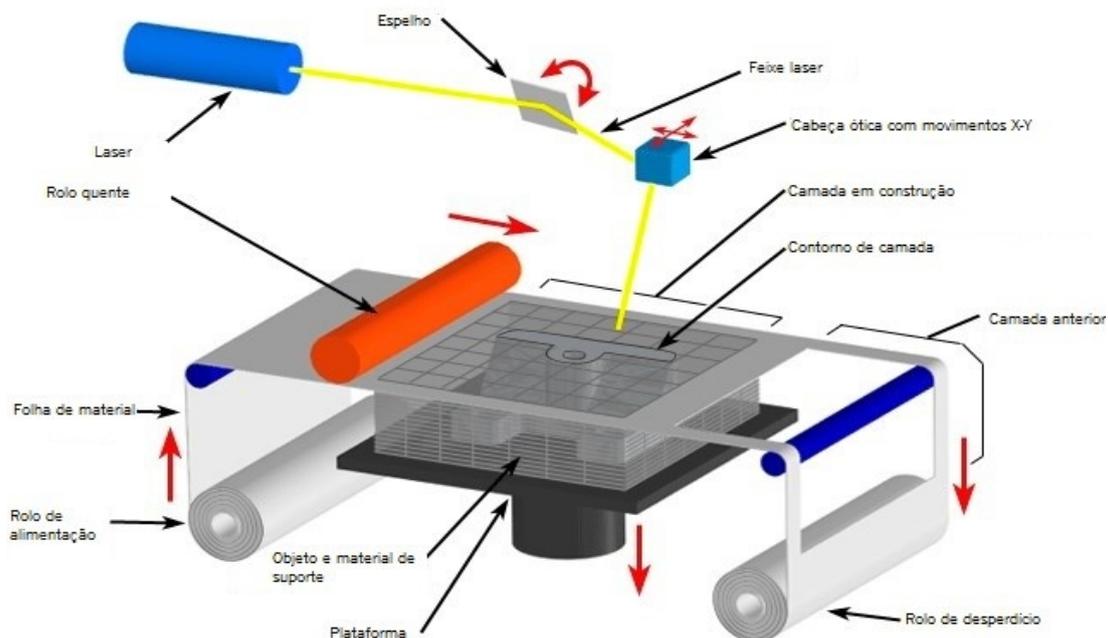


Figura 3 - Esquema representativo do equipamento de LOM [10]

Os protótipos produzidos com esta técnica necessitam de ser impermeabilizados com tintas, vernizes ou outros produtos utilizados no acabamento de madeiras para permitir o aumento da resistência mecânica e estabilidade dimensional dos mesmos ao longo do tempo, não sendo por isso adequados para produtos de teste ou produtos finais. O facto de ser utilizado papel como matéria-prima tem a vantagem de ser relativamente mais barato em relação às outras técnicas, no entanto, o nível de desperdício é superior.

- Modelação por Deposição de Fundido (FDM – do inglês *Fused Deposition Modeling*).

A técnica de FDM utiliza para a construção de modelos físicos filamento de material termoplástico, que é aquecido, fundido e, posteriormente extrudido através de uma microfieira que se movimenta no plano XY, geralmente. O material sob a forma de filamento é alimentado por um sistema de puxo entre uma roda dentada/estriada e uma roldana, que o empurra até a microfieira de extrusão. A microfieira é aquecida por resistências de aquecimento, que mantêm o material a uma temperatura superior ao ponto de fusão, para que aquele escoe através do bico e adira à superfície de construção. Na Figura 4 apresenta-se um esquema do equipamento.

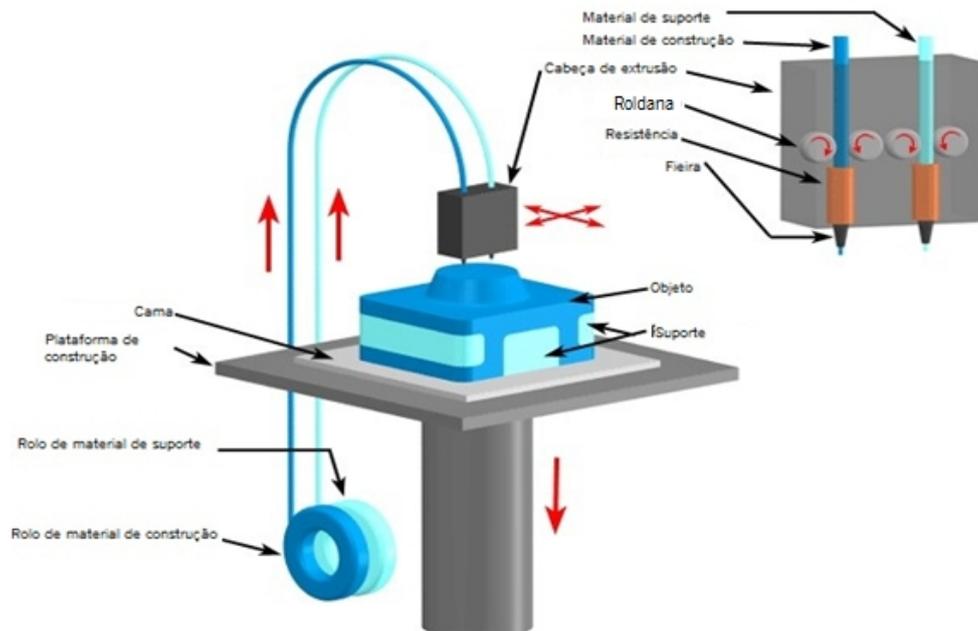


Figura 4 - Esquema representativo do equipamento de FDM [5]

A cabeça de extrusão extrude o material fundido e deposita-o sobre a plataforma de construção, de temperatura regulável, para formar a primeira camada. A plataforma desce, ou a cabeça de extrusão sobe (depende do tipo de equipamento de FDM), e é depositada a segunda camada sobre a primeira. O material arrefece e solidifica rapidamente, após a extrusão sobre a camada anterior.

Quando a geometria da peça a produzir não assegura manutenção da forma durante a sequência de impressão, é possível extrudir um material adicional de suporte, através de uma segunda cabeça de extrusão, usando um material menos resistente, ou solúvel em água, que pode ser removido, por desgaste/abrasão ou dissolução [2-3,5]. Esta segunda cabeça de extrusão pode também extrudir material funcional, podendo assim construir através de FDM modelos físicos que incorporem diferentes materiais e/ou cores [2, 4].

Como materiais para FDM são atualmente utilizados elastômeros, ceras, Copolímero de Acrilnitrilo, Butadieno e Estireno (ABS) ou Ácido Poliláctico (PLA), que permitem obter peças com boa resistência mecânica. Estes materiais têm vindo a ser alargados, sendo recentemente também Polietileno (PE) e Policarbonato (PC) que permitem o alcance de outras propriedades necessárias aos objetos produzidos em FDM, que não eram alcançadas com os materiais anteriormente referidos [11].

Apesar dos grandes desenvolvimentos da técnica de FDM realizados no mercado de aplicações de médio/elevado desempenho, a cadência de produção, dificuldade de manuseamento dos *softwares* CAD e elevado custo dos materiais continuavam a ser um entrave ao crescimento do mercado da tecnologia de FDM [2-3, 12-14].

Neste estudo a técnica abordada será a FDM, pois permite verificar a aplicabilidade de filamento produzido a partir de produtos em materiais termoplásticos reciclados. Tendo em o elevado custo dos materiais disponíveis no mercado, esta poderá ser a solução para a redução de custos que tecnologia envolve a longo prazo. Esta técnica é a que apresenta maior potencial, quando comparada com as outras técnicas de moldação de polímeros convencionais devido à utilização de filamento termoplástico e, por este motivo, irá ser mais detalhada.

1.2 Modelação por Deposição de Fundido

No processo de FDM, a precisão, qualidade superficial, custo e tempo de produção da peça depende de vários aspetos, sendo o seu sucesso muito dependente da experiência do projetista. Os principais fatores que influenciam a qualidade das peças produzidas por FDM são:

1. O modelo CAD [4];
2. O posicionamento espacial do modelo STL [2];
3. Seleção da espessura das camadas [2];
4. Otimização dos parâmetros de impressão [4];
5. Seleção da dimensão da fiação [2];
6. Seleção do material [2];
7. Otimização do tempo de construção através da definição da orientação, espessura e velocidade de deposição das camadas [4];

Para além destes aspetos de definição complexa, o projetista pode ainda ter dificuldades a outros níveis, tais como: design de produto, planeamento de processo, fixação entre camadas e/ou componentes da peça e inspeção da engenharia de valor [2].

Em função do exposto, o sucesso da produção de peças através da técnica de FDM está sujeito a vários fatores, sobretudo à seleção do material adequado e respetiva e à otimização dos parâmetros de impressão. A maior desvantagem associada ao processo é que todo ele se trata de uma iteração manual, isto é, um processo de tentativa-erro, pelo que se torna um processo muito moroso e, normalmente, oneroso.

Contudo, um projeto de FDM corretamente implementado pode tornar-se vantajoso através de:

1. Maior nível de produtividade e menor utilização de ferramentas auxiliares [3];
2. Redução do tempo de design e planeamento [2];
3. Redução de desperdício de material e do tempo de espera [3];
4. Maior precisão e qualidade dos produtos finais [3];
5. Flexibilidade para reagir mais rapidamente a encomendas e clientes [2];
6. Melhor flexibilidade e controlo da informação a todos os níveis [2];

Os desenvolvimentos mais recentes da técnica de FDM permitiu alargar o seu âmbito para aplicações de médio/alto desempenho [1,3,6] em áreas de elevado risco, tais como:

- i. FDM no Espaço – a impressão de peças 3D no espaço já é possível devido ao desenvolvimento e envio, pela NASA, da primeira Impressora 3D Gravidade Zero para a Estação Internacional Espacial (EIE). Devido à distância entre a EIE e a Terra foi preciso encontrar uma forma de obter as peças necessárias para manutenção ou substituição sem que tal implicasse o transporte prévio de tais peças [15].
- ii. Impressão de Armas – em virtude da elevada acessibilidade das impressoras 3D, qualquer pessoa pode construir a sua arma sem qualquer tipo de controlo de entidades competentes [16]. O exército dos Estados Unidos da América em parceria com a NASA e a Universidade de *Alabama Huntsville* está a desenvolver a produção de armas em impressão 3D, não se importando somente com a redução de custos, como também a produção expedita e teste de novos protótipos [16].



Figura 5 - Exemplo de Aplicação: impressão de armas com capacidade de disparo [17]

- iii. Impressão de Próteses – a produção de próteses em impressoras 3D tem sido útil por proporcionar aos utentes os meios de recuperação a custos reduzidos [18-20]. Para além disso, a impressão de órgãos com características semelhantes às do paciente tem proporcionado às equipas médicas uma maior segurança nas cirurgias e menor invasão, pois o ensaio prévio com um modelo idêntico ao que será intervencionado minimiza o impacto da cirurgia [18-20]. A impressão 3D de implantes, tem ajudado equipas médicas a restaurar a funcionalidade dos ossos e vértebras dos pacientes, aliviar dores crónicas e reduzir cicatrizes desfigurantes [18-20].

Atualmente a FDM deixou de ser uma tecnologia utilizada unicamente pela indústria de produção de pequenas séries de produtos e protótipos, sendo também utilizada pela comunidade em geral, que iniciou a produção de pequenos objetos do dia-a-dia nas suas próprias casas. A criação plataformas *online* com projetos DIY gratuitos permitiu levantar barreiras em relação ao funcionamento dos *softwares* CAD. Estas plataformas possuem os mais diversos projetos CAD que podem ser utilizados por indivíduos que não possuem os conhecimentos necessários para desenvolver o seu projeto pessoal e têm permitido banalizar ainda mais a impressão 3D.



Figura 6 - - Exemplo de aplicação: Impressão de parte do rosto [19]

Com esta expansão surgiram vários modelos de impressoras em FDM, cujo seu tamanho, qualidade de impressão e obviamente preço variam [6,21-23]. Prevê-se que a FDM deixe em breve de ser definitivamente um equipamento tecnológico industrial e passe a ser um produto ao alcance do utilizador comum [6,12-14]. A escolha da impressora depende do cliente, do tamanho das peças que deseja produzir, da qualidade com que as pretende produzir e claro do investimento que se disponibiliza a fazer.

1.3 Massificação da Modelação por Deposição do Fundido

A FDM tem vindo a apresentar um crescimento significativo. O custo dos equipamentos é variado, contudo, o custo elevado dos materiais de impressão tem levado ao descontentamento elevado dos utilizadores [6]. Como foi descrito anteriormente, para a produção correta de uma peça existe um longo processo de tentativa-erro o que leva a um dispêndio elevado de material antes da produção final da peça. Este enquadramento tem motivado a procura de materiais menos dispendiosos para FDM, nomeadamente a utilização de materiais reciclados.

A ideia de incorporação de materiais reciclados em filamento para impressão 3D surgiu inicialmente num projeto de *Will.I.Am* [22,24] com a empresa *Coca Cola*. Esta ideia de incorporação de materiais reciclados teve uma elevada recetividade, dado que com FDM em geral não são produzidas peças cujo desempenho mecânico seja crucial, para além disso, será mais uma forma de aplicar o excedente de alguns materiais plásticos reciclados que se encontram nos centros de reciclagem [12-14].

O facto é que a FDM tornou-se uma espécie de brinquedo para muitos entusiastas, capaz de produzir todo o tipo de peças [6]. A redução do tamanho dos equipamentos levou a FDM para o uso privado [6, 14]. Num inquérito a 87 utilizadores não-profissionais de impressoras 3D FDM, questionados sobre os diversos usos que davam às suas impressoras, os utilizadores indicaram as respostas apresentadas na Figura 7. Destes resultados convém destacar a elevada percentagem associada aos produtos com reduzida exigência no respeitante ao comportamento mecânico das peças produzidas, como são os casos dos “objetos decorativos” e “reproduções em pequena escala”.



Figura 7 - Aplicações de Impressão 3D [6]

A massificação da FDM tem sido notável, sendo hoje possível adquirir impressoras de FDM em grandes superfícies comerciais dedicadas a produtos eletrônicos [24-26]. Para além disso, em alguns países, como é o caso dos Estados Unidos, há a possibilidade de alugar uma impressora 3D a baixo custo, isto é \$50 a \$100 (43 a 86 euros) por semana [21], aproximando deste modo aqueles que não possuem capacidade monetária para adquirir uma Impressora da técnica de FDM.

Modelação por Deposição de Fundido com Materiais Reciclados

Tendo em conta que as expectativas da União Europeia, no respeitante ao cumprimento dos níveis de reciclagem estabelecidos, resulta um problema adicional relativo aos produtos plásticos em fim de vida: o que fazer com tanto material reciclado? O facto é de que nos últimos anos o peso de material reciclado tem aumentado e as aplicações onde este é inserido não [27]. A maior parte das aplicações onde é utilizada matéria-prima reciclada, só utilizam uma pequena percentagem de reciclado, 10% a 20%, sendo o restante matéria-prima virgem. Isto acontece devido ao controlo dos requisitos do produto final tendo como resultado um excedente de matéria-prima reciclada nos centros de reciclagem e tratamento de materiais plásticos. A aplicação destes produtos em fim de vida para produção de filamento para FDM pode mudar esta situação pelo que é necessário sobretudo verificar se os materiais possuem aplicabilidade em FDM e estudar as suas propriedades mecânicas quando não são misturados com matéria-prima virgem ou aditivados.

A ideia da produção por parte do utilizador de FDM dos seus produtos em casa veio despoletar a expansão de outros mercados. Sendo a produção por FDM um processo tentativa-e-erro, o desperdício de material torna-o dispendioso dado o elevado custo da matéria-prima. Para os materiais tipicamente utilizados, como é o caso de PLA e ABS, o custo de 500 gramas de filamento ronda o valor de 40 € [28-30].

Para combater este entrave à expansão do mercado da FDM foram desenvolvidas pequenas tecnologias com base nas extrusoras de filamento industriais. Estas mini extrusoras têm como objetivo a produção de filamento, por parte do próprio utilizador de FDM, a partir das embalagens em fim de vida que iriam para o centro de reciclagem ou de materiais virgens. Existem vários modelos de mini extrusoras e como tal existem também vários preços que dependem sobretudo da potência das mesmas. Na Figura 8 apresentam-se alguns modelos comerciais destes equipamentos bem como o preço associado às mesmas.

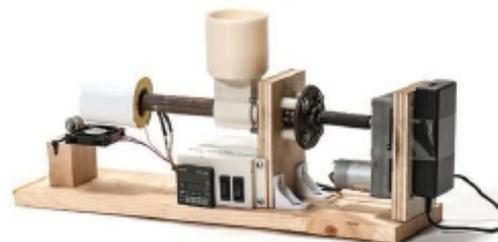


Figura 8 - Mini Extrusoras Comerciais: FILABOT (873 €) [31], STROODER (345 €) [32] e FILASTRUDER (276 €) [33]

Contudo, a produção de filamento por parte do utilizador de FDM acarreta dificuldades adicionais. Apesar de extensa a lista de materiais poliméricos que pode ser utilizada em impressão 3D [11], os equipamentos de FDM estão sobretudo preparados para a impressão de materiais amorfos. A utilização deste tipo de materiais deve-se ao facto de existir uma melhor adesão à plataforma de construção e entre as camadas com polímeros amorfos do que no caso dos polímeros semi-cristalinos. Para além disso, outro problema associado à utilização de materiais reciclados é o seu comportamento reológico. Para além de possíveis contaminações, cada material está reologicamente preparado para o tipo de processamento a que foi submetido inicialmente (injeção, extrusão, etc.). Deste modo, é difícil prever o seu comportamento no momento da impressão, o que poderá prolongar o processo de iterações manuais para identificar as melhores condições de impressão [12, 14].

A empresa Coca-Cola juntamente com o empresário Will.i.am iniciaram um projeto de sucesso onde juntariam tecnologia de FDM e a reciclagem, ou seja, a empresa criou uma impressora própria para trabalhar com filamentos com incorporação de uma percentagem de material reciclado proveniente de garrafas de Coca-Cola [22, 24].



Figura 9 - Impressora 3D EKOCYCLE CUBE [22]

Implementada a ideia ecológica é necessário analisar os custos da mesma. A impressora terá um custo de 1139 € mais cada cartucho de filamento que o cliente desejar comprar. Cada cartucho de filamento de 500 g (gramas) possui um custo de 40 € o que significa um investimento inicial mínimo de 1179 € [24]. Este custo é relativamente elevado quando comparado com o custo de outras impressoras *open-source*. Para além do custo elevado, o filamento, que utiliza apenas 3 garrafas de PET recicladas para a produção de 500 g de material (aproximadamente 25% da massa do material é reciclado) [24], tem que ser distribuído pela empresa devido aos encaixes próprios dos cartuchos na impressora. Deste modo, a vertente económica está um pouco aquém da expectativa, pois apesar da incorporação de material reciclado, que deveria baixar o custo de compra de matéria-prima para produção do filamento, o custo do filamento continua elevado.

Mais recentemente, um grupo de designers propuseram um conceito de impressora 3D para materiais reciclados que incorpora um sistema de reciclagem. Neste equipamento efetuar-se-ia a produção do filamento com base em material 100% reciclado e a impressão 3D [23,34-35]. A impressora teria no seu interior um sistema de trituração próprio para sacos e garrafas em materiais termoplásticos. Estima-se ainda que o custo do equipamento seja próximo ao da EKOCYCLE CUBE, cerca de 1200 €, sendo que o seu custo final será inferior pois não existirá qualquer custo em material por parte do utilizador [23].



Figura 10 - Design do protótipo da Impressora 3D Re-Printer [25]

Adicionalmente, estas abordagens usufruem de todas as vantagens associadas à reciclagem convencional, reduzindo o consumo de matérias-primas virgens.

1.4 Objetivos

Dados os recentes desenvolvimentos tecnológicos nas tecnologias de FDM e a preocupação financeira relativa ao custo dos materiais, este estudo tem como principal objetivo avaliar detalhadamente a possibilidade de aplicar em FDM materiais reciclados, com origem em produtos de uso comum. O estudo deverá cobrir diversas fases do processo, desde a recolha de embalagens em fim de vida e respetiva reciclagem até à produção de peças por FDM. Deste modo, para o estudo serão analisadas as etapas da reciclagem mecânica, extrusão de filamento e impressão em FDM dos materiais reciclados.

De modo a avaliar comparativamente a qualidade das peças impressas, o estudo integra também a produção e avaliação de produtos moldados por compressão com materiais igualmente reciclados. Foi escolhida a tecnologia de moldação por compressão dado nesta técnica de moldação os produtos moldados serem maciços, contrariamente aos produtos obtidos por FDM que apresentam vazios e limitações na soldadura do material entre as diferentes camadas. Deste modo, considerando também os ciclos térmicos ao qual o material impresso é sujeito, pretende-se avaliar a degradação das propriedades mecânicas dos produtos impressos relativamente aos produtos moldados por compressão.

Deste modo, este estudo envolverá as seguintes etapas:

1. Recolha e reciclagem mecânica de produtos de uso comum em polímeros termoplásticos;
2. Produção de Filamento reciclado para FDM;
3. Produção de peças (provetes) por FDM;
4. Produção de peças (provetes) por moldação por compressão;
5. Caracterização mecânica e superficial dos provetes produzidos;
6. Análise e discussão dos resultados obtidos.

Através das conclusões do estudo, que acompanha o processo desde a recolha de embalagens até à produção final de peças em FDM com materiais reciclados, espera-se poder contribuir para o aumento do potencial da técnica e para a ampliação da gama de materiais usados em FDM, visando a redução do custo associado à aquisição de materiais.

1.5 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma introdução à dissertação, como foco na descrição da técnica de FDM, estado de arte, objetivos e a estrutura da dissertação. Segue-se, no Capítulo 2, a descrição dos materiais e métodos (produção e caracterização) utilizados no âmbito dos estudos realizados. No Capítulo 3, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos. O trabalho finaliza com as principais conclusões obtidas e as propostas para trabalhos futuros, no Capítulo 4.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No decorrer deste capítulo irão ser descritos os métodos e materiais (produção e caracterização) utilizados no âmbito do estudo realizado. Inicialmente irão ser descritos os materiais utilizados, a sua origem e respetivo motivo pela sua escolha, bem como as características térmicas mais relevantes para o estudo e os processos a que foram sujeitos antes do processamento. Nas subsecções que se seguem irão ser descritas as técnicas de processamento utilizadas: reciclagem mecânica, extrusão de filamento, moldação por compressão e impressão 3D, respetivamente. Também o procedimento experimental adotado e dos equipamentos utilizados irão ser descritos. Por fim, irão ser abordados os métodos de caracterização mecânica utilizados: ensaios de tração, flexão e impacto, respetivamente. Cada método de caracterização irá ser descrito, bem como os procedimentos experimentais utilizados nos ensaios e a respetivo método de preparação das amostras.

2.1 Materiais

Tendo por base o público-alvo da utilização de materiais reciclados na produção de peças por FDM, selecionaram-se os materiais de embalagens mais utilizadas pelo cidadão comum. Nesta classe de produtos, os materiais são predominantemente o Polietileno Tereftalato (PET), aplicado na produção de garrafas de água, sumos ou embalagens de champô, Polietileno de Alta densidade (HDPE), vulgarmente encontrado em embalagens de produtos de higiene, detergentes e garrafas, Polietileno de Baixa Densidade (LDPE), utilizado na produção de sacos e filmes, e em poucos casos Polipropileno (PP), utilizado na produção de caixas de CD's e tampas de produtos de higiene. Os produtos recolhidos foram apenas os de PET e HDPE, pois são encontrados em grande quantidade. Foram excluídos da recolha de produtos para reciclagem, os sacos plásticos, geralmente produzidos em LDPE ou HDPE, pois, para além da tendência a diminuir em quantidade no mercado com o recente enquadramento legal, estes são em geral reutilizados e como última utilização servem sempre para carregar o lixo doméstico para o contentor.

Assim, tendo em conta os materiais disponíveis, PET e HDPE, naturalmente compatíveis pois ambos são utilizados na produção de garrafas, foram consideradas para o estudo os materiais individuais e três misturas com percentagens distintas. A realização destas misturas foi feita em relação à percentagem de massa após trituração, cujas designação e composição são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 - Materiais utilizados em FDM e moldação por compressão

Designação do Material	Composição (% em massa)
PET	100% PET
HDPE	100% HDPE
P25	25% PET + 75% HDPE
P50	50% PET + 50% HDPE
P75	75% PET + 25% HDPE

A mistura P75 pode ser comparada com uma garrafa de água ou refrigerante, em que a embalagem é de PET e a rolha de HDPE, sendo, contudo, a percentagem de HDPE significativamente inferior a 25%, isto é, considerando uma garrafa com uma massa de 30g, cerca de 27g correspondem a PET e o restante a HDPE, sendo as percentagens relativas de 93% e 7% respetivamente. Tendo em conta a possibilidade de produção de peças por FDM de uma mistura com percentagem de 75% PET e 25% de HDPE, é expectável que a aplicação de uma mistura com apenas 7% de HDPE e 93% de PET também seja viável.

Todos os processos que envolveram ciclos térmicos tiveram em consideração os intervalos de temperaturas de fusão do PET e do HDPE no estado virgem [36]:

-PET: de 180°C a 240°C;

-HDPE: de 140°C a 180°C.

Estes intervalos de temperatura são largos e incompatíveis. Para além das diferenças das temperaturas de fusão e, conseqüentemente, das temperaturas de processamento, a viscosidade dos materiais é dependente do grau, e apesar de estarmos a misturar, por vezes, o mesmo material (PET proveniente da produção por técnicas de moldação distintas, por exemplo), as propriedades reológicas dos produtos reciclados que constituem a matéria-prima podem ser distintas.

Para ajudar na definição das temperaturas de processamento, para além dos intervalos de temperaturas de fusão, foi empregue uma tabela com perfis de temperaturas de processamento disponibilizadas pela empresa *POLIVERSAL S.A.* (Anexo I).

2.2 Recolha e preparação dos materiais

A reciclagem é um dos 5 processos de recuperação eficiente de energia a partir de produtos em final de vida. Existem 4 tipos de reciclagem dos produtos em fim de vida: reciclagem primária (ou reprocessamento), reciclagem mecânica, reciclagem química e reciclagem energética. Para este estudo o tipo de reciclagem utilizado foi a reciclagem mecânica pois, é a que se encontra mais acessível ao público-alvo deste estudo. Os resíduos plásticos provenientes da separação dos RSU's resultam na produção de novos produtos após reciclagem, que geralmente possuem especificações inferiores às dos produtos que lhes deram origem.

O processo de reciclagem mecânica está dividido em cinco etapas fundamentais: separação dos resíduos por tipo de material, lavagem, secagem, trituração e por fim, moldação/granulação [37]. Em geral, após trituração e secagem dos materiais o processo termina com produção de filamento com os materiais reciclados que seguem para um granulador. Após o material ser granulado, este é vendido para empresas de processamento de polímeros que incorporam materiais reciclados nas suas produções como forma de redução de custos em matéria-prima [37]. A Figura 11 ilustra as etapas do processo adotadas para o estudo e de seguida irá ser explicada detalhadamente cada uma delas.

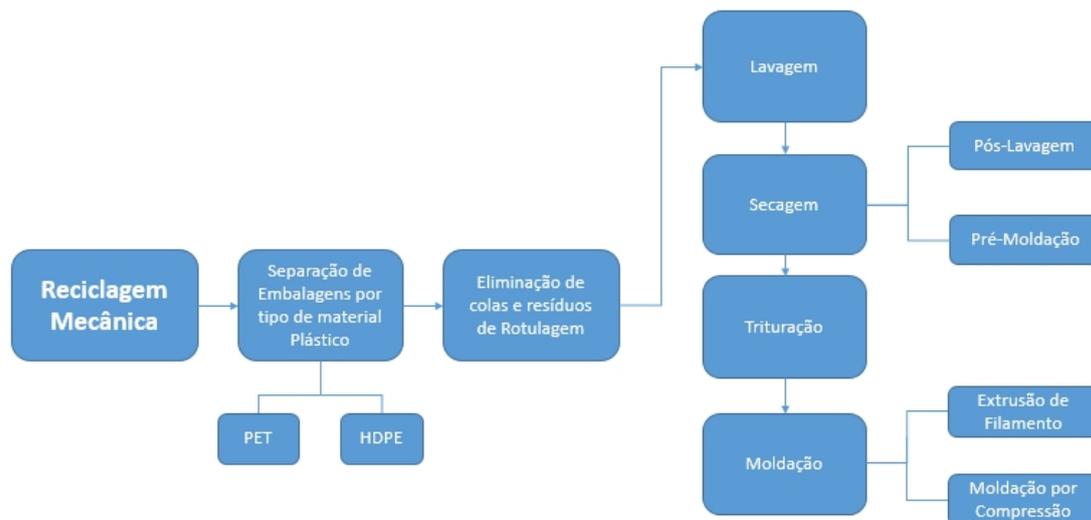


Figura 11 - Etapas do Processo de Reciclagem Mecânica. Adaptado de [37]

- Recolha e separação de embalagens por tipo de material

O processo de recolha de embalagens é um processo moroso. Dado que estamos a simular um processo de reciclagem caseiro, os materiais foram recolhidos em casas de particulares e não num centro de reciclagem. Pelo facto de a recolha não ter sido efetuada em centros de reciclagem, reduziu substancialmente os níveis de contaminação dos resíduos obtidos.

Após recolha dos resíduos plásticos, estes devem ser separados em função do tipo de material para que seja possível um maior controlo das condições operatórias e propriedades nos processos posteriores de produção de novos produtos. A separação das embalagens foi facilitada pela aplicação dos códigos de identificação de plásticos apresentados na Figura 12.

Símbolo	Tipo de Plástico	Exemplo de Aplicação
	PET (Politereftalato de Etileno)	Garrafas de água, refrigerantes
	PEAD (Polietileno de Alta Densidade)	Higiene, detergentes
	PVC (Policloreto de Vinilo)	Tubos, detergentes
	PEBD (Polietileno de Baixa Densidade)	Sacos, filme de paletes
	PP (Polipropileno)	Caixas de CD's
	PS (Poliestireno)	iogurte, caixa de ovos
	Outros	

Figura 12 - Códigos de Identificação de Plásticos [38]

De seguida, procedeu-se à remoção de colas e resíduos de rotulagem de modo a diminuir os níveis de contaminação do material a reciclar.

- Lavagem de Embalagens

Após a separação das embalagens recolhidas por tipo de material, estas devem ser lavadas, com água e sem auxílio de qualquer detergente para não haver adição de quaisquer químicos. Estes cuidados de lavagem, juntamente com a remoção de colas e vestígios de rotulagem, devem-se ao facto de tentar diminuir ao máximo as possibilidades de contaminação e degradação, potenciada pela presença de químicos ou materiais incompatíveis, do material aquando o processo de moldação dos materiais reciclados.

A Figura 13 mostra o tipo de embalagens recolhidas, devidamente lavadas e sem vestígios de colas e/ou rotulagem.

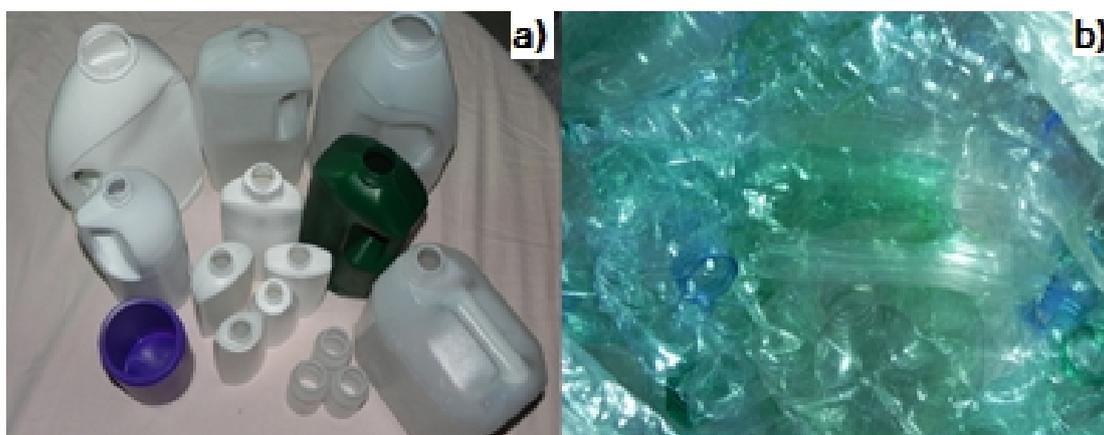


Figura 13 - Tipos de embalagens recolhidas: a) HDPE e b) PET

- Trituração

O processo de trituração trata a redução de volume dos produtos em fim de vida por tipo de material para posterior moldação. Para o estudo foi utilizada uma serra de fita *DeWalt* e um triturador *GRINDO granulator 20-18/JM* com potência de 1.5 kW.

Devido ao espaço limitado do triturador, em grande parte dos casos, é necessário recorrer a serras para redução do volume inicial das embalagens de maiores dimensões. Após redução do volume das embalagens, o material é triturado, guardado e devidamente identificado, para preparação das operações futuras. A Figura 14 ilustra os vários procedimentos adotados durante o processo de trituração.



Figura 14 - Procedimentos de Trituração de Embalagens: a) Redução do volume; b) Trituração

- Secagem do Material Triturado

A secagem do material triturado ocorreu em dois momentos do estudo: após trituração das embalagens, de modo a reservar o material para os procedimentos seguintes com menor nível de humidade, e imediatamente antes de qualquer processo de moldação.

Devido à lavagem dos produtos reciclagem é necessário eliminar a humidade presente nos materiais triturados. Sendo o PET um material higroscópico, como indicado no Anexo III, a sua secagem antes do processamento é fundamental para que defeitos como bolhas de ar, vazios e sinais de degradação não surjam nos produtos moldados. Sabendo que as condições típicas de secagem do PET virgem em estufa são de 4 horas a uma temperatura de 80°C [39], e que o estudo se trata de uma simulação de reciclagem e produção de filamento caseiro, seria necessário reduzir este dispêndio de tempo de secagem. Deste modo, surge a necessidade de estudar experimentalmente a fase de secagem do material.

As condições de secagem (tempo e temperatura) variam entre materiais. Para o estudo foi realizado um ensaio de otimização das condições de secagem dos materiais reciclados de modo a reduzir os custos energéticos e tempo de secagem no processo de reciclagem caseiro. A experiência consistiu na pesagem de 4 copos de vidro e de seguida foi adicionado a cada copo uma quantidade aproximadamente igual de PET reciclado e pesou-se novamente. Após as devidas pesagens e identificações de cada amostra colocam-se as mesmas na estufa a uma temperatura de 150 °C, não ultrapassando a temperatura de fusão (no caso do PET é entre 180 °C e 240°C), durante 60 minutos. Seguindo-se uma nova pesagem e secagem adicional na estufa durante 30 min. O processo é repetido até não se registarem variações de massa entre pesagens.

A massa perdida entre pesagens é equivalente à humidade existente no material que evapora na estufa. A percentagem de massa perdida foi calculada através da seguinte equação:

$$\% \text{ de massa perdida} = \frac{(\text{massa inicial} - \text{massa final})}{\text{massa inicial}} \times 100 \quad (1)$$

É expectável que o dispêndio energético resultante do balanço entre temperatura e tempo de secagem é favorável para uma temperatura menor e tempo maior. Contudo, o processo experimental visa sobretudo a redução do tempo de secagem.

O processo foi realizado numa estufa de convecção *Blinder FD 115 #04* pelo que poderia também ser realizado num forno só com sistema de ventilação ativo.



Figura 15 - Secagem de HDPE em Estufa

2.3 Moldação por Compressão

A moldação por compressão consiste na moldação de material polimérico termoplástico, colocado na cavidade de um molde, com uma forma definida, através da aplicação de calor e pressão. A solidificação da peça dá-se pelo arrefecimento do molde quando o material ainda está sujeito a pressão. O equipamento utilizado é composto por uma prensa hidráulica de dois pratos paralelos, aquecida por um sistema elétrico, a vapor, a gás, a óleo ou a água quente, e um molde [40]. Apesar de se tratar de um processo simples de moldação, processo de moldação por compressão possui diversas variáveis de processamento. Para o estudo realizado, as variáveis foram: a temperatura de moldação, o tempo de pré-aquecimento, o tempo de moldação sob pressão, a força exercida e a massa a moldar. Como o processo decorre sem induzir elevados níveis de deformação no material, e a que ocorre é efetuada a alta temperatura, antecipa-se que as peças produzidas possuirão uma orientação aleatória.

Apesar de se tratar de um processo simples, de baixo custo e nível de desperdício reduzido, este possui alguns inconvenientes: tempos de ciclo elevados, difícil extração das peças e formação de rebarbas ou vazios.

Para a moldação por compressão dos materiais utilizados, para além da prensa hidráulica (Figura 16) foram ainda utilizadas as seguintes ferramentas:

- Molde de placas com cavidade de 190 mm de comprimento, 120 mm de largura e profundidade de 2 mm;
- 2 Placas de base;
- Folhas de PTFE (Politetrafluoretileno ou Teflon, cuja função é impedir a adesão dos materiais às chapas de base e facilitar o processo de desmoldagem;
- Balança, copo de vidro de 250 ml e espátula.

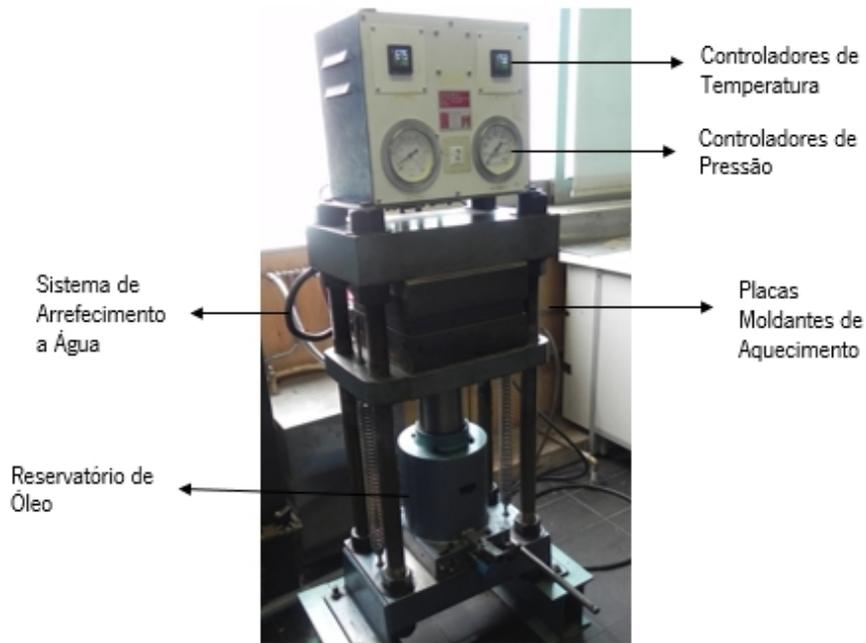


Figura 16 - Prensa G261/X George E. Moore & Son

Definição das Condições de Processamento

O processo de moldação por compressão seguiu a mesma base para todos os materiais a estudar, contudo, as variáveis operatórias foram definidas recorrendo a um processo de tentativa-e-erro.

O primeiro passo era definir uma temperatura de processamento, acima da temperatura de fusão para cada um dos materiais e respetivas misturas. Estas temperaturas eram ajustadas de acordo com as observações efetuadas na peça, isto é, caso fosse visualizado material degradado na placa moldada, baixava-se a temperatura de processamento, por outro lado, se existe material não fundido na placa moldada era necessário subir a temperatura.

De seguida definiu-se uma massa de enchimento do molde e verificou-se se esta preenchia a cavidade do molde sendo ajustada posteriormente, caso esta vazasse o molde ou a placa moldada apresenta-se vazios.

Relativamente à pressão exercida no material durante a moldação, esta foi mantida constante para os diferentes materiais moldados, enquanto que o tempo de pré-aquecimento foi ajustado de acordo a fusão do material no molde, ou seja, de igual modo ao ajuste da temperatura de moldação, caso fosse visualizado material não fundido na placa moldada era necessário subir a temperatura.

No respeitante à temperatura de arrefecimento do molde, o ajuste foi realizado de acordo com o estado da placa quando retirada a uma temperatura do molde de 100°C. Procedeu-se a ajustes na temperatura de arrefecimento quando se verificavam defeitos nas placas como empenos ou roturas, que induziam à redução ou aumento desta temperatura respetivamente.

Procedimento Experimental

As etapas do processo de moldação por compressão foram as seguintes:

1. Secagem dos materiais em estufa nas condições de tempo e temperatura otimizadas (descritas na Subsecção 3.2);
2. Aquecimento dos pratos da prensa à temperatura adequada para cada material;
3. Colocação da placa de molde sobre uma placa de base revestida com filme de PTFE. Preencher a placa do molde com a massa definida de material granulado de modo a não ficarem vazios visíveis na mesma. Colocação de uma segunda placa de base revestida com um filme de PTFE sobre o material triturado;
4. Colocação do molde no interior da prensa e fecho da mesma, sem exercer força de modo a realizar o pré-aquecimento do material triturado;
5. Após o tempo de pré-moldação, exercer uma força de fecho de 20 toneladas (Ton) e manter a força durante o tempo de aquecimento definido;
6. Desligar o aquecimento dos pratos;
7. Ativar o sistema de arrefecimento a água e reduzir a força de fecho do molde quando a temperatura baixar até à temperatura de arrefecimento definida;
8. Retirar o molde e deixar as placas arrefecerem no exterior durante 2 minutos;
9. Análise da peça produzida para identificar eventuais ações corretivas.

As condições operatórias estabelecidas são descritas, para os cinco materiais estudados, na Secção 3.3.

2.4 Extrusão de Filamento

A extrusão de termoplásticos é uma técnica de moldação convencional geralmente utilizada para a produção contínua de produtos com secção transversal constante, isto é, perfis, tubos, filmes ou filamentos [41].

Para este estudo, a técnica de extrusão utilizada foi extrusão de mono filamento. O equipamento utilizado foi uma extrusora *Periplast FI20*20D* do Departamento de Engenharia de Polímeros (DEP) acoplada a uma fieira circular de diâmetro 2 mm, projetada para a produção de mono filamento com 1.75 mm de diâmetro, adequado para a impressora de FDM a utilizar no estudo.

Para além destes equipamentos, a linha de extrusão é ainda constituída por duas unidades de rolos de puxo e respetivos controladores e uma câmara de arrefecimento ar, dispostos como é possível verificar no esquema da Figura 17. A câmara de arrefecimento tem como função o arrefecimento inicial do filamento à saída da fieira. Por sua vez, os rolos de puxo promovem o estiramento do filamento que permite, juntamente com a definição de outras variáveis operatórias, obter o filamento de diâmetro pretendido. Os fornos representados têm a função de aquecer o ar em volta do filamento de modo a permitir o estiramento antes que o filamento esteja completamente sólido.

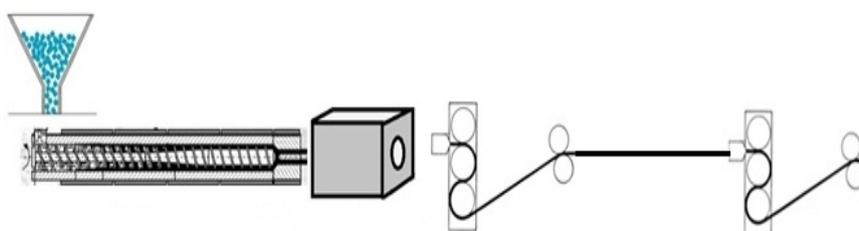


Figura 17 - Esquema representativo da linha de extrusão utilizada [42]: (1) Tremonha; (2) Extrusora; (3) Fieira; (4) Sistema de refrigeração a ar; (5) Rolos de puxo.

A câmara de arrefecimento a ar funciona através de um sistema de convecção forçada de ar à temperatura ambiente. O restante arrefecimento do filamento ocorreu ao longo da linha de extrusão, também à temperatura ambiente.

A obtenção do diâmetro necessário para a utilização em impressora de FDM foi atingido através de um procedimento de tentativa-e-erro, fazendo variar a velocidade de rotação do parafuso e a velocidade dos rolos de puxo, até no final da linha de extrusão se obter filamento com diâmetro contínuo de 1,75 mm. Para verificação deste diâmetro foi utilizado um paquímetro digital com um erro associado de 0,01 mm. Devido ao deslizamento do filamento sobre os rolos de puxo, o estiramento do filamento não foi constante, pelo que foi difícil obter um diâmetro contínuo em todo o filamento, por isso, admitiu-se um diâmetro como aceitável quando entre 1,6 mm e 1,8 mm.

Procedimento Experimental

As etapas do processo de extrusão de filamento seguiram a mesma linha para todos os materiais a estudar, contudo, as variáveis operatórias foram definidas de acordo um processo de tentativa-e-erro. A definição do perfil de temperaturas iniciais teve como base as temperaturas padrão adequadas para o perfil de extrusão de materiais virgens utilizadas na empresa *POLIVERSAL S.A.* que é possível consultar no Anexo I. Estas temperaturas foram ajustadas sempre que o material não fundisse ou estivesse muito fluido.

Considerando a divisão do cilindro da extrusora em três regiões de aquecimento, três resistências de aquecimento, é importante definir uma fusão gradual do material reciclado, definindo uma temperatura de arranque, temperatura do cilindro na zona de entrada do material, e da feira, acima da temperatura de fusão para cada um dos materiais e respetivas misturas. Estas temperaturas eram ajustadas de acordo com as observações efetuadas no produto à saída da feira, isto é, caso à saída o material obtivesse material degradado ou demasiado fluido, baixava-se a temperatura da feira. Por outro lado, caso este se o material não estivesse devidamente fundido era necessário aumentar tanto a temperatura de arranque como a temperatura da feira.

As etapas do processo de extrusão de filamento foram as seguintes:

1. Secagem dos materiais em estufa nas condições de tempo e temperatura otimizadas (descritas no Subcapítulo 3.2);
2. Colocação do material a processar no interior da tremonha;
3. Início do processo de extrusão com um débito lento;
4. Estabelecimento do perfil de aquecimento até às temperaturas adequadas para cada material. É possível variar as temperaturas ao longo do cilindro e na fieira, pelo que a temperatura de arranque, temperatura à entrada do cilindro, é mais baixa, e depois eleva-se a temperatura para uma temperatura próxima à temperatura da fieira.
5. Aumento da velocidade de rotação do parafuso para um intervalo entre 5 rpm a 6 rpm, de modo a homogeneizar o material fundido;
6. Regulação da distância entre a fieira e a câmara-de-ar. Por alguns materiais serem mais fluidos e não suportarem o seu peso próprio, foi necessário reduzir a distância entre a fieira e a câmara de modo a estes materiais solidificarem mais rapidamente.
7. Definido o perfil de temperaturas e a distância entre a fieira e a câmara-de-ar, ajustou-se o débito e velocidade dos rolos de puxo, num processo de tentativa-e-erro até se atingir o diâmetro final contínuo de 1,75 mm.
8. Recolha e identificação do filamento para utilização em impressão por FDM.

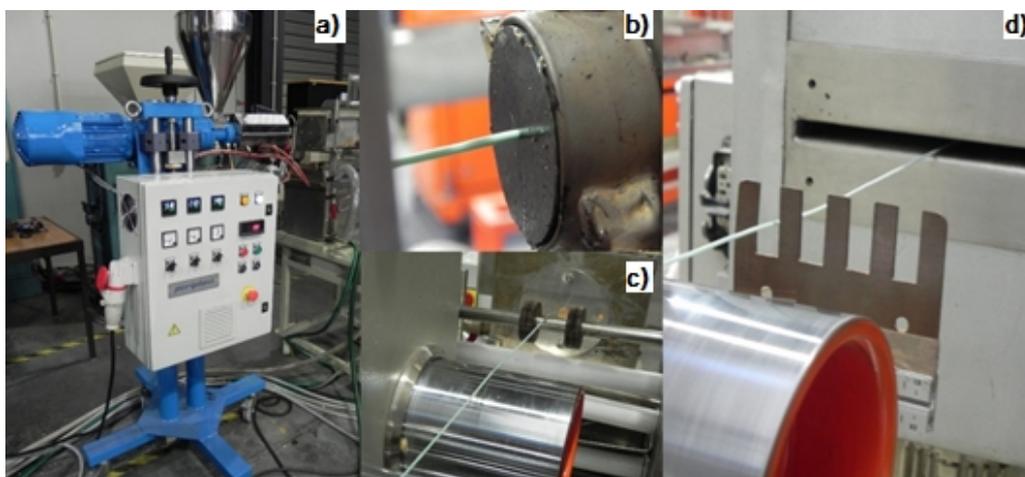


Figura 18 - Etapas no processo de Extrusão de Filamento: a) Definição das condições operatórias; b) Extrusão de Filamento; c) Arrefecimento em câmara-de-ar; d) Estiramento

Note-se que o puxo do filamento não foi sempre realizado no conjunto final de rolos da linha. Sempre que possível foi usado o primeiro conjunto de rolos de puxo para o efeito. No entanto, quando a distância entre a feira e os primeiros rolos de puxo não era suficiente para arrefecer o filamento e o mesmo deformava quando apertado pelos primeiros rolos de puxo, o estiramento era promovido pelo segundo conjunto de rolos de puxo.

2.5 Deposição de Filamento Fundido

2.5.1 Equipamento de FDM utilizado

A impressora utilizada neste estudo é um equipamento FDM projetado pela Prusa Mendel, um dos principais nomes da comunidade *RepRap*, cuja designação é *Prusa i3* e possui movimento nos três eixos, XYZ. As suas especificações são descritas no Anexo V.

A cabeça de impressão, apresentada em corte na Figura 19, é constituída por um motor de passo, que aciona uma engrenagem de transmissão gera o esforço necessário para movimentar o filamento na direção da feira. Esta tem a função de fundir o material e encontra-se acoplada a um suporte de alumínio (*HOT-END*). Este suporte tem como funções o suporte mecânico da feira e o isolamento térmico em relação aos restantes constituintes da cabeça de extrusão.

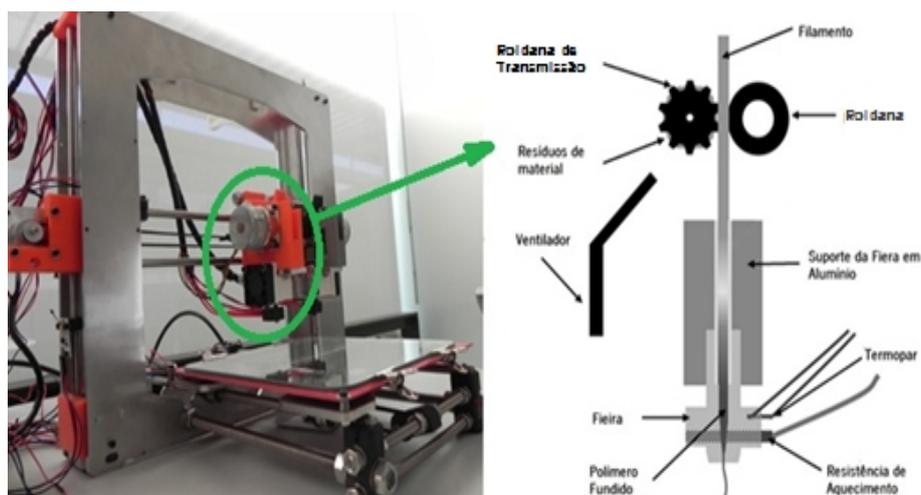


Figura 19 - Impressora Prusa i3 e esquema em corte da cabeça de impressão [4]

O ventilador promove o arrefecimento do filamento por convecção forçada, na região do suporte de alumínio de forma a impedir a fusão do mesmo. Para um bom funcionamento do equipamento, é necessário assegurar que o filamento se encontra sólido nesta região, de tal modo que seja gerada a pressão necessária para promover a passagem do filamento ao longo da feira. Na feira encontra-se a resistência que fornece o calor necessário para a fusão do filamento e um termopar que possibilita o controlo da temperatura.

Outro componente importante no equipamento de FDM é a superfície de construção. Esta superfície tem a possibilidade de aquecimento, no caso da produção de peças com materiais cuja adesão com a superfície de construção é baixa.

O utilizador controla este dispositivo através de *softwares* específicos para impressoras 3D. Os *softwares* utilizados no estudo são, na sua maioria, gratuitos sendo descritos na subsecção que se segue.

2.5.2 Descrição dos *softwares* de controlo

O *SolidWorks* é um *software* de CAD cuja função é a criação de modelos tridimensionais a partir de formas geométricas elementares. Este *software* permitiu fazer os desenhos 3D dos objetos a imprimir, contudo, para que fossem compatíveis com os outros *softwares* a utilizar foi necessário gravar os desenhos no formato STL.

O *Slic3r* é o *software* onde o utilizador pode definir os parâmetros a variar no estudo, e a divisão do objeto em camadas finas (definição das espessuras das camadas impressas). Posteriormente à definição dos parâmetros, o *software* condensa toda a informação relativa à impressão num ficheiro GCODE que será utilizado num terceiro *software* que dá instruções ao controlador do equipamento de FDM. Este *software* é livre e encontra-se disponível online. Na Figura 20 é possível visualizar o ambiente de trabalho do *software*.

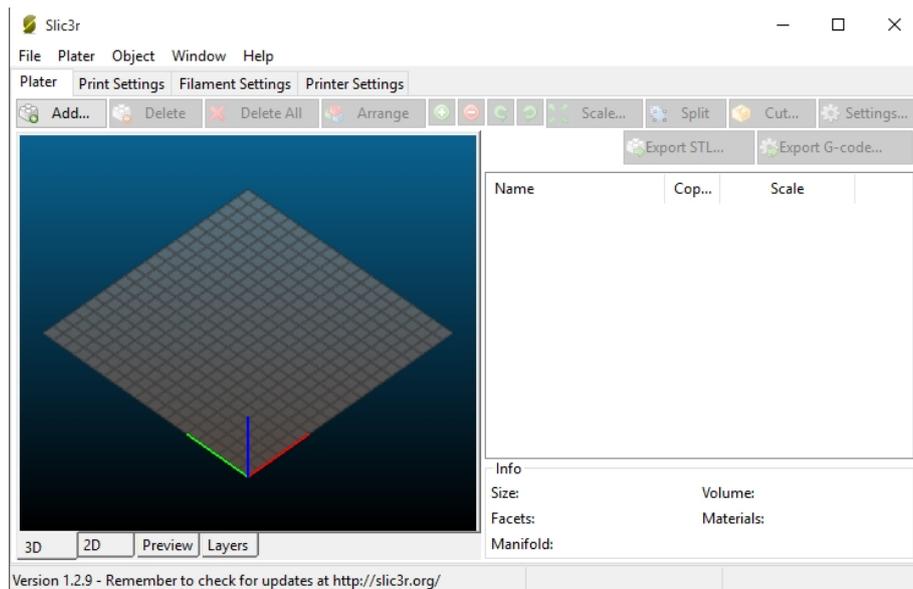


Figura 20 - Ambiente de trabalho do *software* Slic3r

O *software* Pronterface utiliza o *GCODE* para dar instruções ao controlador do equipamento de FDM. A partir deste *software* podemos comandar o sistema de engrenagens, testar temperaturas adequadas para impressão e ajustar a temperatura da superfície de construção para adesão do material. Através deste, é possível também controlar a cabeça de impressão na direção de qualquer eixo e nivelar a superfície de construção de modo a que a impressão do objeto seja realizada com o mínimo de defeitos possível. É igualmente possível acompanhar o processo de impressão camada a camada e a orientação do filamento durante a formação de cada camada.

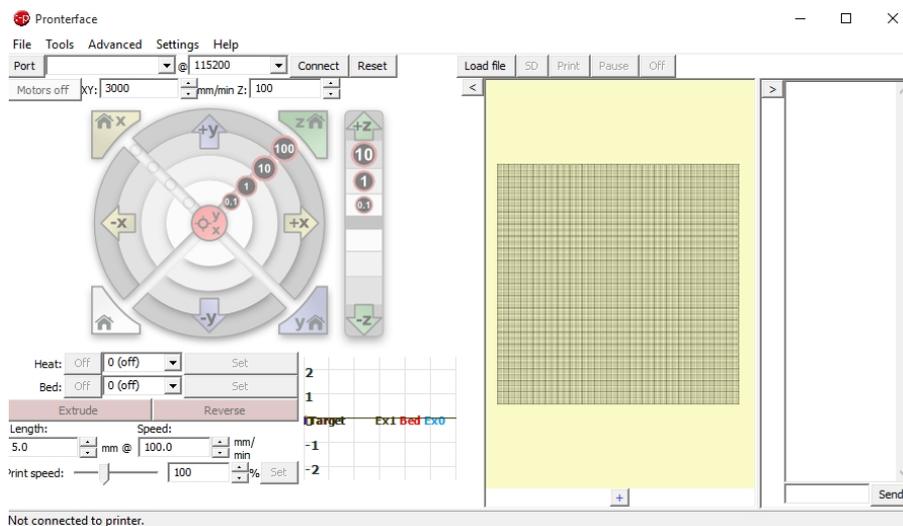


Figura 21 - Ambiente de trabalho do *software* Pronterface

Procedimento Experimental

O processamento do filamento em FDM envolve um segundo ciclo térmico após reciclagem, o que é importante ter em atenção para a definição das temperaturas de impressão. Contudo as temperaturas de base do processo de impressão estão de acordo com as temperaturas de extrusão do filamento. Para além disso, como se tratou de uma nova etapa de processamento, o filamento, que esteve guardado em condições ambiente, necessita de ser sujeito a um novo processo de secagem.

Relativamente aos objetos que foram impressos, estes foram desenhados em *SolidWorks* [4] e as suas dimensões são descritas nas Figuras 22 e 23:

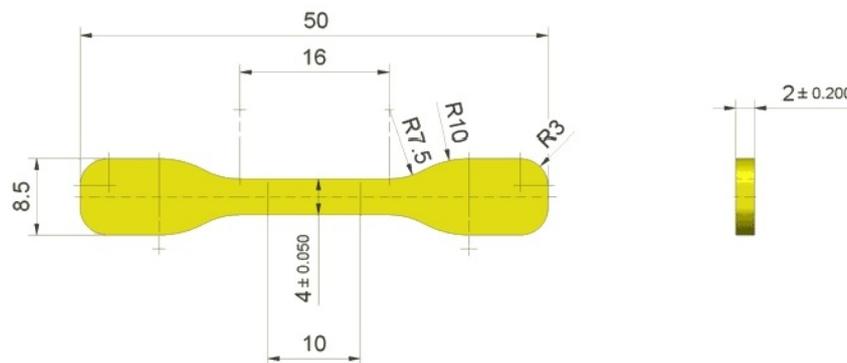


Figura 22 - Dimensões nominais dos provetes de tração impressos

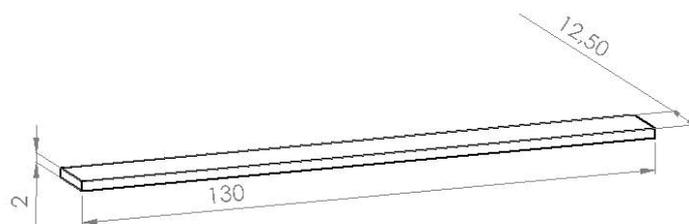


Figura 23 - Dimensões nominais dos provetes de impacto e flexão impressos

Devido ao elevado número de parâmetros que é possível alterar, é necessário definir quais manter constantes para que no final a comparação das propriedades mecânicas dos distintos materiais impressos seja coerente. Na Tabela 2 é possível verificar quais as variáveis que se mantiveram constantes ou que variaram entre materiais estudados, camadas ou objetos impressos.

Tabela 2 – Variáveis Operatórias do Processo de FDM

Variável Operatória	Descrição	Constante/Variável
Espessura da camada	Trata-se da altura que cada camada irá possuir. Esta altura pode variar entre a primeira camada e as seguintes e nunca é superior ao diâmetro da feira.	Constante para camadas, objetos e distintos materiais estudados.
Enchimento do objeto	Na construção de objetos em FDM é possível construir objetos ocos, definindo apenas algumas camadas sólidas na superfície inferior e superior, poupando deste modo material.	Constante para camadas, objetos e distintos materiais estudados.
Perímetros	Fornecem o suporte necessário aos objetos ocos, são as paredes do mesmo. São dependentes da escolha do enchimento do objeto. Por exemplo, o enchimento a 100 % do volume do objeto não requer necessidade de perímetros.	Constante para objetos e distintos materiais estudados
Orientação do filamento entre camadas	A deposição do filamento pode ser realizada de várias formas: retilínea, linear, concêntrica, em forma de favo de mel ou espiral. Para além disso, é possível definir o ângulo com que o filamento será depositado por camada cruzadas, podendo variar esse ângulo entre 0° e 45°. Selecionando um ângulo de deposição do filamento de 45°, as camadas sobrepostas estarão cruzadas com um ângulo de 90°.	Constante para objetos e distintos materiais estudados
Arrefecimento do filamento	O arrefecimento do filamento pode ocorrer na impressão de todas as camadas ou se desejável apenas após a deposição de um número definido de camadas. Contudo, alterações no equipamento de FDM levam a que este processo de arrefecimento ocorra automaticamente com a ativação da impressora.	Constante para camadas, objetos e distintos materiais estudados.
Velocidade de impressão	Existe a distinção de 4 velocidades de impressão: velocidade de enchimento, velocidade de enchimento sólido, velocidade de enchimento das camadas superficiais e velocidade de enchimento do material de suporte (não aplicável no caso em	Variável para o tipo de objeto impresso e distintos materiais estudados

	estudo). As velocidades são definidas de acordo a qualidade superficial e tempo de impressão que o utilizador pretende.	
Temperatura de impressão	Trata-se da temperatura à qual o material é processado. A temperatura definida é sempre superior à temperatura de fusão do material a processar e pode ser ajustada de acordo a necessidade de maior ou menor fluidez do material dependente das velocidades de impressão definidas. Considerando que se trata de um segundo ciclo térmico após o processo de reciclagem é essencial a atenção a eventuais vestígios de degradação.	Variável para os distintos materiais impressos
Temperatura da superfície de construção	Esta temperatura é definida de modo a promover a adesão dos materiais à superfície de construção, isto é, o aumento da temperatura da superfície de construção promove a adesão entre a camada impressa e a superfície. Esta temperatura é necessária sobretudo quando se trata do processamento de polímeros semi-cristalinos.	Variável para os distintos materiais impressos

Tabela 3 - Especificação das variáveis operatórias constantes em FDM

Variável	Especificação
Espessura da camada	0,2 mm
Enchimento do objeto	100 %
Perímetros	0
Orientação do filamento em cada camada	45°
Orientação do filamento entre camadas	Cruzado a 90°
Arrefecimento do filamento	Automático

O tempo de impressão resulta da velocidade de impressão e da dimensão da peça, de tal modo que, de a velocidade a imprimir deve ser máxima para que o tempo de impressão seja mínimo. A velocidade de enchimento da primeira camada é geralmente inferior pois há necessidade de maior perfeição para as camadas que se irão sobrepor (se a primeira camada ficar deformada as restantes camadas também irão apresentar deformações). A igual necessidade de qualidade superficial na camada superior requer a de igual modo a redução da velocidade de impressão para a mesma.

A alteração da geometria do objeto a imprimir influencia as condições operatórias mesmo quando produzido com o mesmo material que um objeto impresso anteriormente. Objetos de maior dimensão requerem velocidades de impressão superiores e também temperaturas de impressão ligeiramente superiores para aumentar a fluidez do material.

De modo a facilitar a comparação das propriedades mecânicas dos materiais, as variáveis que influenciam a área, volume ou orientação dos objetos impressos foram mantidas constantes, pois estas dimensões influenciam os resultados obtidos quando os objetos são submetidos a ensaios de tração, flexão ou impacto.

As etapas do processo experimental para os diferentes materiais impressos foram as seguintes:

1. Secagem dos materiais em estufa nas condições de tempo e temperatura otimizadas (descritas no Subcapítulo 3.2);
2. Aquecimento da feira e superfície de construção às temperaturas definidas;
3. Ajuste do aperto do filamento no sistema de engrenagem de modo a assegurar que o material fundido na feira é empurrado de forma contínua evitando falhas de material no produto impresso posteriormente.
4. Carregar o ficheiro em GCODE do objeto a imprimir no *software Pronterface*;
5. Imprimir o objeto;
6. Retirar o objeto da superfície de construção e verificar se existem falhas na impressão;
7. Efetuar correção dos parâmetros que permitam corrigir as falhas identificadas.

Para o caso de entupimento da feira era necessário arranjar um método de limpeza eficaz dado que não existia qualquer tipo de ferramenta que permitisse limpar uma feira de reduzido diâmetro manualmente. Os métodos de limpeza utilizados foram:

- Limpeza por ultrassons com aplicação de solvente DMF (Dimetilformamida): consiste em colocar a feira devidamente desmontada durante 30 minutos, a uma temperatura de 40 °C, mergulhada em DMF no interior do equipamento de ultrassons. Após os 30 minutos decorridos, verificar se a feira está corretamente limpa, se ainda se verificarem vestígios o processo deve ser repetido. No final do processo, esta deve ser devidamente limpa com ar comprimido e seca de modo a retirar qualquer vestígio de DMF que pode comprometer o novo processamento.

- Limpeza por degradação do material em Mufla: consiste em colocar a feira devidamente desmontada na Mufla a uma temperatura superior a 300°C (dependendo do material no qual a feira é produzida) durante 2 horas. Este método é, contudo, agressivo para a feira e pode degradá-la devido a longo período de tempo a que a mesma está sujeita a elevadas temperaturas.

2.6 Caracterização Mecânica

Como referido nos objetivos desta dissertação é necessário verificar a aplicabilidade deste tipo de materiais em FDM e verificar até que ponto a existência de vazios e limitações entre as ligações do filamento nas peças impressas influenciam as propriedades mecânicas das peças impressas. Estas propriedades foram também medidas nos produtos moldados por compressão, de modo a quantificar a redução das propriedades mecânicas induzida pela produção por FDM.

2.6.1 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão consistem na aplicação de uma carga crescente num ponto central de um provete de geometria padronizada, em forma de barra, como ilustrado na Figura 24. A metodologia aplicada nestes ensaios está de acordo com a norma ASTM D 790-03.

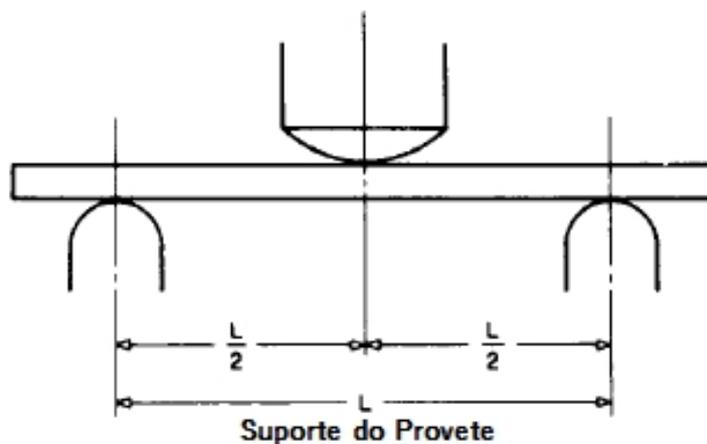


Figura 24 - Ensaio de flexão a três pontos [44]

Os ensaios de flexão permitem analisar a força necessária para uma deflexão máxima imposta a uma determinada velocidade. Após tratamento dos resultados de força e deslocamento é possível calcular o valor de algumas propriedades dos materiais analisados como, tensão de deflexão (σ_f), deformação de cedência em flexão (ε_f) e módulo de elasticidade (E), através das Equações 2,3 e 4 respetivamente.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2le^2} [Mi \quad] \quad (2)$$

Onde:

F = carga aplicada num determinado ponto da curva força-deflexão [N];

L = extensão do suporte [mm];

l = largura do provete [mm];

e = espessura do provete [mm].

$$\varepsilon_f = \frac{6De}{L^2} \times 100 [\%] \quad (3)$$

Onde:

D = deflexão máxima do centro da barra [mm];

e = espessura do provete [mm];

L = extensão do suporte [mm].

$$E = \frac{L^3 m}{4le^3} = \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} [M. \quad] \quad (4)$$

Onde:

L = extensão do suporte [mm];

m = declive da tangente à linha reta inicial da curva força-deflexão [N/mm];

l = largura do provete [mm];

e = espessura do provete [mm].

Os parâmetros de realização dos ensaios de flexão são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros dos ensaios de flexão

Velocidade (mm/min)	2,8
Deslocamento máximo (mm) – D máximo	20
Distância entre pontos de suporte (mm) - L	110

Para a realização destes ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos/ferramentas: máquina universal de ensaios mecânicos (*INSTRON 4505*, Figura 25), paquímetro digital e suporte de provetes com 3 pontos.



Figura 25 - Máquina universal de ensaios mecânicos *INSTRON 4505*

No caso dos ensaios de flexão dos materiais moldados por moldação por compressão, foi necessária, tal como nos ensaios de tração, uma preparação prévia dos provetes submetidos ao ensaio. Para preparação dos provetes foi necessária a utilização de uma serra e paquímetro. Verificando as dimensões normalizadas para os provetes de flexão, foram realizadas as medições e respetivas marcações nas placas moldadas. Posteriormente, procedeu-se ao corte das mesmas placas pelas marcações realizadas na serra de fita, obtendo provetes de secção retangular com 130 mm de comprimento, 12,5 mm de largura e aproximadamente 2 mm de espessura (variável devida à contração ou dilatação do material moldado). Para o ensaio de flexão foram cortados 5 provetes para cada condição a estudar.

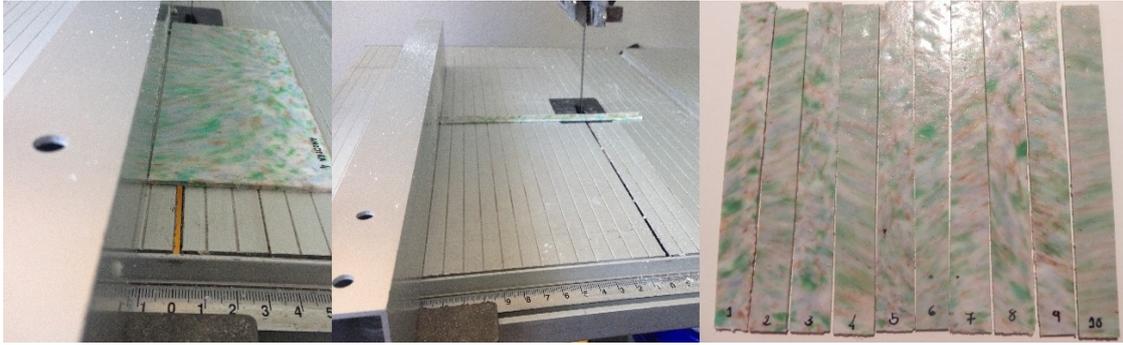


Figura 26 - Metodologia de corte de provetes de impacto a partir de placas moldadas por compressão

Antes de iniciar o ensaio é necessário ajustar os 3 pontos de suporte ao provete. Centrando o provete sobre os dois pontos de base é necessário encostar o terceiro ponto (responsável pela deflexão imposta) ao provete sem que este exerça força sobre o mesmo antes do ensaio iniciar. Deste modo pode-se considerar o deslocamento inicial zero, ou seja, o momento em que o terceiro ponto inicia a aplicação de força é igual ao início do deslocamento.

No respeitante á metodologia dos ensaios de flexão, tanto os materiais moldados por compressão, como os moldados por FDM foram sujeitos às mesmas etapas para realização dos ensaios:

1. Medição da largura e espessura dos provetes na secção transversal de menor área (região central) para um total de 5 provetes para cada condição a estudar;
2. Colocação do provete na base de suporte da máquina de ensaios deixando-o ajustado aos três pontos de contacto.
3. Inserir as medidas de largura e espessura de cada provete. Iniciar os ensaios.
4. Recolha e tratamento dos resultados.
5. Seguidamente calcula-se a média dos 5 ensaios para cada material estudado e analisam-se os resultados obtidos.

Nas curvas tensão-deformação dos produtos produzidos por FDM, ilustradas no Anexo VI, verificou-se um comportamento muito instável, que pode ter origem numa rotura sequencial dos filamentos individuais das peças moldadas por FDM, pelo que os resultados foram obtidos por aproximações lineares às curvas obtidas.

A Figura 27 apresenta um gráfico tensão-deformação obtido e o modo como foram processados os valores das propriedades σ_{ced} , ϵ_{ced} e E . Em alguns casos, região de cedência do material em ensaios de flexão pode não ser muito notável pelo que se deve traçar uma paralela à região linear do gráfico com uma deformação inicial de 0,001, erro associado.

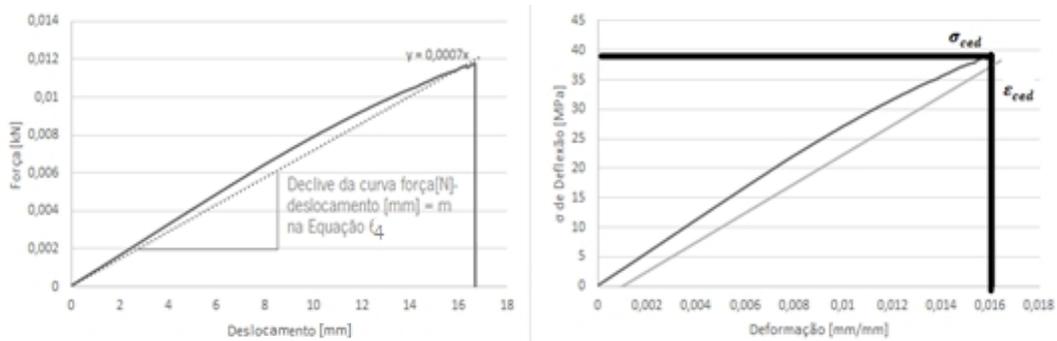


Figura 27 - Leitura de valores de σ_{ced} , ϵ_{ced} e declive em gráficos força-deslocamento e tensão-deformação obtidos em ensaios de flexão

2.6.2 Ensaios de tração

Em ensaios de tração, os provetes são sujeitos a esforços que permitem o alongamento até à rotura. A forma do provete está definida de acordo a norma NP 1198 de 1996 e permite que o esforço seja aplicado nas áreas de secção transversal menores, como ilustrado na Figura 28.

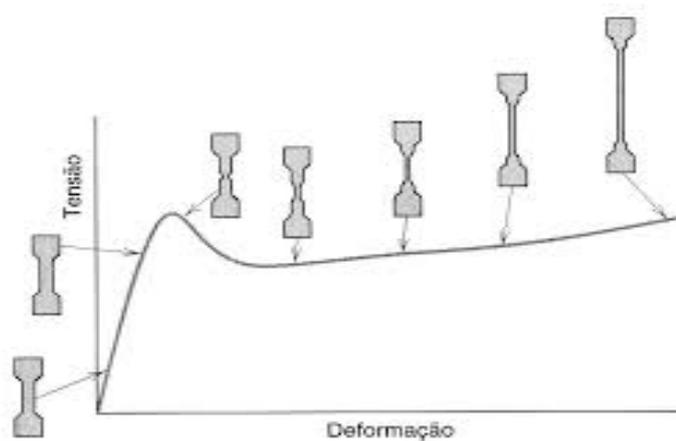


Figura 28 - Alongamento de provetes em ensaios de tração [43]

Os resultados de força-alongamento retirados do ensaio são tratados através das equações 5 e 6 e é reproduzido um gráfico Tensão-Deformação, onde são tipicamente apresentados os resultados de ensaios de tração. Através da análise do gráfico é possível perceber qual o comportamento dos materiais analisados (dúctil ou frágil, elástico ou plástico) e obter propriedades mecânicas dos materiais como, tensão de cedência e rotura (σ_{ced} e σ_{rot}), deformação de cedência e rotura (ε_{ced} e ε_{rot}) e módulo de elasticidade (E). A região de cedência pode não ser muito notável pelo que se deve traçar uma paralela à região linear do gráfico com uma deformação inicial de 0,001, erro associado. A σ_{ced} e ε_{ced} são retirados pelo ponto de intersecção da paralela com o gráfico, enquanto o E é dado pelo declive da região linear inicial.

$$\sigma_{nominal} = \frac{Força}{Área} [Ml] \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{deslocamento}{distância\ entre\ amarras} [mm/mm] \quad (6)$$

Os materiais apresentam um comportamento elástico quando a deformação provocada é anulada por remoção da carga que a induziu, isto é, o provete volta à sua forma inicial quando é retirada a carga que promoveu a sua deformação inicial. Quando é atingida a tensão de cedência, o material passa do regime elástico para o regime plástico, onde a deformação induzida não é revertível. A maior tensão que o material suportar sem quebrar é a tensão de rotura.

Para a realização destes ensaios foi necessária a utilização dos seguintes equipamentos/ferramentas: máquina universal de ensaios mecânicos *Zwick/Roell Z005* (ver Figura 29) e paquímetro digital.



Figura 29 - Máquina universal de ensaios mecânicos *ZWICK/ROELL Z005*

No caso dos ensaios de tração dos materiais moldados por moldação por compressão, foi necessária uma preparação prévia dos provetes submetidos ao ensaio. Dado que o objeto moldado por compressão foi uma placa retangular de 2 mm de espessura foi necessário retirar amostras com a forma especificada na norma acima mencionada. O corte dos provetes de tração foi realizado com o auxílio de uma prensa hidráulica, um molde cortante, ilustrado na Figura 30 e uma serra de fita. Inicialmente procedeu-se ao corte da placa moldada em tiras de 2 cm de largura, com o auxílio de uma serra. Este passo é muito importante pois, como não se consegue antecipar o comportamento do material quando for comprimido com o molde cortante na prensa, evitamos que toda a placa estilhaçe e se desperdice material.

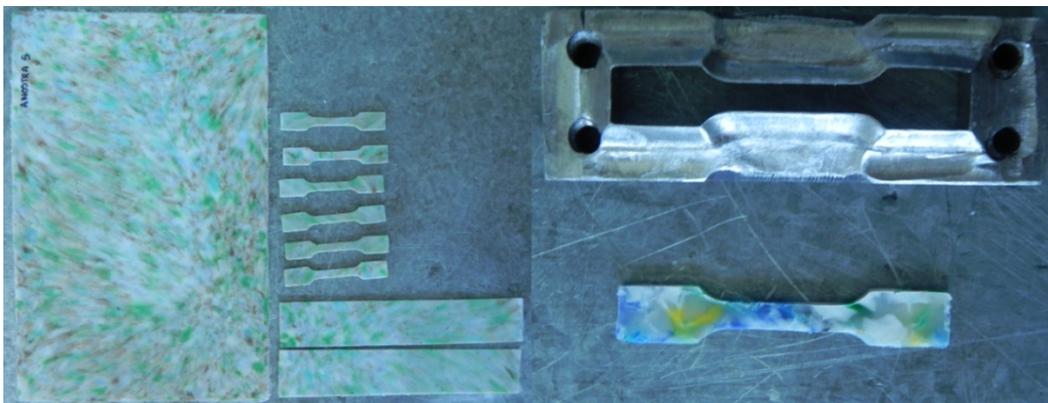


Figura 30 - Corte de provetes de tração a partir de placas moldadas por compressão

Verifica-se que os únicos materiais que não estilhaçam quando comprimidos com o molde cortante na prensa são o HDPE e o P25. O corte dos restantes provetes careceu de aquecimento da amostra. Foi então realizado um curto aquecimento das tiras moldadas para posteriormente se realizar o seu corte:

1. Envolver a tira moldada em PTFE e colocar entre os pratos da prensa aquecidos a uma temperatura de 150°C durante um intervalo de tempo entre 15 a 30 segundos.
2. Retirar a tira do interior da prensa e retirar o PTFE em volta sem deixar o material arrefecer;
3. Colocar a tira entre uma base de corte e o molde cortante e colocar novamente na prensa exercendo força de fecho (sem ultrapassar as 20 toneladas);
4. Retirar o molde da prensa e desmoldar o provete com o auxílio de uma pinça;
5. Repetir o processo até obter os provetes necessários.

Note-se que para os provetes dos materiais cortados sem aquecimento, o método de corte engloba apenas as etapas 3 a 5.

Os provetes produzidos por FDM não necessitam de qualquer tipo de preparação pois o seu desenho em CAD foi realizado conforme os parâmetros normalizados e de modo a serem iguais aos provetes moldados por compressão para que a comparação seja o mais fidedigna possível.

No respeitante á metodologia dos ensaios de tração, tanto os materiais moldados por compressão, como os moldados por FDM foram sujeitos às mesmas etapas para realização dos ensaios:

1. Medição da largura e espessura dos provetes na secção transversal de menor área (região central) para um total de 5 provetes para cada condição a estudar;
2. Colocação do provete nas garras da máquina de ensaios, que se encontram a 20 mm de distância, tendo o cuidado de que este fique centrado entre as garras.
3. Definir uma velocidade de deslocamento das garras de 50 mm/min, comum para todos os ensaios, e inserir as medidas de largura e espessura de cada provete. Iniciar os ensaios.
4. Recolha e tratamento dos resultados.
5. Seguidamente calcula-se a média dos 5 ensaios para cada material estudado e analisam-se os resultados obtidos.

A Figura 31 apresenta um gráfico tensão-deformação obtido e o modo como foram processados os valores das propriedades σ_{ced} , ϵ_{ced} e E .

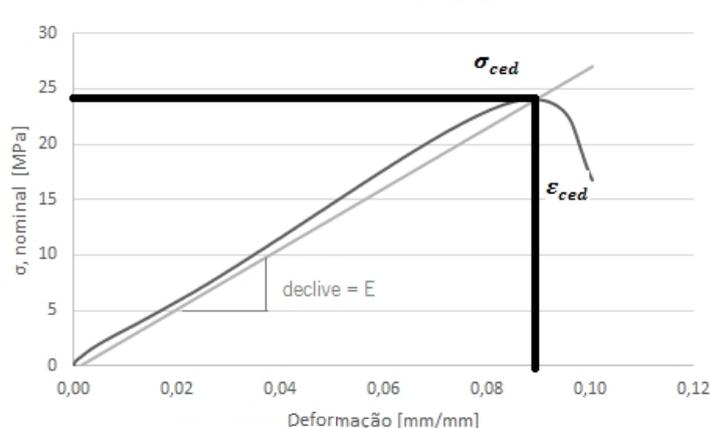


Figura 31 – Leitura de valores de σ_{ced} , ϵ_{ced} e E em gráficos tensão-deformação obtidos em ensaios de tração

2.6.3 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto consiste em submeter um corpo de prova entalhado, padronizado, a uma força de impacto através de um pêndulo. Este tipo de esforço permite determinar a energia utilizada na deformação e rotura do provete, que é medida através da diferença entre a altura inicial do pêndulo e a altura máxima atingida após a rotura do provete. Quanto menor for o valor da energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material a este tipo de solicitações dinâmicas. Os resultados são geralmente apresentados em energia absorvida por unidade de área (kJ/m^2).

Para a realização destes ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos/ferramentas: Pêndulo de Impacto CEAST (ver Figura 32), paquímetro e entalhador em forma de “v”.



Figura 32 - Pendulo de impacto *CEAST*

Os corpos de prova utilizados na realização dos ensaios são padronizados de acordo a norma ASTM D 256-04. Deste modo, o método de corte dos provetes moldados por compressão foi igual ao utilizado para o corte dos provetes utilizados para os ensaios de flexão, resultando em provetes de secção retangular com as seguintes dimensões: comprimento igual a 130 mm, largura igual a 12,5 mm e espessura igual à espessura das placas moldadas, isto é, aproximadamente 2 mm. Os provetes impressos não necessitam de qualquer tipo de preparação pois o seu desenho em CAD foi realizado conforme os parâmetros normalizados e de modo a serem iguais aos provetes moldados por compressão para que a comparação seja o mais fidedigna possível.

Inicialmente realizou-se o entalhe em “v” de 2,54 mm na região central do comprimento de cada corpo de prova sujeito ao ensaio, conforme a norma. O entalhe realizou-se com o auxílio de um entalhador de fresa em forma de “v” com micrómetro integrado que facilitava a medição do entalhe. Colocou-se o provete centrado sobre a base do entalhador e encostou-se a fresa ao provete, seguidamente colocou-se o micrómetro em zero e iniciou-se o corte do entalhe. O processo foi repetido para 5 provetes em cada condição a estudar.

No respeitante à metodologia dos ensaios de impacto, tanto os materiais moldados por compressão, como os moldados por FDM foram sujeitos às mesmas etapas para realização dos ensaios:

1. Realização de um ensaio vazio para determinação da resistência do pêndulo, ou seja, o atrito dos rolamentos que fazem mover o pêndulo. O valor obtido é depois retirado ao resultado de cada ensaio realizado;
2. Medição das dimensões dos provetes a submeter ao ensaio com auxílio de um paquímetro para posterior cálculo da área;
3. Colocação do provete no suporte com o entalhe voltado para a região de embate do pêndulo;
4. Soltar o pêndulo localizado a uma altura pré-definida e registo do valor de energia absorvida no processo de rotura do provete.
5. Tratamento e análise dos resultados obtidos.

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no âmbito do presente projeto de mestrado e respectiva discussão, cobrindo todas as fases do trabalho, nomeadamente: reciclagem, produção de filamentos, produção de provetes por compressão e FDM e caracterização mecânica dos provetes.

3.1 Reciclagem Mecânica

Como mencionado no Capítulo 2, o processo de reciclagem mecânica previa o estudo do comportamento de HDPE e LDPE proveniente de sacos produzidos com esses materiais. Contudo, a trituração mecânica dos mesmos não se verificou possível, usando o procedimento de granulação apresentado na Secção 2.2. Pode-se observar na Figura 33, que no processo os sacos eram apenas rasgados e posteriormente enrolavam sobre o rotor do triturador, tendo que ser retirados manualmente, dado obstruírem a passagem para o reservatório de material triturado. A impossibilidade de reciclar mecanicamente este tipo de produtos pode dever-se à elevada flexibilidade dos mesmos, que permite que estes se enrolem sobre o rotor.



Figura 33 – Sacos em HDPE após trituração

Para além disso, no respeitante à trituração dos produtos em fim de vida foram identificadas algumas dificuldades adicionais, nomeadamente:

- A trituração de embalagens inteiras, isto é, para reduzir o tempo do processo de trituração foi necessário cortar previamente, com o auxílio de uma serra, as embalagens a reciclar. Isto acontece sobretudo devido às facas de corte acopladas ao rotor do triturador podem não ser suficientes ou não serem capazes de exercer corretamente a sua função. O número de facas acopladas ao rotor do triturador é variável e um triturador com maior número de facas acopladas iria exercer melhor a função de trituração, por outro lado, as facas acopladas ao rotor podem apresentar desgaste não exercendo corretamente a função de trituração para materiais mais flexíveis.



Figura 34 - Resultado de Trituração de PET, granulado com elevada variação de dimensões

- A dimensão do triturado pode ser demasiado elevada, isto é, a dimensão dos grânulos é assegurada por uma tela perfurada com as dimensões desejadas, localizada após o rotor. Contudo, mesmo com as várias passagens do material pelas facas de corte, as dimensões da tela perfurada podem ser demasiado elevadas para processos posteriores. Isto pode ser gravoso para procedimentos seguintes como iremos verificar na extrusão de filamento, para alimentação do material pela tremonha.

3.2 Secagem dos Materiais

Relativamente à experiência de secagem de PET que pretendia a redução do tempo de secagem do ponto de vista do utilizador comum apresentada no Capítulo 2, é apresentado na Figura 35 um gráfico relativo à percentagem de massa perdida com o tempo.

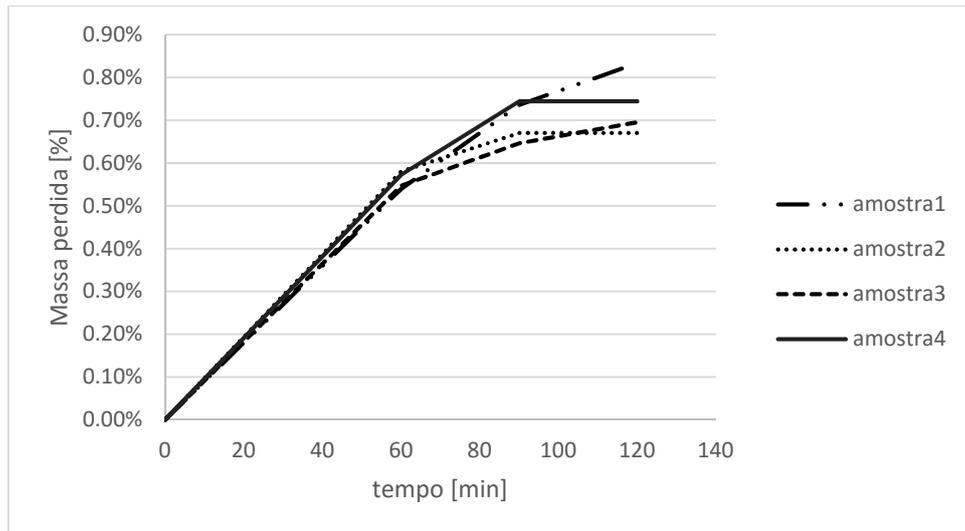


Figura 35 - Percentagem de massa perdida durante o processo de secagem em função do tempo

Pela análise da Figura 35, verifica-se a estabilização da massa perdida para um tempo de secagem de 120 minutos, o que significa que não existe mais humidade na amostra. Considerando os resultados obtidos, as condições ótimas de secagem de PET encontradas são de 120 minutos a uma temperatura de 150°C, ou seja, num processo de reciclagem caseiro, o utilizador poderá secar o seu material em casa, no forno ligado apenas com sistema de ventilação nas condições acima descritas, metade do tempo inicial previsto. Contudo, dada a diversidade de fornos/estufas, a experiência de secagem deve ser repetida pelo utilizador verificando as condições de secagem acima descritas.

O cálculo da percentagem de massa perdida é importante pois considera-se que cerca de 0,1% do peso do PET armazenado é humidade [39] e através dos resultados apresentados na Figura 35 foi possível constatar que a percentagem de humidade perdida é muito superior a esse valor. Considerando que o valor de referência é indicado para materiais armazenados em locais secos, é visível uma diferença substancial entre a percentagem de massa perdida e o valor de referência. Esta diferença poderá ter origem nas condições de armazenamento dos materiais.

Na Figura 36 é possível observar imagens obtidas em Microscopia de Luz Polarizada do filamento de PET extrudido em equipamento de FDM onde se ilustra a presença de bolhas de vapor de água no filamento não sujeito a secagem, Figura 36 a), e no filamento sujeito a secagem, Figura 36 b).

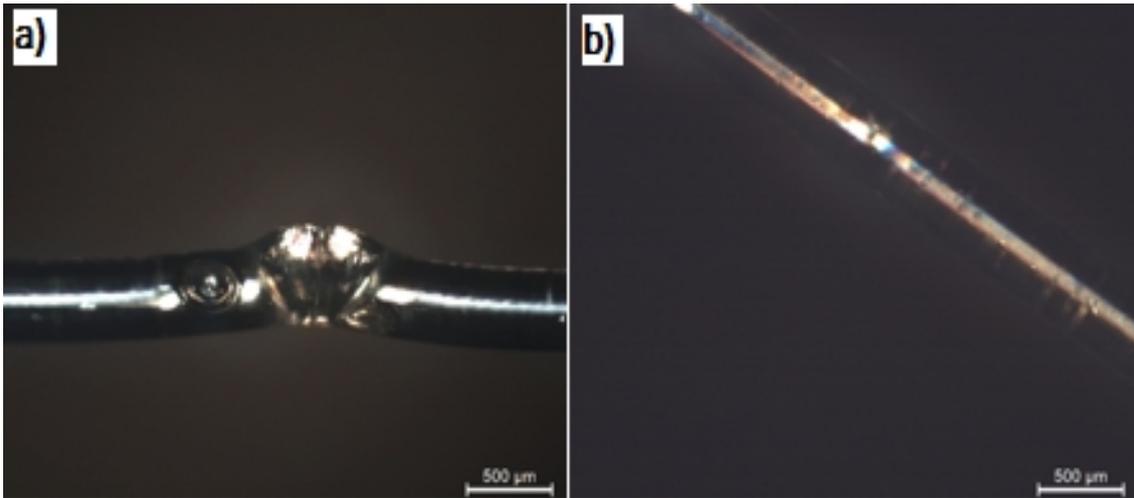


Figura 36 - Presença de bolhas de ar em filamento de PET: a) não sujeito a pré secagem; b) sujeito a pré secagem

Através da análise da Figura 36, observa-se que, após secagem do material, as bolhas de vapor de água deixam de existir, pelo que o processo de secagem dos filamentos é um procedimento importante para que a qualidade do filamento extrudido em FDM não seja afetada e consequentemente não afete a qualidade dos produtos impressos.

3.3 Moldação por Compressão

O processo de moldação por compressão é um processo simples, contudo, moroso. Considerando que se trata da moldação de materiais reciclados e da mistura de materiais reciclados que possuem distintos intervalos de temperaturas de fusão, convém efetuar esta etapa com algum cuidado.

As condições operatórias utilizadas no processamento dos materiais a estudar são apresentadas na Tabela 5. Inicialmente, todos os tempos iriam ser mantidos constantes entre os distintos materiais moldados, contudo, no caso do HDPE, verificou-se que nas extremidades das placas existia material por fundir (ver Figura 37). Para este material aumentando o tempo da fase em que o material estava sob a pressão no interior do molde, esse problema deixava de existir.

Tabela 5 - Condições operatórias de moldação por compressão

Material	Massa (g)	Temperatura de Pré Aquecimento (°C)	Tempo de pré aquecimento (min)	Força de fecho (Ton)	Tempo de Moldação (min)	Temperatura de Arrefecimento (°C)
PET	55	270	8	15-20	5	120
HDPE	45	245	5	15-20	8	80
P25	35	255	8	15-20	5	100
P50	42	270	8	15-20	5	100
P75	42	275	8	15-20	5	100

Relativamente à força de fecho, esta é a responsável pela pressão exercida no material durante a moldação. O valor de força de fecho encontra-se num intervalo entre 15 e 20 toneladas pois, verificava-se que durante o processamento, a força de fecho diminuía. Esta redução da força de fecho dever-se-á provavelmente a pequenas fugas de óleo visíveis e problemas de calibração do equipamento.



Figura 37 – Material não fundido presente nas extremidades de uma Placa de HDPE

A necessidade de o HDPE ser retirado a uma temperatura mais baixa do que a dos restantes materiais, ocorre devido ao empeno das placas em tentativas de desmoldagem com temperatura de arrefecimento superiores. Por outro lado, as placas de PET são retiradas a uma temperatura superior pois, caso a temperatura fosse demasiado baixa, as placas sofririam rotura ao desmoldar, como é possível verificar na Figura 38.

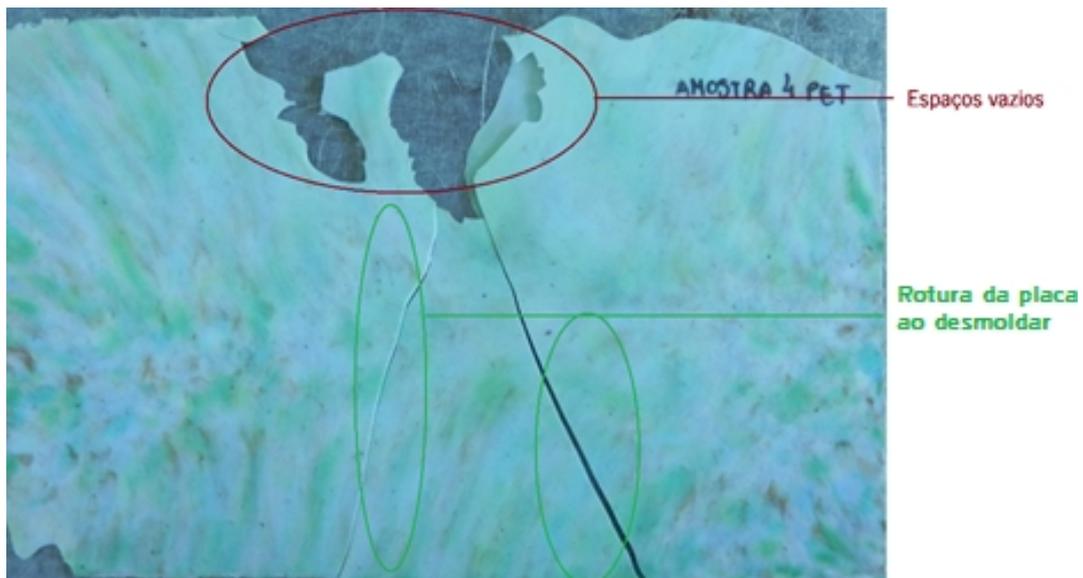


Figura 38 - Placa de PET com presença de espaços vazios e fissuras com origem na desmoldagem

Na Figura 38 é também possível verificar a existência de espaços vazios e manchas acastanhadas no material, cuja possível origem será a presença de humidade no material.

Os longos tempos de ciclo para a moldação de placas com 2 mm de espessura devem-se sobretudo à fase de aquecimento dos pratos da prensa, cerca de metade do ciclo, devido ao facto de as temperaturas de processamento serem relativamente altas quando comparadas com as temperaturas de arrefecimento. A Figura 39 ilustra uma placa de P75 moldada com qualidade



Figura 39 - Placa de P75 moldada com qualidade

3.4 Extrusão de Filamento

O processo de extrusão de filamento é mais complexo do que a moldação por compressão devido sobretudo ao número de variáveis operatórias que é necessário controlar e também ao facto do diâmetro do filamento ser mais sensível a pequenas variações das condições.

3.4.1 Apresentação e análise das condições operatórias

Como já foi referido, a definição das condições operatórias consistiu num processo de tentativa-e-erro. Podemos observar na Tabela 6, as condições operatórias aplicadas em casa região da linha de extrusão esquematizada na Figura 17.

Tabela 6 - Condições operatórias utilizadas para a produção de filamento reciclado

Material	Temperatura de Arranque (°C)	Temperatura do Cilindro (°C)	Temperatura da Fieira (°C)	Distância entre a Fieira e a câmara de arrefecimento (cm)	Velocidade do Parafuso (rpm)	Velocidade dos Rolos de Puxo (m/min)	Rolos de Puxo
PET	210	220	240	1	13	3.8	1 ^{as}
HDPE				10	10.5	3.5	2 ^{as}
P25				3	10.5	3.5	2 ^{as}
P50				2	10.5	3.5	2 ^{as}
P75				4	13.7	3.1	2 ^{as}

Como é possível verificar na Tabela 6, as condições de temperatura utilizadas acabaram por ser iguais para os diferentes materiais processados. Comparando as temperaturas utilizadas no processamento com o perfil de temperaturas de processamento do Anexo I, verificamos que as temperaturas utilizadas para processamento do HDPE são superiores às do anexo e as utilizadas no processamento de PET inferiores. O facto é que processando o material às temperaturas indicadas no Anexo I, no caso de HDPE, o material não flui através da fieira e no caso do PET, o material à saída da fieira apresentava-se demasiado fluído, de tal modo que não a forma da fieira não era suportada pelo material.

Considerando a velocidade do parafuso, devido às forças de atrito existentes entre o material e as paredes do cilindro e o material e o parafuso da extrusora, este influencia no processo de fusão do material. Maior velocidade do parafuso implica maior débito e maior atrito molecular, que por sua vez potencia a fusão dos materiais, sendo a causa da possibilidade de processamento dos distintos materiais à mesma temperatura.

Por sua vez, a velocidade dos rolos de puxo e débito são definidas paralelamente de modo a obter um produto final com um diâmetro aproximado de 1.75 mm. A definição da velocidade dos rolos de puxo é dependente do débito considerando que os filamentos de todos os materiais estudados possuem o mesmo diâmetro e estes possuem comportamentos reológicos distintos. Verifica-se que com o aumento do débito há um aumento da velocidade dos rolos de puxo, exceto no caso do material P75 que foi necessário reduzir a velocidade dos rolos de puxo devido à quebra do filamento ao longo da linha de extrusão devido ao estiramento excessivo. O controlo do diâmetro do filamento foi um processo complicado devido à extensão da linha de extrusão e ao facto de existir escorregamento do filamento ao longo da linha de extrusão que provocava a rotura ou ausência de puxo do mesmo. Para além disso, este diâmetro foi medido manualmente com o auxílio de um paquímetro digital, ou seja, a verificação do diâmetro era realizada em cerca de cada metro de filamento, pelo que ficava um grande espaço sem verificação. Deste modo, recolheram-se amostras de material com um diâmetro compreendido entre 1,6 mm e 1,8 mm.

A distância entre a câmara de arrefecimento e a fieira depende da viscosidade do filamento à saída da fieira, isto é, com a capacidade que o material tem de suportar o peso próprio em função da temperatura. Materiais mais fluidos necessitam de menores distâncias à câmara de arrefecimento, pois não têm capacidade para suportar o peso próprio em função da temperatura e requerem arrefecimento rápido.

A seleção dos rolos de puxo a utilizar, visíveis no esquema da Figura 17, está dependente do arrefecimento do material para que não se verifique deformação do filamento. Deste modo podemos verificar que apenas o PET é estirado nos primeiros rolos de puxo. A presença de HDPE nos materiais leva a que o filamento se torne mais flexível e como o arrefecimento ainda não está concluído, ele deforma ao ser puxado nos primeiros rolos, sendo os materiais com presença de HDPE estirados nos segundos rolos de puxo da linha.

3.4.2 Problemas no processamento e defeitos do filamento produzido

Relativamente a problemas durante o processamento, verificou-se que a resistência da fieira arrefecia devido à corrente de ar de proveniente do sistema de refrigeração do motor. Este problema surge devido à curta distância entre a fieira e o motor da extrusora. Como solução criou-se uma barreira de proteção entre a tremonha e o motor de modo a que a corrente de ar frio não atingisse a fieira e fosse possível a extrusão do filamento nas temperaturas descrita na Tabela 6.

Verificou-se ainda, relativamente ao processamento, que a entrada do material triturado através da tremonha não era contínua, como se existissem espaços com ar dividindo o material triturado. A existência desses poços de ar na tremonha deve-se à elevada dimensão do material triturado e ao baixo peso do mesmo, ou seja, o material que está por cima na tremonha não tem peso suficiente para empurrar o material que se encontra à entrada do cilindro, deixando espaços vazios e cortando o fluxo de material do cilindro. Este problema impedia a produção de filamento de dimensão uniforme e constante.

A solução encontrada para este problema está visível na Figura 40 e resume-se a remoção da tremonha da entrada do cilindro e inserção manual do material. Deste modo, para além do controlo das variáveis operatórias ainda seria necessário controlar a alimentação de material para o cilindro.



Figura 40 - Alimentação da Extrusora para produção de filamento de PET devido ao baixo peso do triturado

Como é possível verificar na Figura 41, o produto final possuiu vários defeitos que não foi possível corrigir durante o processamento.

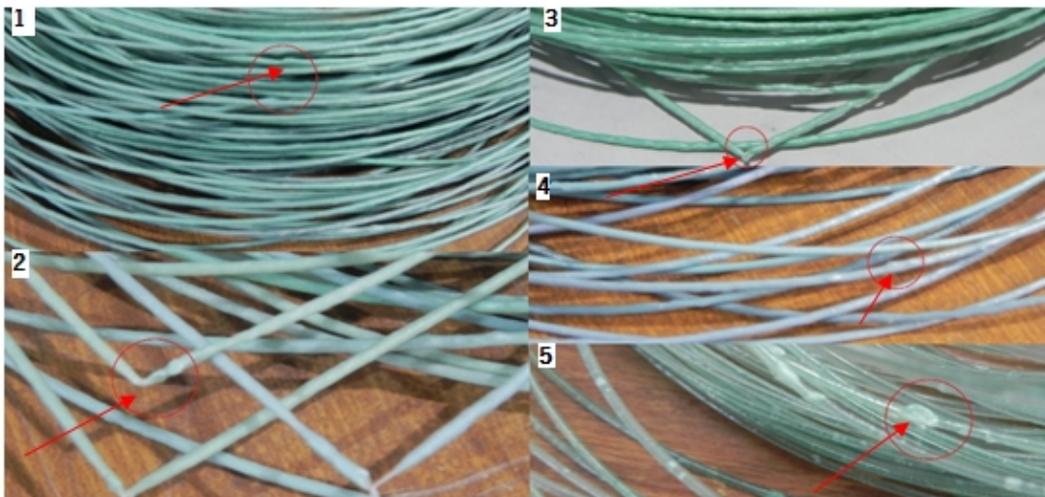


Figura 41 - Defeitos em Extrusão de Filamento (1.Mistura 1, 2.Mistura 2, 3.Mistura 3, 4.HDPE, 5.PET)

Um dos defeitos que é verificável em todos os materiais processados é a rugosidade do filamento, um filamento que apresente irregularidades e de diâmetro não homogêneo ao longo do seu comprimento comprometerá, no caso do estudo, a alimentação pelo sistema de engrenagem no equipamento de FDM para a feira.

Por outro lado, são visíveis também, nos Pontos 2, 3 e 4 da Figura 41, irregularidades, que poderão tratar-se de grânulos de material não fundido, e diminuições bruscas no diâmetro do filamento que poderão de igual modo comprometer o puxo do filamento pelo sistema de engrenagem presente no equipamento de FDM.

Para além disso, o Ponto 5, pelo facto de o material ser transparente, mostra a presença de material não fundido no interior do filamento que pode ter consequências nos processos seguintes do estudo, como o entupimento da feira do equipamento descrito na Subsecção 2.5.1.

3.5 Deposição de Filamento Fundido

O sucesso de uma boa impressão está dependente da qualidade do filamento e a qualidade das peças impressas depende, por sua vez, da definição correta dos parâmetros de impressão. No decorrer desta subsecção é possível encontrar as variáveis operatórias utilizadas na Tabela 7, bem como a descrição de problemas no processamento e defeitos nos produtos impressos.

3.5.1 Condições operatórias

A definição das variáveis operatórias ideais é fundamental para uma impressão sem defeitos. Definiu-se que o enchimento da peça seria de 100% com uma deposição linear do filamento a 45°, cruzada a um ângulo de 90° entre camadas, como podemos visualizar na Figura 42.

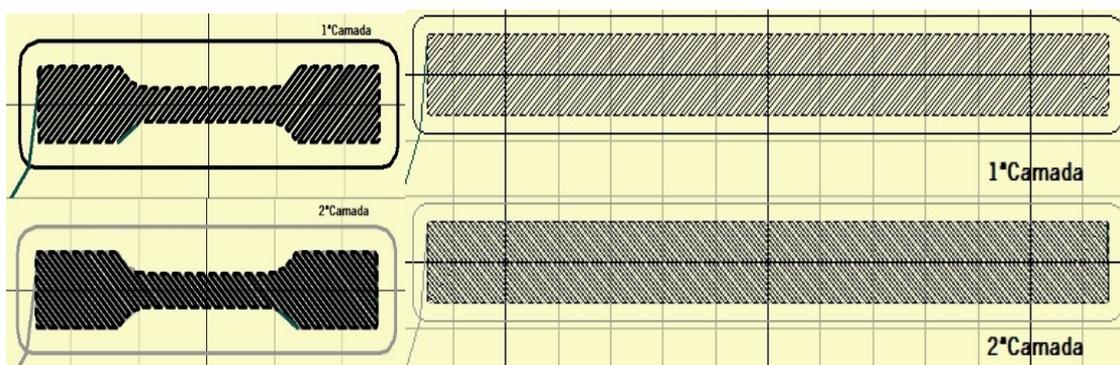


Figura 42 – Deposição do filamento e orientação entre camadas nas impressões de FDM

As Tabelas 7 e 8 descrevem as condições de temperaturas e velocidades utilizadas na impressão para os dois tipos de provetes impressos. Apenas foi possível a impressão em FDM com dois materiais sendo na subsecção seguinte descritos os problemas que impossibilitaram a impressão dos restantes materiais.

Tabela 7 - Condições operatórias para impressão de provetes de tração

Material	Temperatura de Impressão (°C)	Temperatura da Superfície de Construção (°C)	Velocidade de enchimento da 1ª camada (mm/s)	Velocidade de enchimento da camada superior (mm/s)	Velocidade de enchimento sólido (mm/s)	Enchimento (mm/s)
PET	235	50	30	30	35	45
P75	240	Tamb	25	25	30	35

Relativamente às temperaturas de impressão, as temperaturas utilizadas para ambos os materiais foram próximas/iguais às temperaturas utilizadas para extrusão do filamento, verificando degradação, devido ao novo ciclo térmico ao qual os materiais são sujeitos, não influenciou nas condições de temperatura.

A temperatura da superfície de construção que tem como função promover a adesão entre a primeira camada do objeto e superfície de construção. No caso da mistura P75 não foi necessário aquecer a superfície de construção pois apenas com o auxílio da fita de pintura em papel o material aderiu à superfície de construção. No caso do PET, foi necessário colocar a superfície de construção a uma temperatura de 50°C pois o filamento depositado para a primeira camada não aderiu à fita de pintura em papel.

No que diz respeito às velocidades de impressão, verifica-se que estas são superiores quando se utiliza PET pois, a fluidez do material é superior do que no caso da mistura P75.

Tabela 8 - Condições operatórias para impressão de provetes de impacto e flexão

Material	Temperatura de Impressão (°C)	Temperatura da Superfície de Construção (°C)	Velocidade de enchimento da 1ª camada (mm/s)	Velocidade de enchimento da camada superior (mm/s)	Velocidade de enchimento sólido (mm/s)	Enchimento (mm/s)
PET	245	50	45	50	55	60
P75	245	Tamb	40	40	45	50

A variação da geometria dos objetos a imprimir, faz com que as variáveis operatórias tenham que ser alteradas mesmo quando produzidas com o mesmo material. O aumento ligeiro das temperaturas de impressão relativamente às temperaturas de impressão utilizadas para a produção de provetes de tração deve-se à necessidade de um filamento com maior fluidez para a impressão dos provetes de impacto e flexão, ou seja, paralelamente com a seleção das velocidades de impressão adequadas há necessidade que o material flua regularmente pela fieira, evitando vazios e promovendo a adesão entre o filamento depositado e melhorando a qualidade superficial dos produtos.

Para além disso, o aumento das velocidades de impressão deve-se também a uma redução do tempo de impressão que, para os provetes de impacto nas condições da Tabela 8 era expectável de 9 minutos aproximadamente, e no caso das velocidades aplicadas na Tabela 7 seria de 15 minutos aproximadamente. Na tentativa de aumentar ainda mais as velocidades de impressão, verificaram-se defeitos nos produtos pelo que as condições de velocidade de impressão utilizadas para produção de provetes de impacto foram as descritas na Tabela 8.

3.5.2 Dificuldades associadas ao processamento por FDM

O primeiro problema relativo à produção de objetos em FDM que surgiu é relativo ao aperto do filamento no sistema de engrenagens. Como mencionado anteriormente, este sistema de engrenagens é responsável por alimentar o filamento até à fieira forçando a passagem de fundido através da mesma.

O filamento deve, portanto, estar ajustado a este sistema de engrenagens, não demasiado apertado pois, o sistema de engrenagens possui uma roda dentada que iria moer e deformar o filamento impossibilitando a alimentação do mesmo, visível na Figura 44 b). Tendo em conta o diâmetro irregular do filamento, o ajuste do aperto do sistema de engrenagens foi auxiliado por uma mola e uns elásticos acoplados à cabeça de impressão, como é possível visualizar na Figura 43. Através da força exercida pelos elásticos e mola, foi possível assegurar o contacto contínuo entre o filamento e o sistema de engrenagens. Para além disso, a mola assegurou o ajuste do aperto com a variação do diâmetro, permitindo deste modo um fluxo uniforme de material.

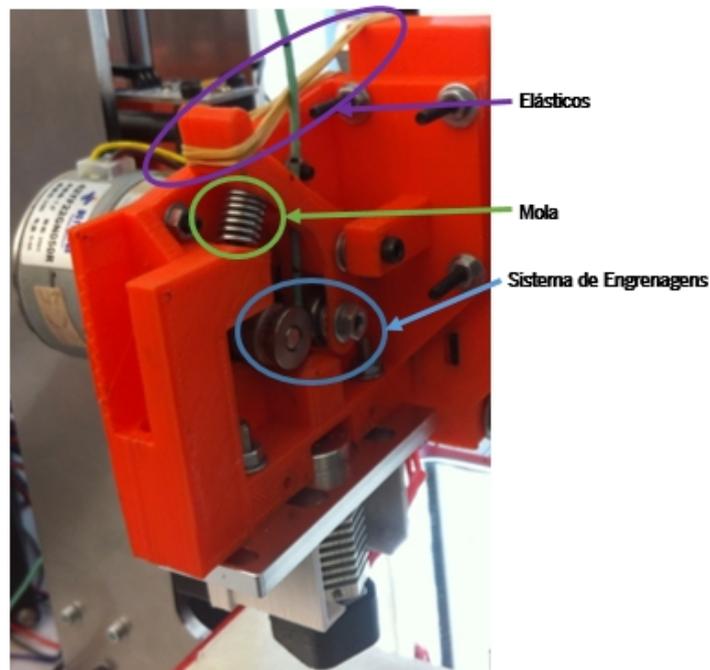


Figura 43 - Solução para aperto por parte do sistema de engrenagem do filamento no equipamento de FDM

A moldação do filamento reciclado em FDM não se revelou um processo fácil, não sendo viável a impressão de alguns materiais, tais como, HDPE, P25 e P50.

No caso do HDPE, verificou-se que a sua impressão não era viável devido à flexibilidade do filamento. Inicialmente pensou tratar-se de dissipação de calor no material que levava a que este se deformasse na região do sistema de engrenagens como é possível ver na Figura 44 a). Contudo, baixou-se a temperatura até aos 150 °C, limiar do intervalo de temperatura de fusão do HDPE, e verificou-se que o material continuava a deformar. Poderia então tratar-se de demasiado aperto do filamento no sistema de engrenagens, contudo, retirou-se a mola e o elástico da cabeça de impressão e o sistema de engrenagens não puxava o filamento. Colocou-se alternadamente a mola e o elástico e verificava-se uma alimentação descontínua do filamento e com deformação do mesmo, visível na Figura 44 b). Isto indica que a rugosidade e irregularidades do filamento, indicada nos defeitos de extrusão de filamento, são um problema para o processamento em FDM, pois ao passar na roda dentada do sistema de engrenagens, o filamento deforma, enrolando sobre a entrada para o *HOT-END*. Deste modo, concluiu-se que a impressão em FDM com filamento de HDPE não era viável.

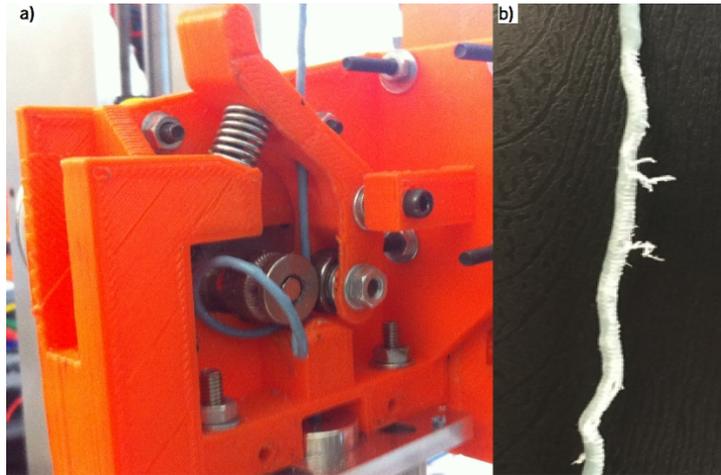


Figura 44 – Deformação do filamento pelo sistema de engrenagens: a) filamento flexível; b) filamento moído

As misturas P25 e P50 demonstraram ter problemas de moldação semelhantes ao caso anterior. Para além disso, verificou-se que a viscosidade dos materiais é elevada e, por isso, aumentou-se a temperatura até à temperatura máxima atingida pelo equipamento de FDM, 265 °C, contudo, a saída do material não foi contínua devido à fluidez reduzida e o filamento na região do sistema de engrenagens deformava. Como se tratam de materiais semi-cristalinos reciclados, provenientes de vários tipos de graus, e tendo em conta que a passagem do estado fundido para o estado sólido deste tipo de materiais dá-se numa gama muito curta de temperaturas, poderão existir partículas de material não fundido no interior da fieira provocando o entupimento da mesma.

Para além destes problemas que não foi possível de solucionar, a Figura 45 apresenta ainda alguns defeitos que surgiram nas peças impressas e problemas que ocorreram durante a impressão. A Figura 45 a) representa a falha de PET durante a impressão de um provete de tração. Este tipo de falha ocorreu devido a irregularidades do filamento e entupimento da fieira. Relativamente à Figura 45 b), esta representa a baixa adesão da P75 à superfície de construção (fita de pintura em papel). O facto é que as primeiras camadas eram depositadas corretamente, contudo, após a sobreposição de algumas camadas, os cantos do provete tinham tendência a levantar da superfície de construção. A Figura 45 c) e 45 d) ilustram o estado do filamento quando ocorre entupimento da fieira ou quando o mesmo apresenta demasiadas irregularidades que deforma na passagem pela engrenagem.

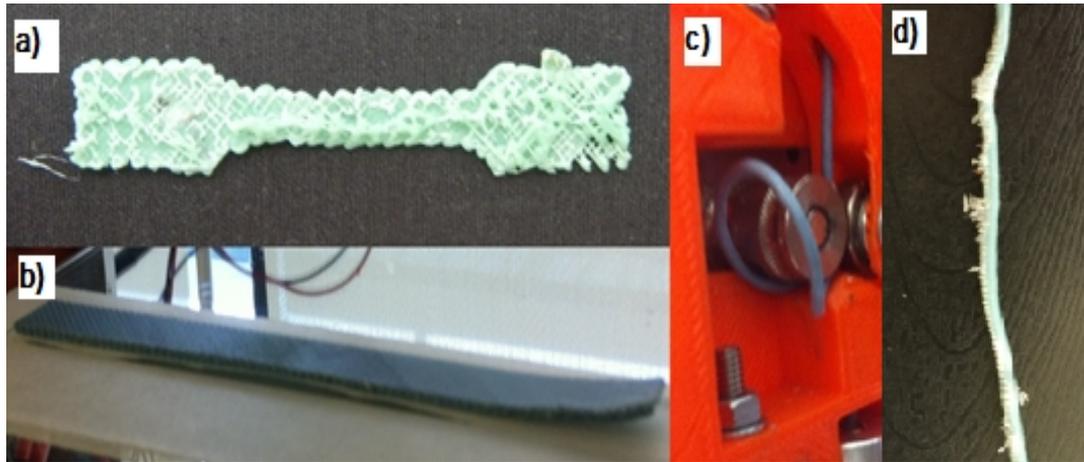


Figura 45 - Dificuldades no processo de Impressão 3D de vários materiais

3.5.3 Apresentação e análise dos resultados

Foi possível produzir por FDM provetes em PET e P75. No que diz respeito à qualidade superficial dos provetes, verifica-se, na Figura 46 que os provetes produzidos com PET possuem melhor acabamento superficial e conseqüentemente um menor número de defeitos tais como, falhas de material ou irregularidades na deposição do fundido.

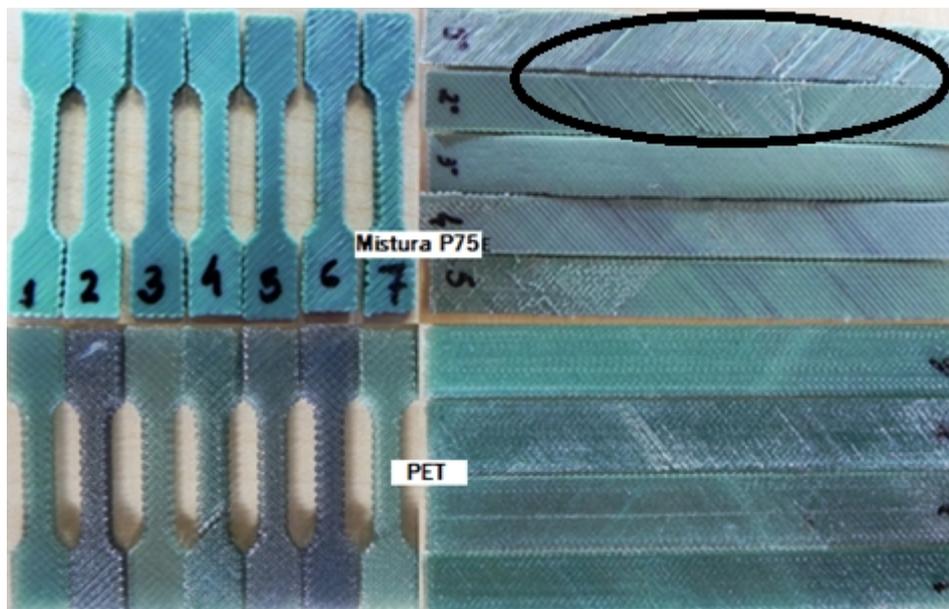


Figura 46 - Provetes produzidos em FDM

3.6 Caracterização Mecânica

Tendo em conta os materiais que podem ser aplicados em FDM, é necessário conhecer as suas propriedades mecânicas de modo a estes poderem ser selecionados para a produção de objetos dependendo das aplicações e dos esforços aos quais os mesmos vão estar sujeitos. Ao longo desta Subsecção serão apresentados e interpretados os resultados relativos aos ensaios de tração, flexão e impacto efetuados aos produtos moldados por compressão e FDM. Inicialmente serão abordados os resultados obtidos em moldação por compressão e de seguida será apresentada uma comparação dos mesmos com os resultados obtidos nas peças produzidas por FDM.

3.6.1 Moldação por Compressão

Ensaio de flexão

Após a realização dos ensaios de flexão efetuados sobre as condições descritas no Capítulo 2, os resultados de tensão e deformação de cedência em flexão e módulo de elasticidade para materiais moldados por compressão podem ser visualizados nas Figuras 47 e 48 respetivamente. No Anexo VI é possível visualizar as curvas tensão-deformação obtidas em cada condição estudada.

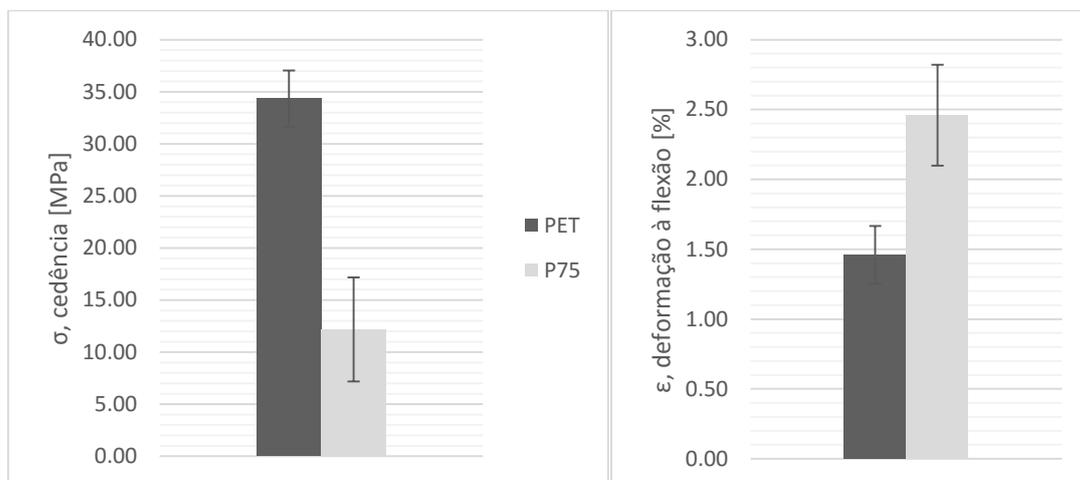


Figura 47 - Resultados de tensão e deformação de cedência em flexão dos materiais moldados por compressão

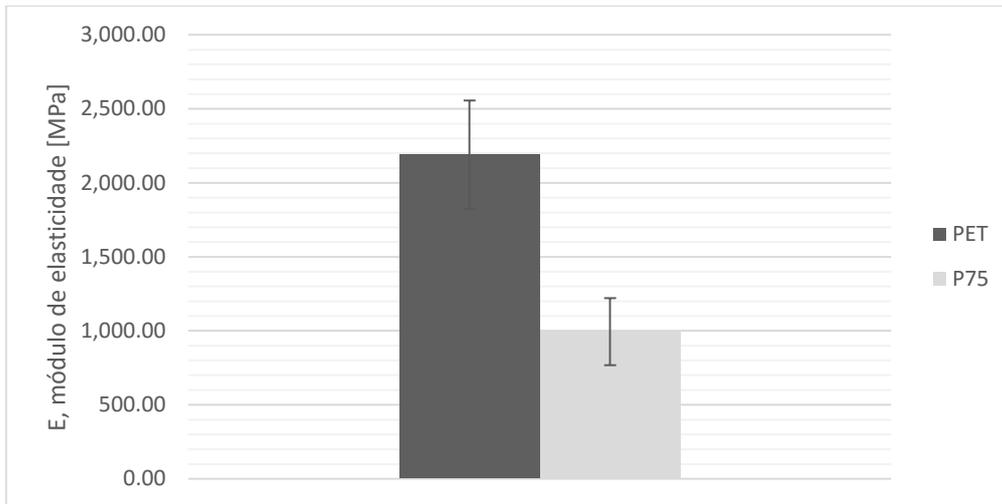


Figura 48 - Módulo de Elasticidade obtido em flexão dos materiais moldados por compressão

Nas Figuras 47 e 48, verifica-se que à uma redução da tensão de cedência e módulo de elasticidade do material quando se adiciona HDPE à mistura. Esta redução está de acordo com as propriedades dos materiais virgens apresentadas nos Anexos III e IV, isto é, é expectável que a tensão de cedência e módulo de elasticidade de PET no estado virgem sejam superiores quanto maior for a percentagem de PET no material. Pela aplicação da lei das misturas para as propriedades de tensão de cedência e módulo de elasticidade, Equação 7 e 8, respetivamente, podemos concluir que o valor das propriedades obtidas também é inferior, como esperado. Verifica-se também que o reprocessamento do PET não afetou significativamente as suas propriedades, obtendo um valor médio de 73% do módulo de elasticidade relativamente à propriedade do material virgem.

Relativamente à deformação de cedência, verifica-se um aumento do valor quando adicionado HDPE. Tendo em consideração que o PET é um material mais frágil que o HDPE, era expectável que a sua deformação de cedência fosse inferior à dos restantes materiais estudados. A Equação 9 trata a aplicação da lei das misturas para a deformação de cedência.

$$\sigma_{ced_{mistura}} = \%_{PET}\sigma_{ced_{PET}} + \%_{HDPE}\sigma_{ced_{HDPE}} = 70 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$E_{mistura} = \%_{PET}E_{PET} + \%_{HDPE}E_{HDPE} = 2467,5 \text{ MPa} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{ced_{mistura}} = \%_{PET}\varepsilon_{ced_{PET}} + \%_{HDPE}\varepsilon_{ced_{HDPE}} = 61,5\% \quad (9)$$

Pelos valores obtidos para as respectivas propriedades de mistura nas Equações 7,8 e 9, verifica-se uma redução elevada das propriedades. Estes resultados pode ser consequência da eventual baixa adesão dos materiais que afeta negativamente as propriedades mecânicas.

Analisados os resultados de comportamento à flexão dos materiais moldados por compressão, pode concluir-se que o material com melhores propriedades quando sujeito a este tipo de esforços é o PET. Apesar da redução do valor de deformação de cedência quando comparado com o material no estado virgem, esta propriedade é apenas 10 % do valor da propriedade do material virgem, o que significa que a sua fragilidade é maior, o material reciclado possui boas propriedades de tensão de cedência e módulo de elasticidade, comparativamente com a mistura analisada e o material virgem. Estas propriedades abrangem 40% e 73% das propriedades de tensão de cedência e módulo de elasticidade do material virgem, respetivamente.

Ensaio de tração

Após a realização dos ensaios de tração efetuados sobre as condições descritas no Capítulo 2, os resultados de tensão e deformação de cedência e módulo de elasticidade para materiais moldados por compressão podem ser visualizados nas Figuras 49 e 50, respetivamente. As curvas tensão-deformação resultantes do tratamento de dados provenientes dos ensaios de tração encontram-se disponíveis no Anexo VII.

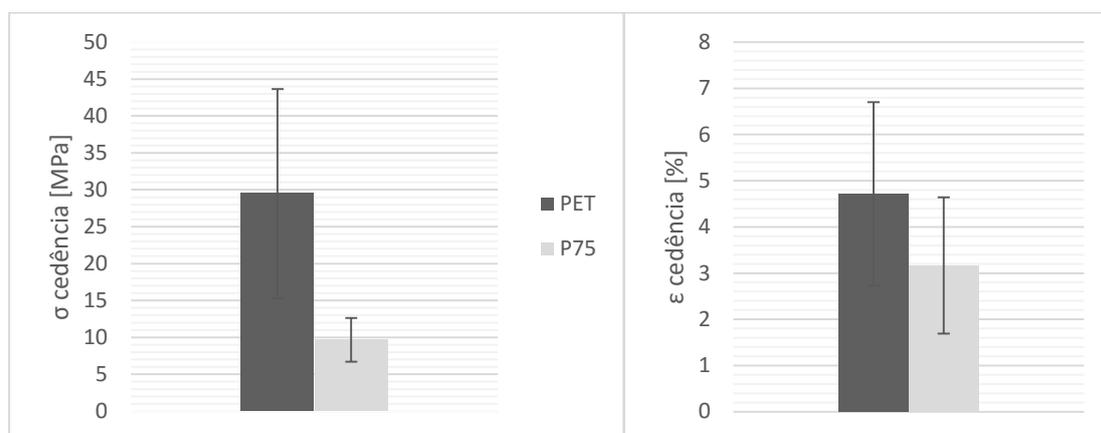


Figura 49 - Resultados de tensão e deformação de cedência em ensaios de tração de materiais moldados por compressão

Através da análise das Figuras 47 e 49 é possível verificar a semelhança entre os valores de tensão de cedência obtidos nos testes de tração com os valores da mesma propriedade obtidos nos ensaios de flexão. O mesmo, não se verificou nos resultados para a deformação à cedência obtidos (ver Figuras 47 e 49), sendo estes valores muito superiores aos valores obtidos nos ensaios de flexão. Este aumento não justificável do valor de deformação à cedência quantificada nos ensaios de tração relativamente aos resultados obtidos em flexão, pode indiciar a existência de escorregamento entre o provete e as amarras durante o teste. Desta forma, a deformação calculada não corresponde ao valor real, o que invalida estes resultados.

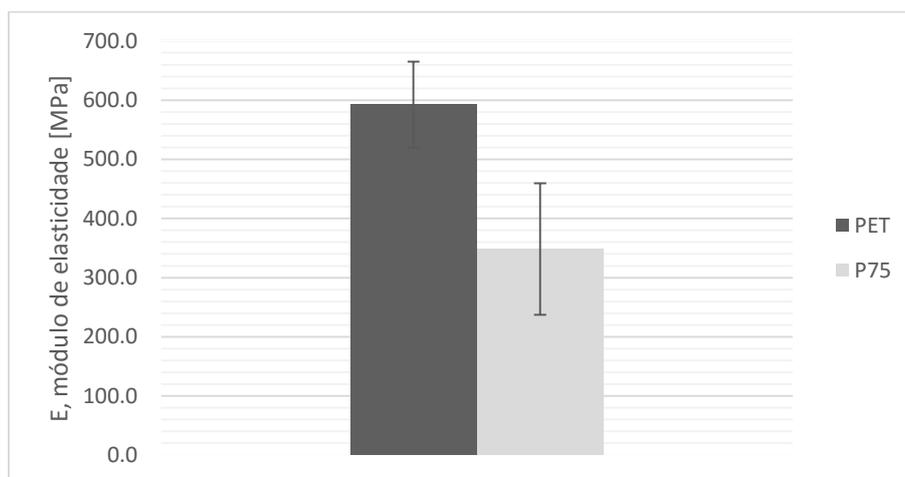


Figura 50 - Módulo de Elasticidade em ensaios de tração de materiais moldados por compressão

Pela análise das Figuras 49 e 50, verifica-se que a adição de HDPE ao PET provoca uma redução do módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade é, contudo, uma propriedade intrínseca dos materiais, pelo que deveria ser igual independentemente do esforço ao qual o material está sujeito. Esta igualdade não se verifica, sendo o segundo valor previsto nos testes de tração bastante inferior. Esta variação das propriedades pode dever-se à não utilização de extensómetro durante a realização dos ensaios e a dimensão reduzida dos provetes e consequentemente à existência de escorregamento dos mesmos nas amarras durante o ensaio. Para além disso, verifica-se que as barras de erro são mais extensas no ensaio de tração. Este facto pode, mais uma vez, evidenciar uma maior precisão dos ensaios de flexão.

Considerando, quantitativamente os resultados obtidos, verifica-se que o valor de tensão e deformação de cedência são de 35% e 31% respetivamente, do valor das propriedades do PET virgem. Por sua vez, o módulo de elasticidade obtido é apenas 20% do valor da propriedade do material virgem.

Atentando os valores superiores de tensão de cedência e módulo de elasticidade, tanto em ensaios de flexão como de tração, podemos concluir que o PET possui maior resistência mecânica que a mistura P75.

Ensaio de impacto

Na Figura 51 é possível visualizar os resultados obtidos a partir dos ensaios de impacto efetuados aos provetes moldados por compressão.

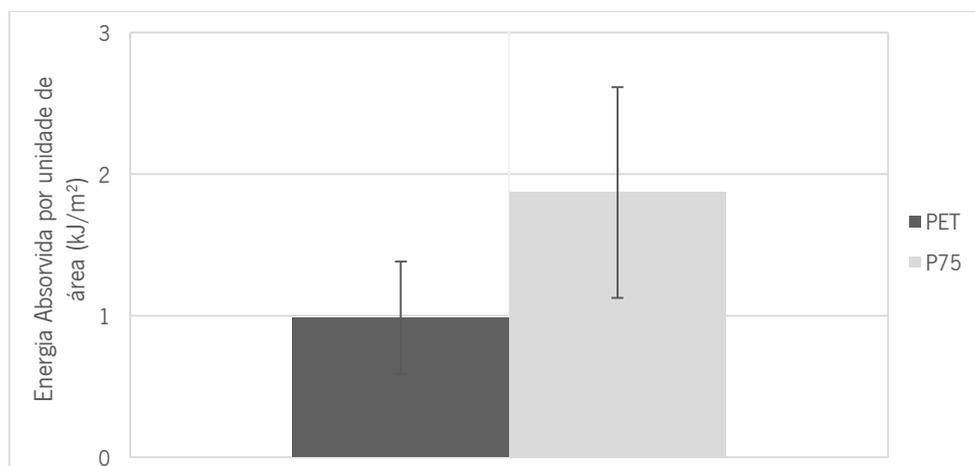


Figura 51 - Energia absorvida por unidade de área dos materiais moldados por compressão

Através da análise dos resultados obtidos, verifica-se que há um aumento da energia absorvida por unidade de área com a inserção de HDPE. Segundo as propriedades dos materiais virgens (Anexo III e IV) e pela aplicação da lei das misturas, este aumento é expectável. Contudo, estes valores encontram-se muito longe dos valores das propriedades dos materiais virgens. No caso do PET, o valor obtido corresponde a cerca de 50% da propriedade do material virgem. No caso da mistura P75, o valor da propriedade aplicando a lei das misturas deveria ser de 15,25 kJ/m², segundo a Equação 10, obtendo-se apenas 12% desse valor.

$$E_{absorvida_{mistura}} = \%_{PET} E_{abs_{PET}} + \%_{HDPE} E_{abs_{HDPE}} = 15,25 \text{ kJ/m}^2 \quad (10)$$

A diferença entre o valor da propriedade da mistura obtido e o valor esperado pelo cálculo efetuado na Equação 10 pode dever-se à baixa adesão entre os materiais que tem influencia negativa sobre as propriedades mecânicas.

Pelos resultados obtidos, pode concluir-se que o material com maior capacidade de absorção de energia quando sujeito a esforços dinâmicos, como impacto, é a mistura P75.

3.6.2 Moldação por Compressão vs. FDM

A comparação entre as propriedades mecânicas dos materiais moldados por compressão e por FDM foi realizada unicamente para os materiais que foram processados com ambas as técnicas, ou seja, trata-se de uma comparação entre o PET e a mistura P75.

Ensaio de flexão

As Figuras 52, 53 e 54 permitem a comparação direta da tensão e deformação de cedência e módulo de elasticidade do PET e da mistura P75 utilizados na produção por FDM e em moldação por compressão (MC), quando sujeitos a esforços de flexão. As curvas tensão-deformação originais, podem ser visualizadas no Anexo VI.

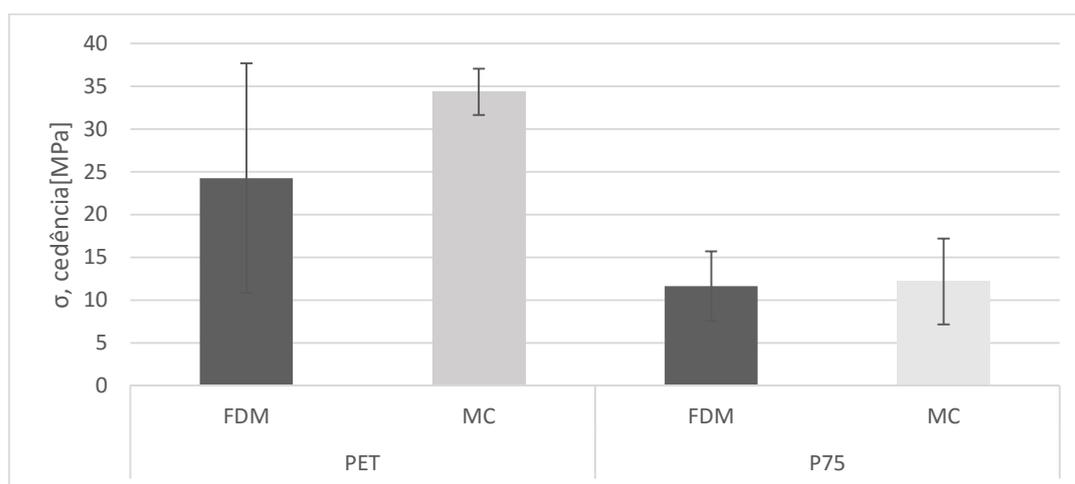


Figura 52 - Comparação da tensão de cedência obtida em ensaios de flexão dos produtos utilizados em MC e FDM

Pela análise da Figura 52, verifica-se a redução da tensão de cedência dos materiais utilizados na produção em FDM. Cerca de 30% no caso do PET e de 5 % no caso da mistura P75 relativamente aos resultados obtidos em MC. No que diz respeito à deformação de cedência (ver Figura 53), verifica-se uma diferença exígua, justificável pelo desvio padrão, no caso do PET. No que diz respeito à mistura P75 verifica-se uma redução da propriedade quando o material é de 30% relativamente ao valor obtido em MC.

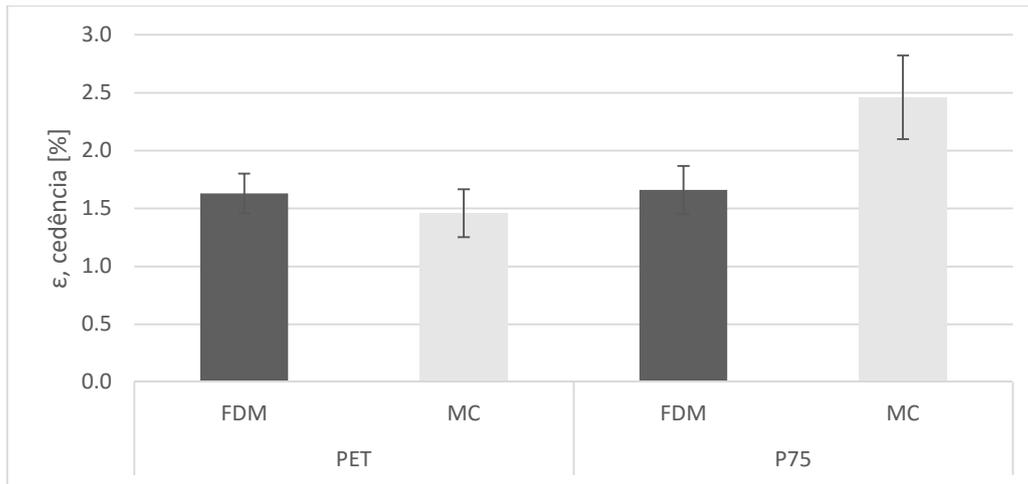


Figura 53 - Comparação da deformação de cedência obtida em ensaios de flexão dos produtos utilizados em MC e FDM

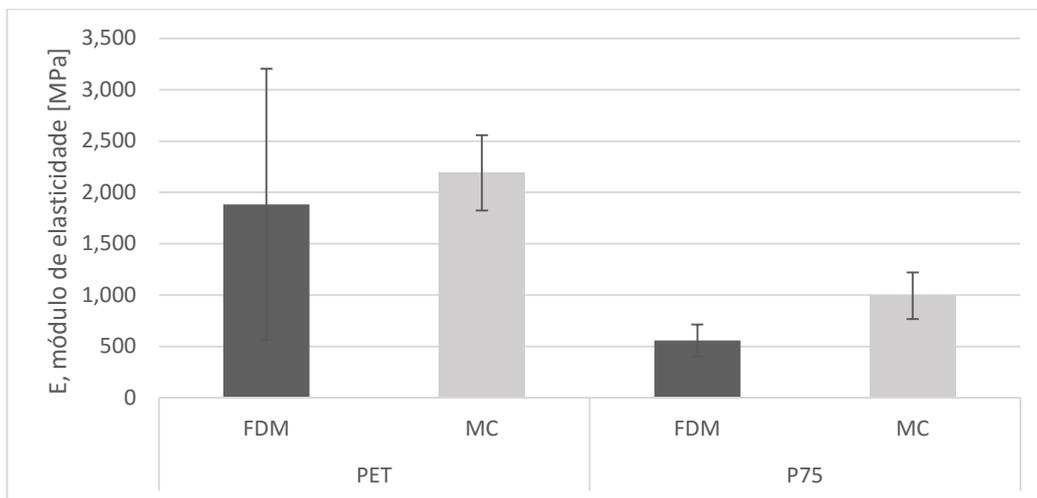


Figura 54 - Comparação do módulo de elasticidade obtido em ensaios de flexão dos produtos utilizados em MC e FDM

Uma redução semelhante entre os materiais moldados por compressão e os materiais utilizados em FDM ocorreu para o módulo de elasticidade. Verifica-se que para os materiais moldados por FDM há uma redução da propriedade na ordem de 15% no caso do PET e de 45 % no caso da mistura P75 relativamente aos resultados obtidos em moldação por compressão.

Esta redução das propriedades dos materiais utilizados em FDM relativamente aos utilizados em moldação compressão era previsível tendo em consideração as limitações da produção de objetos em FDM. A falta de adesão entre camadas pode afetar gravemente os resultados obtidos em flexão sobretudo se as camadas externas (superior e inferior) dos provetes analisados não apresentarem elevada coesão. Para além disso, verifica-se, com maior notoriedade no caso do PET, que os intervalos do desvio padrão são maiores para os materiais utilizados em FDM. Este aumento dos intervalos do desvio-padrão devem-se igualmente às limitações dos produtos produzidos por esta técnica, tais como vazios entre o filamento depositado e limitações na adesão entre as várias camadas que variam de produto para produto e consequentemente originam a dispersão dos resultados obtidos.

Tal como em moldação por compressão, também através dos resultados obtidos na caracterização mecânica dos provetes produzidos em FDM, se verifica que a inserção de HDPE tem influência negativa sobre as propriedades mecânicas, efeito da aplicação em certa medida da lei das misturas.

Ensaio de tração

As Figuras 55, 56 e 57 permitem a comparação direta da tensão e deformação de cedência e módulo de elasticidade do PET e da mistura P75 utilizados na produção por FDM e em moldação por compressão, quando sujeitos a esforços de tração. As curvas tensão-deformação originais, resultantes do tratamento de dados provenientes dos ensaios de tração encontram-se disponíveis no Anexo VII.

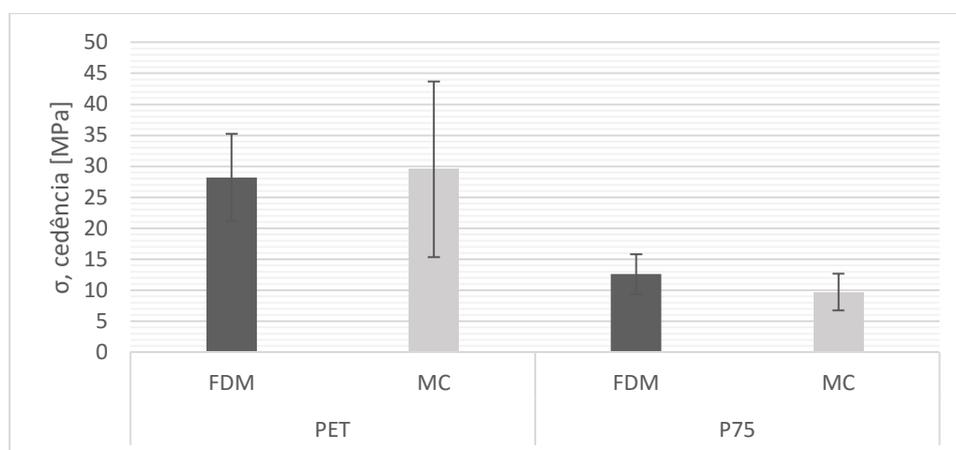


Figura 55 - Comparação da tensão de cedência obtida em ensaios de tração dos produtos utilizados em MC e FDM

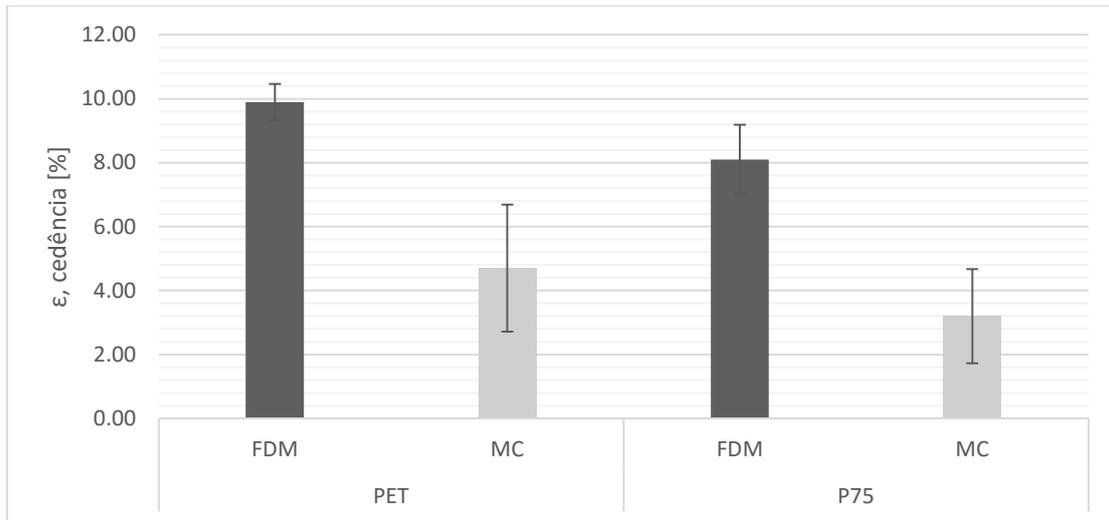


Figura 56 - Comparação da deformação de cedência obtida em ensaios de tração dos produtos utilizados em MC e FDM

Pela análise das Figuras 55 e 56 é possível verificar que as propriedades das peças produzidas com FDM são superiores às propriedades dos produtos maciços produzidos por moldação por compressão. Considerando as limitações dos objetos produzidos em FDM, os resultados obtidos para a deformação de cedência, ilustrados na Figura 56, contestam o esperado. Estes resultados podem ser consequência do anterior processo de extrusão de filamento que promove a homogeneização do material, especialmente no caso da mistura P75, promovendo a adesão entre os distintos materiais e melhorando as suas propriedades de deformação à cedência e também devido ao escorregamento dos provetes, devido às suas reduzidas dimensões durante os ensaios. Deste modo verifica-se um aumento de cerca de 50% do PET e de 60 % da mistura P75 da deformação de cedência dos produtos produzidos em FDM relativamente aos mesmos moldados por compressão.

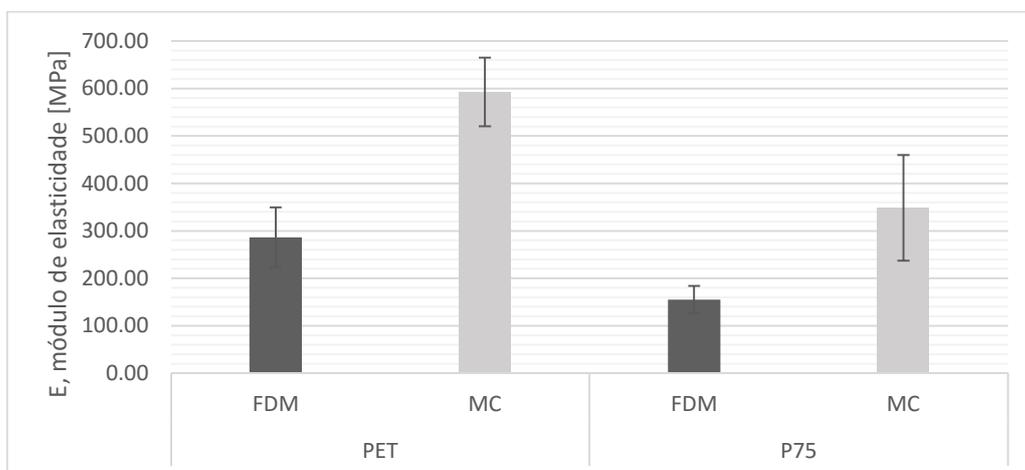


Figura 57 - Comparação do módulo de elasticidade obtido em ensaios de tração dos materiais moldados por compressão e FDM

Pela análise das Figuras 55 e 57, observa-se que os resultados obtidos relativos à tensão de cedência e módulo de elasticidade dos produtos produzidos por FDM são inferiores aos dos materiais sólidos produzidos em MC, como expectável devido às limitações dos produtos produzidos por FDM. Verifica-se uma redução do módulo de elasticidade na ordem de 50%, do PET e de 60% da mistura P75 dos materiais utilizados na produção por FDM relativamente aos mesmos utilizados em moldação por compressão. As variações dos valores de tensão de cedência não são significativas em qualquer dos materiais. Esta redução das propriedades, tal como nos ensaios de flexão é justificável pelas limitações dos produtos de FDM.

Ensaio de impacto

A Figura 58 permite a comparação direta da energia absorvida por unidade de área do PET e da mistura P75 utilizados na produção por FDM e em moldação por compressão, quando sujeitos a impacto.

Pela análise dos resultados obtidos, podemos observar que a inserção de HDPE influencia positivamente a absorção de energia, ou seja, torna o material menos frágil. Estes resultados são expectáveis tendo em conta as propriedades dos materiais virgens (Anexos III e IV) e considerando a lei das misturas apresentada na Equação 10, onde o valor de energia absorvida por unidade de área deveria ser aproximadamente 2 kJ/m² no caso do PET, e 15,25 kJ/m² para a mistura com adição de 25% de HDPE.

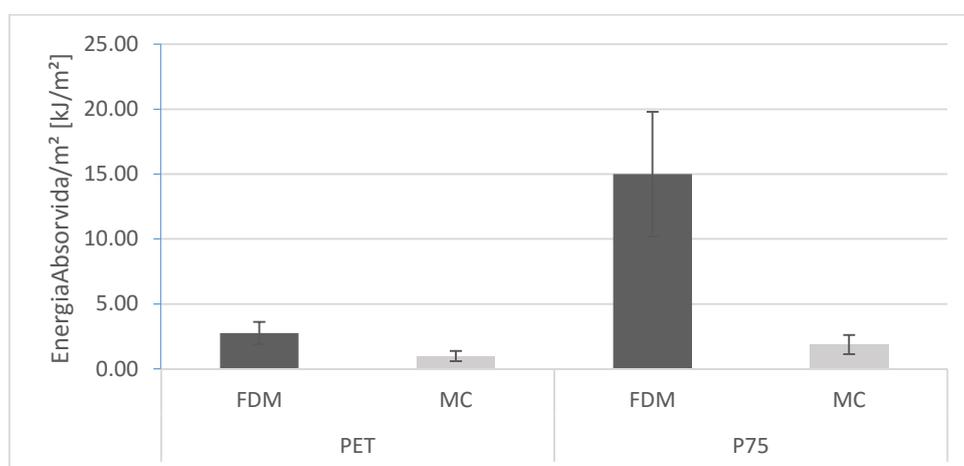


Figura 58 - Comparação da energia absorvida por m² obtida em ensaios de impacto dos produtos utilizados em MC e FDM

Os materiais utilizados em FDM apresentam maior absorção de energia por unidade de área do que os materiais moldados por compressão. Através da análise da Figura 58, pode observar-se uma redução da energia absorvida por unidade de área é de cerca de 60%, do PET e de 90% da mistura P75 dos materiais moldados por compressão relativamente aos utilizados na produção em FDM. Porém, é visível uma maior dispersão dos resultados obtidos com peças produzidas por FDM, através dos intervalos de desvio-padrão, facto que poderá ser consequência direta da limitada adesão entre camadas e vazios característicos de produtos obtidos por esta técnica. Contudo, este aumento das propriedades dos materiais moldados por FDM não era expectável, sobretudo considerando a elevada dimensão das dimensões obtidas. Considerando que, contrariamente aos ensaios de flexão, em que o comportamento das camadas exteriores é o mais relevante, tanto em ensaios de tração como ensaios de impacto, o comportamento de toda a secção transversal influencia uniformemente os resultados obtidos. As peças produzidas por compressão apresentam baixa homogeneização no interior da peça, estando as camadas interiores mais suscetíveis. Esta baixa homogeneização das camadas internas dos provetes moldados por compressão pode resultar de uma fusão ineficiente, pode ser a consequência dos resultados obtidos em ensaios de tração, Figura 56, e ensaios de impacto, Figura 58, isto é, a baixa homogeneização do material no interior da peça moldada por compressão influencia negativamente as propriedades mecânicas dos materiais de tal modo que supera de modo negativo as limitações das peças produzidas por FDM. A falta de qualidade no interior dos provetes poderia ser resolvida com estudos mais detalhados da moldação por compressão.

Apesar dos resultados obtidos não serem coerentes com o expectável em relação à comparação das propriedades obtidas dos produtos moldados por compressão e das peças produzidas por FDM, pode concluir-se que o material com maior capacidade de absorção de energia por unidade de área é a mistura P75, como era previsto de acordo com a lei das misturas.

Tal como expectável, os resultados obtidos verificam que, em geral, as propriedades dos materiais moldados por compressão são superiores às dos mesmos materiais utilizados na produção por FDM. Estas variações são justificadas pela presença de vazios e limitações nas ligações entre o filamento depositado e a adesão entre camadas dos produtos de FDM.

4 CONCLUSÕES E PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal desta dissertação foi a avaliação da aplicabilidade de materiais 100% reciclados em FDM. A este estudo estava acoplado a função de simulação de um processo caseiro e não um processo industrial, tendo em consideração os equipamentos existentes no mercado para que este pudesse proceder desde a reciclagem mecânica de embalagens, extrusão de filamento até à produção de peças em FDM sem o utilizador sair de casa.

A produção de produtos em FDM com materiais reciclados é, não só possível, como também todo o processo, desde a recolha de embalagens pós consumo até à produção de peças, pode ser realizado por utilizador comum de FDM. Existem condições para a produção de filamento, a partir de embalagens pós consumo, por parte dos utilizadores de equipamentos de FDM, com o auxílio de sistemas integrados de reciclagem acoplados aos equipamentos de FDM. Os resultados obtidos mostraram que é viável a produção de peças em FDM com filamentos de 100% PET e mistura 75% PET + 25% HDPE, cujos materiais foram obtidos por reciclagem. A mistura de uma pequena percentagem de HDPE e PET é facilmente combinável sendo um exemplo dessa combinação as garrafas plásticas.

As limitações inerentes ao processo de reciclagem, tais como, baixa potência do triturador e o elevado volume de algumas embalagens, impossibilitaram a utilização de alguns materiais/produtos, como por exemplo, sacos plásticos produzidos em HDPE.

A utilização dos restantes materiais e misturas, HDPE, P25 e P50 em FDM não foi possível, pois verificaram-se problemas associados a utilização do filamento em FDM: filamento demasiado flexível, com variações de diâmetro e irregularidades de textura que não permitiam uma alimentação contínua pelo sistema de engrenagens do equipamento de FDM.

Para além do objetivo acima referido, o estudo envolvia a comparação entre as propriedades dos provetes moldados por compressão e os provetes produzidos com FDM. Verifica-se, como seria expectável, que as propriedades dos provetes moldados por moldação por compressão são superiores às dos provetes moldados por FDM. Esta redução deveu-se ao facto de os produtos produzidos em FDM apresentarem pequenos vazios no interior das moldações e limitações no que diz respeito às ligações entre o filamento depositado e na adesão entre camadas sobrepostas, enquanto por sua vez, em moldação por compressão, os produtos moldados são maciços.

De modo geral verificou-se uma redução das propriedades das peças produzidas em FDM relativamente às peças produzidas em moldação por compressão. No caso dos resultados obtidos em ensaios de Flexão verificou-se uma redução de cerca de 30 % da tensão de cedência e 10% do módulo de elasticidade no caso do PET. No respeitante às propriedades de flexão da mistura esta redução foi na ordem de 30% da deformação de cedência e 40% do módulo de elasticidade. Para os restantes ensaios, os resultados obtidos não foram coerentes com o expectável, que se presumiu ser resultante da baixa homogeneização do material no interior das peças moldadas por compressão e conseqüente adesão ineficiente entre os grânulos. Estas limitações provocaram uma redução das propriedades das peças moldadas por compressão, quando comparadas com as equivalentes produzidas por FDM.

Através dos resultados de caracterização mecânica, pode concluir-se que o material utilizado na produção em FDM com melhores propriedades mecânicas quando sujeitos a esforços de tração ou flexão é o PET, sendo em o módulo de elasticidade cerca de 3 vezes superior ao módulo de elasticidade da mistura (ver Figuras 54 e 57) e a tensão de cedência 2 vezes superior (ver Figuras 52 e 55). Relativamente ao comportamento dos materiais quando sujeitos a impacto, o material que revelou maior tenacidade foi a mistura P75, sendo o valor obtido 5 vezes superior ao do PET isolado (ver Figura 58).

Tendo em conta as propriedades limitadas destes materiais a utilização dos mesmos deve ser limitada a aplicações decorativas, objetos de uso diário ou produtos artísticos.

Devido a limitações de índole temporal, não foi possível efetuar alguns estudos do processo de FDM que poderiam ser relevantes para o estudo das propriedades mecânicas, tal como a variação do ângulo de deposição do filamento nas camadas. Para além disso, seria pertinente o estudo da degradação das propriedades entre peças produzidas com materiais convencionais de FDM, tal como ABS e PLA, e propriedades de peças produzidas com os materiais 100% reciclados, isto é, realizar o mesmo estudo de degradação das propriedades acrescentando ao mesmo a comparação das propriedades dos materiais convencionais de FDM (ABS e PLA) moldados por compressão e utilizados na produção de peças por FDM.

Considerando as dificuldades ao longo do projeto, tais como, dificuldade na reciclagem de sacos plásticos e processamento de filamento com diâmetro não homogéneo, e os resultados de propriedades mecânicas inconclusivos devido ao escorregamento dos provetes de dimensões reduzidas e à baixa homogeneização do interior das placas moldadas por compressão, seguem-se propostas de trabalhos futuros a realizar:

- Utilização de outros equipamentos de trituração mais eficientes para aumentar a gama de produtos a reciclar, como por exemplo sacos plásticos;
- Produção de placas em moldação por compressão posteriormente à extrusão de filamento de modo a promover a homogeneização do material;
- Utilização de uma extrusora com maior comprimento de parafuso de modo a permitir uma maior plasticização do material e consequentemente maior homogeneização do filamento;
- Produção de provetes com maior dimensão de modo a evitar o escorregamento em ensaios de tração;
- Estudo da influência da variação do ângulo de deposição do filamento na produção de peças em FDM nas propriedades mecânicas;
- Comparação de peças produzidas em FDM a partir de materiais convencionais (ABS, PLA e PET) com peças produzidas a partir de materiais reciclados.

REFERÊNCIAS

- [1] Benefícios e valor da impressão 3D: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/benefits-commercial-value/>, 18 de janeiro de 2015
- [2] Syed H. Masood, Intelligent rapid prototyping with fused deposition modelling, Rapid Prototyping Journal, 1996
- [3] A. J. Pontes, Técnicas de Prototipagem Rápida, DEP Universidade do Minho, 2014
- [4] O.S. Carneiro, A.F. Silva, R. Gomes, Fused deposition modeling with polypropylene, Materials & Design, 2015
- [5] Técnica de FDM: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>, 19 de outubro de 2015
- [6] Deco Proteste - Impressoras 3D mais caras do que uteis, 14 de outubro de 2015
- [7] J. Hergel, S. Lefebvre, Clean color: Improving multi-filament 3D prints, Eurographics Volume 33, Number 2, 2014
- [8] Técnica de SLA: <http://aardvarkletterpressfinearteditions.com/3d-printing-technology-sla-stereolithography/>, 19 de outubro de 2015
- [9] Técnica de SLS: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/7261-sinterizacao-seletiva-a-laser/>, 19 de outubro de 2015
- [10] Técnica de LOM: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>, 19 de outubro de 2015
- [11] Condições Operatórias para Impressão de Polímeros Amorfos e Semi-Cristalinos: https://devel.lulzbot.com/filament/Archive/LulzBot_3D_Printing_Filament_Guide.pdf, 28 de maio de 2015
- [12] Filamento sustentável para impressão 3D: <http://www.plasticstoday.com/articles/Newfilamentaimstobringsustainabilityto3Dprintin> g150205, 16 de Fevereiro de 2015
- [13] M.Gebler, A.S. Uiterkamp, C. Visser, A global sustainability perspective on 3D printing technologies, ELSEVIER, Energy Policy 74, 158-167, 2014
- [14] Reciclagem de plástico velho para produção de filamento para impressão 3D: <http://www.3ders.org/articles/20140304turningoldplasticinto3dprinterfilamentisgreenerthanconventionalrecycling.html>, 24 de fevereiro de 2015

- [15] Impressão 3D no Espaço: <http://www.space.com/topics/3d-printing/>, 15 de Janeiro de 2015
- [16] Impressão de Armas no Exército dos Estados Unidos da América:
<http://3dprintingindustry.com/2014/06/05/u-s-army-wants-3d-print-weapons/>, 15 de Janeiro de 2015
- [17] Impressão de Armas em FDM: <http://www.publico.pt/mundo/noticia/homem-detido-no-japao-por-posse-de-armas-feitas-com-impressora-3d-1635132>, 23 de fevereiro de 2015
- [18] Impressão de Modelos de Moléculas que auxiliem a Investigação Médica:
<http://3dprintingindustry.com/2015/01/06/3d-printed-molecule-medical/>, 15 de Janeiro de 2015
- [19] Impressão de órgãos com Biomateriais: <http://www.economist.com/news/technology-quarterly/21598322-bioprinting-building-living-tissue-3d-printer-becoming-new-business> (2014), 23 de Fevereiro de 2015
- [20] Impressão de Órgãos: <http://p3.publico.pt/actualidade/ciencia/11688/impressao-3d-de-orgaos-da-ficcao-realidade>, 23 fevereiro 2015
- [21] Aluguer de Impressoras 3D: <http://3dprintingindustry.com/2014/12/10/rent-a-build-3d-printer-rental/>, 15 de Janeiro de 2015
- [22] EKOCYCLE CUBE: <http://cubify.com/ekocycle>, 16 de fevereiro de 2015
- [23] Impressora 3D Re-Printer: <http://www.inside3dp.com/3d-re-printer-recycles-plastic-bottles-converts-raw-material-3d-printing/>, 02 de abril de 2015
- [24] Funcionalidades da EKOCYCLE: <http://cubify.com/support/ekocycle/faq>, 16 de fevereiro de 2015
- [25] Acessibilidade a equipamentos de FDM:
<http://3dprintingindustry.com/2014/11/25/makerbot-3d-printers-50-staples-stores/>, 15 de fevereiro de 2015
- [26] Acessibilidade a equipamentos de FDM:
<http://3dprintingindustry.com/2014/07/15/home-depot-begins-carrying-makerbot-3d-printers-select-stores/>, 15 de fevereiro de 2015;
- [27] Factos Interessantes sobre os Plásticos 2015:
<http://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/finalplasticsthefacts2015ebookwebve?e=14847134/31230241>, 04 de Janeiro de 2016

- [28] Custo do Cartucho de ABS: <http://www.fabriprint.pt/bobina-filamento-abs-up.html>, 03 de abril de 2015
- [29] Custo do Cartucho de PLA: <http://www.fabriprint.pt/cartucho-bobina-pla-cube-2.html>, 03 de abril de 2015
- [30] Custo do Cartucho de Filamento: <http://www.fabriprint.pt/cartucho-bobina-cube-2.html>, 03 de abril de 2015
- [31] FILABOT: <http://www.filabot.com/>, 17 de fevereiro de 2015
- [32] STROODER: <http://omnidynamics.co.uk/shop/strooder>, 17 de fevereiro de 2015
- [33] FILASTRUDER: <http://www.filastruder.com/products/filastruder-kit>, 17 de fevereiro de 2015
- [34] Impressora 3D Re-Printer: <http://www.yankodesign.com/2014/09/12/3d-printer-reversed/>, 02 de abril de 2015.
- [35] Impressora 3D Re-Printer: <http://www.inside3dp.com/3d-re-printer-recycles-plastic-bottles-converts-raw-material-3d-printing/>, 02 de abril de 2015
- [36] C. Cramez, Termoplásticos: Propriedades e Aplicações, DEP, Universidade do Minho, 2013
- [37] C. Bernardo, Recycling of Plastic Materials, DEP, Universidade do Minho, 2015
- [38] Identificação de Plásticos:
<http://www.plastval.pt/index.asp?info=reciclagem/identificacao>, 20 de abril de 2015
- [39] Secagem de PET:
<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=66>, 20 de abril de 2015
- [40] Moldação por compressão: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAAiP4AD/tecnologia-polimeros?part=3>, 15 de janeiro de 2016
- [41] J.A. Covas, Linhas de Extrusão, DEP, Universidade do Minho 2012
- [42] F. Gonçalves *et al.*, Caracterização do Produto: Extrusão de Tubo – DOW HDPE 35060E, Integradora 5, DEP, 2013
- [43] Introdução a ensaios mecânicos dos materiais:
http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/228326/mod_resource/content/2/Aula%2006%20-%20Ensaio%20Tra%C3%A7%C3%A3o%20Polimeros%20Mod.pdf, 20 de setembro de 2015

[44] D 790-03: Métodos de teste padrão para propriedades de flexão de plásticos sem reforço, ASTM

ANEXOS

Anexo I – Perfis de Temperaturas de Extrusão, Empresa Poliversal

Poliversal
POLIVERSAL - PLÁSTICOS E TECNOLOGIA, S.A.

TEMPERATURAS DE ARRANQUE E DE EXTRUSÃO
Para qualquer zona da linha de extrusão.

Polimero	Temp. mínima de arranque (°C)	Temp. máxima (°C)
EMA/EVA/EBA	120	160
PEBD	120	160
PEAD	180	280
PP	200	280
PS	180	250
SAN	210	260
ABS/ASA	240	270
PC	240	270
PMMA	240	270
PET	260	280
POM	180	210
PBAT	150	220

ANTES DO ARRANQUE:

1. Verificar a limpeza de toda a linha;
2. Verificar o nível de água na tina;
3. Verificar os níveis de óleo;
4. Ligar secador/granulador/crivo/transportador;
5. Verificar as ligações da água;
6. Verificar se as temperaturas das respectivas zonas são indicadas para o polimero a transformar;
7. Verificar se a tremonha está carregada.

DATA: 19.5.14 Resp.: *[Assinatura]*



Anexo II – Força da mola do durómetro, Fonte: ASTM D 2240 (2005)

Valor Indicado	Tipo A	Tipo D
0	0,550	0,000
10	1,300	4,445
20	2,050	8,890
30	2,800	13,335
40	3,550	17,780
50	4,300	22,225
60	5,050	26,670
70	5,800	31,115
80	6,550	35,560
90	7,300	40,005
100	8,050	44,450
Unidade do durómetro/H	0,075	0,4445
Tolerância de calibração da mola	$\pm 0,075$ N	$\pm 0,4445$ N

Anexo III – Ficha Técnica de PET virgem

Technical data sheet



SUSTADUR PET

Product characteristics

- * Very high dimensional stability
- * Very low moisture absorption
- * Excellent creep behavior

Typical fields of application

- * Mechanical engineering
- * Shipbuilding industry
- * Electrical and electronics industry

	Test method	Unit	Value
General properties			
Density	DIN EN ISO 1183-1	g/cm ³	1,38
Water absorption	DIN EN ISO 62	%	0,25
Flammability (Thickness 3 mm / 6 mm)	UL 94		HB / HB
Mechanical properties			
Yield stress	DIN EN ISO 527	MPa	85
Elongation at break	DIN EN ISO 527	%	15
Tensile modulus of elasticity	DIN EN ISO 527	MPa	3000
Notched impact strength (Charpy)	DIN EN ISO 179	kJ/m ²	2,0
Ball indentation hardness	DIN EN ISO 2039-1	MPa	170
Shore hardness	DIN EN ISO 868	scale D	84
Thermal properties			
Melting temperature	ISO 11357-3	°C	255
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W / (m * K)	0,28
Thermal capacity	DIN 52612	kJ / (kg * K)	1,1
Coefficient of linear thermal expansion	DIN 53752	10 ⁻⁶ K ⁻¹	80
Service temperature, long term	Average	°C	-20 ... 115
Service temperature, short term (max.)	Average	°C	180
Heat deflection temperature	DIN EN ISO 75, method A	°C	80
Electrical properties			
Dielectric constant	IEC 60250		3,4
Dielectric dissipation factor (50Hz)	IEC 60250		0,001
Volume resistivity	IEC 60093	Ω *cm	10 ¹⁰
Surface resistivity	IEC 60093	Ω	10 ¹⁰
Comparative tracking index	IEC 60112		800
Dielectric strength	IEC 60243	kV/mm	20

The short-term maximum application temperature only applies to very low mechanical stresses for a few hours. The long-term maximum application temperature is based on the thermal aging of parts by oxidation, resulting in a decrease of the mechanical properties. This applies to an exposure to temperatures for at least 5000 hours causing a 50% loss of the tensile strength from the original value (measured at room temperature). This value says nothing about the mechanical strength of the material at high application temperatures. In case of thick-walled parts, only the surface layer is affected by oxidation from high temperatures. With the addition of antioxidants, a better protection of the surface layer is achieved. In any case, the center area of the material remains unaffected. The minimum application temperature is basically influenced by possible stress factors like impact and/or shock under application. The values stated refer to an minimum degree of impact stress. The electrical properties as stated result from measurements on natural, dry pellets. With other colours (in particular black) or enhanced material, there may be clear differences in the electrical properties. The data statements are average values ascertained by statistical tests on a regular basis. They are in accordance with DIN EN 10989. They serve as information about our products and are not legally binding. Since the properties also depend on the dimension of the semi-finished products and the degree of crystallization (e.g. depending by engineering), the actual values of the properties of a particular product may differ from the indicated values. Special construction details or further material specifications on request.



Anexo IV – Ficha técnica de HDPE virgem

Informação técnica



DOW HDPE 25055E High Density Polyethylene Resin

Descrição geral

Poliétileno de alta densidade 25055E A resina de poliétileno de alta densidade é uma resina de distribuição de peso molecular bastante estreita, desenvolvida para oferecer excelentes propriedades mecânicas, alto brilho e alto acabamento de superfície para peças moldadas por injeção, proporcionando também fácil processamento.

Aplicações:

- Utensílios domésticos
- Recipientes para alimentos
- Brinquedos

Cumpra com:

- UE # 102011
- EUA FDA 21 CFR 177.1520
- HPFB Canadense (Sem objecções)

Consulte os regulamentos para obter mais detalhes.

Aditivo • Antilíquido: No • Deslizamento: No • Auxiliar de Processamento: No

Físicas	Valor Típico (Ing/Ita)	Valor Típico (Métrico)	Método
Densidade	0,955 g/cm ³	0,955 g/cm ³	ASTM D792
Índice de fluído			ISO 1133
100°C/2,18 kg	25 g/10 min	25 g/10 min	
100°C/5,0 kg	62 g/10 min	62 g/10 min	
Spiral Flow ^{1, 2}	42,9 in	109 cm	Método Interno
Contração de moldagem - Fluxo	0,021 in/in	2,1 %	ASTM D955
Resistência à quebra por tensão ambiental, ESCR			ASTM D1693
Antes de CO-830 a 100%, Moldagem por compressão	0,700 hr	0,700 hr	
Mecânicas	Valor Típico (Ing/Ita)	Valor Típico (Métrico)	Método
Tensão			ASTM D638
Limite de elasticidade, Moldagem por compressão	3630 psi	25,0 MPa	
Na Ruptura, Moldagem por compressão	3920 psi	27,0 MPa	
Alongamento			ASTM D638
Na Ruptura, Moldagem por compressão	200 %	200 %	
Módulo de Flexão - 2% Secante (Moldagem por compressão)	128000 psi	870 MPa	ASTM D790
Impacto	Valor Típico (Ing/Ita)	Valor Típico (Métrico)	Método
Resistência ao impacto de tensão			ASTM D1622
Moldagem por compressão	26,2 ft-lb/in ²	55,0 kJ/m ²	
Dureza	Valor Típico (Ing/Ita)	Valor Típico (Métrico)	Método
Dureza Shore			ISO 868
D Escala, Moldagem por compressão	65	65	
Térmicas	Valor Típico (Ing/Ita)	Valor Típico (Métrico)	Método
Temperatura de Amolecimento Vicat	255 °F	124 °C	ISO 306/A

Notas

Estas são apenas propriedades típicas e não devem ser consideradas como especificações. Os utilizadores devem confirmar os resultados efectuando os seus próprios testes.

¹ Temperatura da Massa: 482°F (250°C)

² Injeção de 2 segundos

Anexo V – Especificações da Impressora Prusa i3

Tabela 9 - Especificações da impressora Prusa i3

Tamanho máximo de impressão	20 × 20 × 20 <small><i>cm (L × C × A)</i></small>
Dimensão da impressora	43 × 43 × 37 <small><i>cm (L × C × A)</i></small>
Diâmetro da feira	0.4 mm
Diâmetro do filamento	1.75 mm
Espessura mínima aconselhada de camada	0.15 mm
Velocidade máxima aconselhada	100 mm/s
Consumo elétrico máximo	240 W
<i>Software</i> recomendado	<i>Slic3r + Pronterface (opensource)</i>
<i>Firmware</i>	<i>Arduino/Marlin</i>

Anexo VI – Curvas Tensão – Deformação obtidas a partir de ensaios de Flexão

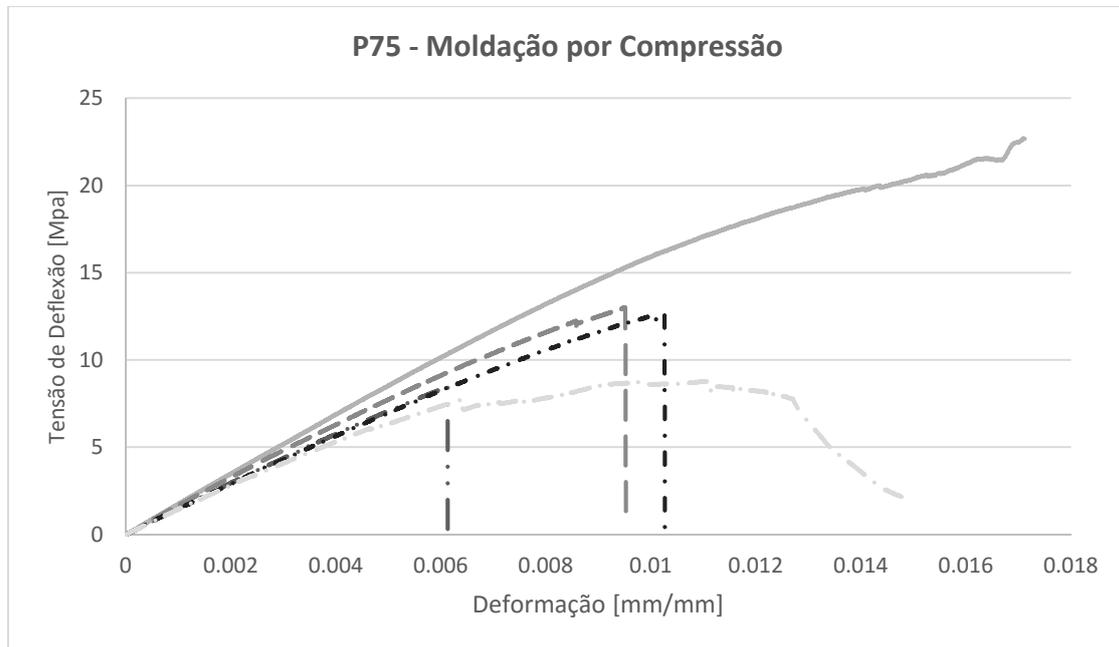


Figura 59 - Curvas tensão-deformação da mistura P75 moldada por compressão

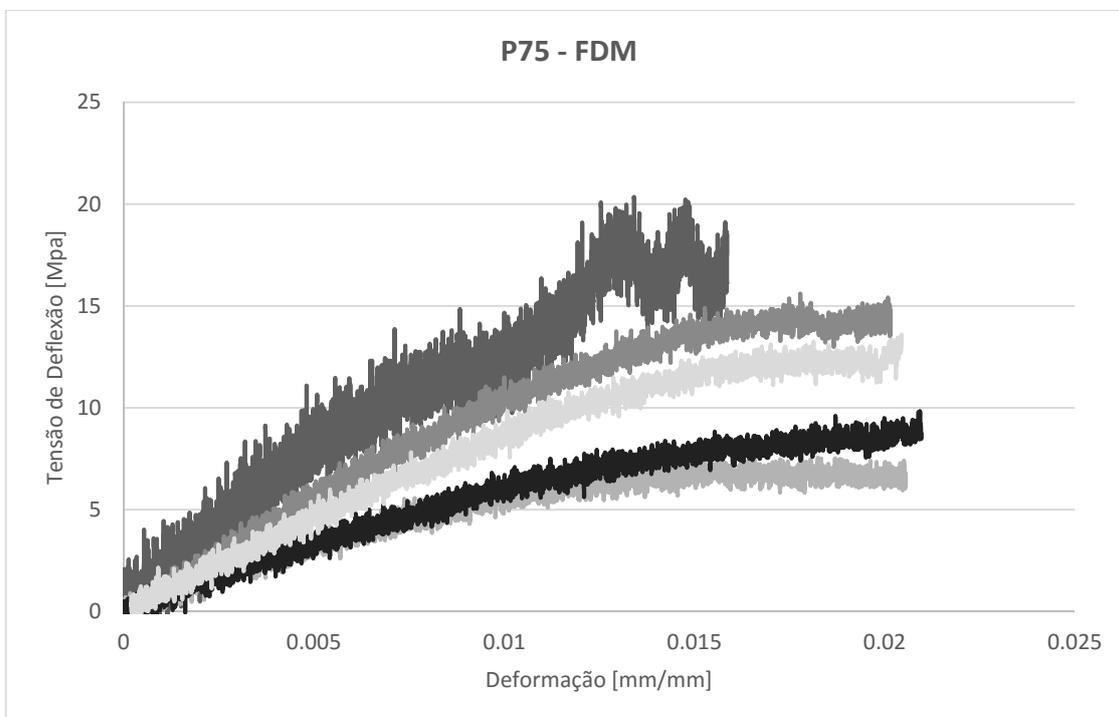


Figura 60 - Curvas tensão-deformação da mistura P75 utilizada na produção em FDM

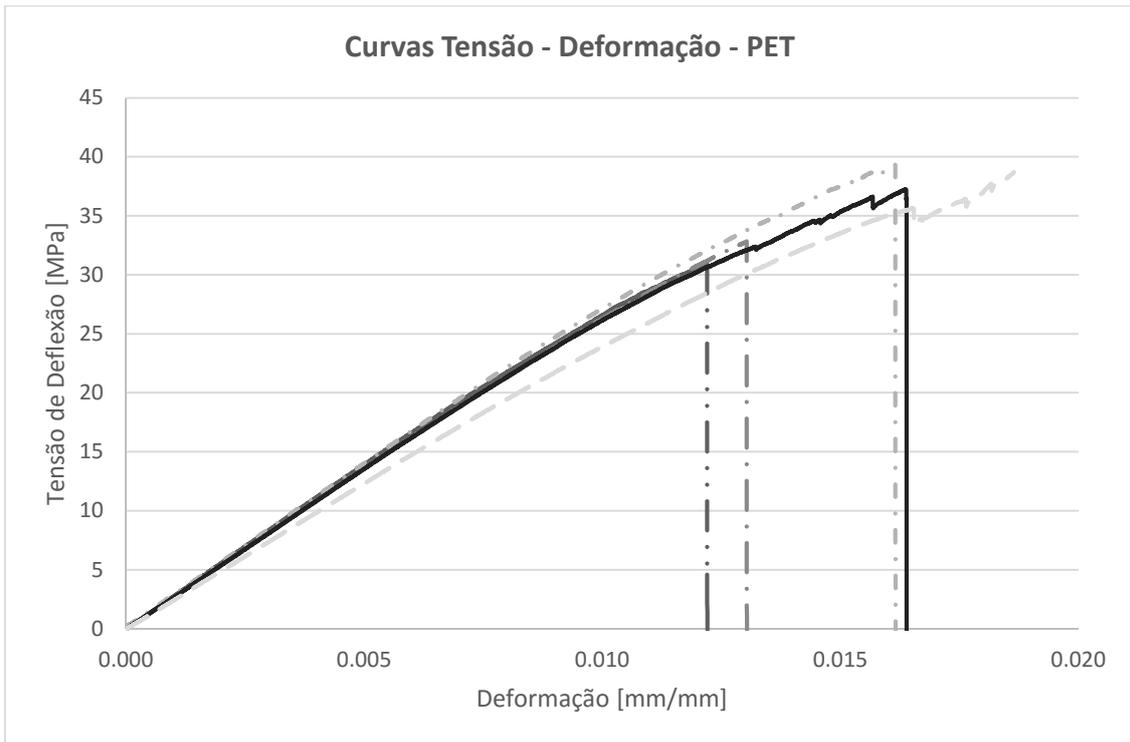


Figura 61 - Curvas tensão-deformação de PET moldado por compressão

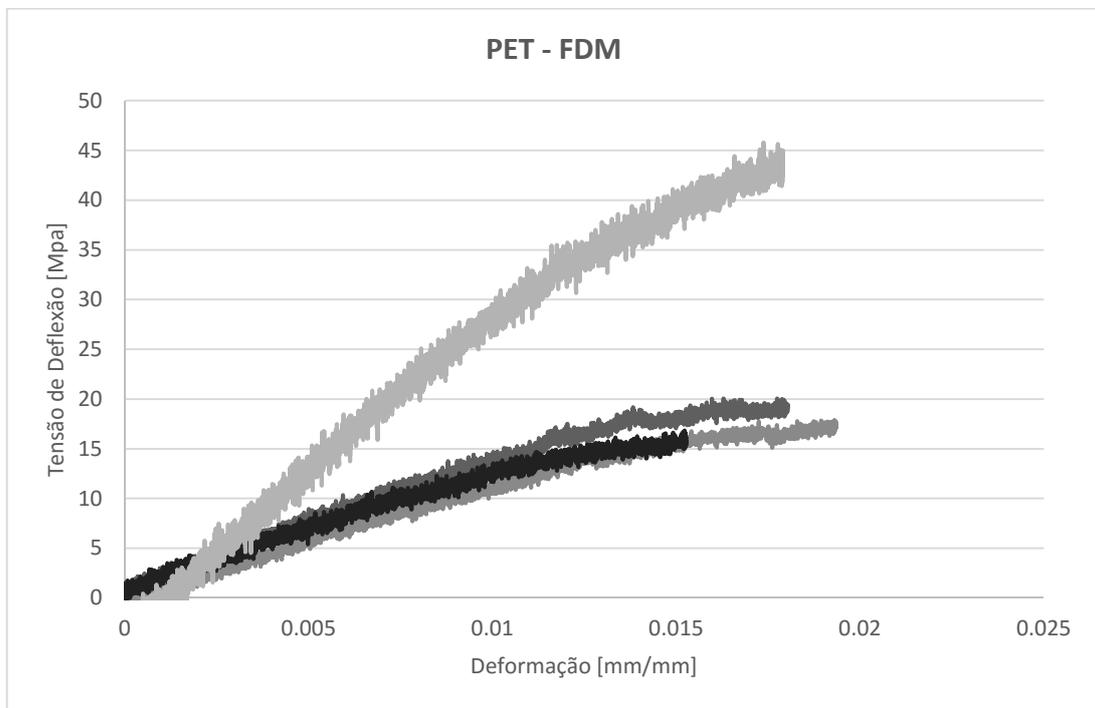


Figura 62 - Curvas tensão-deformação de PET utilizado na produção em FDM

Anexo VII – Curvas Tensão – Deformação obtidas a partir de ensaios de Tração

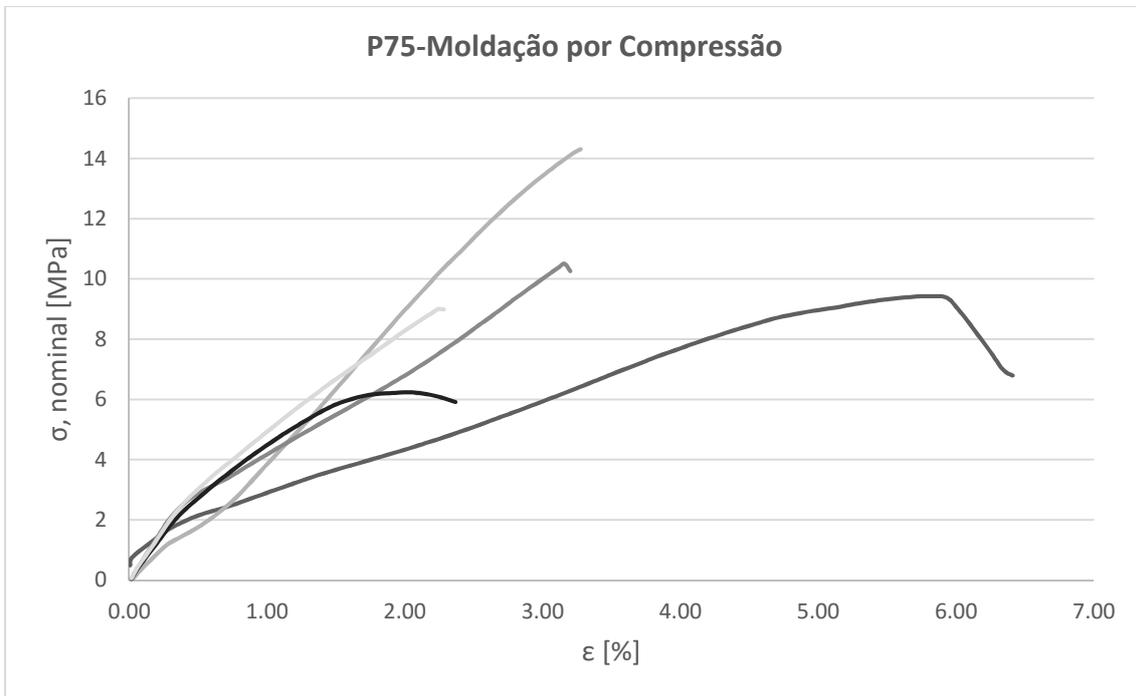


Figura 63 - Curvas tensão-deformação da mistura P75 moldada por compressão

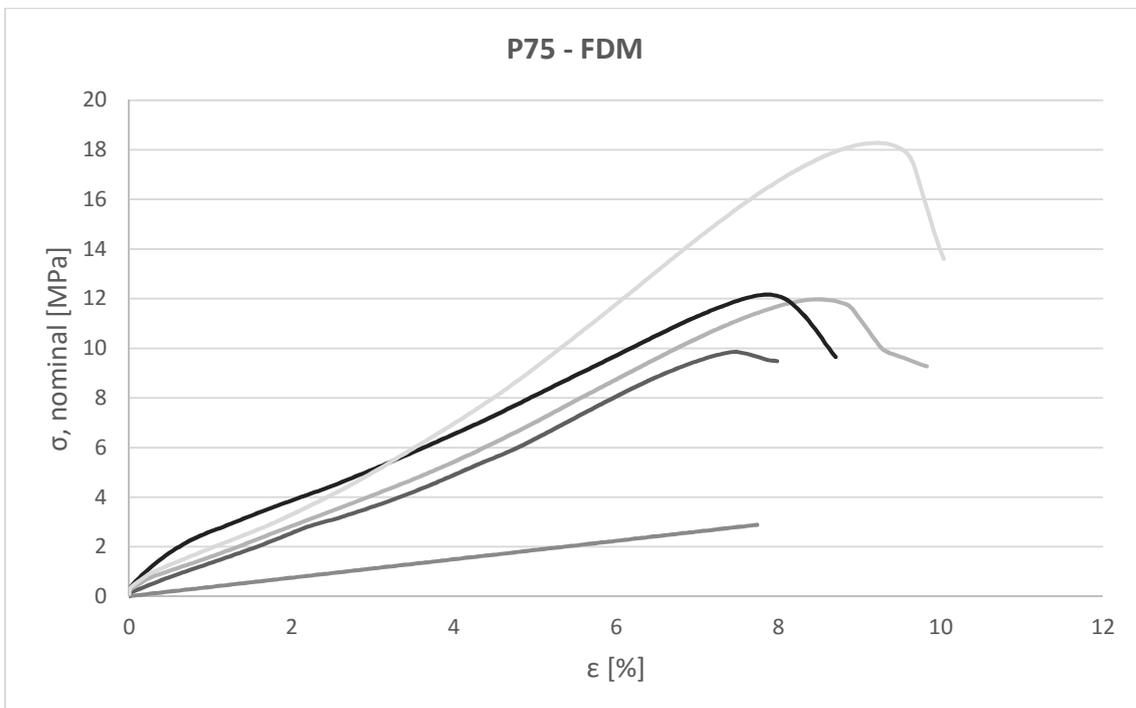


Figura 64 - Curvas tensão-deformação da mistura P75 utilizada na produção em FDM

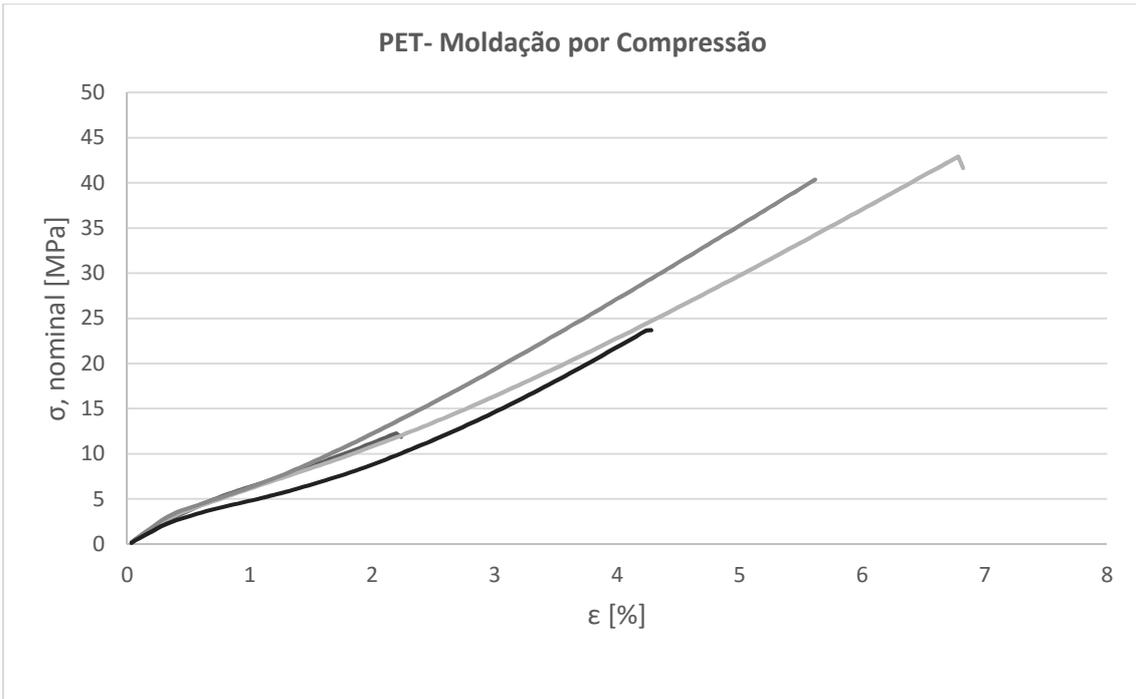


Figura 65 - Curvas tensão-deformação de PET moldado por compressão

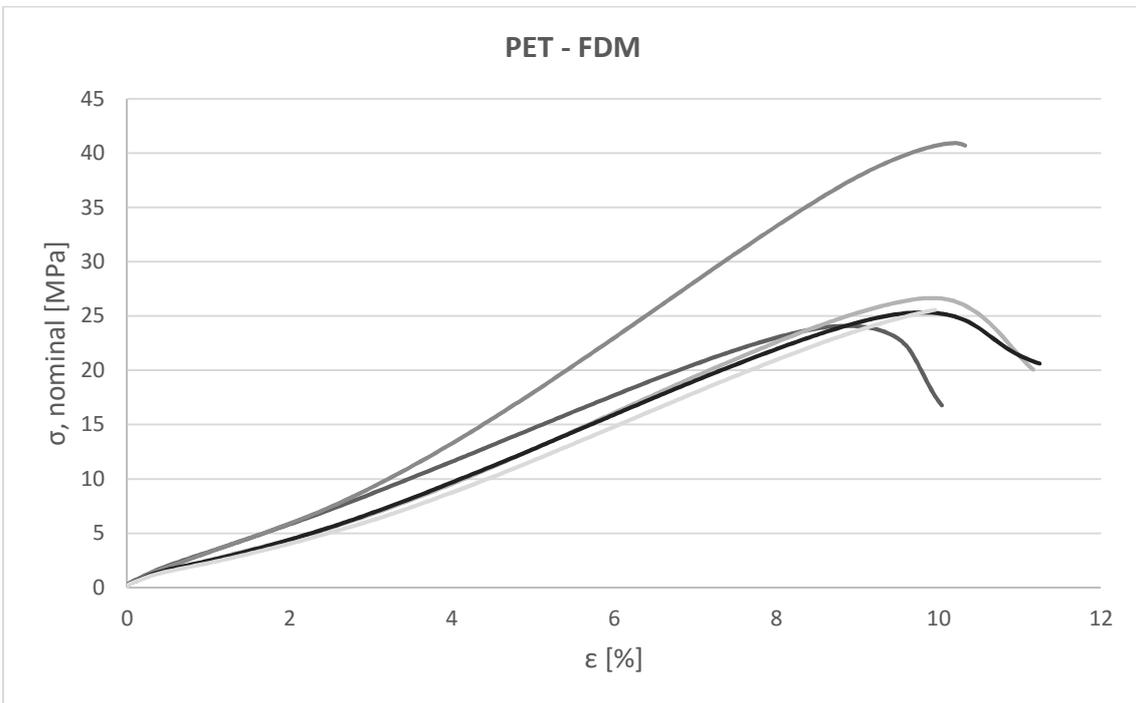


Figura 66 - Curvas tensão-deformação de PET utilizado na produção em FDM