



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia

Reutilização direta de termoplásticos em máquinas de Modelagem por Deposição de Material Fundido

Martim Lima de Aguiar

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar

Covilhã, outubro de 2016

Agradecimentos

Aos meus pais por me apoiarem em todo o meu percurso académico, fazendo inúmeros sacrifícios quer financeira quer psicologicamente:

À minha Mãe por me criar desde pequeno o fascínio pela ciência, investigação e pela matemática, auxiliando-me também no processo de revisão do presente trabalho.

Ao meu Pai por desde sempre desenvolver em mim um gosto especial pela arte e pelo engenho que me define, transmitindo as habilidades para o aplicar e pela contribuição essencial para a construção do fuso;

Ao meu Irmão por me mostrar que nem todos os caminhos são traçados da mesma maneira;

Ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Dinis por me apoiar no desenvolvimento das ideias e não pôr travões nos meus objetivos, depositando sempre confiança nas minhas capacidades, incentivando e motivando o desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus amigos e companheiros de casa Tiago Pereira, João Amado e Luís Paredes por terem feito parte de todas as histórias destes últimos 6 anos criadas no seio da “Eletrolândia”;

Ao meu amigo Daniel Cruz sem o qual não teria conseguido dimensionar e programar o controlo da máquina desenvolvida;

Ao Professor Doutor Hélder Correia que abdicou do seu tempo para me ajudar na maquinação de componentes para a máquina;

Ao Professor Doutor Abílio Silva que nunca se negou a ajudar no que fosse preciso para teste de polímeros e isolamento elétrico de peças;

Ao Professor Doutor Fernando Santos por me permitir a utilização das oficinas metalomecânicas da UBI e disponibilizar a utilização do Laboratório de Fabricação da Universidade da Beira Interior;

Ao técnico superior João Correia por me ter auxiliado na soldadura TIG e na maquinação CNC;

A todos os amigos não referidos que fiz nesta academia, que de certa forma contribuíram para me ter tornado numa melhor versão de mim;

A todos os colegas de curso que promovem o espírito de entreaajuda Eletromecânico e todos os colegas desta academia que criam o autêntico espírito académico Ubiano;

A toda a equipa UBIAN14, UBIAN15 e UBIAN16, em especial à última, que me permitiu participar numa experiência única participando em competições noutros países, onde conheci novas culturas e das quais voltei com amigos para a vida;

A toda a comissão de latada do ano letivo 2014/2015 que tive o prazer de chefiar e a toda a lista de alunos do mesmo ano que participou connosco no projeto da sua integração;

E por fim, mas não menos importante às listas do NEUBI de 2014 a 2016, nas quais tive o prazer de contribuir com a minha participação, desenvolvendo projetos, convívios, parcerias através das quais tive hipótese de conhecer pessoas novas, fazer grandes amizades e deixar a minha marca no curso e na academia.

*“The man who says it cannot be done should
not interrupt the man that’s doing it”
-Confúcio*

Resumo

Cada vez mais a acumulação de plástico nas lixeiras é um problema. A sua composição não biodegradável e produção geralmente feita a partir de combustíveis fósseis fazem com que seja de extrema importância que este plástico se mantenha no ciclo da reciclagem.

Políticas de incentivo à reciclagem, ou punição à má separação de resíduos têm-se provado eficazes para combater o problema, no entanto a contínua e crescente utilização de plásticos requer o desenvolvimento de novas abordagens que contribuam também a este fim.

Vimos também numa era em que o crescimento da tecnologia de modelação por deposição de material fundido (comumente referida como impressão 3D) está a atingir uma escala exponencial, podendo num futuro muito próximo ser um eletrodoméstico comum de encontrar em habitações domésticas, pondo em causa o funcionamento da produção de bens tal como a conhecemos.

Na presente dissertação apresenta-se o dimensionamento e etapas de construção de uma extrusora de termoplástico com dimensões reduzidas, especificamente construída para extrudir resina termoplástica politereftalato de etileno e todas as suas componentes, assente no estudo de termoplásticos, máquinas de fabricação aditiva e da extrusão.

Esta proposta pretende contribuir para a redução do desperdício de termoplásticos, permitindo que a reciclagem seja feita em ambiente doméstico e o produto desta utilizado em máquinas de modelação por deposição de material fundido. Assim, é possibilitada a criação de novos bens a partir de plásticos que seriam descartados, trazendo assim os lucros da reciclagem para o utilizador, diminuindo o desperdício e custos associados ao transporte.

Palavras-chave

FDM, Impressão 3D, Filamento, Extrusão, Reciclagem

Abstract

Now more than ever the accumulation of plastic in dumpsters is a problem we are facing. Its non-degradable composition and production generally from fossil fuels make it of extreme importance that this plastic is maintained in the recycling cycle.

Policies that incite the population to recycle, or punish a bad waste separation have proven effective to fight this problem, nonetheless the continuous growth of plastics usage requires the development of new approaches that contribute to this end.

We also live at a time in which the growth of the fluid deposition modeling (usually known as 3D printing) is at an exponential scale, bringing the possibility of being a common domestic appliance in a few years, jeopardizing the functionality of production of goods, as we know it today.

In the present thesis, the design and construction of a small-scale thermoplastic extruder machine, specifically built for the thermoplastic resin Polyethylene Terephthalate and all its components is presented, based on the study of thermoplastics, fluid deposition modeling machines and extrusion.

This proposal aims to contribute to the reduction of the waste of thermoplastics, allowing the recycling to be done in a domestic environment and its product used in fluid deposition modeling machines. This way the creation of new goods from plastic that would carelessly be thrown to waste is allowed, bringing the profit obtained from recycling directly to the user, diminishing the waste and costs associated with transport.

Keywords

FDM, 3D Printing, Filament, Extrusion, Recycling

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xv
Nomenclatura.....	xvii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	2
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	2
1.3. Objetivos e contribuição da dissertação	3
1.4. Visão geral e organização da dissertação	3
2. Fundamentos do PET.....	5
2.1. História do PET	7
2.2. Processo de produção do PET.....	7
2.3. Produção de PET com recurso a monómeros obtidos através de fontes renováveis .	9
2.4. PET em números.....	10
2.5. Propriedades termofísicas.....	11
2.5.1. Temperatura de transição vítrea	11
2.5.2. Ponto de fusão.....	11
2.5.3. Temperatura de decomposição	11
2.5.4. Outras propriedades	12
2.5.5. Morfologia	13
2.6. Porquê PET	14
2.7. Nota conclusiva	14
3. Fundamentos da fabricação aditiva.....	17
3.1. Introdução.....	17
3.2. Processamento computacional	17
3.3. Tipos de máquinas	20
3.3.1. Estereolitografia (SLA)	20
3.3.2. Modelação por deposição de material fundido (FDM)	20

3.3.3.	Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	21
3.3.4.	Processamento de Luz Digital (DLP)	21
3.3.5.	Impressão 3D.....	21
3.4.	Porquê FDM?.....	22
3.5.	Estudo de mercado.....	22
3.6.	Componentes básicos da máquina FDM RepRap e seu funcionamento.....	23
3.7.	Tipos de filamentos	26
3.8.	Nota conclusiva	27
4.	Fundamentos da extrusão	29
4.1.	Componentes e funcionamento de uma extrusora	29
4.2.	Parâmetros a considerar na construção de uma extrusora	30
4.2.1.	Fuso ou parafuso sem fim	30
4.2.2.	Matriz	42
4.2.3.	Cilindro	42
4.2.4.	Aquecimento.....	42
4.2.5.	Acionamento.....	43
4.2.6.	Desgaseificação.....	43
4.1.	Extrusão de filamento	49
4.2.	Defeitos na extrusão	49
4.3.	Estudo de mercado.....	52
4.4.	Nota conclusiva	53
5.	Estudo experimental do Politereftalato de Etileno	55
5.1.	Filamento de PET referência	55
5.1.1.	Teste do filamento.....	55
5.2.	Impressão em PET	57
5.2.1.	Análise microscópica	57
5.3.	Estudo do PET reciclado.....	60
5.3.1.	Produção de flocos.....	61
5.3.2.	Ensaio termogravimétrico	61
5.4.	Nota conclusiva	62
6.	Protótipo experimental.....	63
6.1.	Projeto da máquina	63
6.2.	Desenho.....	67
6.3.	Construção	78
6.3.1.	Sistema mecânico	78
6.3.2.	Sistema de controlo.....	96
6.4.	Equipamento auxiliar	97

6.4.1. Trituradora.....	97
6.4.2. Máquina de FDM	99
6.5. Nota conclusiva	101
7. Conclusões.....	103
7.1. Conclusões gerais.....	103
7.2. Sugestões de trabalhos futuros.....	104
8. Bibliografia	105
Anexos.....	111
Anexo A - Desenhos técnicos.....	113

Lista de Figuras

Figura 1. Código de identificação da resina opção A e opção B (ASTM D7611 / D7611M, 2013). .	5
Figura 2. Antigo código de identificação da resina opção A e opção B (Caliendo, 2013).	6
Figura 3. Estrutura do politereftalato de etileno (PlasticsEurope, 2010)	6
Figura 4. . Diagrama de fluxo da produção típica de pet categoria de garrafa (PlasticsEurope, 2010), adaptado.	8
Figura 5. Estrutura do orto, meta e paraxilenos. (PlasticsEurope, 2010)	9
Figura 6. Tipo de embalagens utilizadas para proteger bens de consumo (PMMI, 2015), adaptado.	10
Figura 7. Estrutura macromolecular do PET semi-cristalino (Demirel, et al., 2011), adaptado.	14
Figura 8. Modelação CAD no software Solidworks de uma esfera (esquerda) e a sua aproximação em ficheiro STL composto por 5852 superfícies triangulares planares (direita).	18
Figura 9. Várias camadas do ficheiro .gcode, com estruturas de enchimento retilínea (esquerda) e em colmeia (direita).	19
Figura 10. Desktop 3D Printers mais compradas (3D HUBS, 2016).	23
Figura 11. Esquema de funcionamento de uma impressora FDM.	24
Figura 12. Esquema de funcionamento de uma impressora cartesiana.	25
Figura 13. Esquema de funcionamento de uma impressora delta.	26
Figura 14. Esquema de funcionamento de uma extrusora de termoplástico (abiplast, 2014), adaptado.	30
Figura 15. Parâmetros da extrusão (Sarlink, 2002), adaptado.	31
Figura 16. Aumento do diâmetro do filamento à saída da matriz.	33
Figura 17. Zonas do fuso e parâmetros da extrusão afetados (Sarlink, 2002), (Buechler, 2015), (CONCOR, 2011), adaptado.	34
Figura 18. Vista de corte do fuso na zona de alimentação (Sarlink, 2002), adaptado.	34
Figura 19. Vista de corte do fuso na zona de compressão (Sarlink, 2002), adaptado.	35
Figura 20. Vista de corte do fuso na zona de dosagem (Sarlink, 2002), adaptado.	36
Figura 21. Desenho de um fuso simples (Sarlink, 2002), adaptado.	38
Figura 22. Fusão da resina termoplástica num fuso simples (Eslami, 2013), adaptado.	38
Figura 23. Desenho de um fuso de barreira e vista em corte (Eslami, 2013), adaptado.	39
Figura 24. Pormenor das duas hélices do fuso de barreira (Eslami, 2013), adaptado.	39
Figura 25. Fusão da resina termoplástica num fuso de barreira (Eslami, 2013), adaptado.	40
Figura 26. Passagem da zona de alimentação para a zona de compressão num fuso de barreira (Eslami, 2013), adaptado.	40
Figura 27. Variação do volume num fuso de barreira de profundidade constante (a) e largura constante (b) (Eslami, 2013), adaptado.	41
Figura 28. Presença de humidade no filamento PET produzido com diferentes parâmetros de extrusão (Martin, 2014), adaptado.	44
Figura 29. Módulo da zona de vácuo (Rauwendaal, 2002), adaptado.	45

Figura 30. Profundidade do canal de um fuso com uma zona de ventilação (Wormer, 2011), adaptado.	46
Figura 31. Erros comuns no desenho da zona de ventilação e suas consequências (Rauwendaal, 2002), adaptado.	47
Figura 32. Zona de ventilação adequada (Rauwendaal, 2002), adaptado.	48
Figura 33. Esquema da extração e armazenamento de filamento a partir de uma extrusora (abiplast, 2014), adaptado.	49
Figura 34. Filamento PET dobrado.	56
Figura 35. Resultado da queima de filamento PET (em cima) e um bocado de uma garrafa constituída por PET (em baixo).	56
Figura 36. Cubo e lamela impressos em PET numa máquina de FDM.	57
Figura 37. Coloração do filamento PET vincado observado ao microscópio ótico com ampliação de 20x.	58
Figura 38. Marcas no filamento observado ao microscópio ótico com ampliação de 50x.	59
Figura 39. Marcas no filamento observado ao microscópio ótico com ampliação de 20x.	59
Figura 40. Bolhas e impurezas numa lamela impressa em PET observada ao microscópio ótico com ampliação de 50x.	60
Figura 41. Flocos de PET produzidos manualmente.	61
Figura 42. Esquema do sistema de monitorização e controlo da máquina.	67
Figura 43. Desenho da máquina feito no início do presente trabalho.	68
Figura 44. Componentes do desenho da máquina feito no início do presente trabalho.	68
Figura 45. Vista explodida do desenho da máquina após o presente estudo.	69
Figura 46. Vista de cima do desenho da extrusora.	70
Figura 47. Evolução do desenho do suporte da chumaceira como exemplo do processo iterativo do desenho da máquina.	70
Figura 48. Vista de cima do desenho do sistema de transmissão e absorção da carga axial.	71
Figura 49. Desenho da zona de alimentação e sistema de transmissão.	72
Figura 50. Desenho da camisa de extrusão.	72
Figura 51. Desenho da peça de fixação da camisa.	73
Figura 52. Desenho da tomada de vácuo na camisa e encaixe do termopar.	73
Figura 53. Desenho da cabeça de extrusão.	74
Figura 54. Desenho do sistema de encaixe.	74
Figura 55. Desenho do sistema de refrigeração.	75
Figura 56. Desenho do circuito de refrigeração ligado numa configuração tomada de saída → torneira → bomba de água → tomada de entrada.	76
Figura 57. Desenho do tracionador.	76
Figura 58. Cortes do desenho do fuso segundo a ordem zona de alimentação, zona de compressão, zona de bombagem.	77
Figura 59. Peças do fuso e encaixes para maquinação.	78
Figura 60. Base de suporte para a extrusora.	78
Figura 61. Adaptador para soldar aos reservatórios e ligar ao tubo flexível.	79
Figura 62. Tabuleiros após serem limadas as soldaduras, conectados entre si com tubo flexível.	80
Figura 63. Sapata de ajuste e furo para conectar o tabuleiro à base de suporte da extrusora.	81
Figura 64. Sistema de encaixe entre a base e o reservatório de refrigeração.	82
Figura 65. Torneamento da camisa.	82
Figura 66. Zona alhetada da camisa.	83
Figura 67. Tomada de vácuo com vista para o interior e encaixe para um termopar.	84
Figura 68. Resistências de 500 W isoladas eletricamente.	84

Figura 69. Camisa com todas as resistências enroladas.....	85
Figura 70. Peça para fixação da camisa à base da extrusora.	85
Figura 71. Ilustração do processo de corte do recipiente para conexão ao funil.	86
Figura 72. Zona de alimentação constituída pelo reservatório, funil e corte longitudinal.	87
Figura 73. Conexão cravada no motor para apertar na roda dentada.	88
Figura 74. Primeiros passos para a construção do suporte do motor.	88
Figura 75. Sistema de tração.	89
Figura 76. Encaixes que unem o fuso à roda de transmissão e chumaceiras.	90
Figura 77. Maquinação das peças que unem o fuso à roda de transmissão e às chumaceiras. ...	90
Figura 78. Processo de fabrico da cabeça.	91
Figura 79. Primeira fase da construção do tracionador.....	91
Figura 80. Versão final do tracionador.	92
Figura 81. Suporte do tracionador.	93
Figura 82. Previsão de problemas relacionados com uma união roscada.....	94
Figura 83. Suporte para o veio.	95
Figura 84. Processo de construção do fuso.	95
Figura 85. Resultado da produção do fuso.	95
Figura 86. Desempenho da camisa.	96
Figura 87. Barramento de termopares.	96
Figura 88. Duas perspetivas da trituradora de frente e baixo e vista de corte respetivamente. 98	
Figura 89. Trituradora de plástico e garrafa de 1,5L para visualização do tamanho.	99
Figura 90. Kit de montagem da impressora e algumas das ferramentas utilizadas.	100
Figura 91. Impressão da zona de compressão do fuso na Kossel Mini.	101
Figura 92. Desenho técnico do funil de alimentação, vista de cima.	113
Figura 93. Desenho técnico do funil de alimentação, vista de frente.	114
Figura 94. Desenho técnico da planificação do funil de alimentação, peças que unem a base ao topo.....	115
Figura 95. Desenho técnico da planificação do funil de alimentação, retângulo da base.	116
Figura 96. Desenho técnico da planificação do funil de alimentação, aro do topo.	117
Figura 97. Desenho técnico da planificação do tabuleiro de refrigeração, tabuleiro de recolha.	118
Figura 98. Desenho técnico da planificação do tabuleiro de refrigeração, tabuleiro de arrefecimento	119
Figura 99. Desenho técnico da peça de fixação da camisa.....	120
Figura 100. Desenho técnico da camisa da extrusora.	121
Figura 101. Desenho técnico de um fuso sem dupla hélice e sem variação da profundidade do canal.....	123

Lista de Tabelas

Tabela 1. Resistencia a químicos (Goodfellow, 2016), adaptado.	12
Tabela 2. Propriedades mecânicas (Goodfellow, 2016), adaptado.....	12
Tabela 3. Propriedades físicas (Goodfellow, 2016), adaptado.....	12
Tabela 4. Outras propriedades térmicas (Goodfellow, 2016), adaptado.....	13
Tabela 5 Problemas, causas e soluções na extrusão (Dineli, 2011).	50
Tabela 6 Problemas, causas e soluções na extrusão -continuação- (Dineli, 2011).....	51
Tabela 7 Problemas, causas e soluções na extrusão -continuação- (Dineli, 2011).....	52

Nomenclatura

Geral:

<i>c</i>	Canal do fuso, [mm];
<i>CR</i>	Rácio de compressão.
<i>d</i>	Diâmetro da raiz do fuso, [mm];
<i>D</i>	Diâmetro do fuso, [mm];
<i>e</i>	Largura da hélice do fuso, [mm];
<i>f</i>	Hélice do fuso, [mm];
<i>FL</i>	Comprimento do fuso (<i>Flight length</i>) [mm];
<i>h</i>	Altura do canal do fuso, [mm];
<i>h</i>	Altura do canal do fuso, [mm];
<i>L</i>	Comprimento do fuso, [mm];
<i>L/D</i>	Comprimento pelo diâmetro do fuso;
<i>p</i>	Passo do fuso, [mm];
<i>r</i>	Raiz do fuso, [mm];
<i>T</i>	Temperatura [°C];
<i>VL</i>	Comprimento do fuso até à zona de vácuo (<i>Vacuum length</i>) [mm];
<i>w</i>	Largura do canal do fuso, [mm];

Índices inferiores:

<i>b</i>	Extrudido;
<i>d</i>	Fusão.
<i>e</i>	Matriz;
<i>f</i>	Zona de alimentação;
<i>g</i>	Transição vítrea;
<i>m</i>	Zona de dosagem;
<i>p</i>	Segunda zona de dosagem;

v Zona de vácuo;

Simbologia grega:

δ Folga, [mm];
 β Ângulo da matriz da extrusora, [°];
 α Ângulo da cabeça da extrusora, [°];
 θ Ângulo da hélice, [°];
 φ Ângulo de inclinação da zona de compressão, [°].

Acrónimos:

2D Bidimensional;
3D Tridimensional;
ABS Acrilonitrila butadieno estireno;
AM Fabricação aditiva ou por camadas (*Additive Manufacturing*);
ANSI *American National Standards Institute*;
ASA Acrilonitrila estireno acrilato;
ASTM American Society for Testing and Materials;
BHET Tereftalato de bis-hidroxieta;la;
BTX Mistura de Benzeno, Tolueno e os três isómeros Xilenos;
CAD *Computer Aided Design*;
CAM *Computer Assisted Manufacturing*;
CAS *Chemical Abstracts Service*;
CH Suíça;
CLK *Clock*;
CNC Controlo numérico computadorizado (*Computer Numeric Control*);
CO₂ Dióxido de carbono;
CS *Chip Select*;
DIN Instituto Alemão para Normatização (*Deutsches Institut für Normung*);
DLP Processamento de Luz Digital;

<i>EPRO</i>	Associação Europeia das Organizações para a Recuperação e reciclagem do Plástico (<i>European Association of Plastics Recycling and Recovery Organisations</i>);
<i>EPS</i>	Poliestireno expandido;
<i>EUA</i>	Estados Unidos da América;
<i>FDM</i>	Modelagem por Deposição de Material Fundido (<i>Fused deposition modeling</i>);
<i>HIPS</i>	Poliestireno de alto impacto;
<i>ISO</i>	International organization for standardization;
<i>ISSO</i>	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>);
<i>MISO</i>	<i>Master In Slave Out</i> ;
<i>NO</i>	Noruega;
<i>PA</i>	Poliamida;
<i>PBT</i>	Politereftalato de butilen;
<i>PC</i>	Policarbonato;
<i>PE</i>	Polietileno;
<i>PEEK</i>	Poliéter éter cetona;
<i>PE-HD</i>	Polietileno de alta densidade;
<i>PE-LD</i>	Polietileno de baixa densidade;
<i>PET</i>	Politereftalato de Etileno (<i>Polyethylene terephthalate</i>);
<i>PETE</i>	Politereftalato de Etileno (<i>Polyethylene terephthalate</i>);
<i>PETG</i>	PET modificado;
<i>PLA</i>	Ácido poliláctico (<i>polylactic acid</i>);
<i>PMMA</i>	Metacrilato de Polimetilo;
<i>POM</i>	Polioximetileno;
<i>PP</i>	Polipropileno;
<i>PS</i>	Poliestireno;
<i>PTA</i>	Ácido tereftálico purificado;
<i>PTFE</i>	Politetrafluoretileno (<i>Polytetrafluoroethylene</i>);
<i>PUR</i>	Poliuretanos;
<i>PVA</i>	Acetato de polivinila;
<i>PVC</i>	Cloreto de polivinil;
<i>RP</i>	Prototipagem rápida (<i>Rapid Prototyping</i>);
<i>rPET</i>	PET constituído total ou parcialmente por PET reciclado;

<i>RSU's</i>	Resíduos sólidos urbanos;
<i>SAN</i>	Estireno Acrilonitrilo;
<i>SLA</i>	Estereolitografia;
<i>SLS</i>	Sinterização Seletiva a Laser;
<i>SSR</i>	Relé de estado sólido (<i>Solid State Relay</i>);
<i>STL</i>	Estereolitográfico (<i>STereoLithography</i>);
<i>TIG</i>	<i>Tungsten Inert Gas</i> ;
<i>UBI</i>	Universidade da Beira Interior;
<i>UE</i>	União Europeia;
<i>UV</i>	Ultravioleta;

1. Introdução

Cada vez mais se tem vindo a falar da importância da contribuição da reciclagem para suportar a sustentabilidade da humanidade. A produção de plásticos consome uma quantidade significativa de recursos não renováveis, sendo por isso, responsável por emissões de CO₂ e consumo de combustíveis fósseis quer como matéria-prima, quer como fonte de energia necessária ao seu processamento e produção (Hopewell, et al., 2009).

Após a sua utilização, grande parte destes plásticos é encaminhado para aterros sanitários, onde todas as suas potenciais reutilizações são descartadas, causando adicionalmente poluição ambiental. Outras vezes são encaminhados para incineradoras onde se reaproveita alguma da energia que foi investida na sua produção. Por fim, uma outra parte que é reciclada e apenas requer o fornecimento de uma pequena quantidade de energia extra para o seu transporte e processamento (PlasticsEurope, 2015), (Tsuchida, et al., 2009).

A reciclagem de plásticos é bastante complexa, e a maior parte dos problemas advém da ineficiência na sua separação e remoção de contaminantes, já que os utilizadores destes produtos raramente têm interesses na sua separação, para além das preocupações ambientais. Isto faz com que raramente existam materiais compostos por 100% de plásticos reciclados, já que normalmente são uma mistura de plásticos reciclados e virgens para reduzir o efeito dos contaminantes no produto final (Wasari & Paranonsatit, 2009).

Numa situação em que o ganho da reciclagem seja diretamente obtido pelo indivíduo que o recicla, há um aumento do interesse na sua correta separação (Sukholthaman & Shirahada, 2015). Se, adicionalmente for possível a sua realização em ambiente doméstico, os custos com a reciclagem podem ser imensamente reduzidos, já que não só se reduzem os custos com a separação de plásticos, mas também com o seu transporte. Na maior parte dos casos é mais económico transportar resíduos domésticos para aterros do que reciclar, por causa dos custos de transporte e processamento (Kinnaman, 2015).

O estudo alvo desta dissertação ocorre numa era em que as máquinas de modelagem por deposição de material fundido (ou máquinas FDM) também comumente conhecidas por impressoras 3D estão em grande expansão e desenvolvimento. O seu mercado em 2014 já se encontrava perto dos 3 mil milhões de euros e estima-se que possa atingir cerca de 18 mil milhões de euros em 2019 (Canalys, 2015).

Atualmente, grande parte destas máquinas usa termoplásticos ou compósitos destes (Nikzad, et al., 2009) (Hui, et al., 2011), sob a forma de filamento, aceitando uma grande variedade de termoplásticos, com os quais nos costumamos deparar diariamente tais como Acrilonitrila butadieno estireno (acrylonitrile butadiene styrene - ABS), Ácido poliláctico (polylactic acid - PLA), Poliestireno de alto impacto (High Impact Polystyrene - HIPS), Acetato de polivinila (Polyvinyl alcohol - PVA), Náilon, politereftalato de etileno (polyethylene terephthalate - PET), Policarbonato, entre outros (3dprintingfromscratch, 2016).

Sendo possível através de um extrusor relativamente portátil produzir filamento para uma máquina FDM, os benefícios da reciclagem aproximam-se do utilizador doméstico, e consegue-se mais uma contribuição para a diminuição do consumo de combustíveis fósseis, já que a reciclagem é feita no local, reduzindo custos e poluição associadas ao transporte e seleção dos plásticos, redução da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU's) com consequente diminuição da poluição do ambiente e sobrecarga dos sistemas de tratamento de RSU's.

1.1. Enquadramento

Tal como já foi referido, na atualidade existe um grande desenvolvimento a nível de máquinas de FDM, que utilizam geralmente como consumível apenas o termoplástico durante a impressão. Algumas máquinas que têm como objetivo produzir filamento em ambiente doméstico a partir de pellets do termoplástico em questão, ou até mesmo algumas máquinas de FDM que são capazes de funcionar alimentadas a pellets também já foram desenvolvidas (Sculptify, 2016). Este método é capaz de reduzir o custo de uma impressão associado ao material (Filabot, 2016) para menos de um sexto em alguns casos (ColorFabb, 2016).

Existe também um crescente interesse na tecnologia de FDM, que é comprovado com o crescimento exponencial do mercado para tecnologias associadas tal como já foi referido, o que torna este o momento ideal para a realização de estudos nesta temática.

Vive-se também numa era na qual são muito divulgadas as vantagens da reciclagem, quer a nível económico quer a nível ambiental. Esta divulgação faz com que exista uma consciencialização geral e sensibilidade da população para a reciclagem (Mizuno & Takahashi, 2005), que pode ser utilizada a favor da divulgação de um produto que seja desenvolvido com o propósito de reciclar.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

Na União Europeia (UE) foram aterrados oito milhões de toneladas de plástico em 2014 (PlasticsEurope, 2015), e apesar de ser o continente com melhor taxa de reciclagem do mundo (Kinnaman, 2015), vive-se ainda numa altura em que muito falta fazer para alcançar um sistema auto sustentável independente de combustíveis fósseis que não deteriore intensivamente o ambiente. Apesar da reciclagem ser um grande contributo para atingir estes objetivos, ainda existe um longo caminho a percorrer (PlasticsEurope, 2015). Mais incentivos para aumentar a reciclagem são necessários, para estimular aqueles para os quais apenas questões ambientais não bastam para motivar a efetuar a separação do lixo no ambiente doméstico (Sukholthaman & Shirahada, 2015).

Adicionalmente, a quantidade de centrais de reciclagem é menor do que a de aterros, e portanto a distância a percorrer para transportar RSU's para uma central de reciclagem é muito maior do que para um aterro, o que resulta numa maior poluição associada a emissões relacionadas com o transporte, e o processamento/separação de resíduos aquando da reciclagem. A isto acresce ainda os custos quer económicos quer ambientais da reciclagem (Kinnaman, 2015).

A atribuição de uma utilidade a algo que para os consumidores não teria valor após o uso faz com que o que era considerado resíduo, detrito ou lixo passe a ter valor, e sendo este valor um ganho

para o próprio consumidor faz com que, tal como já foi referido, este tenha mais motivação para reciclar, e assim se aumente a reciclagem.

A proposta deste trabalho de dissertação consiste no desenvolvimento de uma máquina capaz de converter termoplásticos no filamento utilizado para alimentar máquinas de FDM, que iria trazer várias vantagens em primeiro lugar para o utilizador, mas também para o ambiente e para a sociedade. O aumento da quantidade de plásticos reciclados é a primeira e mais óbvia consequência positiva, trazendo também a redução de custos associados à FDM e fazendo com que menos resíduos sejam produzidos, por serem reutilizados na impressão. Ao ser efetuada no local onde o plástico é descartado, a reciclagem não apresenta custos de transporte. Os custos de processamento são acarretados pelo utilizador e sendo a energia utilizada a da rede, utiliza-se uma cada vez maior percentagem de energias renováveis (Sharma & Chawla, 2012).

É óbvio que a aquisição de uma máquina FDM ainda não é ainda algo desejado pela maioria dos consumidores pelo custo associado à tecnologia, mas as suas previsões de crescimento irão permitir a entrada no mercado de novas marcas e modelos com contínuos avanços tecnológicos (Canalys, 2015).

A possibilidade da criação de filamento através de material reciclado pode também ser uma vantagem competitiva numa empresa do ramo, já que se pode realizar uma espécie de central de reciclagem em pequena escala da qual resulta a comercialização de filamento “verde”.

Do ponto de vista do utilizador, num mundo onde a tecnologia FDM visa alcançar a criação de bens em ambiente doméstico em detrimento da sua aquisição numa loja física, a capacidade de produção da matéria-prima a partir de algo que não possuía qualquer valor é mais uma vez uma vantagem, que permite aumentar a quantidade, variedade de peças criadas e efetuar experiências sem ter receio de erros ou falhas, uma vez que um objeto defeituoso ou que já não é necessário pode ser novamente utilizado para produzir filamento.

1.3. Objetivos e contribuição da dissertação

Esta dissertação tem como objetivo, tal como foi referido, estudar a possibilidade e desenvolver uma máquina extrusora de filamento para utilização em FDM. Pretende-se primeiramente que esta máquina seja capaz de extrudir filamento a partir de termoplásticos que de outra forma seriam descartados, mas também deverá ser capaz de extrudir filamento a partir de pellets, ou uma mistura dos dois.

Devido ao vasto leque de propriedades dos termoplásticos disponíveis ao consumidor, este trabalho ir-se-á focar inicialmente apenas na extrusão de um termoplástico - o PET - que depois se tentará extrapolar para outros tipos de termoplásticos após o estudo das características particulares de extrusão de cada um destes.

1.4. Visão geral e organização da dissertação

Esta dissertação organiza-se essencialmente em duas partes, uma primeira parte em que se estuda a componente teórica essencial ao desenvolvimento da máquina, e uma segunda parte onde se abordam as partes experimentais e práticas do desenvolvimento da máquina.

A primeira parte começa por estudar um termoplástico com vista à sua extrusão para produção de filamento, e utilização na modelação por deposição de material fundido (FDM), de seguida, máquinas de FDM são estudadas e os seus requisitos a nível de filamento são retidos, sendo por fim estudadas as extrusoras, principalmente extrusoras industriais, para que as suas características e propriedades possam ser utilizadas no dimensionamento da máquina.

A segunda parte tem em vista o desenvolvimento de um protótipo funcional, inicialmente corroboram-se as informações obtidas em relação às propriedades do PET (politereftalato de etileno) importantes para a sua extrusão e experimenta-se um filamento de PET comercial numa máquina de FDM comum. Por fim uma máquina para a extrusão de filamento é projetada, desenhada e a sua construção iniciada.

2. Fundamentos do PET

PET, por vezes também referido como PETE é a abreviatura de *polyethylene terephthalate* (politereftalato de etileno), o nome químico da resina de polímero termoplástica da família poliéster. O PET é principalmente associado a garrafas de água ou refrigerantes, mas também pode ser encontrada em outras embalagens, fibras sintéticas, etc. Quando não é tingido pode ser encontrado sob forma translúcida ou opaca esbranquiçada (Demirel, et al., 2011).



Figura 1. Código de identificação da resina opção A e opção B (ASTM D7611 / D7611M, 2013).

O PET é totalmente reciclável, quer através de quebra química, ou mais comumente refusão (Geissler, Improving Processing of PET, 2015). Este polímero pode ser identificado através do número 1 dentro de um triângulo marcado em embalagens de plástico (ver exemplo na Figura 1). O PET é a única resina a utilizar este número (ASTM D7611 / D7611M, 2013).

Também é possível encontrar em algumas embalagens o símbolo de identificação antigo, que foi alterado pela ASTM devido à confusão entre reciclabilidade e identificação de plásticos por parte dos utilizadores

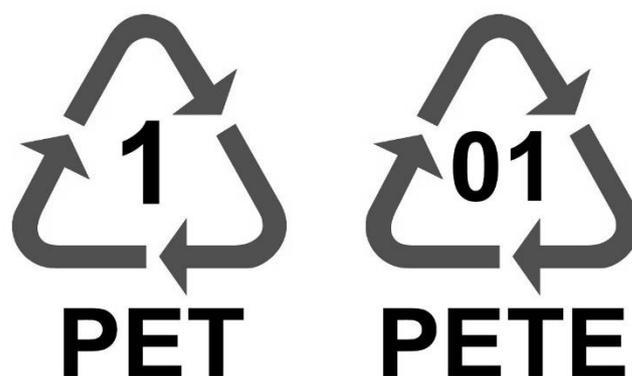


Figura 2. Antigo código de identificação da resina opção A e opção B (Caliendo, 2013).

Esta alteração pretende criar uma separação mais clara entre o símbolo de identificação da resina e a sua reciclabilidade (Caliendo, 2013).

O PET é um termoplástico poliéster com o número CAS 25038-59-9 (IFA, 2014). A sua aplicação mais relevante são as fibras, películas e garrafas. Cada finalidade requer propriedades específicas, e por isso existem diferentes tipos de categorias de PET para cada uma destas finalidades, daí as diferentes categorias para fibras, películas e garrafas. Neste contexto a consideração mais importante é o peso molecular do polímero, que usualmente é indicado através da viscosidade intrínseca (PlasticsEurope, 2010). A estrutura do PET é mostrada na Figura 3:

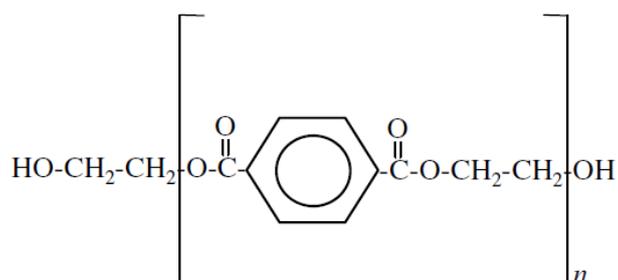


Figura 3. Estrutura do politereftalato de etileno (PlasticsEurope, 2010)

Esta molécula forma uma cadeia em que a componente entre parêntesis tem geralmente um valor de repetição (n) entre 100 e 200, cuja organização irá influenciar a morfologia do PET (semi-cristalino ou amorfo) e consequentemente alterar as suas propriedades físicas e mecânicas. Esta morfologia e portanto características do produto final estão altamente relacionadas com os processos de produção, tais como a temperatura de processamento, taxa de arrefecimento, processo de alongamento etc. (Demirel, et al., 2011).

2.1. História do PET

O PET foi inicialmente desenvolvido em 1941 pela britânica Calico Printers para uso em fibras sintéticas. Os direitos foram posteriormente vendidos à DuPont e ICI que por sua vez venderam direitos regionais a muitas outras empresas (PlasticsEurope, 2015).

Apesar de originalmente ter sido utilizado na produção de fibras, o uso da película de PET em embalagem começou nos meados da década de 60, tendo aplicações extensivas na indústria do cinema, fotografia e embalagem (PETRA, 2015). No início da década de 70, a técnica de sopro com orientação molecular biaxial foi desenvolvida comercialmente, o que levou a que hoje, a produção de garrafas represente a maior parte da utilização das resinas PET (PlasticsEurope, 2010).

A primeira garrafa de PET foi reciclada em 1977 (NAPCOR, 2010) o que mudou completamente a indústria PET já que em 2014 de todo o PET consumido reciclava-se 57,2% na UE e 31% nos EUA (PETRA, 2015).

2.2. Processo de produção do PET

Os componentes com os quais se começa a produção do PET são o etileno ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) para a produção do glicolato de etileno e do paraxileno que por sua vez servem para a produção do ácido tereftálico.

O reformado das refinarias é a principal fonte de xilenos. A matéria-prima dos aromáticos é convertida numa mistura de produtos dos quais os principais componentes são o benzeno, tolueno e xilenos (conhecido por processo BTX). O Benzeno e outros aromáticos são isolados no seu estado puro a partir do reformado, através da extração de solvente e destilação fracionada. (PlasticsEurope, 2010). Na Figura 4 encontra-se um diagrama de fluxo da produção típica de PET categoria de garrafa (adaptado de PlasticsEurope, 2010).

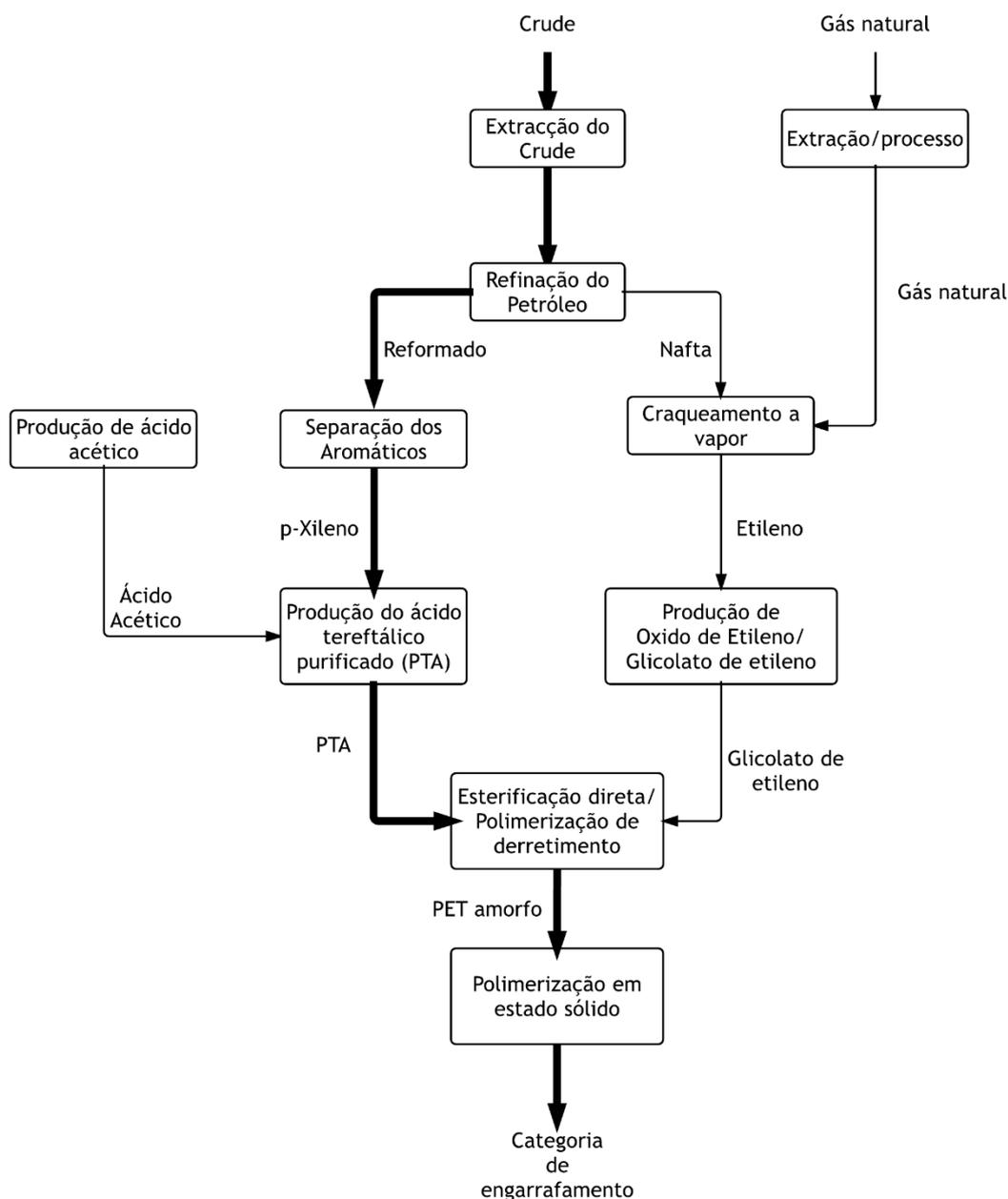


Figura 4. . Diagrama de fluxo da produção típica de pet categoria de garrafa (PlasticsEurope, 2010), adaptado.

O *output* da produção de xileno é uma mistura das três formas de xileno, ortoxileno, metaxileno e paraxileno. Antes do seu uso na produção do ácido tereftálico, os isômeros são separados já que o paraxileno permite que se forme uma cadeia “direita” que é mais adequada a polímeros lineares como o PET (PlasticsEurope, 2010).

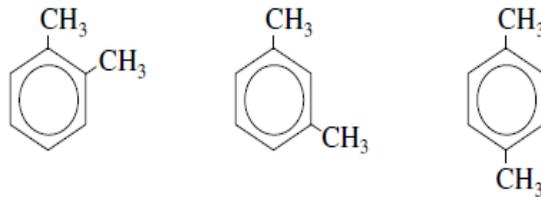


Figura 5. Estrutura do orto, meta e paraxilenos. (PlasticsEurope, 2010)

O paraxileno é então oxidado dando origem ao ácido tereftálico que é depois purificado. Este ácido tereftálico purificado (PTA) reage então com o glicolato de etileno e tereftalato de bis-hidroxieta (BHET), obtendo água como subproduto. O monómero pode agora ser polimerizado no estado líquido e dar origem ao PET amorfo, que nesta forma pode ser utilizado para produzir películas e fibras, no entanto, a maior parte das garrafas produzidas utilizam uma pequena adição (1 a 2%) de ácido isoftálico (IPA) e ciclohexanodimetanol durante a polimerização. Uma segunda polimerização no estado sólido aumenta o peso molecular do polímero e produz uma resina parcialmente cristalina, que pode ser utilizada para produzir garrafas via injeção em moldes ou moldagem por sopro (PlasticsEurope, 2010).

2.3. Produção de PET com recurso a monómeros obtidos através de fontes renováveis

A produção de PET pode ser efetuada alternativamente à tradicional utilização do petróleo, a partir de alimentos ou restos de alimentos (milho, cana de açúcar, etc...) ou biomassa e desperdícios (lascas de madeira, algas, resíduos orgânicos compostáveis urbanos, etc...) resultando na matéria-prima total ou parcial para a produção de PET. Alguns destes métodos estão prestes a atingir escala industrial de produção, recaindo sob duas categorias:

Monómeros ou co-monómeros derivados de fontes renováveis, que têm a mesma estrutura química e preenchem critérios de pureza comparáveis com os dos monómeros correspondentes de síntese petroquímica. Fontes renováveis podem ser utilizadas para produzir um ou mais monómero ou co-monómeros *standard* à produção do PET, tais como o ácido tereftálico (PTA), ácido isoftálico (IPA), etileno glicol (EG), di-etileno glicol (DEG) e ciclohexanodimetanol (CHDM). Se os monómeros e co-monómeros manufaturados através de fontes renováveis tiverem a mesma estrutura e cumprirem os mesmos critérios de pureza são virtualmente indistinguíveis, e portanto, dão origem a um PET praticamente idêntico, quer em características, quer em estrutura, e portanto não se distingue do PET produzido com recurso a fontes não renováveis sem recorrer a equipamento sofisticado para tal. Isto significa que tal como o PET produzido com recurso a petroquímicos pode ser reciclado e misturado com este após o seu uso, dando origem ao rPET (EPBP, 2012).

Monómeros e co-monómeros derivados de fontes renováveis com estruturas químicas diferentes dos já utilizados na normal síntese do PET. O resultado é uma resina poliéster com uma estrutura química diferente da do PET normalmente utilizado, o que o pode levar a ter propriedades diferentes das usuais do PET. Esta questão pode tornar-se problemática, já que para além de poder alterar as características pelas quais os fabricantes escolhem o PET para os seus produtos, pode também afetar a sua entrada no ciclo de reciclagem do PET, e até mesmo contaminar e consequentemente inviabilizar a normal reciclagem deste polímero. Para que tal não aconteça é

necessário analisar adequadamente cada tipo de poliéster obtido por este processo, já que tanto pode ter propriedades suficientemente semelhantes ao PET utilizado comercialmente, e ser viável para entrar no ciclo de reciclagem do PET, como pode inviabilizar este ciclo contaminando-o (EPBP, 2012).

2.4. PET em números

Devido a características como o módulo elástico, dureza, rigidez, resistência à tração, resistência a solventes e ao impacto, o PET é o plástico de eleição para utilização em garrafas de plástico (Demirel, et al., 2011) representando 7% da procura de plásticos na EU-28+NO/CH em 2014 (PlasticsEurope, 2015) e 12% das embalagens descartáveis, sob a forma de garrafas (PMMI, 2015).

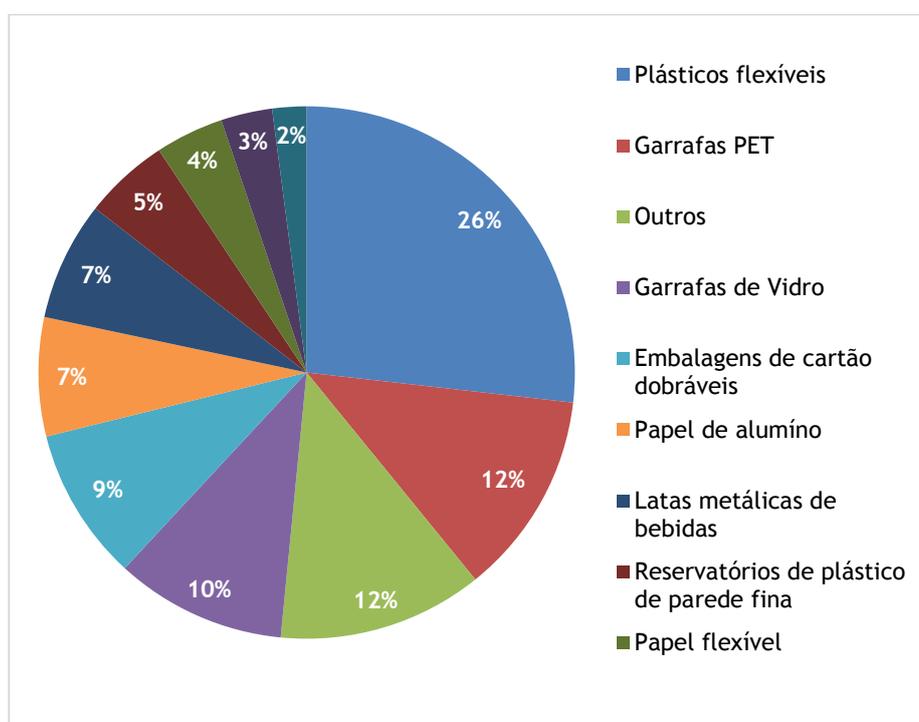


Figura 6. Tipo de embalagens utilizadas para proteger bens de consumo (PMMI, 2015), adaptado.

Este termoplástico apesar de não ser o mais produzido é o mais reciclado na UE e nos EUA, tendo em 2014 atingido uma taxa de reciclagem de 57,2% na UE e 31,0% nos EUA (PETRA, 2015), e apesar da procura de rPET (PET reciclado) ter diminuído para aplicações têxteis (39,3% em 2011 para 26,4% em 2014) e ter deixado de ser esta a área que mais consome rPET, esta diminuição foi compensada pelo aumento da procura de rPET na produção de garrafas de plástico (25,3% em 2011 para 29,8% em 2014), (PETRA, 2015), (EPBP, 2015) que em média são atualmente constituídas por cerca de 11,7% de material reciclado (EPBP, 2015).

Atualmente mais de metade das fibras sintéticas são constituídas por PET, muitas vezes apenas designado por poliéster (PETRA, 2015).

A segurança do PET para alimentação, utilizações farmacêuticas e médicas tem sido demonstrada através de estudos extensivos e testes, tendo sido globalmente aceite há mais de 3 décadas (PETRA, 2015).

Apesar de uma grande quantidade de materiais constituídos por PET terem ainda como destino aterros, a sua baixa densidade e características que permitem utilizar pouco material para embalar fazem com que após esmagamento apenas ocupem 1% das lixeiras nos EUA (PETRA, 2015).

Mesmo com todos os problemas associados à logística e processamento, a produção do PET consome relativamente pouca energia, mas essa diminui 40% quando se introduz rPET (PETRA, 2015).

2.5. Propriedades termofísicas

Na bibliografia, a informação relacionada com propriedades do PET é por vezes contraditória, e será confirmada no decorrer desta dissertação por via experimental.

2.5.1. Temperatura de transição vítrea

A temperatura de transição vítrea (T_g), ao contrário da temperatura de fusão (T_d), não implica mudança de fase, mas sim uma alteração nas suas propriedades físicas, o que se verifica geralmente em polímeros amorfos. Esta é a temperatura à qual materiais poliméricos passam de uma forma vítrea para uma forma mais borrachosa, sendo portanto mais flexíveis e elásticos. Esta temperatura é importante porque é uma fase pela qual os materiais impressos passam antes de ficarem rígidos (Wang, et al., 2012). Os valores de T_g rondam os 80 °C (Geissler, 2006; Demirel et al., 2011) para o PET cristalino e 67°C para o PET amorfo (Demirel, et al., 2011).

80°C (Geissler, 2006)

67°C para PET amorfo e 81°C para PET cristalino (Demirel, et al., 2011)

2.5.2. Ponto de fusão

À primeira vista, a informação essencial reside na temperatura à qual o PET altera as suas propriedades, e destas, a mais importante será a temperatura de fusão, já que será necessário atingir esta temperatura para poder imprimir com este material, e antes disso ainda, extrudir o PET para fazer filamento. Os estudos realizados por (Shi & Jabarin, 2001; Geissler, 2006; Demirel et al., 2011; Faraj et al., 2011; IFA, 2014) indicam que a temperatura de fusão se situa entre os 230°C e os 268°C.

2.5.3. Temperatura de decomposição

A temperatura de decomposição é aquela a partir da qual o polímero começa a perder massa, ou seja, os substratos do PET são estáveis até esta temperatura, a partir daqui o polímero inicia a

decomposição e não se deverão esperar as mesmas propriedades aquando da solidificação. A temperatura de decomposição do PET situa-se nos 300°C (Faraj, et al., 2011).

2.5.4. Outras propriedades

Nesta subsecção foi reunido um conjunto de propriedades gerais deste polímero, relevantes ao conhecimento do polímero e para o desenvolvimento do trabalho.

Tabela 1. Resistencia a químicos (Goodfellow, 2016), adaptado.

Químico	Resistência
Ácidos concentrados	Média
Ácidos diluídos	Alta
Alcoois	Alta
Alcalinos	Baixa
Hidrocarbonetos aromáticos	Média alta
Gorduras e óleos	Alta
Hidrocarbonetos halogenados	Média
Halogénios	Média baixa
Cetonas	Média alta

Tabela 2. Propriedades mecânicas (Goodfellow, 2016), adaptado.

Propriedades mecânicas	Valor
Coeficiente de fricção	0.2-0.4
Dureza Rockwell	M94-101
Módulo elástico	2-4GPa
Resistência à tração	80MPa

Tabela 3. Propriedades físicas (Goodfellow, 2016), adaptado.

Propriedades físicas	Valor
Massa específica	$1,3-1,4 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-3}$
Absorção de água (equilíbrio)	<0.7%
Absorção de água (24h)	0.1

Tabela 4. Outras propriedades térmicas (Goodfellow, 2016), adaptado.

Propriedades térmicas	Valor
Coefficiente de expansão térmica	$20-80 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Calor específico	$1200-1350 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
Condutibilidade térmica a 23°C	$0,15-0,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

2.5.5. Morfologia

O PET tal como já foi referido, é um polímero termoplástico muito utilizado em embalagens e fibras, mas prestando atenção às embalagens, pode-se verificar que aquelas que dispõem do símbolo PET podem ter propriedades bastante distintas, podendo-se essencialmente dividir em dois grupos: Garrafas ou embalagens translúcidas, mais rígidas e menos flexíveis, ou garrafas opacas, geralmente esbranquiçadas caso não sejam aplicados corantes, menos rígidas mas mais flexíveis. Esta condição é causada pelas diferenças na morfologia do polímero, que pode ser amorfo (as cadeias do polímero estão misturadas sem ordem específica) ou semi-cristalino (as cadeias estão alinhadas umas com as outras em grupos). O PET cristalino não é possível de obter nas condições de produção normais, e por isso não está disponível ao consumidor (Demirel, et al., 2011).

A diferença na produção do PET amorfo e semi-cristalino reside essencialmente na velocidade de arrefecimento, já que se este for arrefecido lentamente dá tempo para as cadeias se organizarem e se alinharem formando pedaços cristalinos na estrutura do polímero, que se for rapidamente arrefecido não tem tempo de cristalizar e fica portanto PET amorfo (Demirel, et al., 2011).

Outra forma de obter PET cristalino é através de tração, esticando o plástico de maneira a que as cadeias fiquem orientadas no mesmo sentido, ficando conseqüentemente o polímero semi-cristalino (Demirel, et al., 2011).

Numa estrutura amorfa, microscopicamente, todo o polímero é homogéneo, já que todas as cadeias se encontram desorganizadas aleatoriamente. Por outro lado, o PET semi-cristalino observado microscopicamente é composto como que por mosaicos do polímero cristalino, intercalados com zonas amorfas, e por isso, heterogéneo como se pode visualizar na Figura 7.

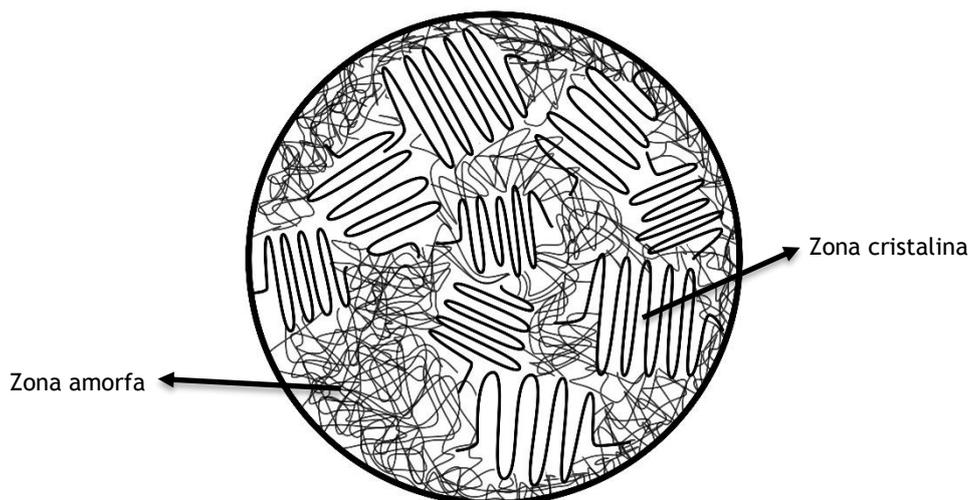


Figura 7. Estrutura macromolecular do PET semi-cristalino (Demirel, et al., 2011), adaptado.

2.6. Porquê PET

O objetivo de uma máquina capaz de transformar termoplástico em filamento que seja funcional numa impressora 3D consiste na produção de filamento a partir de qualquer termoplástico. No entanto, para desenvolver tal equipamento tem que se começar por apenas um, já que apesar dos termoplásticos apresentarem comportamentos relativamente semelhantes, permitindo que apenas uma máquina possa ser utilizada na sua extrusão, as diferenças entre eles fazem com que a sua viabilidade tenha que ser estudada independentemente.

A primeira abordagem deveria residir no estudo do PLA ou ABS por serem os termoplásticos mais utilizados na FDM. No entanto, a pequena quantidade de materiais feitos com estes plásticos iria reduzir a aplicabilidade do equipamento a desenvolver nesta dissertação e no seu grande objetivo: a possibilidade de reciclar termoplásticos domésticos em filamento para impressoras 3D. O estudo tornar-se-ia mais complexo por não ser fácil encontrar grandes quantidades deste material em forma de plástico descartado. Face a estas restrições, a presente abordagem residiu no estudo do PET. É um termoplástico totalmente reciclável, cuja reciclagem está bem documentada e é feita em larga escala nos dias que correm. É uma resina facilmente identificável e as suas propriedades como o coeficiente de expansão térmica e temperatura de fusão à partida não inviabilizam a sua utilização na tecnologia FDM. Graças às normas implementadas no processo de produtos em PET é fácil remover os contaminantes a este termoplástico, para que impurezas não afetem a sua extrusão e utilização durante a impressão.

Para além de todas estas características, a existência de PET em máquinas FDM já está documentada (3dprintingfromscratch, 2016), e apesar de não ser muito utilizado nesta tecnologia, permite já estudar a viabilidade da máquina extrusora.

2.7. Nota conclusiva

O PET é um termoplástico que tem sido muito utilizado nos últimos anos, facilmente identificável, sendo por isso é uma boa escolha para aplicação num extrusor de filamento para uma máquina FDM.

A sua reciclabilidade corrobora ainda mais a sua possível aplicabilidade numa máquina de extrusão de filamento.

A variação da morfologia com a taxa de arrefecimento deixa em aberto a possibilidade de controlar a morfologia pós impressão, que poderia ser um interessante trabalho futuro a realizar.

A possibilidade de fazer PET a partir de fontes renováveis também permite garantir um futuro ao uso deste plástico.

“In the 60 years since PET was first synthesized, it has become one of the world’s most widely used, versatile and trusted materials” (PETRA, 2015)

3. Fundamentos da fabricação aditiva

3.1. Introdução

Reduzir tempo e custos nos processos de prototipagem sempre foi uma prioridade para empresas e centros de investigação. A fabricação aditiva é um dos métodos de prototipagem rápida (*Rapid Prototyping* - RP) mais utilizados (LeGault, *The rise of rapid manufacturing*, 2009).

A fabricação aditiva ou por camadas, de sigla AM do inglês *Additive Manufacturing* consiste num conjunto de métodos de fabrico de peças *layer by layer* que tem sido utilizada e desenvolvida em várias empresas e universidades desde há mais de 20 anos (Brown & Beer, 2013). Este conjunto de métodos de fabrico é uma mais-valia em situações de prototipagem, uma vez que permite a rápida execução de peças recorrendo apenas a um desenho CAD e uma máquina de AM. Esta valência evita a necessidade de múltiplas ferramentas para criar uma peça, já que a necessidade de moldar, cortar e maquinar os materiais é praticamente eliminada, permitindo que esta criação seja feita num ambiente de escritório, em detrimento de ter uma oficina para este tipo de trabalhos (LeGault, *The rise of rapid manufacturing*, 2009). Por isso, é frequentemente utilizada para produzir protótipos de bens de consumo, implantes médicos, modelos para o fundição ou moldagem, etc. (Brown & Beer, 2013).

3.2. Processamento computacional

O processo de AM é essencialmente constituído por três fases: A primeira fase consiste em desenvolver o modelo 3D da peça através de um *software* de desenho assistido por computador (*Computer-Aided Design* - CAD), a segunda fase consiste em converter esta peça num ficheiro com o formato estereolitográfico (*STereoLithography*- STL) e através deste gerar o caminho da ferramenta por camadas, adequada à leitura por uma máquina de controlo numérico computadorizado (*Computer Numeric Control* - CNC), por exemplo *G-codes* e *M-codes*, e por fim a última etapa consiste na produção da peça a partir de uma máquina de AM (Brown & Beer, 2013).

Tal como indicado, todos os métodos de AM começam com um desenho CAD 3D. Este desenho deve ser convertido num formato que se aproxima à forma através de um conjunto de superfícies triangulares planares (normalmente um ficheiro com o formato STL como representado na Figura 8).

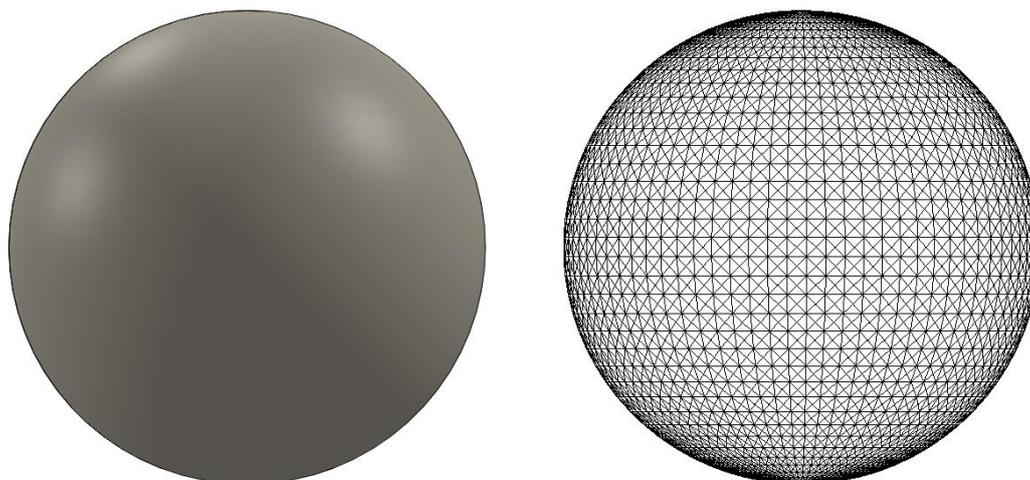


Figura 8. Modelação CAD no software Solidworks de uma esfera (esquerda) e a sua aproximação em ficheiro STL composto por 5852 superfícies triangulares planares (direita).

Apesar de já terem sido criados vários formatos para RP, nenhum tem sido adotado tão universalmente pelos desenvolvedores de *software* CAD como o STL, devido à sua simplicidade e facilidade de geração que não exige *software* muito avançado (Brown & Beer, 2013).

Muitas máquinas CNC são controladas utilizando uma linguagem de programação específica designada por *G-code*, ou em português, código G. Esta linguagem consiste numa sequência de comandos, tais como movimento da ferramenta em eixos diferentes com velocidades diferentes, interpolações, início e paragem da máquina, alteração dos parâmetros de maquinação, etc. Comparada com uma linguagem de programação de alto nível, o código G é muito simples porque na sua forma original não toma decisões e não possui variáveis ou ciclos. Existem várias maneiras básicas de repetir operações utilizando comandos específicos ou parâmetros de repetição. Mesmo sendo os comandos do código G *standard*, muitas produtoras estenderam as suas funções com extensões proprietárias tais como a RS274D mais utilizada nos Estados Unidos e ISO 6983 ou DIN 66025 utilizadas na Alemanha. O código G pode ser desenvolvido manualmente, gerado automaticamente através de *software* específico para o efeito, ou através de plug-ins e *add-ons* presentes em *software* de CAD (Aciu & Ciocarlie, 2014).

A maior parte das configurações e otimizações do código G são feitas aquando da geração deste, já que a maior parte do *software* que faz esta geração permite bastante configuração e otimização do código. Após esta geração é bastante mais complicado de corrigir e configurar (Aciu & Ciocarlie, 2014).

Para uma peça 3D como a que se encontra exemplificada na figura 8, esta conversão separa a forma 3D numa série de cortes transversais, formando uma série de desenhos 2D separados entre si pela altura da camada de material desejada, geralmente na ordem da décima de milímetro (LeGault, *The rise of rapid manufacturing*, 2009) que pode ser diminuída para melhorar o acabamento da superfície ou aumentada para aumentar a velocidade de fabrico da peça (dependendo das características técnicas da máquina AM) (Brown & Beer, 2013).

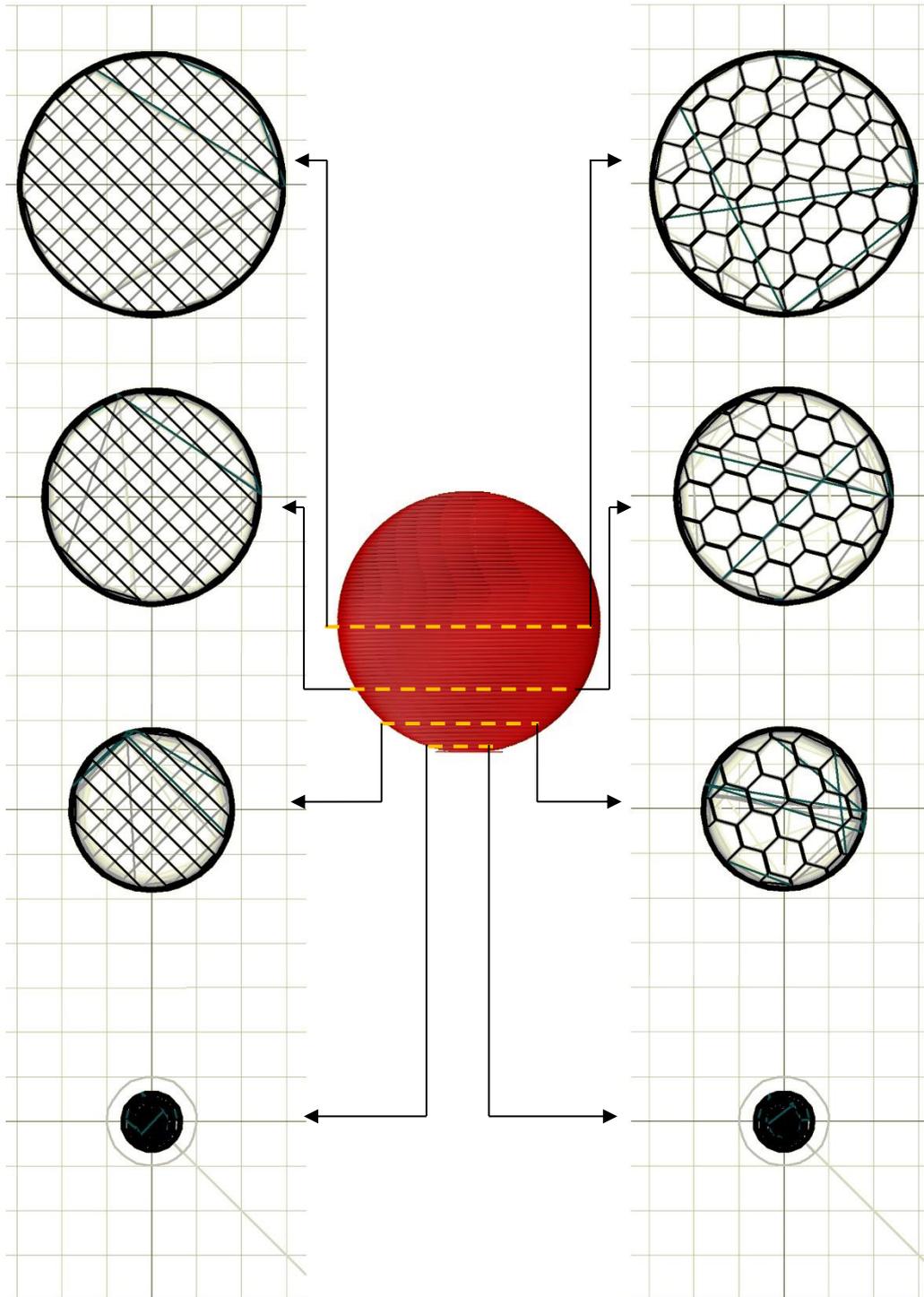


Figura 9. Várias camadas do ficheiro .gcode, com estruturas de enchimento retilínea (esquerda) e em colmeia (direita).

Na figura 9 pode-se observar cortes de quatro camadas diferentes do ficheiro de código G da esfera representada na figura 8 onde se pode ver o planeamento da passagem da cabeça extrusora da impressora com configurações diferentes. Ambas possuem uma parede igual, mas o enchimento é diferente, sendo considerado à esquerda um enchimento retilíneo enquanto à

direita é considerado um enchimento em colmeia, apesar de em ambas as situações poupar 90% do material que seria utilizado no enchimento caso fosse uma esfera maciça. A configuração selecionada pode afetar bastante as propriedades mecânicas da peça, velocidade de processamento e economizar grandes quantidades de material. Como estes existem outros inúmeros tipos de configurações de enchimento possíveis (Aciu & Ciocarlie, 2014).

3.3. Tipos de máquinas

As máquinas de fabricação aditiva foram nas recentes décadas cruciais para o desenvolvimento da tecnologia, permitindo às empresas reduzir o tempo de desenvolvimento dos produtos. Foram criados vários métodos e atualmente existem 5 tipos principais de máquinas AM (LeGault, The rise of rapid manufacturing, 2009):

3.3.1. Estereolitografia (SLA)

Patenteado em 1986 foi o primeiro método de prototipagem rápida disponibilizado no mercado e ainda hoje é dos mais utilizados em meio industrial. A peça é construída numa plataforma posicionada ligeiramente abaixo da superfície num reservatório com um polímero foto curável, geralmente uma resina epóxi ou de acrilato. Um laser de alta precisão na gama do espectro ultravioleta (UV) de baixa potência programado com os cortes transversais da peça traça a camada dentro dos limites até que a resina cure e a área fique sólida. Um sistema descende a plataforma até a parte solidificada ser coberta de novo com a resina na espessura desejada e o laser varre de novo a superfície. O processo repete-se até que a parte esteja completa. Dependendo da geometria da peça podem ser adicionados pontos de suporte, que serão posteriormente removidos. A peça no final pode ser levada a um forno UV para uma melhor cura da resina (LeGault, The rise of rapid manufacturing, 2009).

As tolerâncias típicas deste tipo de máquinas rondam os 0,1 e 0,4mm para peças entre 200 e 500mm (LeGault, The rise of rapid manufacturing, 2009).

3.3.2. Modelação por deposição de material fundido (FDM)

Também normalmente referidas como Impressoras 3D foram comercializadas a partir de 1988. As máquinas de FDM ficam em segundo lugar na lista de máquinas AM mais utilizadas em meio industrial, e primeiro lugar nas mais utilizadas em ambiente doméstico e de escritório - *desktop 3D printers*. Costumam utilizar principalmente como material de impressão o Acrilonitrila butadieno estireno (*Acrylonitrile butadiene styrene* - ABS) (nos meios industriais e aplicações da engenharia) e o ácido poliláctico (*PolyLactic Acid* - PLA) (em meios domésticos, escritório e hobby), mas é capaz de aceitar muitos outros materiais tais como o poliestireno de alto impacto (High Impact Polystyrene - HIPS), acetato de polivinilo (PolyVinyl Alcohol - PVA), Náilon, PET, Policarbonato, entre outros (3dprintingfromscratch, 2016)

Esta impressora constrói objetos por camadas, tal como nas outras tecnologias AM, mas fá-lo fundindo resina termoplástica através de um bico extrusor. A impressão pode ser feita deslocando a cabeça de impressão, a plataforma de impressão, ou ambas. Pode utilizar diferentes métodos para tal, utilizando as cartesianas a deslocação nos três eixos cartesianos, a delta que utiliza três

eixos verticais para posicionar a cabeça da impressora (LeGault, The rise of rapid manufacturing, 2009) e as polares nas quais a base roda e a cabeça de extrusão se movimenta em apenas um eixo. Estas últimas, apesar de poderem possuir menos um motor de passo do que as duas anteriores, as desvantagens são demasiadas para competirem com as delta e cartesianas (Bernier, 2015).

As tolerâncias deste tipo de impressão variam muito de modelo para modelo, mas o mais comum ronda os 0,25mm que corresponde à altura média de uma camada (LeGault, The rise of rapid manufacturing, 2009).

Este é o método escolhido para implementar nesta dissertação tal como será explicado mais à frente, e por isso será desenvolvido mais à frente neste capítulo.

3.3.3. Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

Foi desenvolvida em 1980, mas só começou a ser comercializada em 2001. Num método semelhante à estereolitografia, a SLS utiliza o calor que um laser de CO₂ é capaz de fornecer para fundir uma série de materiais sob a forma de pó, contrariamente à estereolitografia que utiliza um líquido. Após a fusão do pó, a plataforma desce e um rolo aplica uma nova camada (LeGault, The rise of rapid manufacturing, 2009).

A tolerância deste tipo de impressão ronda os 0,1mm e 0,75mm para peças com comprimentos de 100 e 500mm respetivamente (LeGault, The rise of rapid manufacturing, 2009).

Este método de impressão permite imprimir uma vasta gama de materiais sem necessidade de recorrer a suporte (o pó serve de suporte), no entanto o mau acabamento da superfície e alta porosidade são também características deste tipo de impressão (LeGault, The rise of rapid manufacturing, 2009).

3.3.4. Processamento de Luz Digital (DLP)

Desenvolvida pela Texas *Instruments*, esta tecnologia utiliza tal como a estereolitografia uma resina termocurável, mas consegue processá-la mais rapidamente, num processo mais contínuo do que o referido que trabalha por camadas. O DLP utiliza toda a imagem da projeção do corte em detrimento de um ponto de luz que efetua o varrimento, e está constantemente a deslocar a peça verticalmente em vez de parar por camada (LeGault, The rise of rapid manufacturing, 2009).

Este método elimina a visível separação de camadas, característica dos métodos de AM que utilizam a deposição de camadas.

3.3.5. Impressão 3D

Apesar de se poder confundir com o nome comumente dado a máquinas de FDM, estas ganham o nome de Impressora 3D precisamente por utilizarem a mesma tecnologia que uma impressora de escritório a jato de tinta (LeGault, The rise of rapid manufacturing, 2009).

Apenas desenvolvidas em 2007, estas máquinas funcionam projetando a jato camadas sucessivas de material. O sistema funciona canalizando o material proprietário sob forma líquida às suas várias cabeças que podem atingir uma centena de injetores cada. Através deste sistema podem-se controlar as propriedades mecânicas da peça através da controlada impressão de dois materiais diferentes da qual resulta um compósito (LeGault, *The rise of rapid manufacturing*, 2009).

Este método de AM é capaz de obter precisões entre 0,1 e 0,3mm e face à sua recente existência ainda é cedo para estudar o impacto no mercado (LeGault, *The rise of rapid manufacturing*, 2009).

3.4. Porquê FDM?

Após estudar as máquinas existentes de AM, pode-se reforçar que FDM é sem dúvida o método mais adequado a utilizar neste trabalho, já que apesar do processo de criação de filamento ser exigente (Cerneels, et al., 2013), é mais simples, e economicamente acessível do que criar um polímero fotocurável (para SLA), resina termocurável (DLP) ou pó (SLS)

Adicionalmente, por ser mais económica, a máquina FDM é a mais utilizada em ambiente doméstico e de escritório, setor de grande crescimento da impressão 3D, e tem potencial para fazer economizar centenas a milhares de euros anualmente por habitação (Wittbrodt, et al., 2013).

3.5. Estudo de mercado

Sendo um setor promissor e de crescimento rápido, com potencial para criar uma nova revolução industrial (Wittbrodt, et al., 2013), deve-se tentar que este trabalho consiga ser utilizado pela maior quantidade possível de impressoras.

As impressoras mais vendidas são do projeto RepRap, seguidas de perto pelas das empresas Ultimaker e Makerbot (3D HUBS, 2016). Estas três marcas detêm cerca de 70% do mercado conforme indicado na figura 10

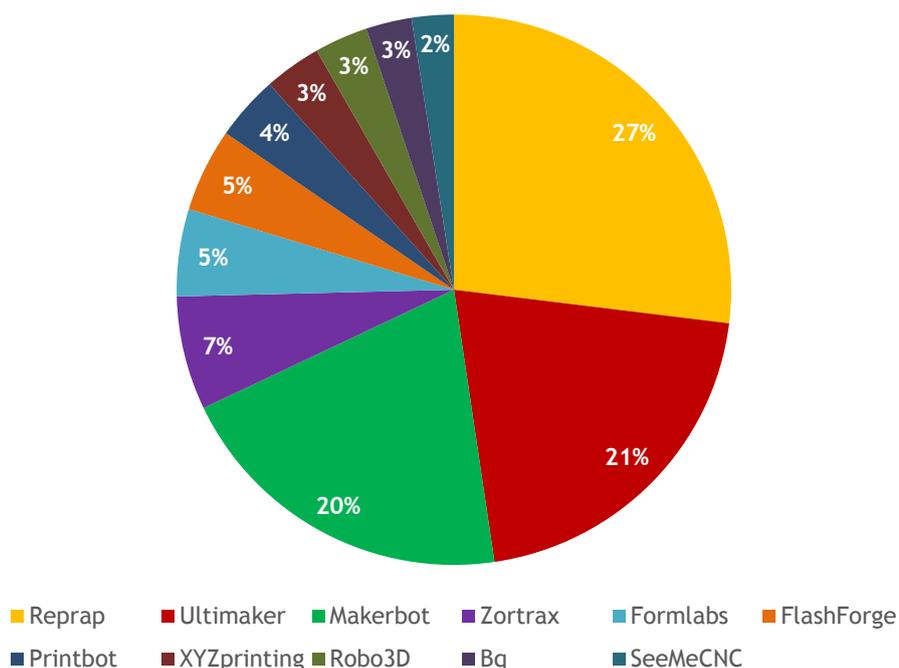


Figura 10. Desktop 3D Printers mais compradas (3D HUBS, 2016).

A RepRap utiliza normalmente filamento de diâmetro de 1,75mm e 3mm, atualmente consideradas como sendo as medidas *standard* (English, 2012). Já as fabricantes Ultimaker e Makerbot possuem medidas que não obedecem ao *standard* (Ultimaker, 2016) e utilizam filamento proprietário (Makerbot, 2016).

Face a estas características e especificações técnicas, a escolha que faz mais sentido consiste no desenvolvimento de uma máquina capaz de produzir filamento para uma RepRap, já que para além de possuir as características ideais, é também aquela que, por ser *OpenSource* permite que sejam facilmente feitas alterações, sendo assim mais fácil a sua configuração ao uso de filamentos para os quais não está inicialmente preparada (Bowyer, 2016).

3.6. Componentes básicos da máquina FDM RepRap e seu funcionamento

Face às considerações prévias, é então necessário detalhar o funcionamento da máquina escolhida como destino ao filamento que se pretende produzir. Esta condição é crucial, para que as características deste obedçam aos requisitos da máquina, permitindo o seu normal funcionamento. A Figura 11 apresenta um esquema de funcionamento de uma impressora FDM que de seguida é descrito.

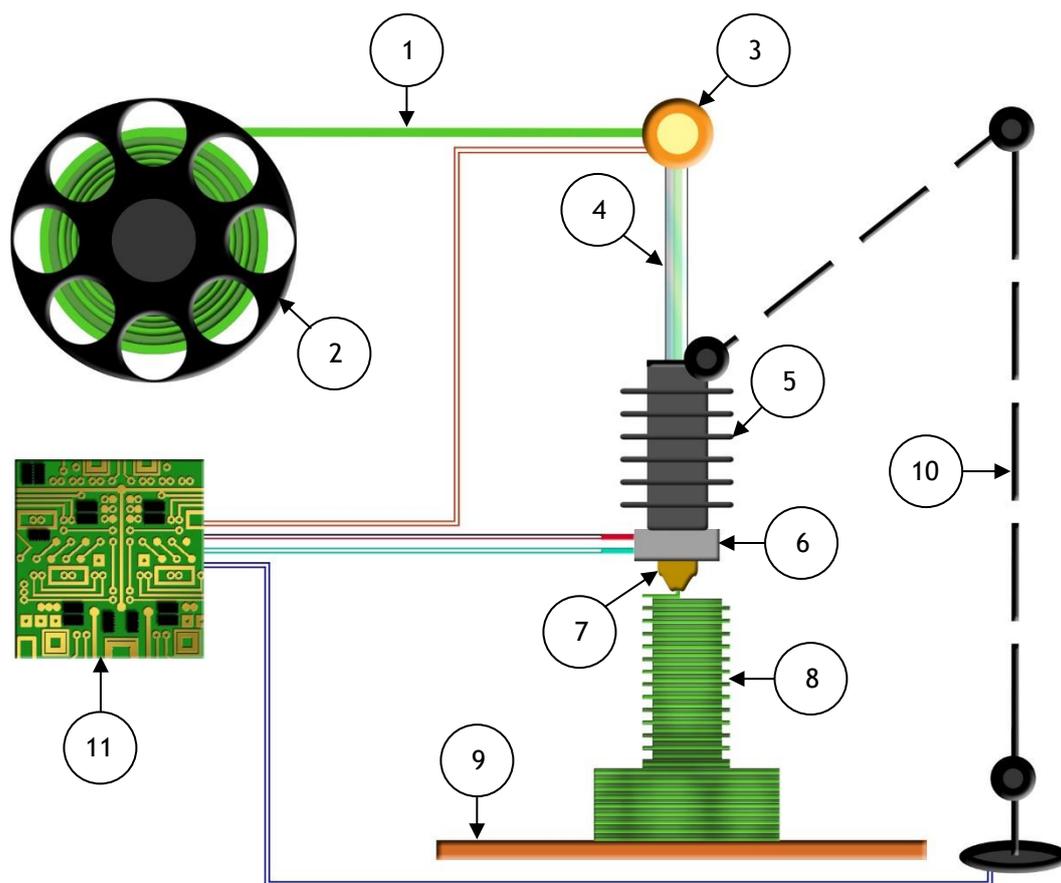


Figura 11. Esquema de funcionamento de uma impressora FDM.

O filamento (1) armazenado no rolo (2) é empurrado por um extrusor (3) através de um tubo (4) normalmente de politetrafluoretileno (*Polytetrafluoroethylene* - PTFE) que não o permite fletir, para a cabeça de extrusão (5, 6 e 7). Esta cabeça é composta por uma zona que derrete o filamento (6), um bico de extrusão (7) que determina o diâmetro com que o filamento é extrudido e uma zona de dissipação de calor (5) normalmente de alumínio e com alhetas, que não permite que o calor suba e derreta o filamento antes do tempo, o que poderia resultar no entupimento da máquina. Por vezes, esta cabeça de extrusão também pode possuir uma ventoinha de refrigeração na zona das alhetas e/ou uma ventoinha de arrefecimento do filamento extrudido junto ao bico de extrusão. O termoplástico fundido que sai do bico de extrusão é então depositado por camadas (8) na plataforma de impressão (9) que pode ou não ser aquecida. O depositar das camadas é feito de acordo com o ficheiro que contém o planeamento da passagem da cabeça de impressão por cada camada, passagem esta controlada pelo braço de impressão (10), comandado pela placa de controlo (11) que geralmente, no caso das impressoras RepRap é um Arduino com a *firmware* Marlin. Também é controlada pela placa a temperatura de extrusão, temperatura da plataforma de impressão, as ventoinhas e velocidade de extrusão (Cerneels, et al., 2013), (Patel, et al., 2014), (Huang, et al., 2015), (Kim, et al., 2015), (Monzon, et al., 2010) e (3D Printing Industry, 2014).

Um dos fatores que mais distingue estas impressoras é a forma como se movimenta a cabeça de impressão em relação à plataforma de impressão para depositar o material fundido. Sendo estas máquinas geralmente de três eixos, existem inúmeras formas de fazer estes movimentos, mas atualmente, as mais utilizadas são as impressoras cartesianas, em que cada movimento da impressora funciona deslocando-se sobre os três eixos cartesianos, normalmente a cabeça de impressão funciona nos eixos X e Z, e a plataforma de impressão no eixo Y (ver figura 12), podendo haver variações entre estes, como por exemplo, a plataforma trabalhar nos eixos X e Y enquanto a cabeça de impressão apenas trabalha em Z, etc. (Earls & Baya, 2014).

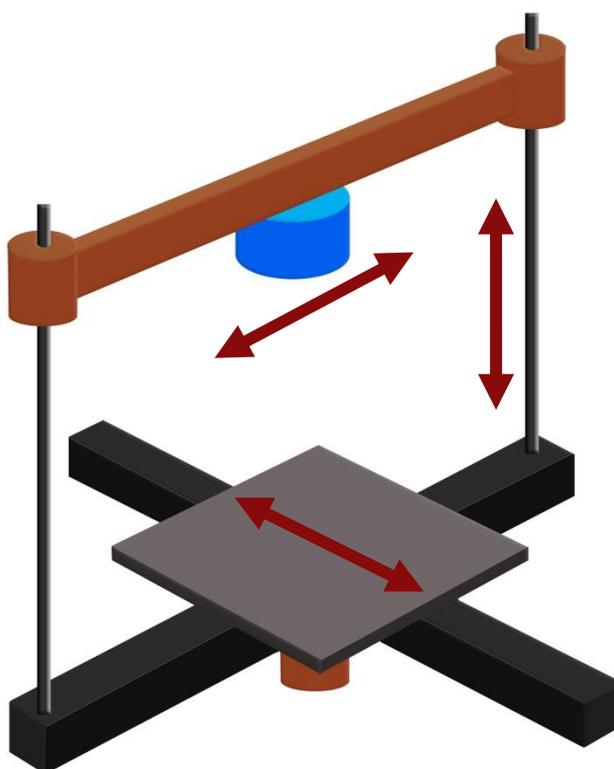


Figura 12. Esquema de funcionamento de uma impressora cartesiana.

Graças à sua simplicidade, estas impressoras são as que mais rapidamente se espalharam no mercado das impressoras *desktop*. Nomeadamente, são as que compõem a maior parte das variações das impressoras RepRap, como por exemplo a Prusa i3 que representa 80% de todas as impressoras RepRap (3D HUBS, 2016). No entanto, o número e peso de partes móveis faz com que as impressões sejam mais lentas para evitar vibrações que resultam em impressões menos eficientes (Pearce, 2014).

As impressoras do tipo delta, apesar de mais complexas e requererem cálculos trigonométricos mais complicados, reduzem estes problemas tendo apenas a cabeça de impressão móvel, acionada não por movimentos nos três eixos cartesianos, mas três eixos verticais que se unem à cabeça de impressão através de varetas conforme exposto na figura 13, permitindo que esta

consiga realizar movimentos de forma mais livre e rápida, podendo ser até duas vezes mais rápida que uma impressora cartesiana (Pearce, 2014).

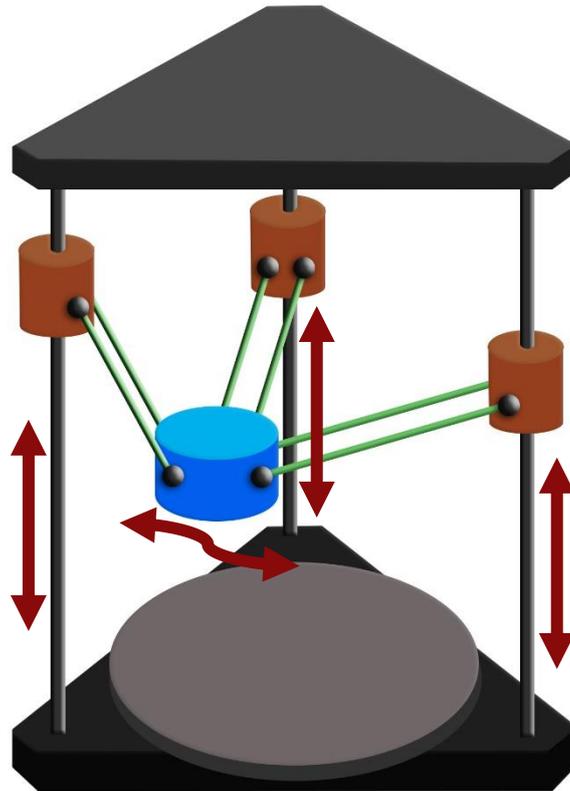


Figura 13. Esquema de funcionamento de uma impressora delta.

Tal como indicado, a grande maioria das impressoras são cartesianas, mas vale apenas referir as impressoras delta porque *“atualmente apenas existem algumas impressoras delta no mercado, mas prevejo que isto não venha a ser verdade muito mais tempo. As impressoras delta irão basicamente substituir as impressoras cartesianas, porque têm bastantes benefícios em relação a estas, sendo um deles a velocidade.”* (Pearce, 2014).

3.7. Tipos de filamentos

Tal como já foi referido, o diâmetro de filamentos para impressão FDM *standard* é o de 1,75mm ou 3,00mm, geralmente fabricado em PLA ou ABS (English, 2012). No entanto, existem marcas que produzem impressoras para trabalhar com outros diâmetros, conseguindo assim alguma exclusividade na comercialização do filamento (Ultimaker, 2016).

A tolerância do fabrico do filamento para impressão FDM é baixa, rondando os $\pm 0,06\text{mm}$ para filamentos de 1,75mm (EUA Patente Nº 6,866,807 B2, 2002).

No que diz respeito ao material, a maior parte das impressões é feita em PLA e ABS, mas também podem ser feitas em PET, PETG, Policarbonato, PVA, HIPS, Náilon (English, 2012) e até mesmo compósitos de madeira, aço ou cobre que conferem propriedades específicas à peça (Monzon, et al., 2010).

Toda esta variedade de materiais permite concluir que desde que a impressora seja capaz de fornecer as temperaturas necessárias à extrusão, e o filamento obedeça aos requisitos dimensionais da impressora, a maior parte dos termoplásticos deve poder ser extrudido numa impressora de FDM RepRap.

3.8. Nota conclusiva

A impressão 3D realmente tem um grande potencial para mudar o mundo, Reichental, o executivo chefe da 3D systems afirma que esta tecnologia promete vir a ser *“tão grande como a máquina a vapor foi na sua altura, tão grande como o computador foi na altura em que surgiu e tão grande como a Internet quando apareceu. A impressão 3D permite democratizar a manufatura. Com esta tecnologia, aquele que é o empreendedor de garagem pode ter as mesmas capacidades de produção de uma grande empresa.”* (Reichental, 2012).

Se for possível aproveitar a onda de inovação e desenvolvimento que está a trazer a manufatura para os domicílios da população, e aliar a esta a capacidade de efetuar reciclagem, vai-se conseguir dar mais um passo no sentido de atingir sustentabilidade e aumentar o já enorme potencial da impressão 3D (PETRA, 2015).

4. Fundamentos da extrusão

Extrudir significa “empurrar” ou “forçar a sair”. Muitos materiais são transformados pelo processo de extrusão: metais, argila, alimentos, plásticos, etc. (abiplast, 2014).

A extrusão de termoplásticos consiste em forçar a passagem de *pellets* ou flocos levados à temperatura de fusão por um cilindro ou canhão aquecido através de um ou mais parafusos sem fim, que transportam, misturam e compactam, podendo ter um sistema de retirada de gases. Na saída do cilindro existe uma matriz com o perfil desejado contra a qual o material é comprimido, dando a forma desejada ao produto, podendo ainda este ser calibrado, arrefecido e cortado/enrolado (abiplast, 2014). A extrusora de termoplásticos é portanto mais que uma bomba, uma vez que também proporciona energia térmica necessária para fundir o polímero (Santana, 2010).

Existem essencialmente dois tipos de formas de criar a pressão necessária para forçar a passagem do material pela matriz: Através de um êmbolo (extrusoras de êmbolo), nas quais esta pressão é produzida por um êmbolo ou extrusoras de fuso cuja pressão necessária para forçar a passagem do material através da matriz é produzida por um fuso sem fim. O primeiro tipo referido possui um caráter descontínuo de processo e produtividade mais baixa. Esta descontinuidade impossibilita a produção de um filamento calibrado como o necessário para as impressoras 3D, e por isso só serão abordadas extrusoras de fuso, caracterizadas pela continuidade do processo, facilidade de fusão e homogeneização do material (Tormento, 2015).

4.1. Componentes e funcionamento de uma extrusora

O processo de extrusão representado na figura 14 começa por forçar a passagem de *pellets* ou flocos (1) colocados num funil de alimentação (2) através de um (ou mais) fuso (3) acionado por um motor (5) ao qual está conectado através de uma caixa redutora (6). Este veio é apoiado em chumaceiras (7) que o posicionam no interior de um cilindro (4) aquecido por várias resistências (8) independentes que permitem obter zonas de temperaturas diferentes, medidas através de termopares (9). Estas resistências levam o plástico à temperatura de fusão, dando este origem a uma massa que é misturada e compactada, formando uma pasta uniforme (11), à qual podem ser retirados gases através de um sistema de vácuo. Esta pasta converge na cabeça (10) e é empurrada através de uma matriz (12) com o perfil desejado, sendo de seguida arrefecido e podendo ser cortado, calibrado e/ou enrolado. Um sistema de controlo (13) deve ser utilizado para articular as temperaturas medidas, a potência fornecida às resistências de aquecimento e a velocidade do motor que aciona o fuso (abiplast, 2014).

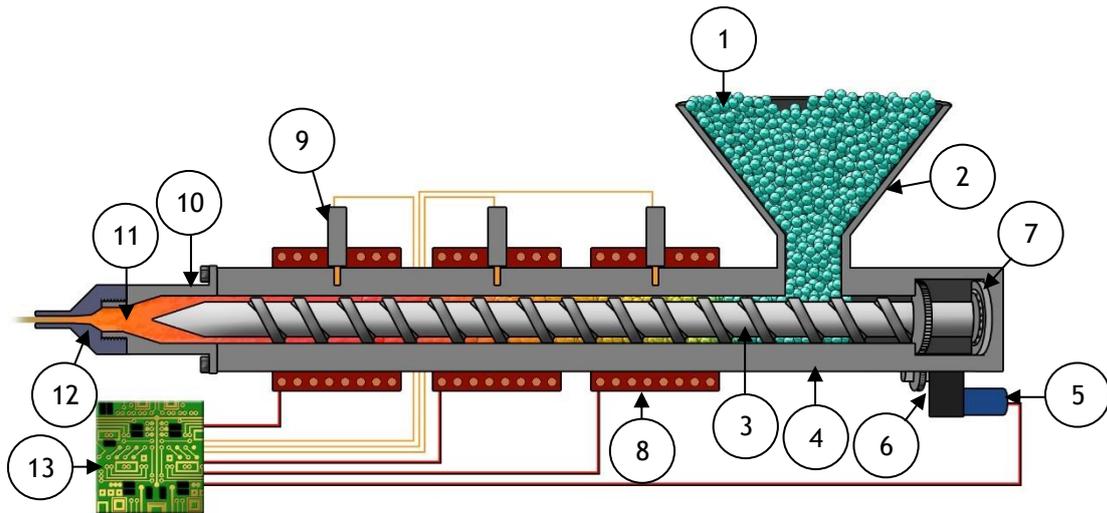


Figura 14. Esquema de funcionamento de uma extrusora de termoplástico (abiplast, 2014), adaptado.

4.2. Parâmetros a considerar na construção de uma extrusora

As extrusoras podem ser caracterizadas relativamente ao tipo de alimentação (a quente ou a frio), ao diâmetro do fuso, comprimento do fuso e relação entre estes, tipo de fuso e sua velocidade de rotação, zona de desgaseificação, débito máximo do material, potência e tipo de motor do acionamento, utilização de fluidos de aquecimento e/ou arrefecimento, sistema de regulação da temperatura, equipamentos de controlo, superfície que ocupa e peso (Tormento, 2015). Estas características serão abordadas com vista à obtenção de um processo o mais simples possível do ponto de vista do utilizador, e que exija o mínimo possível da sua intervenção.

4.2.1. Fuso ou parafuso sem fim

De todos os componentes da extrusora, o mais importante é o fuso. O seu impacto no desempenho é tão elevado que na maior parte dos casos o *design* de uma extrusora é essencialmente equivalente ao *design* do fuso (Papathanasiou, 2011). Produzido geralmente a partir de aço cromado (Greene, 2000), este é considerado o coração da extrusora, derretendo o polímero, preparando uma massa fundida homogénea e fornecendo a pressão necessária para bombear esta massa através da matriz. Um fuso bem desenhado deve derreter completamente o material, homogeneizar a mistura e desenvolver uma temperatura e pressão apropriadas antes de levar o polímero à matriz (Eslami, 2013), proporcionando um fluxo regular de material na zona da cabeça e da matriz. Variações neste fluxo causam variações de pressão que por sua vez causam variações dimensionais do extrudado (Tormento, 2015).

A geometria da rosca é caracterizada através de uma série de parâmetros, como ilustrado na figura 15.

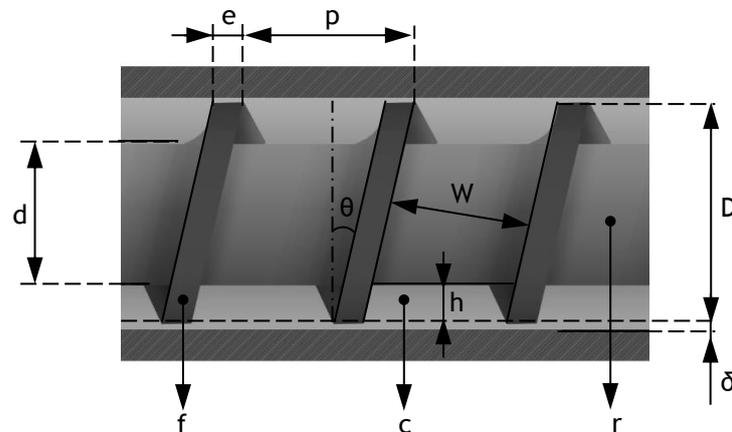


Figura 15. Parâmetros da extrusão (Sarlink, 2002), adaptado.

Hélice (f) - Saliência que revolve em torno do eixo do fuso, avançando um passo por volta;

Canal (c) - Espaço entre as hélices num passo;

Raiz (r) - Diâmetro menor do fuso, medido a partir da base da hélice;

Altura do canal (h) - Distância do topo da hélice à raiz;

Largura do canal (w) - Distância entre duas hélices consecutivas medida perpendicularmente à hélice;

Largura da hélice (e) - Distância entre as duas paredes verticais da secção hélice;

Passo (p) - Distância entre duas voltas consecutivas da hélice;

Ângulo da hélice (θ) - ângulo que a hélice faz com um plano perpendicular ao eixo do fuso;

Diâmetro do fuso (D) - diâmetro externo da hélice;

Diâmetro da raiz (d) - diâmetro menos duas vezes a profundidade do canal;

Folga (δ) - Distância entre a parte superior da hélice e o cilindro

Comprimento do fuso - distância desde a ponta inicial da hélice até a ponta do fuso (Buechler, 2015).

Tal como já foi referido, o passo do fuso é definido pela distância entre duas voltas consecutivas da hélice. Este passo está diretamente relacionado com o ângulo da hélice. Matematicamente, esta relação pode ser expressa pela equação (1).

$$\tan \theta = \frac{p}{\pi D} \quad (1)$$

Se o fuso for desenhado de maneira a que o passo seja igual ao diâmetro, chama-se passo quadrado, que é o mais adequado à maioria das aplicações, com um ângulo obtido a partir da Equação (1) de 17.66° (Eslami, 2013)

Outro parâmetro também relacionado que pode afetar bastante a eficiência da extrusão se não for tido em consideração é o ângulo de inclinação da zona de compressão, φ , representado na figura 19, que varia não só com o rácio de compressão, como também com o comprimento desta zona (Eslami, 2013). Diminuindo φ , diminui o *output* e as tensões de corte. Aumentando φ obtém-se um maior *output* e tensões de corte (Kuhman, 2015).

Talvez a forma mais comum de caracterizar fusos seja a utilização do rácio comprimento-diâmetro (normalmente abreviado por L/D do inglês *length-diameter*). O comprimento por diâmetro depende do número de secções a serem consideradas (Eslami, 2013). Roscas com relação superior a 20/1 obtêm rotações menos concêntricas e estão expostas a maior desgaste, no entanto permitem fusões mais uniformes (innova, 2008).

Quanto maior a altura do canal, maior o *output* a uma determinada velocidade de rotação da rosca. Utilizam-se roscas pouco fundas para materiais menos viscosos e roscas mais fundas para materiais de alta viscosidade. Deve-se ter também em consideração que com a profundidade da rosca aumenta o binário necessário para esta iniciar a rotação (innova, 2008).

A folga (δ) demasiado pequena causa desgaste excessivo no fuso e folgas muito grandes diminuem a eficiência, capacidades de bombagem e fusão do termoplástico (Eslami, 2013).

O transporte do material e conseqüente *output* depende, de φ e da altura do canal, mas também varia com o diâmetro, velocidade e configuração do fuso, tipo de polímero, pressão na matriz (relacionado com o ângulo de afunilamento e diâmetro do furo), perfil de temperaturas ao longo da extrusão (Sarlink, 2002) e diferença de atrito polímero-cilindro e polímero-rosca que deve ser o mais alta possível no cilindro e o mais baixa possível na rosca. Quanto maior a diferença entre estes dois atritos maior será o fluxo de polímero, devendo para isso a rosca estar mais polida que o cilindro (innova, 2008).

O “inchaço” do extrudido é o nome dado ao fenómeno do aumento do diâmetro do filamento após a sua passagem pela matriz. Fatores como a diminuição da temperatura, dureza do polímero, aumento das taxas de cisalhamento e diminuição da ponta da matriz (Sarlink, 2002) fazem com que o diâmetro do filamento extrudido seja superior ao furo da matriz devido à sua expansão à saída desta como se pode observar na figura 16, em que D_e é o diâmetro do filamento, que se observa superior a D_b , o diâmetro do furo da matriz.

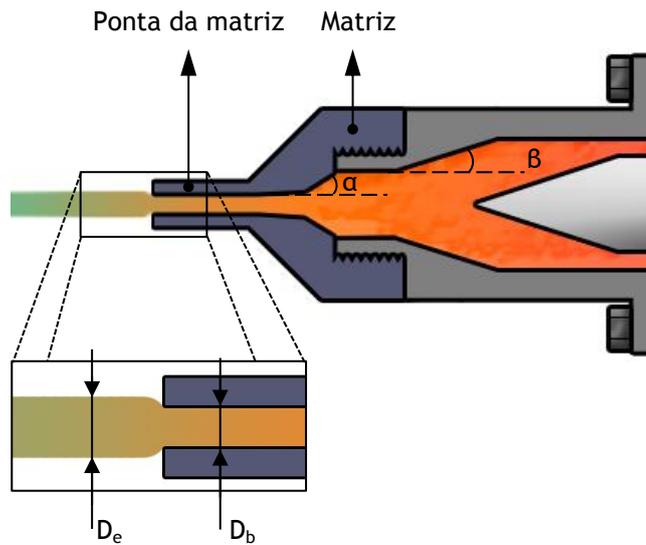


Figura 16. Aumento do diâmetro do filamento à saída da matriz.

Para se reduzir este efeito pode-se aumentar a temperatura junto da zona da cabeça da extrusora e matriz, aumentar o diâmetro do furo da matriz para diminuir a pressão e taxas de cisalhamento, escolher polímeros que quando fundidos sejam menos viscosos, utilizar uma matriz cônica em que o ângulo não seja superior a 15° ($\alpha < 15^\circ$) e a zona da cabeça que converge para a matriz (zona afunilada da cabeça da matriz) não seja superior a 30° ($\beta < 30^\circ$). É também recomendado que a matriz tenha uma zona com o diâmetro e forma do furo em que a secção é constante para reduzir as tensões causadas pelo comportamento viscoelástico do polímero e diminuir a turbulência do escoamento (Sarlink, 2002).

Como indicado na figura 17, o fuso é dividido em zonas de atuação geralmente designadas por zona de alimentação (onde é alimentado o termoplástico sob forma de *pellets* ou flocos), zona de compressão (onde o termoplástico é comprimido e fundido) e zona de dosagem (onde o polímero fundido é comprimido contra a matriz) (Dineli, 2011). Nesta mesma figura é indicado como variam a profundidade do canal, a pressão, a temperatura, a viscosidade e qual a percentagem de material fundido em função da zona onde se encontra.

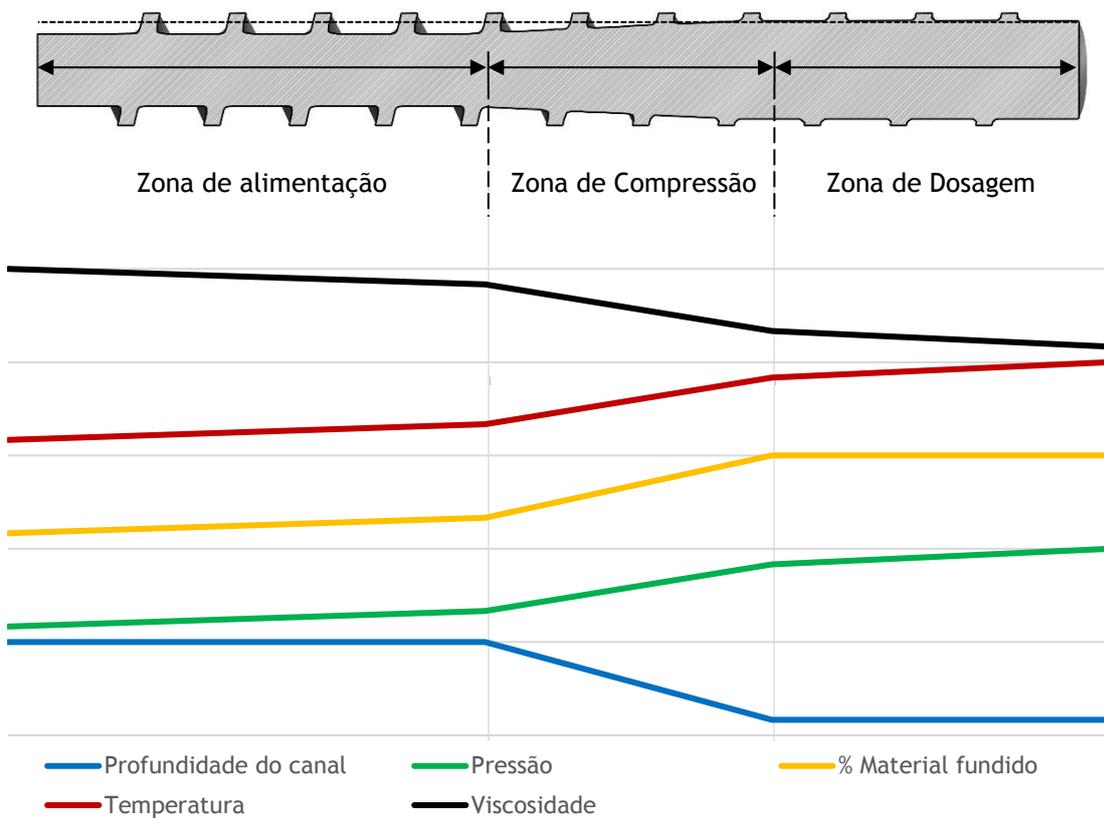


Figura 17. Zonas do fuso e parâmetros da extrusão afetados (Sarlink, 2002), (Buechler, 2015), (CONCOR, 2011), adaptado.

A zona de alimentação é a zona onde o material entra no fuso e é, como apresentado na figura 18, caracterizada por um canal de grande altura, ou seja, raiz de diâmetro reduzido para ter mais espaço para acomodar o granulado do polímero (Greene, 2000).

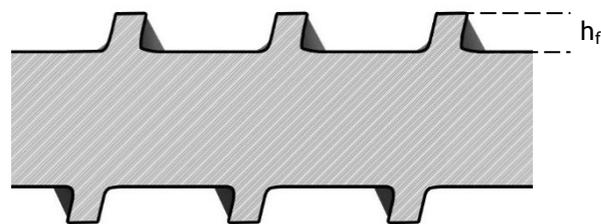


Figura 18. Vista de corte do fuso na zona de alimentação (Sarlink, 2002), adaptado.

Nesta zona, a temperatura deve ser abaixo da temperatura de fusão do material (podendo ser necessária uma zona de dissipação de calor), já que se os flocos do polímero se fundirem junto à rosca aglomerar-se-ão e impedirão o avanço, comprometendo todo o processo (Greene, 2000). Normalmente, a maior parte dos fusos tem zonas de alimentação mais

longas para que seja mais fácil controlar a alimentação e aquecer o polímero antes de passar à próxima zona (CONCOR, 2011).

A zona de compressão, também conhecida por zona de fusão ou zona de transição, é identificada através do aumento do diâmetro da raiz ao longo da secção, tal como indicado na figura 19. Isto resulta na compressão do polímero, compressão que pode ser ainda mais incrementada diminuindo o passo da rosca do fuso (Greene, 2000). Para além da compressão, a mistura e fusão também se intensificam nesta zona (innova, 2008).

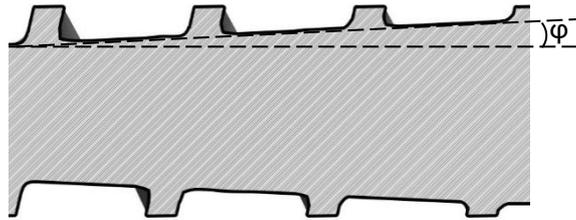


Figura 19. Vista de corte do fuso na zona de compressão (Sarlink, 2002), adaptado.

A razão de compressão pode ser volumétrica ou, caso não se varie o passo, calculada com base na altura do canal de acordo com a equação (2)(1) (Eslami, 2013):

$$CR = \frac{h_f}{h_m} \quad (2)$$

Ou seja, é dada pela relação entre a altura (ou volume) do canal na primeira volta da hélice na zona de alimentação e a altura (ou volume) do canal na última volta da hélice na zona de dosagem (innova, 2008), (Greene, 2000).

No entanto, este parâmetro pode ser enganador, já que, por exemplo fusos com profundidade de 8 mm na zona de alimentação e 2 mm na zona de dosagem comportam-se de maneira diferente de fusos de 16 mm na zona de alimentação e 4 mm na de dosagem apesar de serem ambos CR=4:1 (Greene, 2000).

Na zona de dosagem, o canal é de profundidade constante e reduzida como se pode constatar na figura 20. A temperatura aumenta devido ao aumento das tensões de corte e a pressão elevada permite que o material seja extrudido através da matriz. É nesta zona que se dá a mistura final e se assegura a homogeneização do material e da temperatura (Greene, 2000).

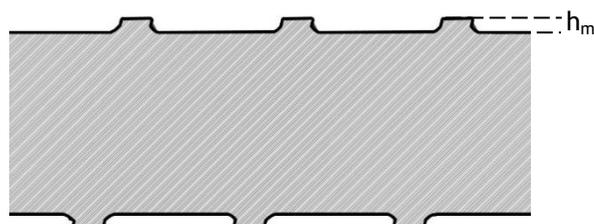


Figura 20. Vista de corte do fuso na zona de dosagem (Sarlink, 2002), adaptado.

No que diz respeito a dimensões, a bibliografia é bastante variada, já que o dimensionamento de um fuso varia de fabricante para fabricante. O estudo do mesmo parâmetro em várias fontes permite ter uma ideia geral da dimensão de um fuso.

A classificação da extrusora costuma ser feita de acordo com o diâmetro da rosca que geralmente varia entre 25 e 250 mm e a relação entre o comprimento do cilindro em função do diâmetro da rosca, também conhecida por L/D (abiplast, 2014), que depende do número de secções a serem consideradas (Eslami, 2013). Esta varia para um fuso simples entre 20:1 e 28:1 (Buechler, 2015), 18:1 e 24:1 (innova, 2008), 20:1 e 34:1 (Eslami, 2013), 20:1 e 30:1 (abiplast, 2014), 24:1 a 30:1 (Kuhman, 2015). Para fusos de duas fases, varia entre 24:1 e 40:1 com relações mais comuns na ordem de 32:1 a 36:1 (Wormer, Things your screw designer never told you about screws, 2011). Considerando a distribuição do comprimento por zonas, é comum ter a zona de alimentação com um comprimento de 5D a 10D (Wormer, Things your screw designer never told you about screws, 2011), 5D a 10D (Buechler, 2015) ou 8D a 10D (innova, 2008) e uma zona de dosagem com 7D a 8D (Wormer, Things your screw designer never told you about screws, 2011), 6D a 10D (Buechler, 2015) ou 4D a 6D (innova, 2008).

A relação de compressão na maior parte dos fusos ronda os 2,2:1 a 2,8:1, sendo a razão de 2,5:1 a escolhida pela CONCOR (CONCOR, 2011), 1,5:1 a 4:1 (Kuhman, 2015), 1,1:1 a 5:1, sendo a mais utilizada à volta de 2,25:1 (Greene, 2000), 1,5:1 a 4,5:1, sendo nas roscas de uso geral 2,5/1 a 3/1 e para poliestirenos e outros polímeros amorfos a relação de compressão preferida é da ordem de 2,5/1 (innova, 2008). Para fusos especiais abordados adiante é mais fiável usar a razão volumétrica, já que possui uma geometria mais irregular e pode variar o passo (Eslami, 2013).

Fusos maiores tendem a funcionar com velocidades menores (Sarlink, 2002). Para fusos industriais, velocidades de 25 a 80 rpm são comuns (Sarlink, 2002). Roscas com grande razão de compressão devem ser operadas a menor velocidade (10 a 50 rpm), enquanto relações menores que 3:1 podem ser operadas entre 50 e 150 rpm com poliestireno (innova, 2008).

Roscas comerciais costumam ter uma profundidade de 0,15D a 0,18D na secção de alimentação e 0,05D a 0,06D na zona de dosagem (innova, 2008), uma folga a rondar os 0,01D (Eslami, 2013).

Outro dos fatores chave do desenho de um fuso é o polímero que este vai processar, e parâmetros como cristalinidade e viscosidade deste (CONCOR, 2011).

Materiais cristalinos são em regra mais difíceis de processar. Têm uma fusão abrupta - não derretem gradualmente, mas aquecem até ao ponto de fusão, após o qual derretem repentinamente. Processam-se melhor com fusos que têm uma zona de transição mais abrupta (grande ϕ), resultando em grandes rácios de compressão e em fusos com um rácio L/D elevado para aquecer os *pellets* antes de estes chegarem à zona de compressão. No entanto quanto mais sensível à temperatura, mais curta deve ser a zona de dosagem (CONCOR, 2011).

Por outro lado, materiais amorfos amolecem gradualmente assim que começam a ser aquecidos. Temperaturas elevadas não permitem obter um estado fundido mais rapidamente, mas queimam e degradam o polímero. Estes materiais são sensíveis às tensões de corte exigindo razões de compressão mais reduzidas e zonas de transição mais suaves (compridas e de inclinação reduzida) (CONCOR, 2011).

A viscosidade é também um fator importante a considerar, já que se refere à resistência ao fluxo. Quanto mais viscoso for um dado polímero no estado fundido, mais resistente ao fluxo será. Para compensar esta resistência, o canal do fuso deve ser mais fundo, permitindo aumentar o fluxo diminuindo a probabilidade do material sobreaquecer e apresentar tensões de corte mais elevadas (CONCOR, 2011). Este tipo de fuso é adequado a resinas viscosas como o PE e PP, mas não é adequado de todo a materiais pouco viscosos (Wormer, The evolution of screw design technology for the injection molding process, 2011). Já canais menos fundos são mais adequados a materiais de baixa viscosidade (PET, Nylon, PEEK), resinas mais viscosas como o PE ou o PP também podem ser processadas, mas mais lentamente.

Utilizam-se também razões de compressão maiores para materiais com mais compressibilidade (Eslami, 2013). A própria forma em que o polímero é introduzido na máquina afeta a sua compressibilidade, por exemplo sob o estado já fundido, *pellets* ou flocos.

Os fusos são normalmente desenhados para extrusão de um material específico, e quando se pretendem para um uso geral deve ser encontrado um compromisso entre os parâmetros que maximiza o número de resinas que consegue processar e parâmetros orientados para melhorar o desempenho (Kuhman, 2015), (innova, 2008).

Ao serem abordadas as extrusoras de um fuso, deve-se referir que existem outros tipos de fuso para além do típico fuso de uma hélice. Os mais conhecidos são o fuso de mistura, fuso de barreira e fuso distributivo *mix/melt*.

O fuso de uma hélice (convencional) representado na figura 21 apenas possui a hélice primária, desde o início ao fim. Apesar de poder variar o passo, não existem hélices secundárias. É frequentemente associado ao termo “*general purpose*”, o que é enganador, já que este tipo de fuso é muito raramente, se alguma vez, o *design* mais eficiente para fundir materiais (GLYCON, 2015).



Figura 21. Desenho de um fuso simples (Sarlink, 2002), adaptado.

Estes fusos podem apresentar ineficiência na fusão do polímero, pois com o aumento das velocidades, o termoplástico ainda no estado sólido sob a forma de flocos ou *pellets* mistura-se e dispersa-se na massa de polímero já fundida, resultando no isolamento destes flocos da zona com maior capacidade de fusão do material, o cilindro, uma vez que o processo de fusão por convecção através do polímero fundido é muito mais ineficiente devido à baixa condutividade térmica dos polímeros. Isto pode fazer com que polímero por fundir acabe na matriz, resultando no entupimento da máquina (Eslami, 2013). Este processo encontra-se exemplificado na figura 22.

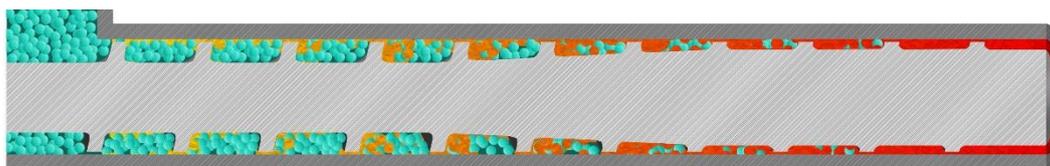


Figura 22. Fusão da resina termoplástica num fuso simples (Eslami, 2013), adaptado.

O fuso de mistura também geralmente de apenas uma hélice pode ter uma ou mais secções destinadas à mistura da massa polimérica. Existem imensos desenhos diferentes para secções misturadoras, alguns dos quais podem ser de secção curta ou hélice secundária. Estes misturadores podem ser dispersivos ou distributivos e têm a função de homogeneizar e uniformizar a mistura, sendo importantes para processos nos quais haja a necessidade de misturar corantes ou outros aditivos (GLYCON, 2015).

Fusos de barreira resolvem este problema separando o material fundido do material em estado sólido e forçando este contra a parede do cilindro (Eslami, 2013), utilizando uma hélice secundária designada por hélice de barreira introduzida no início da zona de compressão (Kuhman, 2015) como apresentado na figura 23.

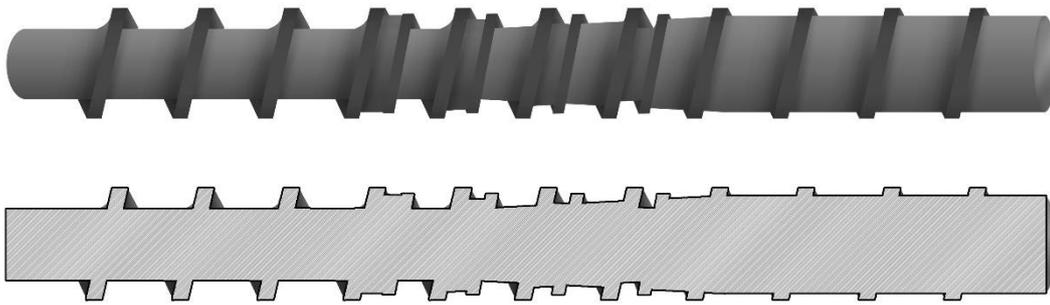


Figura 23. Desenho de um fuso de barreira e vista em corte (Eslami, 2013), adaptado.

Esta hélice separa duas zonas nas quais o volume vai variando de forma inversamente proporcional, quer através da profundidade do canal (como na figura 24), quer através de um passo diferente do da hélice principal.

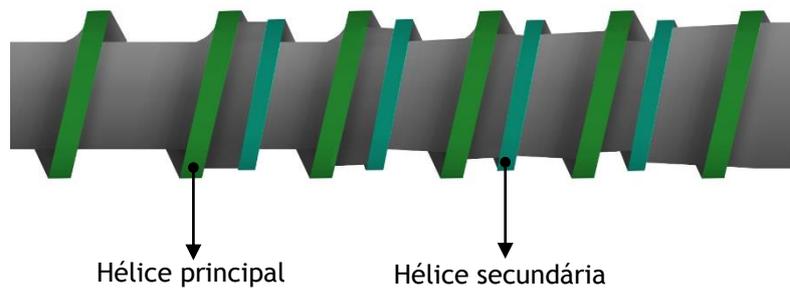


Figura 24. Pormenor das duas hélices do fuso de barreira (Eslami, 2013), adaptado.

A separação destas zonas tem o intuito de separar o material já derretido do que ainda não fundiu, criando um canal de material fundido e um canal de material sólido e fazendo com que este último esteja em contacto com o cilindro (quente), aumentando assim significativamente a eficiência da fusão (GLYCON, 2015). Este processo acontece na zona de compressão, acabando por a substituir, apesar de existirem fusos onde a zona de barreira e zona de compressão são distintas. A figura 25 exemplifica o processo de fusão de uma resina termoplástica num fuso de barreira.

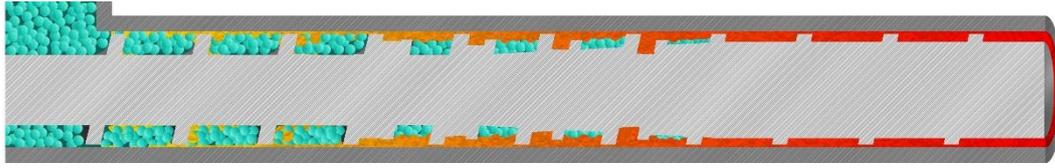


Figura 25. Fusão da resina termoplástica num fusão de barreira (Eslami, 2013), adaptado.

Existem muitos formatos para este tipo de rosca, no entanto todos seguem o princípio de separar o material em estado sólido do em estado líquido, como exemplificado na figura 26. Fusos deste tipo bem desenhados resultam em fluxos de polímero maiores a temperaturas mais baixas, já que possuem grande eficiência na fusão do polímero (Eslami, 2013), sendo esta uma das razões pelas quais são os mais comumente utilizados (Buechler, 2015).

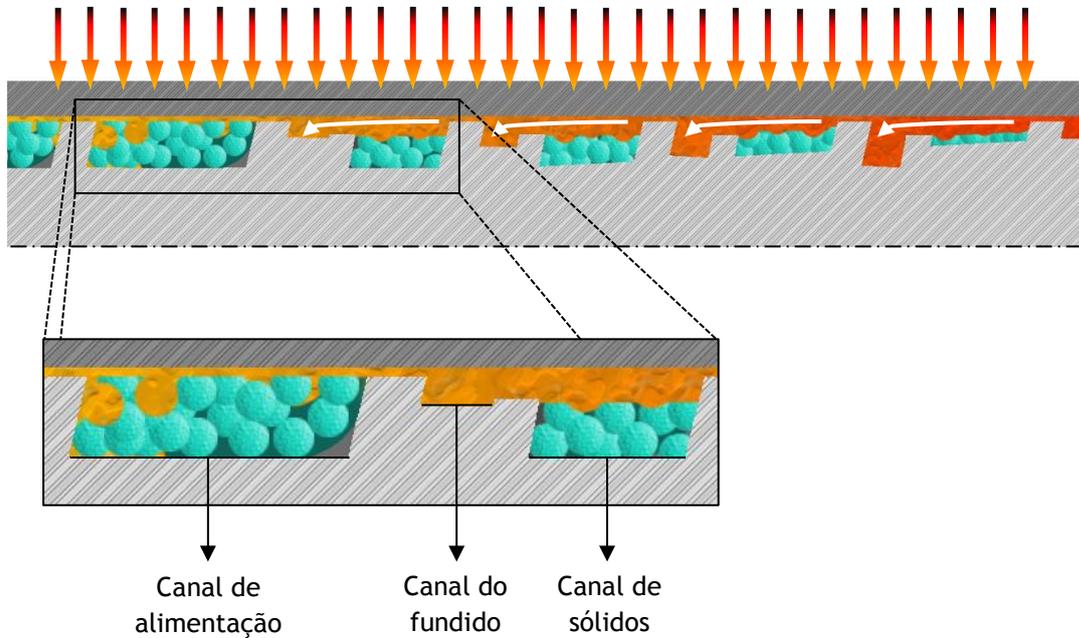


Figura 26. Passagem da zona de alimentação para a zona de compressão num fusão de barreira (Eslami, 2013), adaptado.

Tal como já foi referido, existem dois tipos principais de fusão de barreira como se pode visualizar na figura 27: o de profundidade constante (a) e o de largura constante (b). No primeiro, a largura do canal mantém-se constante ao longo do fusão, mas a forma de forçar o material contra a parede do cilindro é conseguida pela diminuição da profundidade do canal de sólidos (a azul) e pelo aumento da profundidade do canal do fundido (a laranja). Por outro lado, o fusão de profundidade constante vai estreitando o canal de sólidos e alargando o canal do fundido. Destes dois tipos de fusos, o mais utilizado é o de largura

constante, já que permite uma área de contacto maior entre os sólidos e a parede quente do cilindro ao longo do processo (Eslami, 2013).

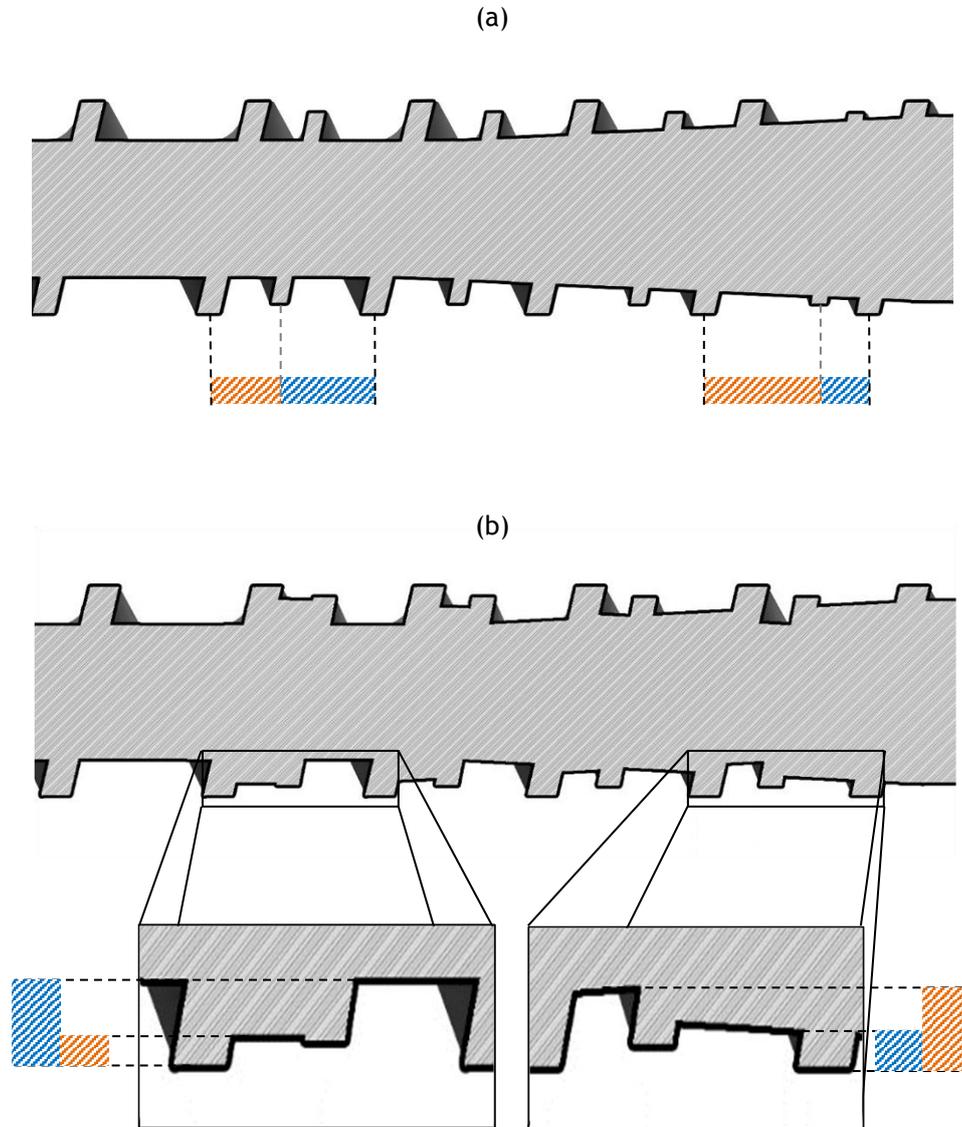


Figura 27. Variação do volume num fuso de barreira de profundidade constante (a) e largura constante (b) (Eslami, 2013), adaptado.

O fuso distributivo *mix/melt* é frequentemente confundido com o de barreira por também ter hélice para além da primária. Este desenho inicia a fusão como um fuso de barreira, mas depois mistura o material fundido com o material ainda no estado sólido para completar o processo de fusão (GLYCON, 2015). Esta condição faz com que o polímero fundido forneça energia necessária ao que ainda está por fundir resultando em menos tensões e mais eficiência (Kuhman, 2015), o oposto dos fusos de barreira que separam as duas fases. Isto não só fornece uma fusão mais eficiente, como também origina menores tensões de corte e

permite funcionar com temperaturas mais baixas. As excentricidades na raiz nesta secção também permitem misturas com atrito mais reduzido. Tal como o fuso de mistura, estes são mais utilizados quando se acrescentam corantes e outros aditivos ao polímero a extrudir ou para auxiliar a homogeneização da temperatura ao longo da massa (GLYCON, 2015).

Existe um desenho adequado de fuso para cada aplicação, no entanto, para aplicações mais gerais, o recomendado é um fuso de barreira ou fuso distributivo *mix/melt* para otimizar a mistura (GLYCON, 2015).

4.2.2. Matriz

A matriz é a peça da extrusora que dá a forma ao polímero extrudido. Deve ser possível de trocar para efetuar limpezas e extrudir produtos diferentes na mesma máquina (Greene, 2000). Normalmente é feita em aço carbono para ferramentas ou inox (Sarlink, 2002) e deve ter uma forma que não permita estagnação, normalmente cónica com um ângulo que irá influenciar o “inchaço” do extrudido (Greene, 2000). Para reduzir este fenómeno, deve também ter na ponta uma zona com a forma do que se pretende extrudir (Sarlink, 2002) em que as paredes são paralelas, conferindo pressão uniforme ao polímero fundido e estabilizando o fluxo (quanto mais comprido mais uniforme). Porém, deste modo existe mais pressão no interior da extrusora, e mais força é aplicada na chumaceira, criando desgaste, sendo por isso importante encontrar o equilíbrio ideal (Greene, 2000).

4.2.3. Cilindro

Feito normalmente a partir de aço temperado, deve ser constituído por um material resistente ao desgaste e à corrosão. Este cilindro é dimensionado a partir do diâmetro externo do fuso, coberto com elementos de aquecimento elétricos para fornecer parte da energia necessária à fusão do polímero e termopares para monitorizar este aquecimento (Greene, 2000).

O termoplástico é inserido num funil de alimentação normalmente integrado neste cilindro numa zona em que está aberto para permitir que este termoplástico alcance o fuso (Greene, 2000).

É importante que este cilindro tenha uma superfície que permita mais aderência do plástico do que a superfície do fuso já que como foi indicado, o transporte do material e consequente *output* depende da diferença de atrito polímero-cilindro e polímero-rosca que deve ser o mais alta possível no cilindro e mais baixa possível na rosca. Quanto maior a diferença entre estes dois atritos, maior será o fluxo de polímero, podendo para isso ser adicionadas estrias no cilindro (innova, 2008).

4.2.4. Aquecimento

Temperatura de extrusão muito baixa resulta num aumento do “inchaço” do extrudido. Temperatura muito alta, em conjunto com o tempo de residência, resultam na deterioração

do termoplástico (Michaeli e Schmitz 2004), observável através de manchas escuras e/ou da obtenção de um produto final frágil (innova, 2008).

O aquecimento é normalmente feito por zonas, sendo cada uma das zonas da máquina aquecida com uma temperatura que pode ser diferente. Para além das zonas, na matriz também pode ser adicionada uma zona de aquecimento.

Este aquecimento é normalmente feito através de uma resistência elétrica isolada com mica ou cerâmica controlada por um sistema de controlo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), com termopares também distribuídos pelas zonas de aquecimento para auxiliar o controlo e monitorização (Sarlink, 2002). É vantajoso dispor de um termopar também na zona da cabeça em contacto com a massa fundida para obter com mais precisão a temperatura do material que está prestes a ser expelido (innova, 2008).

Normalmente, a temperatura medida no cilindro é inferior à temperatura real devido ao aumento de temperatura no interior do cilindro causado pelas tensões de corte. Esta situação pode acontecer em excesso devido a altas velocidades da rosca (aquecimento este aproximadamente proporcional ao quadrado da rotação) ou demasiada obstrução na zona da matriz (furo demasiado pequeno) (innova, 2008). Por este motivo, baixar a temperatura não é tão simples como reduzir a corrente elétrica nas resistências de aquecimento, mesmo mantendo a velocidade constante. Quando se tenta baixar a temperatura, a viscosidade do polímero aumenta, fazendo com que aumente o atrito e a temperatura, devido ao calor gerado por este (Papathanasiou, 2011).

A zona de alimentação pode ser arrefecida caso se verifique a aglomeração de *pellets*, que cause o impedimento do fluxo.

4.2.5. Acionamento

O acionamento fornece um grande binário à rosca com velocidade constante, devendo existir um sistema de proteção contra sobrecargas para prevenir danos causados pela obstrução da máquina. A velocidade deve ser possível de controlar para que seja possível configurar a extrusora para diferentes materiais que exijam outras velocidades (innova, 2008).

A velocidade da rosca deve ser uma característica independente da carga, para que o *output* se mantenha constante ao longo do funcionamento, mas é expectável que a velocidade varie com a carga, o que pode ser um problema (innova, 2008)

4.2.6. Desgaseificação

Muitos polímeros são rápidos absorvedores de humidade, atingindo estados de equilíbrio de 1000 a 3300 ppm de água como é exemplo o PET. Consequentemente, quando não há pré-secagem, o plástico sofre imediatamente degradação hidrolítica aquando da plastificação. Assim, a remoção da humidade é um dos principais problemas do processamento de alguns polímeros, mesmo para material virgem (Martin, 2014). No entanto, uma extrusora de um fuso com ventilação pode permitir a extrusão de polímeros com qualidade sem necessidade de pré-secagem (Michaeli & Schmitz, 2004).

O processo de desgaseificação do fundido consiste na evaporação de voláteis e a sua remoção através de uma zona de ventilação, que utiliza a lei de Fick (um soluto desloca-se de uma região onde se encontra em maior concentração, para uma zona onde se encontra em menor concentração), ou seja, os gases dissolvidos na massa polimérica irão ser libertados durante o borbulhar do polímero (Michaeli & Schmitz, 2004). O vácuo aplicado na zona de ventilação pode fazer uma grande diferença no conteúdo de humidade conforme exposto na figura 28, devendo aumentar este vácuo com a viscosidade do polímero (Martin, 2014).

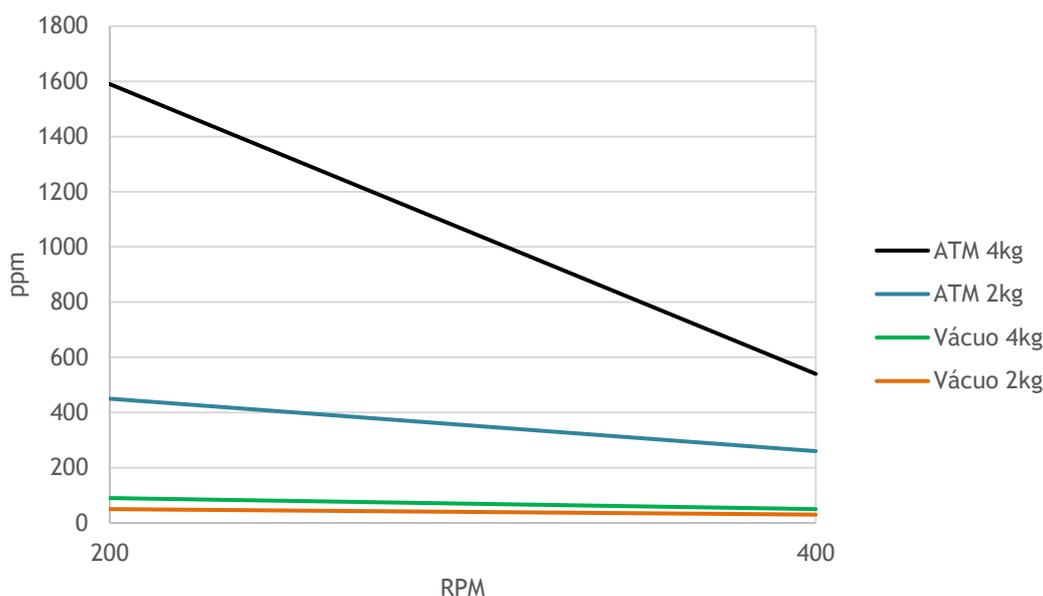


Figura 28. Presença de humidade no filamento PET produzido com diferentes parâmetros de extrusão (Martin, 2014), adaptado.

A temperatura costuma ser elevada imediatamente antes da zona de vácuo, já que leva à diminuição da viscosidade, aumentando assim a libertação de gases por permitir que o polímero borbulhe mais facilmente. Este aumento deve, no entanto, ser cuidadoso, pois se for demasiado elevada, a temperatura leva à degradação do plástico (Michaeli & Schmitz, 2004).

O tempo de residência na zona de desgaseificação deve ser o mais elevado possível para aumentar a libertação de gases (Michaeli & Schmitz, 2004), mas a presença de oxigénio, tensões de corte, tempo e temperatura podem contribuir para a degradação e reações indesejadas (Martin, 2014). Velocidades de rotação mais elevadas e desenho do fuso também podem melhorar a libertação de gases, por revolverem as camadas de material fundido. Em contrapartida, o aumento da velocidade de rotação faz aumentar a taxa de cisalhamento, que por sua vez aumenta a temperatura (Michaeli & Schmitz, 2004). Para aplicar uma zona de vácuo à extrusora esquematizada na figura 14, é necessário introduzir um módulo como o que se encontra exposto na figura 29 junto à zona do fuso adequada para tal.

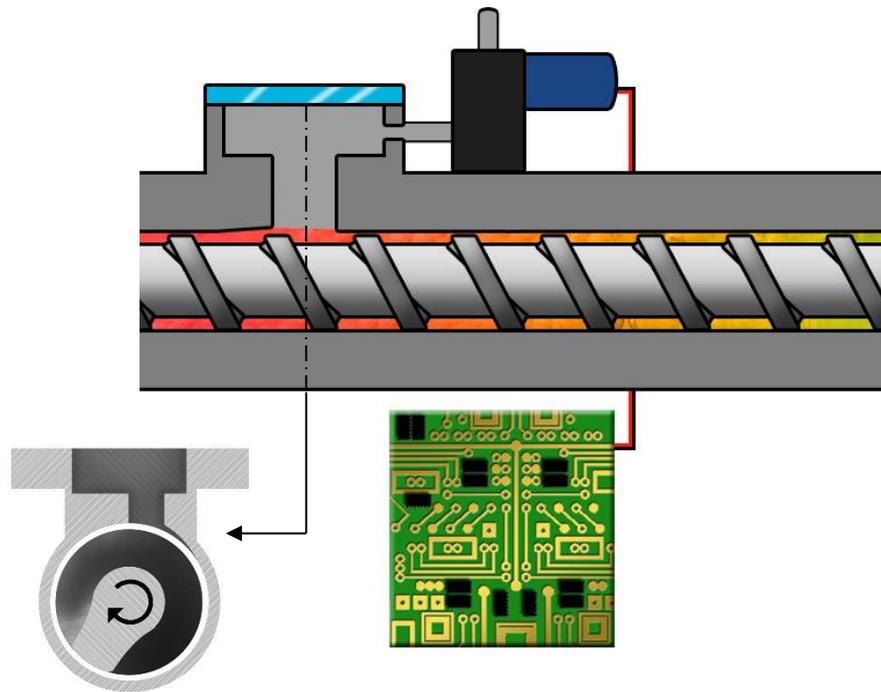


Figura 29. Módulo da zona de vácuo (Rauwendaal, 2002), adaptado.

A zona de vácuo, como exposta na figura 29, normalmente possui uma janela transparente que permite a visualização para a zona do fuso, permitindo ver como se encontra o processo, e se a desgaseificação se está a processar da forma mais adequada (Martin, 2014).

Uma extrusora com ventilação requer uma geometria específica de fuso, de múltiplas fases para manter a massa de polímero sem pressão na zona de ventilação para que não hajam fugas. Se tiver uma zona de ventilação necessita de duas fases, se tiver duas zonas de ventilação necessita de três fases, e por aí adiante. Como exposto na figura 30, cada fase tem uma zona despressurizada, seguida de uma zona de compressão e uma zona de dosagem, começando todas exceto a primeira com uma zona de descompressão. A primeira zona despressurizada é a de alimentação, e as seguintes são zonas despressurizadas de extração onde se encontra a ventilação (Rauwendaal, 2002). Esquemáticamente, este fuso pode ser representado como na figura 30 em que a profundidade do canal do fuso varia em A, B e C como num fuso comum (zona de alimentação, compressão e dosagem respetivamente), mas é seguido de uma zona de descompressão (D), seguida da zona de ventilação (E) colocada a uma distância V_L do início do fuso, e seguida de uma segunda zona de compressão e dosagem (F e G). Também se pode observar que h_f e h_v podem ser diferentes, tal como h_m e h_p , o que significa que existem duas razões de compressão diferentes, que, no entanto, são calculadas da mesma maneira (Wormer, 2011).

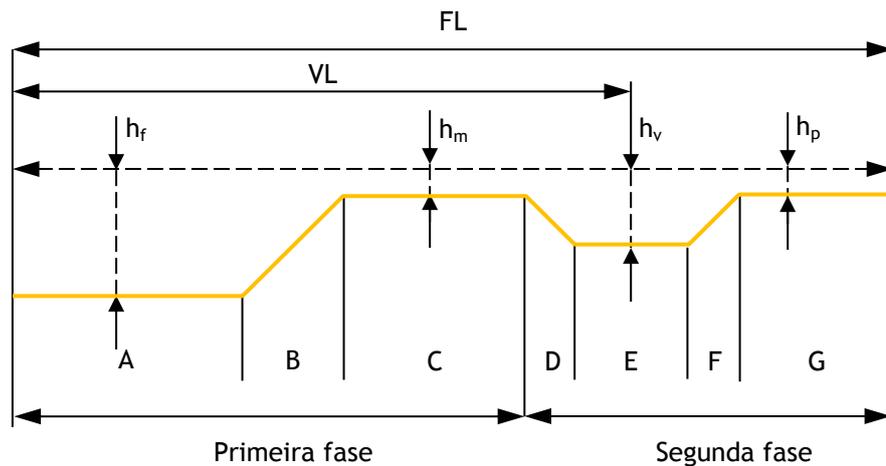


Figura 30. Profundidade do canal de um fusão com uma zona de ventilação (Wormer, 2011), adaptado.

Para garantir uma desgaseificação eficiente também se deve garantir que o polímero está totalmente fundido na zona de ventilação. Uma queda brusca de pressão antes desta zona inicia o borbulhar dos gases e um aumento da altura do canal do fusão dá espaço à formação de gases, não comprometendo a espessura das camadas do material fundido. Uma via de ventilação grande o suficiente deve ser considerada para que a evaporação e escape de gases não resulte em reduções bruscas de pressão e por fim capacidade de aquecimento suficiente para compensar as perdas de temperatura relacionadas com a evaporação (Michaeli & Schmitz, 2004).

O funil de alimentação também pode estar sob vácuo para que menos gases sejam admitidos nesta zona (Michaeli & Schmitz, 2004).

Para além da aplicação de vácuo na zona de desgaseificação, a velocidade de rotação e o caudal de alimentação também estão relacionados com a libertação de voláteis como exemplificado na figura 28. Portanto, para controlar a desgaseificação deve-se controlar a velocidade do fusão, a velocidade de alimentação, a temperatura do cilindro e o nível de vácuo, medindo a pressão e temperatura do fundido e caudal de alimentação, utilizando termopares, transdutor de vácuo e medidor de caudal da alimentação (Martin, 2014).

Mais duas características importantes no desenho do fusão são o plástico ter que estar totalmente fundido quando chega à zona de ventilação, para que haja a libertação de gases, e capacidade de bombagem da segunda zona da fase deve ser maior do que a da primeira, mantendo-a subalimentada para que não haja aumento da pressão na zona de ventilação. Quando isto não se verifica, a massa fundida recua (Rauwendaal, 2002).

Pode também existir uma zona de condensação e deve haver um filtro antes da bomba de vácuo para evitar danos nesta. A limpeza desta zona durante o funcionamento deve ser feita com uma ferramenta de um material que não danifique a extrusora caso caia no buraco destinado à ventilação (Martin, 2014).

A eficiência da desgaseificação pode ser testada através da comparação da presença de humidade entre o produto obtido e produto obtido com extrusão sem desgaseificação e extrusão de material que passou por uma pré-secagem (Michaeli & Schmitz, 2004).

Tal como já foi referido, colocar uma ou mais zonas de ventilação é uma boa maneira de eliminar humidade, ar aprisionado e outros voláteis do plástico fundido enquanto este passa pelo processo de extrusão. Todavia, aberturas no cilindro podem também ser uma fonte de problemas. Um dos problemas mais comuns é o plástico que sai pela zona de ventilação. Mesmo uma pequena quantidade de fluxo de plástico na zona de ventilação pode ser problemática por perturbar a libertação de voláteis, e assim diminuir a qualidade do material extrudido. Se for uma grande quantidade, esta pode entupir e forçar a paragem da máquina (Rauwendaal, 2002).

Existem duas causas principais para existir fluxo na zona de ventilação (figura 31 b): um fuso mal desenhado, ou uma ventilação mal desenhada. Se espreitando pela zona de ventilação mais de 50% do fuso estiver ocupado com termoplástico fundido, o problema está no fuso ou na alimentação, caso contrário o problema estará na ventilação (Rauwendaal, 2002).

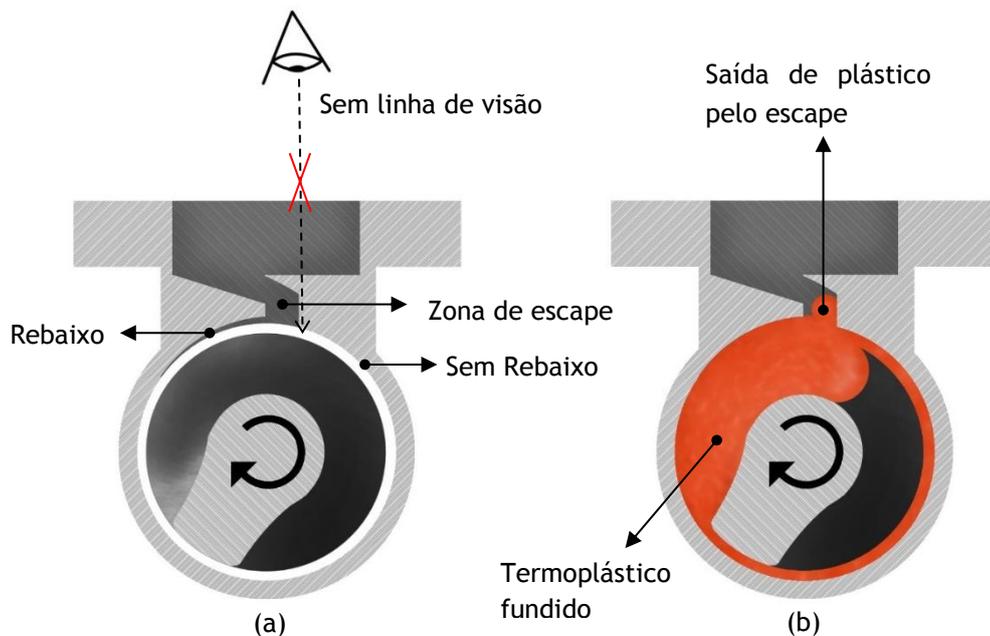


Figura 31. Erros comuns no desenho da zona de ventilação e suas consequências (Rauwendaal, 2002), adaptado.

As soluções mais rápidas e menos dispendiosas são a alteração das condições do processo em vez da forma do fuso. A capacidade de bombagem na primeira zona pode ser alterada diminuindo a temperatura da zona 1 e aumentando a temperatura das zonas 2 e 3 ou subalimentando a extrusora. Por sua vez, para aumentar a capacidade de bombagem da segunda zona pode-se reduzir a temperatura do cilindro na zona 2 e aumentar a temperatura

ou diâmetro da matriz. Caso assim não se resolva o problema, o fuso, matriz ou cilindro devem ser alterados (Rauwendaal, 2002).

Para ter uma zona de ventilação eficiente, a abertura deve ser larga o suficiente para que a massa fundida não a obstrua, ao mesmo tempo que não pode ser grande demais para evitar “inchaço” da massa fundida e tempo de exposição demasiado longo. Ou seja, a zona de ventilação deve ter em conta o comportamento viscoelástico dos polímeros fundidos, caso contrário parte desta massa é raspada e acumula na zona de ventilação. Este comportamento é agravado com o tempo de exposição - quanto mais tempo mais “incha” - e isto é controlado através da velocidade do fuso e abertura da zona de ventilação. Quanto mais lento for o fuso e maior for a zona de ventilação, mais “inchará” o polímero nesta zona (Rauwendaal, 2002).

Se o polímero acumula na zona de ventilação, eventualmente irá acabar por a bloquear. Para prevenir esta situação, utiliza-se um rebaixo como na figura 32 (b) que deverá estar de acordo com o “inchaço” da massa fundida. Por exemplo, se expandir 3 a 5 mm deverá ter pelo menos esse valor. Se em vez disso este rebaixo estiver como na figura 31 (a) irá ter o efeito oposto, o que resulta na acumulação de plástico na zona de escape (Rauwendaal, 2002).

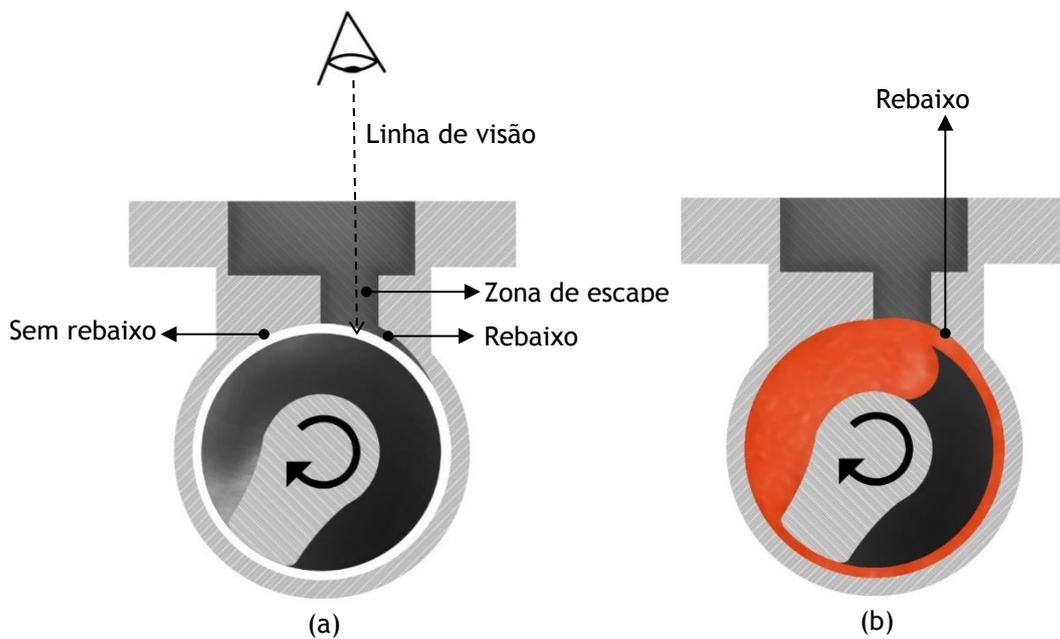


Figura 32. Zona de ventilação adequada (Rauwendaal, 2002), adaptado.

Tal como seria de esperar, o caudal é mais reduzido 70% nestas máquinas, mas esta perda é compensada com o tempo e energia que se gasta a efetuar pré-secagens, no mínimo de 3h (Wormer, 2011). Adicionalmente, o funil de alimentação também pode estar sob vácuo para reduzir o ar admitido na extrusora (Greene, 2000).

A razão L/D utilizada por estes fusos é na zona mais comprida, sendo um L/D típico de fusos de duas fases 32:1 a 36:1, com limites de 24:1 e 40:1 (Wormer, 2011), mas aumenta ainda mais com o número de fases (Michaeli & Schmitz, 2004). Os tempos de residência na zona de vácuo podem variar entre 5 segundos e 10 minutos, estando tipicamente entre os 20 segundos e 2 minutos. Para a maior parte das aplicações, uma pressão relativa negativa de 130-60 mbar é suficiente, mas alguns casos, como por exemplo PET que não passou um processo de secagem, beneficiam de pressões negativas superiores (Martin, 2014).

4.1. Extrusão de filamento

O filamento quando acabado de extrudir encontra-se geralmente no estado líquido, e por isso é necessária uma zona de arrefecimento que leve a sua temperatura abaixo de T_g permitindo uma calibração e tração. O banho de água é o método mais comum utilizado para efetuar esta tarefa, mas também se pode utilizar convecção forçada, a ar, caso uma taxa de arrefecimento lenta seja aceitável (Greene, 2000). O arrefecimento a água é útil quando se pretende o processamento de vários polímeros diferentes na mesma extrusora, já que oferece versatilidade (Womer, et al., 2006).

Quando o filamento é arrefecido ao ponto de manter a forma, é tracionado puxando o polímero que está a sair pela matriz através do banho, passando pela calibração que pode ser feita em rolos, anéis de dimensionamento ou através do tracionador. Após este processo, o filamento deve ser enrolado em rolos para armazenamento como exposto na figura 33.

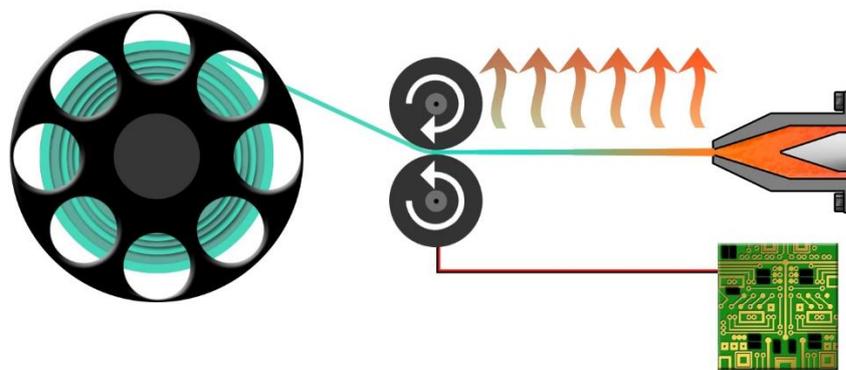


Figura 33. Esquema da extração e armazenamento de filamento a partir de uma extrusora (abiplast, 2014), adaptado.

4.2. Defeitos na extrusão

A complexidade de uma extrusora faz com que muitas causas diferentes possam ter efeito na qualidade do filamento extrudido, e por isso é importante ter consciência de que defeitos são causados por que causas, e quais as soluções para os corrigir como apresentado na tabela 5 (Dineli, 2011).

Tabela 5 Problemas, causas e soluções na extrusão (Dineli, 2011).

Problema	Descrição	Causas	Soluções
Pulsação	Também conhecida por <i>surging</i> é a variação do diâmetro do filamento, pode ser notada uma espécie de ondulação neste.	Rosca subalimentada.	Diminuir a temperatura na zona de alimentação da rosca. Adicionar mais material na garganta de entrada. Diminuir as dimensões das partículas do material de alimentação.
Escape do material pela ventilação	Saída de material pela zona destinada à ventilação.	Excesso de alimentação de material na garganta de entrada (mais do que o que a rosca consegue processar).	Reduzir a passagem de material na primeira e/ou segunda etapa Abrir a válvula de contrapressão Aumentar a temperatura na terceira etapa e da matriz. Reduzir a entrada de alimentação na garganta de entrada.
Marcas de varíola	Bolhas/depressões sob a superfície do filamento.	Bolhas de ar que ficaram aprisionadas no filamento podem ser causadas por fusão prematura de material que bloqueia a evacuação de ar do material fundido posteriormente.	Reduzir a velocidade da rosca para aumentar o tempo de expulsão do ar. Diminuir o tamanho das partículas com que se alimenta a máquina.
Linhas na direção da extrusão	Depressões ou bossas contínuas ao longo de todo o filamento.	Imperfeições na matriz, tais como arranhões ou pontos na borda da matriz, que causam bossas ou depressões respetivamente.	Também pode ser causado por algum empancamento ou material preso na matriz. Bom acabamento na matriz, polimento. Limpeza da matriz.

Tabela 6 Problemas, causas e soluções na extrusão -continuação- (Dineli, 2011).

Problema	Descrição	Causas	Soluções
Linhas perpendiculares à direção da extrusão	Marcas no filamento perpendiculares à direção de extrusão.	Aderência do filamento ao rolo tracionador.	Vibrações no rolo tracionador ou no fuso. Arrefecer o rolo. Arrefecer mais o filamento antes de este entrar em contacto com o rolo. Reduzir vibrações no rolo e no fuso, melhorando a transmissão entre o motor e este, eliminando folgas e trocando chumaceiras defeituosas.
Linhas parabólicas	Marcas no filamento parabólicas na direção da extrusão.	O filamento é demasiado espesso e não é uniforme.	Reduzir a velocidade do tracionador. Ajustar a matriz.
Marcas do tipo	Marcas no filamento com bifurcações, com formas semelhantes à de pegadas de galinha.	Humidade, resultado de uma pré-secagem não adequada.	A presença de humidade deve ser eliminada através de uma pré-secagem adequada.
Superfície Rugosa	Rugosidade, ou imperfeições semelhantes às marcas de varíola, mas sem ser preenchidas por ar.	Incompatibilidade de materiais/presença de contaminantes imiscíveis ou com pontos de fusão diferentes.	Para prevenir este defeito deve-se eliminar ao máximo a presença de contaminantes no plástico alimentado, não trocar o material a ser extrudido sem limpar a máquina e evitar misturar plásticos imiscíveis. Para corrigir o problema deve-se baixar a temperatura da máquina de maneira a que a viscosidade do polímero aumente e mais facilmente elimine o resto das impurezas. No entanto, em casos de contaminação mais séria poderá ser necessário fazer o oposto, ou seja, aumentar a temperatura da máquina até ser possível eliminar estes contaminantes.

Tabela 7 Problemas, causas e soluções na extrusão -continuação- (Dineli, 2011).

Problema	Descrição	Causas	Soluções
Nervuras ou partículas com	Presença de nervuras, pontos com coloração ou propriedades diferentes das do termoplástico extrudido.	Contaminação.	Seleção mais cuidadosa dos termoplásticos utilizados. Limpeza dos materiais a reciclar mais rigorosa.
Produto amarelado ou com manchas	A cor do material extrudido não é a expectável tendo em conta o material de alimentação, saindo mais amarelado ou manchado.	Temperatura do processo demasiado alta.	Diminuir tempo de residência. Escolher um material com maior estabilidade térmica. Acertar a temperatura.
Inchaço do extrudido	Aumento do diâmetro do filamento extrudido, também conhecida por <i>die swell</i> ou <i>balloning</i> .	Elasticidade do material fundido que está sob pressão e é descomprimido à saída da matriz, resultando num aumento do diâmetro.	Matriz cónica. Redução da temperatura. Redução da velocidade de extrusão. Controlo do diâmetro tracionando o filamento.
Fratura do fundido	Fraturas ou quebra do filamento durante o processo de extrusão.	Quando a massa polimérica passa para canais mais estreitos (neste caso a matriz) aumenta a taxa e tensão de cisalhamento resultando em defeitos neste.	Utilização de matriz de entrada cónica. A taxa de cisalhamento diminui com o ângulo do cone de entrada.

4.3. Estudo de mercado

Atualmente existem algumas extrusoras de filamento no mercado e na comunidade *open source*, que são na sua maioria dimensionadas com base na extrusora de Lyman, extrusora de *pellets* desenvolvida por Hugh Lyman e vencedora do prémio patrocinado pela *Inventables* para a primeira pessoa ou equipa que submetesse planos para um dispositivo capaz de transformar *pellets* em filamento para impressoras 3D (McCracken, 2013). A partir

daqui foram dimensionadas outras versões, e máquinas baseadas no mesmo princípio, mas o mais próximo que se chega da reciclagem é a reciclagem de peças impressas, ou impressões falhadas, sendo *pellets* o material mais utilizado, alguns exemplos mais conhecidos são a Filabot, ProtoCycler, Filastruder entre outras (Filastruder, 2016), (ReDeTec, 2016), (Noztek, 2016).

4.4. Nota conclusiva

A extrusão é um processo complexo, que tem muito mais para estudar do que o que parece à primeira vista. Uma extrusão feita por uma extrusora relativamente portátil bem dimensionada deve ser capaz de produzir filamento com qualidade suficiente para utilizar em impressoras 3D. Um dos problemas com que as extrusoras já existentes se deparam é exigir a pré-secagem do material, processo moroso que exige mais maquinaria, consumo de energia, e provavelmente a razão pela qual pequenas extrusoras para utilizar em ambiente doméstico não funcionam eficientemente com plásticos reciclados. Foi estudado neste capítulo que a desgaseificação é o único método que não exige pré processamento do material (Schönfeld, et al., 2007), sendo assim uma mais-valia por não exigir ao consumidor etapas e processos extra para operar com a máquina.

5. Estudo experimental do Politereftalato de Etileno

Um estudo experimental do plástico a utilizar na extrusão é necessário para confirmar a possibilidade da utilização de PET na impressão 3D, corroboradas as informações relevantes para a extrusão do PET obtidas na revisão bibliográfica. Visa adicionalmente averiguar uma última vez se o PET realmente é uma boa escolha para seguir com a parte experimental da presente dissertação.

5.1. Filamento de PET referência

Um dos primeiros passos feitos no desenvolver deste trabalho, após a aquisição e montagem de uma máquina de FDM que será abordada mais à frente, foi pesquisar e encomendar *online* filamento produzido a partir de PET. Foi então encomendada uma quantidade de 200g na loja 2012hictech do eBay, dando-se início aos testes após a chegada da encomenda.

5.1.1. Teste do filamento

Para se confirmar que o filamento comprado realmente é constituído por PET, há alguns testes simples que jogam com as propriedades deste termoplástico e apesar de não garantirem a autenticidade do material, apresentam indicadores de se tratar efetivamente de PET.

O primeiro teste consistiu em dobrar o filamento. Imediatamente dá para notar que se trata de um termoplástico com propriedades diferentes das dos mais comumente utilizados na impressão por FDM, possui uma ductilidade superior e rigidez inferior, dobrando facilmente o filamento sem partir, sendo até extremamente complicado partir o filamento através de dobragens consecutivas. O filamento é também mais elástico e bastante resistente ao impacto, características conhecidas do PET.

Com esta dobragem também se pode verificar o esbranquiçar do filamento na zona de dobragem, conforme exposto na figura 34, propriedade também característica do PET.



Figura 34. Filamento PET dobrado.

Por fim, também se observou a queima do filamento, comparada com a de uma tira de PET de uma embalagem. O primeiro sinal de semelhança é a velocidade com que se inicia a combustão quando se aproxima a chama. É uma combustão que se inicia rapidamente com a zona que se encontra em contacto com a chama a adquirir imediatamente uma aparência negra e opaca visível na figura 35. Quando se inicia a reação de combustão, são libertados um fumo negro e um odor químico idêntico ao do PET retirado de uma garrafa, permitindo assim obter mais certezas em relação à autenticidade do filamento.



Figura 35. Resultado da queima de filamento PET (em cima) e um bocado de uma garrafa constituída por PET (em baixo).

Para ter um exemplo de como estas propriedades podem variar entre termoplásticos, o filamento de PLA quebra facilmente, possui um odor adocicado quando é queimado, queima esta que demora bastante mais tempo a iniciar e não obtém uma aparência negra tão facilmente, notando-se um borbulhar do plástico não visível no PET.

5.2. Impressão em PET

A impressão em PET não é muito mais complicada do que em um filamento como o PLA, desde que se tenha em consideração a ductilidade deste polímero (pode torcer quando empurrado pelo motor extrusor se estiver com velocidades demasiado elevadas) e se encontrar a sua temperatura de extrusão. Neste caso começou-se com a temperatura de 230°C, recomendada pelo vendedor. A utilização desta temperatura que não exigiu nenhuma alteração para funcionar corretamente.

Outra propriedade interessante do PET é a sua miscibilidade com o PLA, o que permite uma troca de filamentos suave, podendo-se observar a partir da cor do material extrudido quando já só existe PET na cabeça da impressora.

As impressões com este material decorreram normalmente e sem grandes falhas que não sejam de esperar numa máquina do género, e foram obtidas inicialmente as duas peças expostas na figura 36, sendo a primeira um cubo com 1cm³ e a segunda uma lamela na qual se podem ver uma, duas e três camadas impressas, para análise em microscópio.



Figura 36. Cubo e lamela impressos em PET numa máquina de FDM.

A união entre camadas, adesão á superfície de impressão e comportamento das peças impressas no geral não apresentam qualquer contratempo à sua utilização na impressão FDM, tanto que após estas duas impressões foram realizadas outras que continuaram sem apresentar problemas e se provaram capazes de desempenhar as funções para as quais foram desenhadas.

5.2.1. Análise microscópica

Para melhor analisar o filamento e as peças impressas em PET já abordadas neste capítulo, recorreu-se a um microscópio ótico com o qual se analisaram pormenorizadamente as

propriedades do PET antes e depois da impressão, tais como presença de bolhas e partículas contaminantes.

Começou por se analisar em detalhe o filamento da figura 34, sendo visível com mais clareza na figura 37, observação que será útil mais à frente.

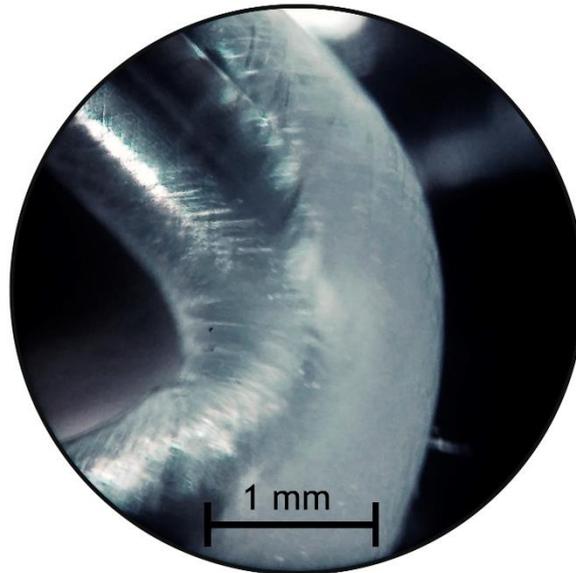


Figura 37. Coloração do filamento PET vincado observado ao microscópio ótico com ampliação de 20x.

Passando a analisar o filamento simples sem ter sofrido qualquer processo de alteração, o primeiro contacto com este resultou no que pode observar na figura 38, onde se deteta o que aparenta serem bolhas esticadas com reduzidas dimensões.

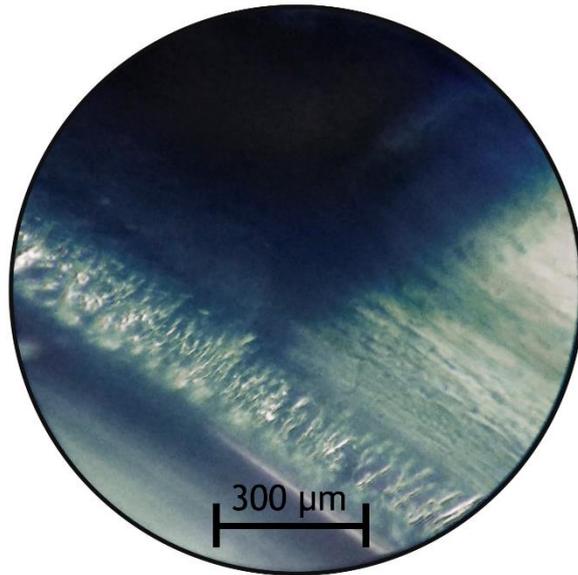


Figura 38. Marcas no filamento observado ao microscópio ótico com ampliação de 50x.

No entanto, diminuindo a ampliação pode-se observar que eram apenas marcas associadas ao dobramento do filamento, tal como o que foi analisado na figura 37, mas em muito menos quantidade, e provavelmente associado não ao vincar, mas ao enrolar na bobina do filamento.

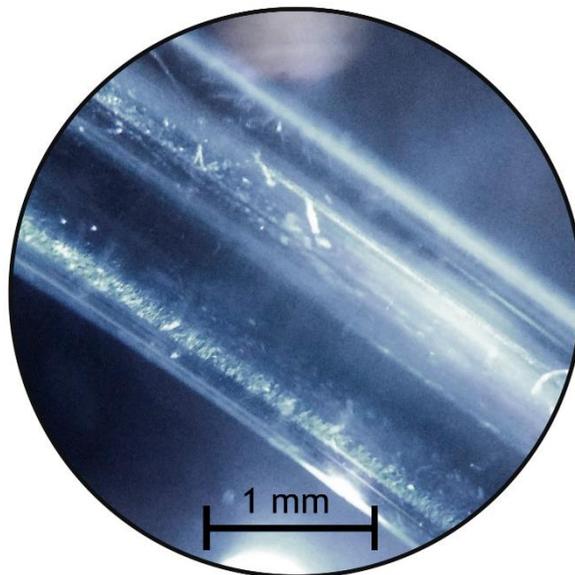


Figura 39. Marcas no filamento observado ao microscópio ótico com ampliação de 20x.

A presença de bolhas no filamento é, tal como a presença de contaminantes praticamente inexistente e devem ser estes os requisitos que se pretendem obter no final da extrusão de filamento, que deverá ser igualmente observado ao microscópio antes da sua utilização numa máquina de FDM, para prevenir o seu entupimento/dano.

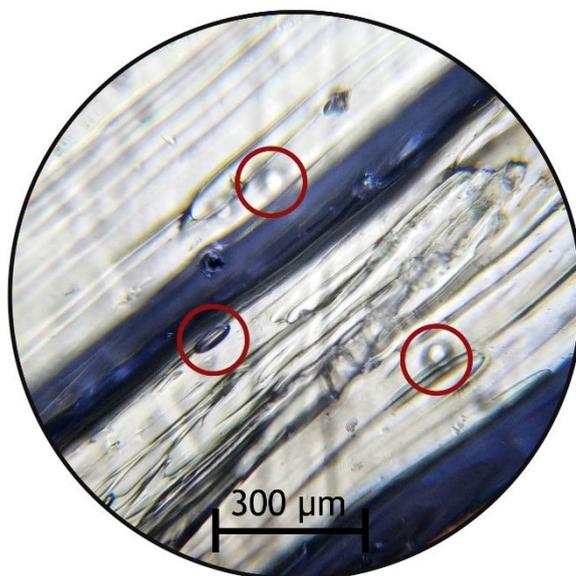


Figura 40. Bolhas e impurezas numa lamela impressa em PET observada ao microscópio óptico com ampliação de 50x.

Após a impressão, a presença de bolhas aumentou significativamente, tal como assinalado na figura 40, o que se deve provavelmente à absorção de humidade por parte do PET, que evapora aquando da impressão, ficando este gás aprisionado quando esta resina solidifica. A presença de contaminantes, se bem que não existe em excesso, é visível ao longo da amostra, o que se deve ao ambiente onde a impressão foi realizada e às condições de armazenamento do filamento.

Também se podem observar linhas escuras, que se devem ao barrar do plástico pela cabeça da impressora ao longo da impressão, sendo estas irregularidades, em conjunto com as bolhas, impurezas e condições de arrefecimento do PET a razão pela qual uma peça impressa neste material translúcido resulta num objeto fosco.

5.3. Estudo do PET reciclado

Tendo a confirmação de que a impressão em PET é possível e prática, pode-se então avançar para a sua reciclagem numa extrusora. Para tal foram produzidos flocos para realizar testes que devem servir para reduzir a amplitude de valores obtida na pesquisa bibliográfica, e permitir uma extrusão com parâmetros devidamente ajustados de acordo com o material utilizado.

5.3.1. Produção de flocos

Os flocos utilizados para utilização em testes foram produzidos manualmente com o auxílio de uma tesoura e dimensões inferiores a 1 cm². O seu processo de produção começou pela seleção de embalagens PET de uma variada gama de marcas, para que se obtenham valores que abranjam diversos produtos. Foram então selecionadas garrafas de água e sumo da marca Pepsi, Vimeiro, Vitalis, Fastio, Serra do Caramulo, Serra da Estrela, Luso e Refrigerante Manga-Laranja da marca Continente. A estas garrafas foi retirada a tampa, rótulo e anilha que lacra a tampa por serem de materiais diferentes. Foi também cortada a zona que possui a cola que fixa o rótulo, por uma questão de simplificar o trabalho (evitar a limpeza desta cola) e evitar o máximo possível de contaminantes nesta fase do trabalho. As garrafas foram então cortadas em pequenos pedaços e postos de molho em água morna com detergente desengordurante, sendo depois mexidos, escoada a água e enxaguados cinco vezes para eliminar os vestígios do detergente. Estes flocos foram coados para se retirar o máximo de água possível e colocados num saco de pano onde secaram com auxílio de convexão forçada à temperatura ambiente para permitir eliminar a água que os cobre, mas não a humidade absorvida pelo PET, já que se pretende estudar também a forma como o PET perde a humidade durante o seu processo de fusão. Por fim, estes flocos foram colocados num frasco de vidro e tapados como se pode ver na figura 41.



Figura 41. Flocos de PET produzidos manualmente.

5.3.2. Ensaio termogravimétricos

Após a produção do floco de PET o próximo passo seria efetuar uma análise termogravimétrica, que iria medir a variação da massa do PET com o aumento da temperatura, permitindo assim obter uma curva onde se consegue visualizar a que temperatura se dá a desgaseificação e a partir de que temperatura o PET se degrada. No entanto o equipamento necessário para realizar estes ensaios encontra-se avariado na altura de realização da presente dissertação e portanto a alternativa encontrada consiste na extrusão a baixa velocidade e iniciada com um perfil de temperaturas próximo da

temperatura mínima de fusão obtida na bibliografia, variando a partir daí as condições de extrusão até ser atingido o perfil de temperaturas que permita a obtenção do melhor filamento.

5.4. Nota conclusiva

O estudo experimental do PET permitiu em primeiro lugar confirmar a possibilidade da impressão utilizando PET, material pouco utilizado na tecnologia FDM. Obteve-se também mais conhecimento sobre o que se deve esperar no filamento de PET extrudido e impresso, que poderá agora ser comparado com o filamento de referência analisado neste capítulo. Uma observação cuidadosa e um novo estudo deverá ser feito ao filamento antes de o testar numa máquina de FDM para evitar que a potencial presença de contaminantes danifique a máquina.

6. Protótipo experimental

O objetivo do desenvolvimento da extrusora e finalidade da presente dissertação consiste na obtenção de uma máquina compacta com um funcionamento o mais independente possível, necessitando do mínimo de intervenção possível por parte do utilizador. Pretende-se que esta máquina seja capaz de produzir filamento com características de qualidade suficientes para que possa ser utilizado numa máquina de FDM, resultando na impressão de peças com material reciclado localmente. Para tal, após toda a pesquisa e investigação, é desenvolvido o protótipo experimental da máquina, sendo neste capítulo abordadas três fases cruciais para tal: O projeto da máquina, em que se dimensionam as características mais importantes, sendo planeadas e justificadas tomadas de decisão e escolhas de componentes. Após esta primeira fase passa-se ao desenho em CAD da máquina. Aqui observam-se interferências, dimensões, corrobora-se a lista de materiais obtida na primeira fase de projeto, obtém-se uma primeira visão do produto final e retiram-se desenhos técnicos necessários ao desenvolvimento e construção da máquina. Por fim, a terceira parte deste capítulo detalha a construção da máquina passo a passo, apresentando os obstáculos encontrados e a solução para os ultrapassar.

6.1. Projeto da máquina

O projeto da máquina consiste no desenho desta com vista a atingir os objetivos de construção, sendo este baseado em toda a informação recolhida nos capítulos anteriores. Se bem que o objetivo passa pela construção de uma máquina de reduzidas dimensões, acabou por se optar por aumentar um pouco a escala desta, para que as tolerâncias da sua construção fossem maiores, não estando a sua construção tão comprometida pela precisão. Assim, caso se observe um bom funcionamento da máquina, poder-se-á desenvolver uma das propostas de trabalhos futuros: reduzir a escala da máquina para que se torne mais compacta e portátil, já que se pretende presentemente principalmente testar a sua funcionalidade, sacrificando-se a dimensão em prole de facilidade e simplicidade de construção.

O projeto da máquina em si começou pelo coração da extrusora: o fuso. Como foi estudado no capítulo 4, todas as dimensões de um fuso são específicas do tipo de extrusora, tipo de fuso e propriedades do plástico a ser extrudido, sendo expressas em múltiplos do diâmetro do fuso. Pretende-se que inicialmente a máquina apenas seja capaz de extrudir PET, mas com vista a trabalhos futuros, foi também tida em conta a versatilidade do fuso, mesmo que esta sacrificasse um pouco do rendimento da máquina. O fuso escolhido foi o de barreira, já que como se estudou anteriormente para aplicações mais gerais e que não necessitem que haja mistura de corantes ou outros aditivos, o fuso recomendado é um fuso de barreira, com hélice secundária de largura constante na primeira zona de compressão. Com esta solução obtém-se uma grande uniformidade e rendimento na fusão dos flocos de termoplástico, sendo por isso o tipo de fuso mais utilizado na indústria.

Como se pretende evitar ao máximo a intervenção humana no processo e como foi visto no capítulo 2, o PET é um termoplástico que absorve bastante humidade. Assim, a extrusora terá que ser capaz de eliminar a água durante o processo, evitando uma longa pré-secagem dos flocos, que para além de tempo iria exigir uma estufa. Portanto, a extrusora terá uma zona de ventilação, que será colocada a vácuo para melhor eliminação dos gases durante o processo, evitando a descontinuidade na extrusão e formação de bolhas no filamento que resulta em baixa qualidade do produto final sendo por isso necessariamente um fuso de duas fases.

Começou-se então por atribuir um diâmetro de 25 mm para o fuso e a partir daí, com base na bibliografia foram escolhidos comprimentos e profundidades para cada uma das zonas do fuso: Começou por se definir um fuso com 35D (875 mm) com uma zona de alimentação com 6,5D e profundidade de 0,15D (162,5 mm e 3,75 mm respetivamente) na primeira fase, com zona de compressão com hélice secundária de barreira com comprimento de 4,25D (106,25 mm) e razão de compressão de 2,5, resultando numa zona de dosagem com uma profundidade de 0,06D e comprimento de 6D (1,5 mm e 150 mm respetivamente). Na segunda fase existe uma zona de descompressão com 3,5D seguida de uma zona de vácuo com 5D onde a profundidade do canal é de 0,12D (3 mm) com uma nova zona de compressão de 3,5D (87,5 mm), com uma razão de compressão de 2 mas sem hélice secundária de barreira, uma vez que não é necessária nesta fase, em que é expectável que todo o polímero já esteja completamente fundido e por fim, uma última zona de dosagem novamente com comprimento de 6,25D e profundidade de 0,06D (156,3 mm e 1,5 mm) estreitando a partir daqui a ponta do fuso para que o polímero entre na matriz de forma o menos turbulenta possível.

Por fim, uma folga de 0,01D tem que ser dada entre o fuso e a camisa, portanto todo o fuso foi encolhido após ser desenhado em 0,01D. Este processo simplificou a construção, já que apesar do fuso não ficar com exatamente 25 mm de diâmetro, não é expectável que uma redução nesta ordem tenha impacto significativo na extrusão. No entanto, este passo permitiu que seja utilizado tubo com 25 mm de diâmetro interno e este não tenha que ser maquinado internamente (tendo em conta a improbabilidade de encontrar no mercado tubo com 25,5 mm de diâmetro) para criar a folga, o que seria um processo complexo e desnecessário.

A primeira zona de compressão exigiu que a área da secção do canal do fundido e do canal de sólidos fosse calculada de maneira a que a razão de compressão fosse respeitada. Para isso, parte-se do princípio que a área no início da zona de compressão é igual à área na zona de alimentação e a área da secção no fim da zona de compressão deve também ser igual à área da zona de dosagem. Para isso, a compressão é feita numa primeira fase com o aparecimento gradual do canal dos sólidos, que começa com um diâmetro igual ao da hélice secundária, ou seja, 24 mm e uma largura de 6 mm que se mantém constante ao longo da zona de compressão tal como a do canal dos sólidos que também se mantém constante com 14 mm. Este é mais largo porque interessa que a superfície de contacto com o polímero ainda não derretido seja grande para aumentar a eficiência do processo de fusão. Após o derretimento este polímero, pode ser armazenado num canal mais estreito. O canal de sólidos vai gradualmente diminuindo a sua área de secção até que atinge um diâmetro de 23,6 mm e o canal dos líquidos vai aumentando a profundidade até que atinge um diâmetro de 18,2 mm. Este aumento de profundidade do canal de sólidos não é proporcional à diminuição da profundidade do canal do fundido, já que a área da secção da zona de compressão começa com 90 mm² e termina com 33 mm².

Ao fuso teve que ser acrescentado comprimento atrás da zona de alimentação, para serem criadas zonas para a transmissão de potência responsável pela rotação do fuso e chumaceiras que permitem o funcionamento do fuso sem a sua deslocação axial causada pela força de reação da extrusão ou flexão do veio causada pela transmissão.

Para o aquecimento são controladas seis zonas, cinco das quais com resistências de aquecimento de 500 W e uma com uma resistência de aquecimento de 750 W. As resistências de 500 W estão divididas pela zona de compressão e dosagem da primeira fase, duas na zona de vácuo (zona de descompressão, vácuo e segunda zona de compressão) devido ao comprimento desta e uma na última zona de dosagem. Uma resistência de 750 W é colocada na cabeça de extrusão para que se possa aumentar a temperatura, diminuindo a viscosidade, nesta zona crítica à forma como o polímero atravessa a matriz. Estas resistências são independentes e são controladas individualmente, devendo existir um termopar no meio de cada zona aquecida para que este controlo seja possível.

A matriz foi desenhada de maneira a que o seu encaixe seja justo no topo da camisa, e apertada com três pernos roscados a esta. Foi projetada de maneira a que o seu ângulo interno seja de 20° com a horizontal, bastante inferior ao máximo recomendado, reduzindo as tensões de corte do polímero à saída da extrusora.

A ponta da matriz tem um furo com 3 mm por onde é extrudido o termoplástico. Este, após passar no tabuleiro de refrigeração é puxado por um tracionador que consiste em dois rolos de borracha movidos por um motor de passo. O filamento é calibrado a partir da velocidade com que o tracionador puxa o filamento, ou seja, se for puxado à velocidade com que sai da extrusora, o filamento terá um diâmetro de 3 mm. O diâmetro do filamento diminui com a velocidade com que o tracionador o puxa.

A refrigeração do filamento à saída da matriz é essencial para o bom funcionamento do sistema e à semelhança dos equipamentos à escala industrial é feita a água. O termoplástico após sair da cabeça extrusora deve atravessar um tabuleiro com circulação de água para que entre em contacto com o filamento e a temperatura da água se mantenha constante. Um tabuleiro com 700 mm de comprimento é então alimentado com água durante o funcionamento da máquina para arrefecer o filamento. Outro tabuleiro mais largo e mais baixo serve para recolher a água que transborda do tabuleiro de arrefecimento.

A bomba de vácuo selecionada funciona a 12 V DC com uma potência de 5 W e é capaz de fornecer um vácuo de 65 kPa e tem um caudal de 5 L/min.

O motor elétrico selecionado foi aproveitado da motorização de bancos automóveis e funciona a 12 V DC. No entanto, apesar de ter sido testado, os valores do seu binário não foram encontrados. Quando não é submetido a cargas possui uma velocidade de rotação de 75 RPM, o que mesmo tendo em conta a diminuição do binário com a carga, será suficiente para os testes iniciais, que têm como objetivo o teste da funcionalidade da máquina e não a sua otimização, tendo por isso sido desenhado um sistema de acoplamento ao fuso com uma razão de transmissão de 1:1. Futuramente, a otimização e desenvolvimento da máquina já poderá requerer motores com binário e velocidades superiores.

A extrusão é o resultado do empurrar do plástico ao longo da camisa e através da cabeça de extrusão, Este “empurrar” resulta numa força de reação no sentido axial do fuso, com sentido contrário ao da circulação do plástico. Para amparar esta força é utilizada uma chumaceira axial da SKF 51204 com capacidade de carga dinâmica de 21,2 kN, com os

diâmetros interno menor de 20 mm e diâmetro externo de 40 mm. Esta chumaceira encaixa num suporte desenhado com vista a transmitir os esforços axiais à placa de madeira.

Caso se verifique a ineficiência do aquecimento da máquina poder-se-á acrescentar uma cerâmica com boa condutibilidade térmica (como por exemplo alumina) em forma de pasta às resistências para aumentar a sua área de contacto com a camisa. Poderá também ser acrescentado um isolamento térmico resistente a altas temperaturas, por exemplo à base de lã de rocha, em volta da camisa para reduzir as perdas.

Para que o objetivo de interação mínima do utilizador seja cumprido, tem que ser dimensionado um sistema de controlo capaz de medir os parâmetros necessários de funcionamento da máquina e atuar no sentido de manter um funcionamento de acordo com os parâmetros definidos. A máquina tem que ser capaz de manter o perfil de temperaturas definido, velocidade de rotação do fuso, velocidade do tracionador, precisando para tal, de medir a temperatura em cada uma das resistências de aquecimento e a espessura do filamento após o seu arrefecimento. Para o processamento de dados é utilizado um *launchpad* da Texas *instruments* que contém o microcontrolador TM4C123G. As resistências selecionadas têm potência de 500 W e 750 W tal como já foi referido. As cinco resistências de 500 W são do tipo tubular, o que possui vantagens por já virem isoladas com óxido de magnésio compactado e por isso o seu isolamento elétrico não é uma preocupação a ter. No entanto, a espessura do isolamento limita a sua aplicação (não permite raios de curvatura presentes na ponta da cabeça da extrusora) e por isso a resistência de 750 W em filamento foi a selecionada para utilizar na cabeça da extrusora, tendo que haver aqui a preocupação com o isolamento elétrico entre o filamento da resistência e a cabeça da extrusora e isolamento entre as voltas sucessivas do filamento da resistência. Estas resistências são acionadas pelo microcontrolador, cada uma através de um relé de estado sólido SSR25DD (SSR do inglês *Solid State Relay*) e controladas com base na temperatura medida por termopares do tipo K ligados a um conversor analógico-digital MAX6675, enviando o sinal digital para o microcontrolador que faz o processamento da informação e decide quando ligar e desligar as resistências em cada uma das zonas, em função dos dados inseridos pelo utilizador. Inicialmente, o motor responsável por rodar o veio irá estar a trabalhar com a máxima potência, mas para assegurar que a velocidade é constante e possibilitar a sua variação em caso de necessidade é acrescentado um *encoder* ótico para que o microcontrolador consiga medir a sua velocidade de rotação. Por fim, a monitorização da espessura do filamento é feita a partir de um adaptador construído para encaixar um paquímetro digital conectado ao microcontrolador, cujos dados obtidos irão fazer variar a velocidade do tracionador, aumentando caso o filamento esteja com espessura acima da pretendida, e diminuindo a velocidade caso esta esteja abaixo do pretendido. A bomba de água e a bomba de vácuo também são controladas pelo microcontrolador, mas apenas lhe será dada a capacidade de ligar/desligar. O circuito pode ser observado em esquema na figura 42 onde se pode ver ainda a conexão entre o Tiva e o MATLAB num computador, que é utilizado para controlar os parâmetros e armazenar/tratar dados.

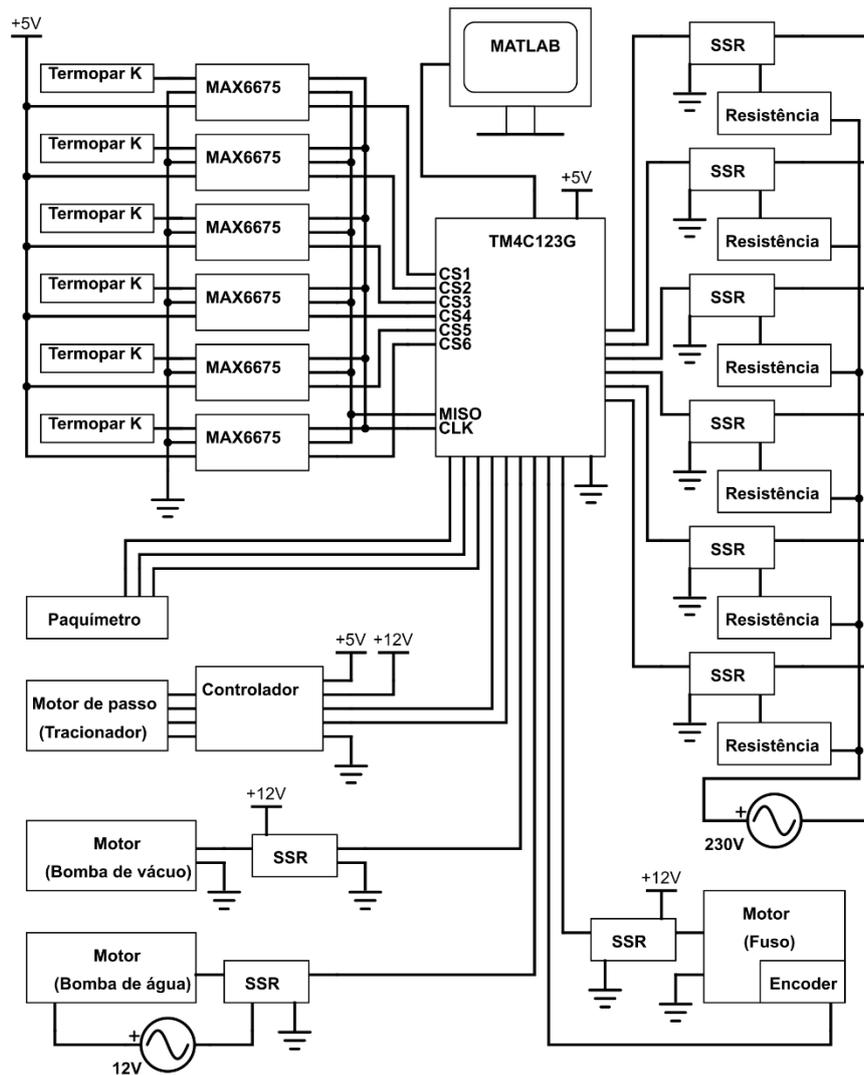


Figura 42. Esquema do sistema de monitorização e controlo da máquina.

Outras componentes da máquina que não foram mencionadas nesta fase foram projetadas durante o seu desenho e/ou construção, não valendo por isso a pena a sua menção nesta secção. Também há casos de sistemas que simplesmente foram sobredimensionados, devido a não serem o foco principal do trabalho e o seu dimensionamento teve que ser sacrificado em prol da realização de outros trabalhos durante o período de tempo definido para o desenvolver da dissertação.

6.2. Desenho

No início do desenvolvimento desta dissertação a ideia de desenvolver uma máquina capaz de extrudir plástico descartável foi aplicada a um desenho primordial que se pode observar na figura 43. Trata-se de um esboço inicial feito com base no pouco conhecimento já obtido

sobre a extrusão, servindo de motivação e ponto de partida para o desenvolvimento da extrusora. Na figura 45 é apresentada uma vista explodida deste desenho.



Figura 43. Desenho da máquina feito no início do presente trabalho.



Figura 44. Componentes do desenho da máquina feito no início do presente trabalho.

Neste capítulo, este desenho inicial serve perfeitamente para ilustrar todo o conhecimento desenvolvido através da pesquisa realizada ao longo da dissertação, já que quando se observa este desenho primordial e as suas componentes apresentadas na figura 44 comparando com a vista explodida da versão atual representada na figura 45, consegue-se facilmente aperceber que apesar de o conceito ser correto (um funil de alimentação que alimenta flocos ou pellets a um fuso que os empurra ao longo de uma camisa aquecida e finalmente os extrude pela matriz), nenhuma componente nesta máquina primordial está bem dimensionada, podendo assim, caso tivesse sido construída, ter um funcionamento extremamente ineficiente, ou até mesmo não funcionar de todo.

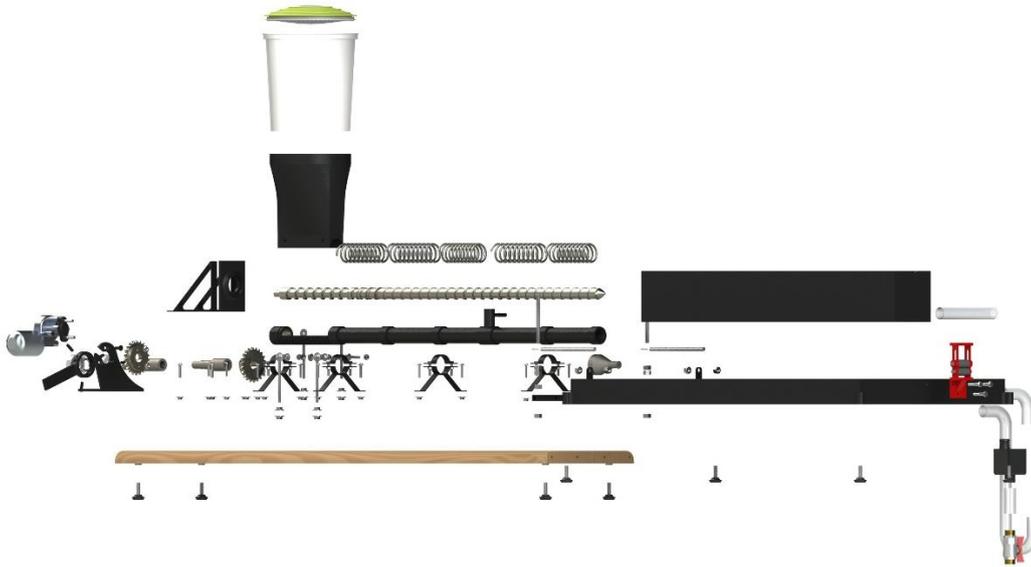


Figura 45. Vista explodida do desenho da máquina após o presente estudo.

A grande profundidade do fuso e o seu comprimento iriam dar origem a um derretimento ineficiente observado essencialmente junto à camisa. A existência de apenas uma zona de aquecimento que nem sequer cobre a matriz também iria contribuir para esta ineficiência. O formato da matriz, não sendo cónico e alongado na ponta, iria resultar num extrudir errático, pouco constante e imprevisível. Esta extrusora também apenas poderia funcionar com pellets, ou flocos que tivessem passado por uma pré-secagem, já que a ausência de uma zona de vácuo resultaria em que caso o plástico alimentado tivesse humidade, esta ir-se-ia observar sob a forma de bolhas de gás presentes no filamento extrudido. Concluindo a breve descrição desta extrusora, caso esta funcionasse, seria a velocidades extremamente reduzidas, tal como a maior parte das já existentes, desenvolvidas pela comunidade *open source* e *maker*, exigindo um pré-processamento do material que não é de todo desejável, uma vez que o objetivo do desenvolvimento da extrusora, tal como já foi referido, é obter uma máquina o mais independente e que necessite do mínimo de intervenção do utilizador possível.

O desenho realizado no *software* de CAD Solidworks representa, tal como se pode ver na figura 46 toda a parte mecânica do projeto e serviu essencialmente para planear a construção antes de a iniciar. A criação de um modelo em 3D da máquina antes da sua construção é útil de várias formas diferentes: Em primeiro lugar, permite que se tenha uma ideia concreta do que se vai construir. Isto implica corrigir erros que não se tiveram em consideração, emendar falhas que de outra forma teriam resultado em gastos materiais e verificar a interferência de componentes do sistema. Em segundo lugar, permite que se faça uma lista de material bastante completa, permitindo que o processo de construção não tenha que ser constantemente interrompido por falta de peças e componentes. Em terceiro lugar, a posse de um modelo em CAD permite que sejam retirados desenhos técnicos que servem de auxílio à construção da máquina e permitem que não exista desperdício de

material por compra em excesso ou paragens na construção por falta deste. Estes desenhos também servem para transmitir a ideia do que se pretende fazer a empresas ou entidades que possam auxiliar na construção de componentes (por exemplo corte e quinagem das chapas que deram origem aos tabuleiros). Por fim, os desenhos das componentes podem ser utilizados para que essas peças sejam produzidas em máquinas CNC, seja o caso de um torno mecânico (por exemplo para a produção do fuso ou do veio que o antecede) ou uma impressora 3D.

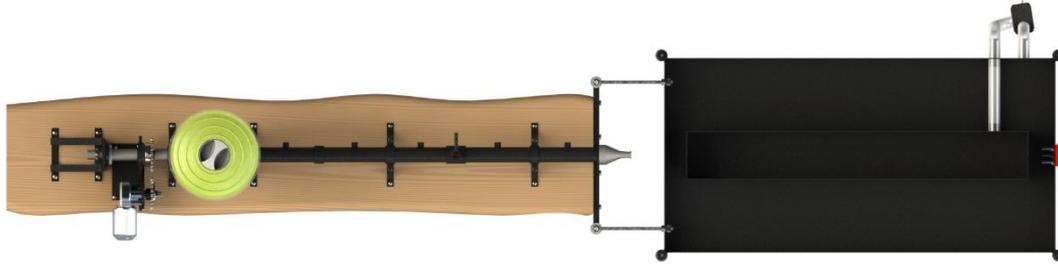


Figura 46. Vista de cima do desenho da extrusora.

Como seria expectável, existiu sempre um processo iterativo entre a fase de projeto e a fase de desenho e posteriormente entre a fase de desenho e a fase de construção. Por exemplo, quando se escolheu a chumaceira axial, foi desenhado um suporte sem grande consideração aos materiais utilizados, forças aplicadas e processo de fabrico, que evoluiu para uma segunda fase que já tinha em consideração os esforços e materiais. No entanto, durante a construção utilizou-se um processo mais simples e o desenho foi atualizado. A figura 47 apresenta como exemplo o processo de evolução do desenho do suporte da chumaceira.



Figura 47. Evolução do desenho do suporte da chumaceira como exemplo do processo iterativo do desenho da máquina.

Apesar de neste caso aparentemente ser desnecessário o desenho realista da peça produzida, este auxiliou a dimensionar o veio onde encaixa a chumaceira e a roda dentada,

e permitiu encontrar a forma mais prática de fazer também caber nesta parte o suporte do motor, sem acrescentar ainda mais comprimento à máquina.

Este não foi o único caso em que as peças foram refeitas antes de se passar à construção. Num projeto com vista à execução da máquina, a modelação em CAD permite que seja economizado bastante tempo e materiais em execuções de peças não viáveis por não se ter tido uma boa visualização do projeto.

O desenho do motor foi o primeiro passo para que se elaborasse um sistema de transmissão, e um suporte para este. A chumaceira radial e o respetivo suporte permitiram testar se a sua montagem no suporte do motor era possível e onde no veio ficariam os seus encaixes. Veio este, cuja utilização do modelo CAD foi essencial para a sua maquinação como se verá mais á frente. Este sistema e sua montagem estão ilustrados na figura 48.

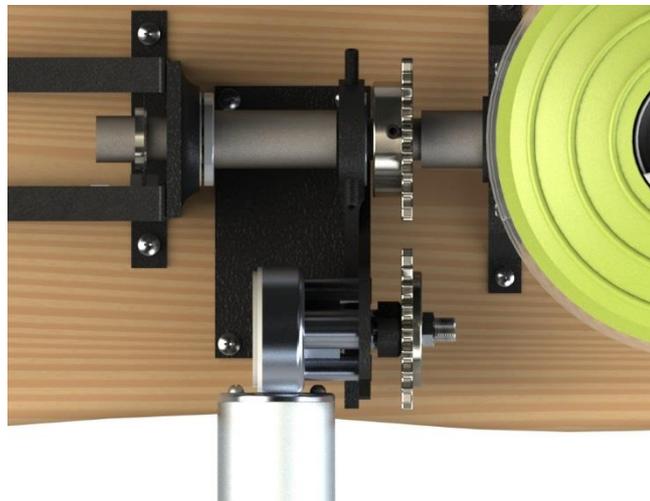


Figura 48. Vista de cima do desenho do sistema de transmissão e absorção da carga axial.

O funil e zona de alimentação, observáveis na figura 49 também usufruíram bastante da pré conceção de um desenho em CAD, sendo este utilizado para gerar os desenhos técnicos em anexo com as formas das chapas que o compõem.



Figura 49. Desenho da zona de alimentação e sistema de transmissão.

A camisa também sofreu um processo de iteração entre o desenho, projeto e construção, já que estava inicialmente planejada ser construída com tubo sem costura de 2 mm. No entanto, o único tubo sem costura encontrado tinha 6 mm de parede interna, o que apesar de inicialmente parecer um contratempo acabou por ser uma oportunidade, já que permitiu que se criassem alhetas junto da zona de alimentação, e que fossem criadas cavas para a colocação de resistências ao longo da camisa. As cavas e alhetas foram desenhadas inicialmente no Solidworks, dando origem à camisa que se pode observar na figura 50, sendo a partir daí produzido um desenho técnico exposto no anexo que serviu de auxílio ao seu torneamento.



Figura 50. Desenho da camisa de extrusão.

De forma semelhante, o desenho técnico dos suportes para esta camisa, feito a partir do modelo computacional visível na figura 51 serviu de auxílio para a sua construção.



Figura 51. Desenho da peça de fixação da camisa.

A tomada de vácuo também sofreu um processo iterativo devido à disponibilidade de materiais, simplicidade de execução e fixação à camisa, dando origem à tomada de vácuo exposta na figura 52. Nesta figura também se podem observar porcas, posicionadas lateralmente no desenho CAD, nas quais apertam os termopares.



Figura 52. Desenho da tomada de vácuo na camisa e encaixe do termopar.

A cabeça de extrusão é também o caso de uma componente que foi construída a partir da maquinação CNC e exigiu por isso a criação de um desenho em CAD exposto na figura 53 a partir do qual se fez o CAM e maquinou a peça.



Figura 53. Desenho da cabeça de extrusão.

A distância mínima de ajuste da base de suporte (cujo modelo também se pode ver sob a extrusora na figura 46) aos tabuleiros de refrigeração também foi medida a partir do modelo, já que nem todas as componentes da máquina estavam desenvolvidas na altura da sua execução e o posicionamento da cabeça de extrusão é o ponto de orientação a partir do qual se mede a distância ao tabuleiro. Este ajuste modelado conforme figura 54 foi descrito no subcapítulo anterior.



Figura 54. Desenho do sistema de encaixe.

Estes tabuleiros de refrigeração também foram desenhados de maneira a obter uma noção do seu comprimento em relação à máquina. Este desenho serviu de auxílio para o seu dimensionamento, resultando no modelo exposto na figura 55. Como referido, nem todas as componentes da máquina foram dimensionadas no projeto e baseadas na bibliografia, já que se teve que sacrificar o dimensionamento de alguns componentes menos relevantes, para que se pudesse despendar mais tempo em estudo e projeto de componentes como por exemplo o fuso.

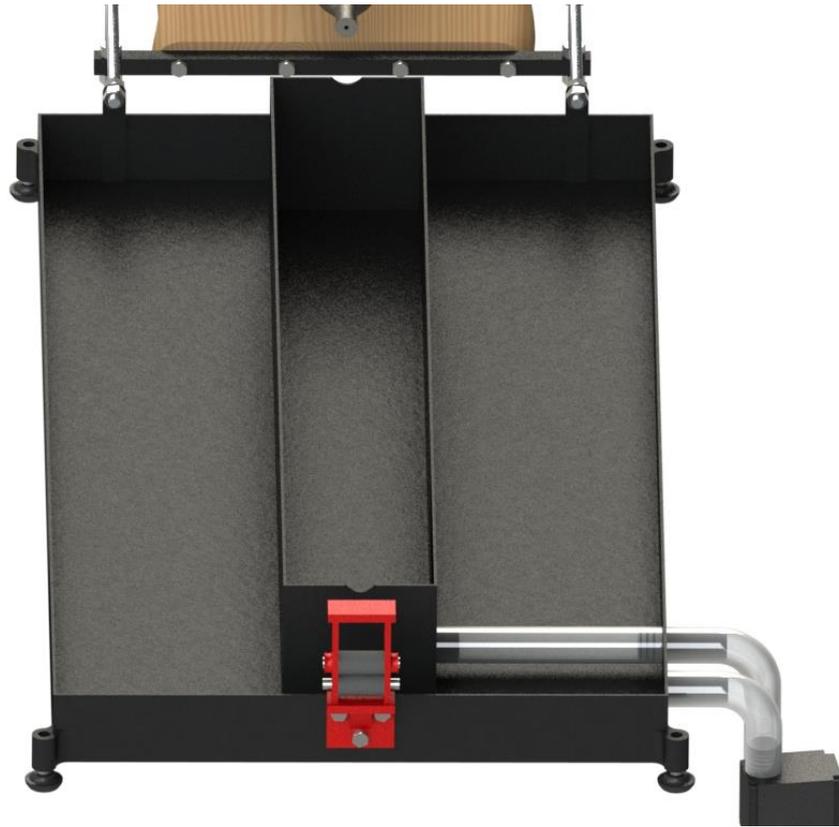


Figura 55. Desenho do sistema de refrigeração.

O sistema de refrigeração também foi esquematizado com todos os adaptadores que se construíram e o seu respetivo posicionamento nos tabuleiro, permitindo assim estudar qual a melhor forma de os dispor, chegando ao resultado representado na figura 56. Esta configuração será abordada mais à frente.



Figura 56. Desenho do circuito de refrigeração ligado numa configuração tomada de saída → torneira → bomba de água → tomada de entrada.

O tracionador foi desenhado para permitir que algumas das peças modeladas possam ser processadas para serem impressas numa máquina de FDM, que será abordada mais à frente. Por isso, foi mais uma vez essencial a modelação CAD da peça e do seu encaixe no resto da máquina tal como exposto na figura 57.



Figura 57. Desenho do tracionador.

Por fim, a peça de execução mais complexa, e talvez a mais importante foi o fuso. Esta peça, devido à sua elevada complexidade apenas pode ser construída numa máquina CNC. Ao contrário de um fuso básico, a profundidade do canal varia entre as zonas, sendo a zona de compressão exposta na figura 58 ao centro, especialmente complexa de executar por ter diferentes profundidades que variam inversamente separadas por uma hélice secundária.

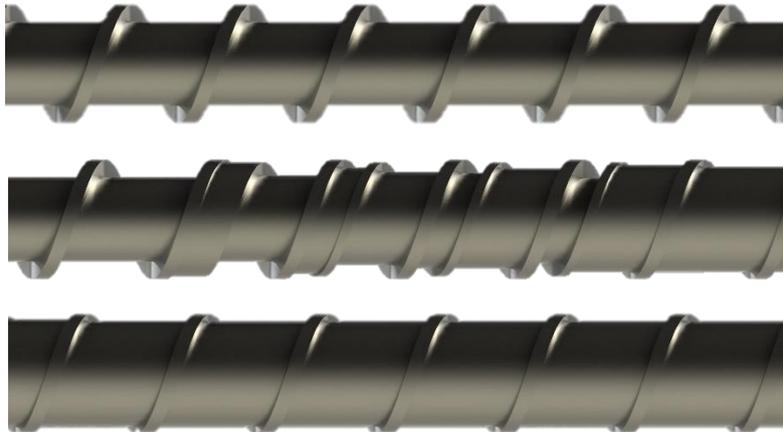


Figura 58. Cortes do desenho do fuso segundo a ordem zona de alimentação, zona de compressão, zona de bombagem.

Para ser torneada no torno CNC do Laboratório de Fabricação da Universidade da Beira Interior, este fuso teve que ser dividido em 7 peças que podem ser observadas na figura 59, com um encaixe que as permita unir e cravar, como será discutido mais à frente.



Figura 59. Peças do fuso e encaixes para maquinação.

6.3. Construção

A construção da extrusora dividiu-se essencialmente em duas partes que no fim se interligaram. A programação do sistema de controlo e a construção do sistema mecânico. Por questões de respeito de prazos, o sistema de controlo teve algumas componentes simplificadas o suficiente para permitir o funcionamento da máquina com o mínimo de complexidade possível.

6.3.1. Sistema mecânico

A construção começou pela base da extrusora, feita a partir de uma placa em madeira com 40 mm de altura e 27 mm de largura. Esta placa foi cortada com 120 mm de comprimento, limada de acordo com a figura 60 e furada para fixar os vários componentes. Foram-lhe adicionadas quatro sapatas que permitem regular a altura em cerca de 23 mm, permitindo inclinar o sistema ou aumentar a altura do sistema em relação à zona de refrigeração.



Figura 60. Base de suporte para a extrusora.

A zona de refrigeração é essencialmente composta por dois tabuleiros, um de arrefecimento e outro de recolha, feitos a partir de chapa de 2 mm cortada numa guilhotina e quinada numa quinadeira de acordo com desenhos técnicos em anexo produzidos a partir do modelo CAD, posteriormente soldados, limados e pintados com primário à base de zinco e tinta acrílica para prevenir oxidação. O tabuleiro de arrefecimento, mais alto e mais estreito é atravessado pelo filamento, estando para tal constantemente a ser alimentado com água por uma tomada localizada na sua zona inferior, transbordando assim pelo topo e entrando em contacto com o filamento. Esta água é recolhida pelo segundo tabuleiro, de recolha, podendo a partir daí escorrer para outro reservatório de água externo, que poderá ter um sistema de refrigeração ou possuir água suficiente/ser feita troca de água para que durante o período de funcionamento a sua temperatura se mantenha relativamente constante. Para períodos de funcionamento curtos pode-se também alimentar diretamente o tabuleiro mais pequeno a partir da água armazenada no tabuleiro de recolha, ligando este circuito numa configuração tomada de saída → torneira → bomba de água → tomada de entrada, como se pode observar na figura 56.

Nestes tabuleiros foram feitos furos para permitir soldar adaptadores para a mangueira. Estes adaptadores, expostos na figura 61, foram torneados a partir de tubo com 21 mm de diâmetro.



Figura 61. Adaptador para soldar aos reservatórios e ligar ao tubo flexível.

Estas tomadas servem para entrada e saída de água nos tabuleiros, fazendo assim a água um circuito que após transbordar pelo reservatório de arrefecimento escorre pelo reservatório de recolha. Daí sai pela tomada de saída e volta para um reservatório externo. A água é bombeada deste reservatório por uma bomba de água, passando por uma torneira reguladora de caudal e voltando a entrar no tabuleiro de refrigeração pela tomada de entrada do

sistema colocada no tabuleiro de recolha, que está diretamente ligada à tomada de entrada do reservatório de refrigeração como exposto na figura 62.

A bomba de água tem um caudal máximo de 450 L/h controlado por uma torneira inserida no circuito e funciona a 12 V AC. Para se poder ligar um tubo à saída da bomba, um adaptador teve que ser torneado, pintado e colado com cola epóxi. O tabuleiro menor é fixo ao maior com recurso a cola e vedante em poliuretano na posição exposta na figura 62, que confere uma fixação forte, mas permite o seu reposicionamento no futuro em caso de necessidade.



Figura 62. Tabuleiros após serem limadas as soldaduras, conectados entre si com tubo flexível.

As conexões entre reservatórios, bomba de água e torneira são feitas por intermédio de tubo flexível transparente com diâmetro interno de 18 mm apertado com braçadeiras de aço. Foram também acrescentados quatro sapatas, visíveis na figura 63 para melhor movimentação dos tabuleiros, possibilitando variar a altura em relação à extrusora em 23 mm. Para além disto, permite alterar o nível da água e conferir inclinações que afetem o escoamento da água durante a refrigeração do filamento. Por fim, foram acrescentados dois pontos de fixação ao sistema de encaixe que posiciona o sistema de refrigeração em relação à extrusora. Estes pontos foram construídos a partir de barra de 15 mm cortada, soldada ao reservatório, limada e furada com um diâmetro de 8 mm conforme exposto na figura 63.



Figura 63. Sapata de ajuste e furo para conectar o tabuleiro à base de suporte da extrusora.

O sistema de encaixe entre a base e o reservatório permite não só que a altura entre o reservatório e a base seja variada, mas também variar a distância entre a base e o reservatório, ou seja, entre a cabeça de extrusão e o reservatório de refrigeração. No furo de 8 mm feito no tabuleiro de recolha é inserida horizontalmente uma peça construída a partir de varão roscado M8 soldado a uma anilha, limada e pintada com primário à base de zinco. Esta peça é apertada com duas porcas para permitir variação da distância como exposto na figura 64. Na ponta desta peça é apertado um varão com duas porcas que permite regular a altura, fixo também com duas porcas a um tubo quadrado de 12 mm furado verticalmente para permitir este encaixe e com quatro furos horizontais que permitem que seja fixo à base, com quatro parafusos tirefond de 6 mm de diâmetro 50 mm de comprimento.



Figura 64. Sistema de encaixe entre a base e o reservatório de refrigeração.

A camisa do fuso da extrusora foi construída a partir de tubo mecânico, normalmente utilizado em sistemas hidráulicos, com 25 mm de diâmetro interno e parede com espessura de 6 mm. Este tubo foi escolhido por não ter costura e a sua espessura permitiu que tenha sido torneado (como ilustrado na figura 65) para cavar 3 mm em cinco zonas para colocação das resistências de aquecimento uniformemente enroladas.



Figura 65. Torneamento da camisa.

Na zona de alimentação foram torneadas alhetas com o formato exposto na figura 66 para permitir dissipação de calor, evitando derretimento prematuro do plástico. Uma ventoinha colocada por baixo da zona de alimentação e fixa à placa por varão roscado de 4 mm permite uma maior dissipação de calor por convecção forçada na zona alhetada.



Figura 66. Zona alhetada da camisa.

As zonas das resistências são separadas por zonas não torneadas com 20 mm de comprimento onde apertam os apoios que fixam o tubo à base. Na zona de alimentação foi feito um corte longitudinal visível na figura 72, de maneira a criar um entalhe para permitir a alimentação de plástico, feita através de um funil de alimentação que encaixa neste corte. Na zona do tubo que coincide com a zona do fuso desenhada para ser aplicado vácuo foi feito um furo com 12 mm de diâmetro para permitir uma tomada de vácuo. Este furo foi limado no lado para o qual roda o fuso, para reduzir a probabilidade de haver escape de material nesta zona como estudado no capítulo 4 e esquematizado na figura 31 (b) desse mesmo capítulo. A tomada foi feita a partir de um tubo com 21 mm de diâmetro cortado com 35 mm de comprimento, torneado no topo para criar uma ranhura que permitisse o encaixe de um vidro resistente a altas temperaturas, com 20 mm de diâmetro e colado com massa refratária. Este vidro serve para se poder observar a zona de vácuo durante o funcionamento da máquina e diagnosticar o processo. A base deste tubo foi limada para que encaixe perfeitamente na camisa, podendo-se assim soldar a TIG com o mínimo de adição de material possível. Este tipo de soldadura foi escolhida porque permitir uma superfície com melhor acabamento e menor porosidade, reduzindo a probabilidade de fugas nesta zona. Junto ao topo desta peça foi feito um furo de 8,5 mm para soldar também a TIG um adaptador que encaixa ao tubo que liga à bomba de vácuo. Este encaixe foi torneado a partir de um veio de 10 mm e furado com uma broca de 4 mm. O resultado pode ser analisado na figura 67, na qual para questões de visualização se introduziu uma secção do fuso no interior da camisa, secção esta que foi impressa em PLA vermelho na máquina de FDM que será abordada mais à frente.



Figura 67. Tomada de vácuo com vista para o interior e encaixe para um termopar.

No meio de cada zona de resistências foram soldadas duas porcas de $\frac{1}{4}$ de polegada para encaixe dos termopares, observável também na figura 67 para que se possa medir a temperatura por zona e controlar as resistências com base nessa informação. O interior do tubo foi lixado com uma lixa de grão 60, longitudinalmente, para criar uma textura favorável à aderência do material e assim permitir um melhor fluxo como discutido anteriormente no capítulo 4. Por fim, o interior do tubo foi isolado e o exterior pintado com tinta resistente a altas temperaturas. Em cada zona designada à colocação de resistências foram colocadas resistências de 500 W com 1 m de comprimento, expostas na figura 68 já isoladas eletricamente.



Figura 68. Resistências de 500 W isoladas eletricamente.

Estas resistências foram enroladas o mais uniformemente possível ao longo de cada zona, conforme exposto na figura 69. Estas resistências funcionam a 230 V AC para que possam ser ligadas diretamente à rede e não tenha que ser utilizada uma fonte de alimentação capaz de fornecer 2500 W de potência.



Figura 69. Camisa com todas as resistências enroladas.

A camisa do fuso é posicionada na placa através de quatro peças representadas na figura 70 feitas com barra de aço de 3 mm por 15 mm dobrada, cortada, soldada limada, furada e pintada com tinta resistente a altas temperaturas, criando um encaixe que permite remover a camisa para limpeza e manutenção, desapertando apenas parafusos dos encaixes. Estes são fixos à placa através de dois parafusos M5.



Figura 70. Peça para fixação da camisa à base da extrusora.

Para a alimentação da extrusora foi feito um funil com reservatório. Este reservatório foi feito a partir de um recipiente cilíndrico transparente com tampa, ao qual foi cortado o fundo rodando-o repetitivamente contra uma lâmina fixa a uma placa de 5 mm para que o corte seja uniforme, processo este ilustrado na figura 71.



Figura 71. Ilustração do processo de corte do recipiente para conexão ao funil.

A construção do funil foi complexa, uma vez que na sua base possui uma forma retangular, que se adapta à zona de alimentação da camisa do fuso e termina na base do reservatório que é circular. Este funil começou por ser executado através da sua parte inferior. Um aro retangular com o comprimento do corte da camisa e largura interna igual ao diâmetro do fuso foi feito com chapa de 6 mm, soldado e limado. Posteriormente, chapas de 2 mm cortadas de acordo com os desenhos técnicos em anexo foram soldadas a este aro e entre si, sendo depois dada uma forma circular à zona do topo. Um aro com 20 mm de altura foi feito para encaixar no reservatório e quando a forma do funil se aproximou da do aro, este foi soldado. A base do funil foi limada para encaixar o melhor possível na zona de alimentação. Na fresa foi cortada a zona redonda lateral de encaixe à camisa. Os poros característicos da soldadura a elétrodo foram tapados com cola e vedante à base de poliuretano e foi pintado com primário à base de zinco e tinta acrílica, estando o resultado presente na figura 72.



Figura 72. Zona de alimentação constituída pelo reservatório, funil e corte longitudinal.

A lateral da base foi furada para permitir que sejam colocados, sem interferir com a alimentação, parafusos de regada quadrada pertencentes ao sistema de encaixe à base. Este encaixe é feito com quatro peças construídas a partir de varão roscado soldado a uma anilha, limado e pintado com primário à base de zinco, que prendem ao parafuso de regada quadrada inserido anteriormente e são apertados à base.

A rotação do fuso é causada por um motor elétrico que transmite potência ao veio através de duas rodas dentadas conectadas por uma corrente encurtada ao comprimento da transmissão. O motor elétrico utilizado é um BOSCH BPH 12V, utilizado em assentos elétricos de carros que funciona a 12 V DC. Este motor teve que ser adaptado, sendo feita uma peça que permite apertar com dois parafusos a roda dentada pretendida para fazer a transmissão, como exposto na figura 73. Esta peça foi cravada e colada ao motor com cola epóxi, sendo posteriormente pintada com tinta acrílica. A razão da transmissão é 1:1, uma vez que o motor já vem com caixa redutora, e a velocidade de rotação quando alimentado à tensão de 12 V e sem aplicação de uma carga é de 75 RPM, o que é uma boa velocidade de rotação máxima para o que se pretende, podendo esta ser reduzida através da alimentação.



Figura 73. Conexão cravada no motor para apertar na roda dentada.

O suporte do motor foi feito com chapa de 5 mm cortada de acordo com a figura 74, dobrada, limada e furada de maneira a que o motor encaixe e possa ser colocada na base com o mínimo de interferência possível nas outras componentes da máquina.



Figura 74. Primeiros passos para a construção do suporte do motor.

Os furos de aperto ao motor foram escareados para que se possam utilizar parafusos com cabeça de embeber evitando assim interferência entre a cabeça do parafuso e a peça de encaixe à roda dentada, permitindo a configuração mais curta possível para que o momento fletor seja também o menor possível. Foi ainda feito um furo com diâmetro de 29 mm no centro destes três furos para a passagem do veio do motor e criado um rasgo na peça que permite a remoção do motor do suporte sem que se tenha que descravar e descolar a peça de encaixe à roda dentada. A roda dentada que é fixa ao veio do fuso foi furada no sentido radial e criou-se rosca para ser acrescentado um perno roscado que não a permite deslizar no veio, esta configuração pode ser observada na figura 75.



Figura 75. Sistema de tração.

Foi também criada uma peça com chapa de 6 mm soldada a um pedaço de tubo com 40 mm de diâmetro interno cortado e torneado, furado em três pontos onde se abriu rosca para colocar pernos roscados para prender uma chumaceira radial. Esta peça é apertada ao suporte do motor com o objetivo de não permitir que haja flexão no veio causada pela transmissão de potência. Esta chumaceira não seria necessária se a transmissão de potência ao veio fosse feita no sentido axial do fuso.

O suporte da chumaceira axial foi construído a partir de barra de aço de 3 mm por 15 mm. De acordo com o desenho técnico, foi unido a um encaixe feito com um pedaço de tubo com 40 mm de diâmetro interno cortado e torneado, soldado a uma chapa de 6 mm furada para permitir a passagem do veio e apertada ao suporte apenas quando a camisa estiver montada de acordo com a figura 75 na placa e o fuso for colocado, para que a excentricidade seja o mais reduzida possível.

O veio que antecede o fuso é onde se acopla a roda dentada de transmissão, a chumaceira radial e a chumaceira axial. Esta parte do veio teve que ser feita em duas partes visíveis na figura 76, para que se possa encaixar a chumaceira axial que se encontra depois das outras duas peças, cujo diâmetro de encaixe é menor.



Figura 76. Encaixes que unem o fuso à roda de transmissão e chumaceiras.

As peças foram produzidas a partir do desenho CAD, que foi utilizado para fazer o CAM e a sua maquinação no torno CNC. Após esta maquinação, apresentada na figura 77, obtiveram-se as peças, que ficaram com um encaixe perfeito nas chumaceiras, mas a roda dentada teve que ser maquinada internamente por possuir riscos no seu interior que impediram o encaixe. Um breve processo de torneamento com uma lixa assegurou um encaixe justo.



Figura 77. Maquinação das peças que unem o fuso à roda de transmissão e às chumaceiras.

A cabeça da extrusora foi também maquinada no torno mecânico CNC. Posteriormente o seu interior foi fresado para conferir um ângulo mais suave (o torno não possui ferramenta para esta maquinação) e foi furada na zona de colocação do termopar para que este esteja o mais próximo da massa fundida como recomendado no capítulo 4 e foi soldada uma porca acima deste furo para que o termopar possa ser apertado. De seguida, foram feitos três furos igualmente espaçados em torno da zona de encaixe à camisa. Nestes furos foi aberta rosca M6 para aplicar três pernos, de maneira a que esta cabeça fique fixa à camisa durante a extrusão. Por fim, foi aplicada massa refratária em torno da ponta desta cabeça para a isolar eletricamente e foi criada uma Saliência para que se possa enrolar uma resistência de aquecimento, assegurando assim que esta zona se mantém aquecida. Todo este processo pode ser observado na figura 78.



Figura 78. Processo de fabrico da cabeça.

O tracionador foi feito a partir de seis peças impressas e montadas com cola epóxi. A impressão foi realizada em PLA e feita a partir do modelo CAD, que foi processado para ser utilizado na impressora. Foi necessário um processamento pós impressão, já que furos e rasgos impressos geralmente são ligeiramente menores do que o desenhado, e por isso foram limados para permitir um encaixe justo. O resultado da impressão das peças pode ser analisado na figura 79.



Figura 79. Primeira fase da construção do tracionador.

Após esta impressão verificou-se a necessidade de alargar o tracionador para colocar anilhas que diminuíssem o atrito entre os rolos de borracha e a peça. Para tal, imprimiram-se duas peças como a que se pode observar na figura 79 à direita, mas alteradas com um milímetro extra de comprimento, sendo acrescentadas duas anilhas de latão de cada lado. Foi também desenhado um suporte que permitiu o encaixe do motor para mover o sistema e após a montagem foi feito um teste com filamento para ver se o sistema era funcional, sendo daí tirada a necessidade de duas modificações: em primeiro lugar, o motor não possuía a potência suficiente e foi trocado por um mais potente, o que exigiu que um novo suporte fosse dimensionado, e a segunda alteração consistiu em acrescentar um guia para permitir que o filamento não se desviasse e ficasse entalado entre o rolo e a peça onde este encaixa, sendo o resultado final observável na figura 80.



Figura 80. Versão final do tracionador.

Por fim, todo o sistema foi lubrificado com massa de lítio para reduzir ainda mais o atrito entre as peças móveis e dois elásticos foram colocados nas chumaceiras plásticas para que o rolo superior pressione contra o rolo inferior.

Este tracionador tem que ser fixo ao reservatório, e se bem que a primeira hipótese possa ser a furação deste e aperto com parafusos, esta seria uma hipótese limitadora, já que iria impossibilitar a variação da posição do tracionador em relação ao reservatório. Pretende-se que a fixação permita que o tracionador possa ser ajustado de acordo com a forma com que é extrudido o filamento e de acordo com a inclinação do reservatório. Para tal foi feito um suporte que fixa o tracionador em três cuja distância ao reservatório pode variar através do posicionamento da porca e contraporca. Este sistema fixa ao reservatório com três pernos apertados na chapa de 5 mm que constitui o suporte, chapa que foi escolhida com esta

espessura para evitar que a utilização de pernos como método de fixação resultasse na sua dobragem, e para permitir a abertura de rosca para encaixe destes pernos. O resultado pode ser observado na figura 81 após ser soldado, limado e pintado.



Figura 81. Suporte do tracionador.

O fuso, tal como foi dito anteriormente, tem que ser produzido numa máquina CNC, já que um torno comum não permite a sua execução devido à forma complexa. A sua maquinação no torno CNC do Laboratório de Fabricação a UBI também não é simples, uma vez que o torno tem um comprimento de trabalho relativamente curto que fica mais curto ainda quando se utiliza uma broca como ferramenta, que é indispensável como será demonstrado.

O comprimento máximo da peça a maquinar é de 147 mm. Considerando uma margem de segurança de 7 mm, o comprimento máximo é reduzido a 140 mm. Ou seja, o fuso teve que ser dividido em 7 peças.

Para além desta divisão, é necessário dimensionar um encaixe que permita que a hélice do fuso bata certo entre as peças, não havendo empeno do fuso já que este resultaria na inutilização do fuso por raspar nas paredes da camisa.

A primeira hipótese residiu em soldar as partes, mas esta solução tinha uma grande probabilidade de resultar num empeno do fuso, com inutilização subsequente. Outra solução passou por dimensionar um encaixe oval, já que a força de reação do fuso é no sentido oposto ao fluxo do plástico, pelo que as peças não deveriam desencaixar. No entanto, formas ovais não podem ser feitas num torno mecânico. Dada a impossibilidade desta solução, outra poderia residir na criação de uma rosca. Mais uma vez, também esta ideia se provou impossível de executar, já que não existem ferramentas que entrem dentro de um furo de 13 mm para fazer uma rosca de passo largo, e abrir rosca com um macho iria certamente

resultar na hélice não se unir no mesmo ponto entre os dois encaixes, como mostrado na figura 82.



Figura 82. Previsão de problemas relacionados com uma união roscada.

Por fim, a única hipótese que sobrou foi a utilização de um furo de 13 mm na extremidade esquerda de cada uma das peças, e a maquinação do veio a um cilindro de 13 mm na extremidade direita de cada uma das peças. Após a maquinação, este será posicionado com as hélices coincidentes nos encaixes e será furado nesta zona, sendo um pino posto e soldado a TIG dando o mínimo de calor possível para evitar empenos. Por fim, esta soldadura seria limada de maneira a criar o mínimo impacto possível na extrusão. O resultado do dimensionamento destas peças já foi abordado na fase do desenho e pode ser observado na figura 59.

Uma vez que a impossibilidade de ter este fuso produzido a tempo do fim do presente trabalho, procurou-se à ajuda de torneiros da região, mas uma vez que nenhum ofereceu uma solução viável quer em termos de tempo, quer em termos de custos recorreu-se à última alternativa para a sua realização com vista a uma máquina funcional, a execução de um fuso manualmente. Para tal começou-se por simplificar o que seria um fuso de barreira para um fuso convencional de apenas uma hélice, mantendo o resto das dimensões do fuso desenhado. Foi feito o desenho técnico presente em anexo de um fuso sem variação de profundidade para ser mais rápido, já que este serviu apenas para guiar o processo de construção.

Partiu-se de um veio com 25 mm de diâmetro, ao qual foi soldada uma manivela e feito um encaixe em madeira, permitindo que este pudesse ser rodado durante o seu processo de fabrico, como se pode ver na figura 83.



Figura 83. Suporte para o veio.

Após isto foi enrolada fita de papel com 24 mm de largura, ao longo do veio, com 1 mm de espaçamento (para perfazer um passo de 25 mm, ou seja, 1D, tal como dimensionado) a partir do qual foi feito um corte com retificadora, usando um disco de corte ao longo de toda a fita. Após este corte e utilizando este corte como guia, com uma lâmina espaçada 2,5 mm de outra lâmina que entra no corte, foi cortada uma tira de fita ao longo de todo o veio, sobrando uma tira adjacente ao corte com 2,5 mm de espessura, sendo então a partir desta fita feito um novo corte, processo ilustrado na figura 84.



Figura 84. Processo de construção do fuso.

Nesta figura pode-se visualizar, por ordem da esquerda para a direita, o veio com a fita enrolada, a ferramenta para cortar uma tira com 2,5 mm ao longo do diâmetro, o veio com os dois cortes que delimitam a hélice e o início da fase seguinte, que foi a que consumiu mais tempo, e consistiu no desbaste do canal do fuso, utilizando a retificadora com um disco de limar para desbastes maiores e disco de lixa para desbastes perto da hélice, para que esta não fique danificada acidentalmente. Estes desbastes foram realizados com profundidades variáveis de acordo com a zona do fuso projetada anteriormente. Para conferir um melhor acabamento, o fuso foi limado enquanto se rodava, passando para lixas com grão sucessivamente menos abrasivo. Por fim, a hélice do fuso foi desbastada para permitir uma folga entre esta e a camisa, estando o produto final ilustrado na figura 85.



Figura 85. Resultado da produção do fuso.

Este é obviamente um processo que não permite o rigor de um torno mecânico CNC, mas para questões de testes, desde que se tenha em consideração as perdas na eficiência da extrusão deverá ser funcional.

Na montagem da máquina houve interferência entre o fuso e a camisa, que acabou por se descobrir ser empeno da camisa, este empeno foi retirado na prensa hidráulica do laboratório de materiais como se pode ver na figura 86



Figura 86. Desempeno da camisa.

6.3.2. Sistema de controlo

Estava previsto, durante o início da fase de projeto da presente dissertação fazer o controlo de acordo com o esquematizado na figura 42. No entanto, para tentar obter o máximo de resultados possível num curto espaço de tempo, foi necessário abdicar de grande parte deste sistema, sendo o controlo por parte do microcontrolador resumido à manutenção da temperatura do sistema. Para tal foram utilizados seis SSR-25 DA da Fotek, ligados às resistências de aquecimento permitindo assim o seu controlo por parte do microprocessador, também ligado a um termopar por cada zona ligados entre si e ao microprocessador através do barramento visível na figura 87, para que a temperatura possa ser medida e ajustada.

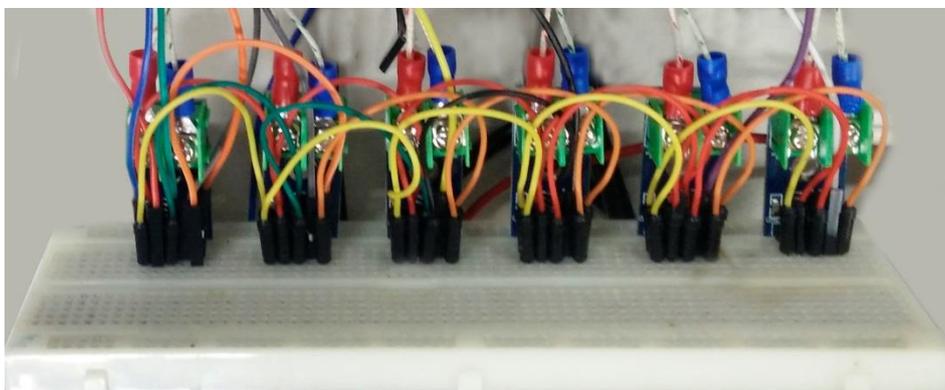


Figura 87. Barramento de termopares.

A programação desenvolvida com vista a manter o perfil de temperaturas desejado relativamente constante ao longo da extrusão com uma margem de 2°C além do erro de medição do termopar. Ou seja, se a temperatura estiver 2°C acima da pretendida desligam-se as resistências, se a temperatura medida estiver 2°C abaixo do pretendido ligam-se as resistências. O resto do controlo, que se resume ao controlo da rotação do fuso, controlo da velocidade do tracionador, controlo da bomba de água e bomba de vácuo é feito manualmente através dos controlos de fontes de alimentação, que permitem variar a velocidade dos motores através da variação da tensão e da corrente.

O controlo da espessura do filamento é também feito manualmente com o auxílio de um paquímetro.

6.4. Equipamento auxiliar

Com a extrusora é pretendido converter garrafas plásticas e outros objetos descartados, construídos em PET em filamento utilizável numa máquina FDM. Esta máquina deve ter como *input* floco de PET e como *output* filamento com 1,75 mm \pm 0,06 mm de diâmetro. Para tal, é necessário equipamento auxiliar: em primeiro lugar, para produzir floco de PET a partir de garrafas e outras embalagens descartáveis é necessário uma trituradora. Em segundo lugar, para se conseguir testar o filamento é necessária uma impressora que o utilize.

6.4.1. Trituradora

A trituradora é utilizada para desfazer as embalagens de PET em flocos com um tamanho relativamente uniforme, serve para simplificar e acelerar um processo que seria demasiado moroso se fosse realizado manualmente.

6.4.1.1. Projeto

A construção e desenho da máquina foram baseados em máquinas já existentes, tais como a de Dave Hakkens (Hakkens, 2013) Aleksandar Kapelan (Kapelan, 2015) e Reza Deabae (Deabae, 2015), por isso não houve um projeto detalhado envolvido. O facto de ser um equipamento auxiliar não incorreu num estudo deste tipo de máquinas, sendo por isso a maior parte do projeto realizado durante o desenho em CAD e execução.

Os pontos mais estudados foram as lâminas, que possuem três dentes e são feitas em aço temperado após o corte. Também necessita de anilhas para espaçar as rodas e peças para tapar os rasgos entre rodas para não permitir que o plástico enrole, e auxiliem o corte.

Uma rede por baixo da máquina permite calibrar o tamanho do floco pretendido, já que esta “peneira” o plástico cortado e apenas permite a passagem do que tiver tamanho para atravessar a rede. Se for demasiado grande volta a ser arrastado e cortado pela lâmina.

6.4.1.2. Desenho

O desenho da trituradora pode ser separado em lâminas, anilhas, espaçadores, pega armadura grelha transmissão e chumaceiras, representados na figura 88.

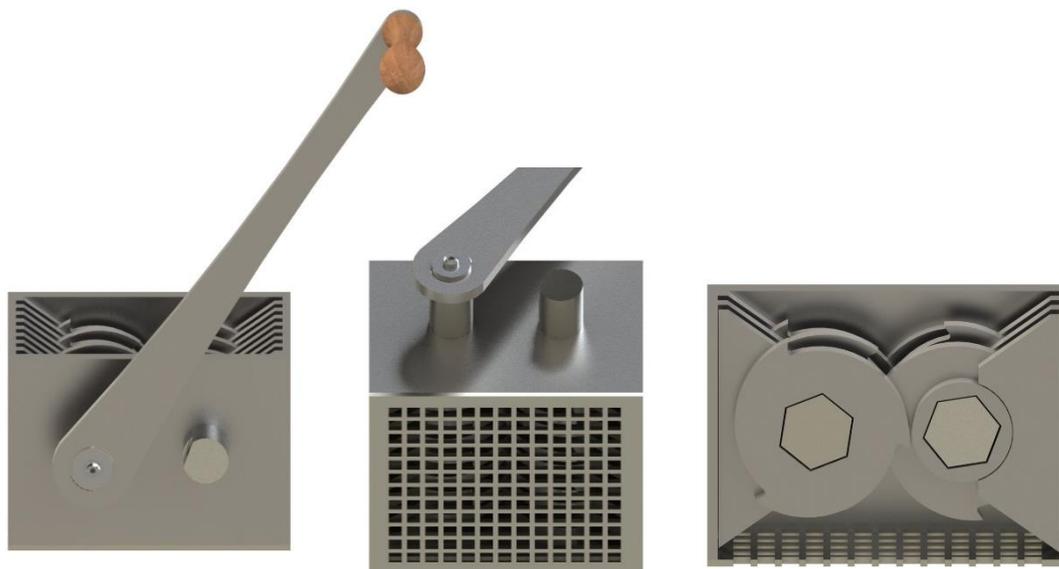


Figura 88. Duas perspetivas da trituradora de frente e baixo e vista de corte respetivamente.

Foi atribuído um número de 16 lâminas com uma espessura de 5 mm e 55 mm de diâmetro, espaçadores e anilhas também com a mesma espessura resultando num comprimento de 80 mm e uma largura de 99 mm. Na figura 89 pode-se visualizar um render da máquina montada ao lado de uma típica garrafa de 1,5l desenhada com as medidas típicas para que se tenha uma ideia da escala e da dimensão da máquina em relação ao que se pretende processar nesta.



Figura 89. Trituradora de plástico e garrafa de 1,5L para visualização do tamanho.

6.4.1.3. Construção

A construção da trituradora não chegou a ser feita porque esta dependia da máquina de corte a jato de água do Laboratório de Fabricação da Universidade da Beira Interior, não disponível no momento. Para produzir flocos alternativamente pode-se recorrer a uma máquina de triturar papel, que apesar de poder servir o propósito, poderá sofrer um grande desgaste e tornar o processo mais moroso.

6.4.2. Máquina de FDM

Para que se pudesse testar o filamento produzido e comparar com o existente no mercado, houve a necessidade de utilizar uma máquina de FDM. Foi então adquirido o *kit* que se pode ver na figura 90 de uma Kossel Mini, a RepRap delta mais comum, na loja 3d_professional_shop do eBay.



Figura 90. Kit de montagem da impressora e algumas das ferramentas utilizadas.

O processo de montagem durou cerca de 10h, dividido ao longo de vários dias já que as instruções fornecidas não eram da mesma máquina por isso tinham falta de informação, especialmente no que diz respeito à ligação dos sensores e atuadores da máquina. Algumas peças também tiveram que ser limadas e ajustadas para que pudessem encaixar. No entanto, a sua construção permitiu obter conhecimento sobre a máquina para a qual se pretende extrudir filamento de uma maneira que não seria possível de outra forma.

Apesar desses imprevistos, a máquina funcionou e tem sido utilizada como se pode ver na figura 91 desde novembro de 2015, com alguns contratempos normais de uma máquina do género, tais como entupimento e necessidade de calibração ocasional, que apesar de tudo exigem uma manutenção que desenvolve o conhecimento sobre a tecnologia. Conhecimentos no que diz respeito ao CAM, configuração dos parâmetros de impressão e a forma como estes afetam o produto final também foram desenvolvidos.



Figura 91. Impressão da zona de compressão do fuso na Kossel Mini.

6.5. Nota conclusiva

Tal como seria de esperar, a complexidade do dimensionamento e da construção da máquina provaram-se complexos e os contratempos consumiram tempo que teve que ser compensado com simplificações. O maior contratempo foi a complexidade de maquinação do fuso, que se bem expectável, exigiu mais tempo, conhecimento técnico e maquinaria sofisticada do que seria possível dispensar a tempo, comprometendo assim toda a parte prática do presente trabalho.

Se bem que muitas simplificações foram feitas, a máquina está desenhada e construída para funcionar na sua forma mais complexa, ou seja, apesar de se poder utilizar uma temperatura uniforme ao longo de toda a camisa de extrusão, também se pode configurar a máquina para funcionar com cinco zonas de temperaturas. Apesar dos motores serem controlados com o controlo da fonte de alimentação, estes podem ser ligados a um SSR e a sua velocidade ser variada através de controlo PWM programado no microcontrolador do launchpad da Texas Instruments, entre outros. Em suma, esta máquina tem suporte para ser capaz de comportar grande parte dos trabalhos futuros.

Certos sistemas da máquina também poderiam ser simplificados, ou feitos utilizando menos recursos e componentes, no entanto servem simples e eficazmente o propósito de constituir um protótipo funcional, que teria que ser dimensionado de forma diferente, mas

apresentando as mesmas propriedades, para desenvolver uma versão que pudesse ser comercializável.

7. Conclusões

7.1. Conclusões gerais

O desenvolvimento de uma extrusora para filamento utilizável numa impressora 3D é um trabalho que envolve várias áreas científicas de investigação, e por isso mesmo, complexo e exigente. Foi iniciado com o estudo do plástico a extrudir, já que cada plástico tem características que exigem diferentes propriedades da extrusora e variáveis na extrusão. A própria impressora para qual o filamento é extrudido resulta em fatores a ter em conta no projeto da extrusora.

O projeto da extrusora foi bastante complexo e tal como seria expectável num trabalho com uma forte componente prática que exige a elaboração de um projeto com tantas componentes, imprevistos e contratempos surgiram frequentemente tendo havido a constante necessidade de aplicar mudanças no projeto, desenho e execução de componentes da máquina, levando inevitavelmente a atrasos no trabalho e por fim, apesar de todos os esforços, à incapacidade de testar a máquina antes da entrega do presente estudo.

No entanto todas as componentes da máquina foram executadas e se bem que a falta de um teste em conjunto que possa comprovar a sua funcionalidade, de acordo com o estudo realizado antes de se dar início ao projeto, a máquina apresenta condições de proporcionar a operação pretendida. A execução de componentes como o fuso pode ter sido simplificada em relação ao projeto, mas não ao ponto de inviabilizar o funcionamento da máquina. A este órgão da máquina foi-lhe retirada a hélice secundária para permitir a sua execução com as ferramentas disponíveis num curto período de tempo. De forma semelhante, o sistema de monitorização e controlo foi simplificado ao máximo, sendo reduzido à monitorização da temperatura pelos termopares e controlo das resistências elétricas de aquecimento, para reduzir o tempo de execução do projeto, apesar da aquisição de todos os componentes necessários à sua total execução. O sistema de tração e chumaceiras foi realizado de acordo com o previsto apesar de ser necessário ter planos para aumento da potência transmitida ao fuso, uma vez que esta não foi dimensionada e poderá estar subdimensionada. A camisa foi o resultado de um processo iterativo entre a disponibilidade da matéria-prima e o projeto, tendo sido aproveitado o contratempo de apenas se ter encontrado tubo sem costura com parede de 6 mm para lhe adicionar características, tais como, a adição de alhetas e cavas para as resistências de aquecimento, apesar de durante este processo ter sido causado um empeno nesta camisa, retirado *A posteriori*. O sistema de aquecimento, sobredimensionado com 3250 W deverá ser suficiente para fundir o termoplástico, mesmo com a diminuição do rendimento do fuso já evidenciada, mas dever-se-á, pelo menos nos primeiros testes, limitar a potência para evitar sobreaquecimento, e conseqüente degradação do PET. A grande massa da máquina fará com que o seu aquecimento seja lento, e portanto, o ideal será aguardar que a máquina aqueça - entre em regime permanente -

antes de se iniciar a extrusão de maneira a ter a fluidez ideal do polímero (ao qual são retirados vapores pela tomada de vácuo) sem que este se degrade. Esta fluidez após a extrusão deixa de ser desejada, e por isso o plástico é arrefecido o mais rapidamente possível no sistema de refrigeração a água que deve arrefecer o filamento, à medida que este é calibrado pela velocidade com que o tracionador o puxa, para obter um filamento utilizável numa máquina de modelação por deposição de material fundido.

Este trabalho surgiu de uma ideia, mas a vontade de o realizar veio do desafio pessoal de entrar em áreas desconhecidas como eram o caso dos polímeros, impressão 3D, extrusão, microcontroladores, maquinaria CNC, entre outras e utilizando todos os conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico, aprender estes processos e desenvolver um projeto com base nessa aprendizagem, sendo assim cumprido sem sombra de dúvida um dos objetivos iniciais: o desenvolvimento do conhecimento.

O custo de matéria-prima, materiais de desgaste e ferramentas necessárias ao desenvolvimento ascendeu a cerca de 600€. Este valor poderia ser bastante mais elevado caso o trabalho não tivesse sido desenvolvido em ambiente académico, já que foram facultadas ferramentas e espaço pela universidade. Serviços como por exemplo a maquinaria CNC, soldadura TIG e equipamentos como maquinaria oficial e equipamento de laboratório poder-se-iam revelar extremamente dispendiosas, o que se tornou em mais uma ótima razão para aproveitar a oportunidade para expandir horizontes.

7.2. Sugestões de trabalhos futuros

O presente estudo deixa em aberto inúmeras sugestões de trabalhos futuros, no entanto apenas algumas serão aqui enumeradas:

Em primeiro lugar a montagem final da máquina, execução do tracionador, teste de extrusão e impressão com filamento extrudido são os trabalhos futuros mais óbvios e certamente serão brevemente executados.

De seguida, o estudo da viabilidade da máquina á extrusão de outros termoplásticos e em caso de necessidade, a sua adaptação para permitir a extrusão da máxima quantidade de termoplásticos na mesma extrusora.

A otimização da máquina e dos seus subsistemas, sendo o exemplo mais relevante a produção de um fuso em maquinaria CNC para testar a sua eficiência na extrusão e automatização do processo de extrusão e calibração do filamento como esquematizado no circuito elétrico da figura 42.

O desenvolvimento de um sistema mais compacto baseado no presente trabalho poderia dar aso a uma extrusora de filamento comercializável com um rendimento elevado e pequenas dimensões.

E por fim, um estudo económico também poderia ser feito com vista a obter o custo de produção de uma versão comercializável e o tempo e quantidade de filamento que seria necessário extrudir para que este investimento começasse a providenciar retorno.

8. Bibliografia

- 3D HUBS. (Junho de 2016). *3D Printing Trends June 2016*. Obtido de 3D HUBS: <https://www.3dhubs.com/trends>
- 3D Printing Industry. (2014). *The Free Beginner's Guide to 3D Printing*. Obtido de 3D Printing Industry - The Authority on 3D printing: <http://www.3dprintingindustry.com>
- 3dprintingfromscratch. (2016). *3D Printer Filament Types Overview*. Obtido de 3D Printing from scratch: <http://3dprintingfromscratch.com/>
- abiplast. (2014). *Processos de transformação para materiais plásticos*. Obtido de Associação Brasileira da indústria do plástico: <http://www.abiplast.org.br/>
- Aciu, R.-M., & Ciocarlie, H. (2014). G-code optimization algorithm and its application on Printed Circuit Board drilling. *IEEE 9th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)* (pp. 43-47). Timisoara: IEEE.
- ASTM D7611 / D7611M. (2013). *Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification*. West Conshohocken: ASTM International. doi:10.1520/D7611_D7611M-13E01
- Bernier, S. (14 de Novembro de 2015). *Polar 3D*. Obtido de Make:: <http://makezine.com/product-review/polar-3d/>
- Bowyer, A. (2016). *RepRap - RepRap Wiki*. Obtido de RepRap: <http://reprap.org/RepRap>
- Brown, A., & Beer, D. (2013). Development of a stereolithography (STL) slicing and G-code generation algorithm for an entry level 3-D printer. *AFRICON* (pp. 1-5). Pointe-Aux-Piments: IEEE.
- Buechler, A. (2015). *Extrusion guide book*. Obtido de Plastics News: <http://www.plastics.gl/construction/extrusion-guide-book/>
- Caliendo, H. (2013). *Changes to the resin identification system*. Obtido de Plastics today: <http://www.plasticstoday.com/>
- Canalys. (2015). *Global 3D printing market to reach \$20.2 bilion in 2019*. [Conferência de imprensa]. Obtido de <http://www.canalys.com/>
- Cerneels, J., Voet, A., Ivens, J., & Kruth, J.-P. (2013). Additive Manufacturing of Thermoplastic Composites. *Composites Week @ Leuven* (pp. 1-7). Leuven, Bélgica: KU Leuven.

- ColorFabb. (2016). *ColorFabb online store - 3D printing filament*. Obtido de <http://colorfabb.com/>
- Comb, J. W., Prideman, W. R., Leavitt, P. J., Skubic, R. L., & John, B. S. (2002). *EUA Patente N° 6,866,807 B2*.
- CONCOR. (2011). *How screw design affects processing*. Obtido de CONCOR - tool and machine: http://www.concortool.com/uploads/4/0/0/8/40089901/how_screw_design_affects_processing.pdf
- Deabae, R. (13 de Julho de 2015). *GrabCad*. Obtido em Março de 2016, de <https://grabcad.com/library/dual-shaft-shear-shredder-1>
- Demirel, B., Yaras, A., & Elçiçek, H. (2011). Crystlization Behaviour of PET Materials. *Bil Enst Dergisi Cilt*, 13, pp. 26-35.
- Dineli, F. (2011). *Problemas e soluções em peças extrudidas*. Campo Grande, Rio de Janeiro, Brasil.
- Earls, A., & Baya, V. (2014). *The road ahead for 3-D printers*. Obtido de PricewaterhouseCoopers: <http://www.pwc.com/us/en/technology-forecast/2014/3d-printing/features/future-3d-printing.html>
- English, A. R. (13 de Junho de 2012). *3D Printer Filament Buyer's Guide*. Obtido de ProtoParadigm: <http://www.protoparadigm.com/news-updates/3d-printer-filament-buyers-guide/>
- EPBP. (25 de Junho de 2012). *PET grades manufactured using monomers derived from renewable sources*. Obtido de European PET bottle platform: <http://www.epbp.org/>
- EPBP. (2015). *How to keep a sustainable PET recycling industry in Europe*. Obtido de European PET bottle platform: www.epbp.org/
- Eslami, H. (2013). *Understanding Screw Design for Film Extrusion Process*. Ontario: Macro.
- Faraj, M. G., Ibrahim, K., & Ali, M. K. (Agosto de 2011). PET as a plastic substrate for the flexible optoelectronic applications. *Optoelectronic and advanced materials - Rapid communications*, 5, pp. 879-882.
- Filabot. (2016). *3D printing filament*. Obtido de www.filabot.com
- Filastruder. (2016). *Filastruder | Make Cheap 3D Filament with the Premier At-Home Filament extruder/maker*. Obtido de <http://www.filastruder.com/>
- Geissler, T. (Dezembro de 2006). *Investigation of the flow characteristics of PET*. Obtido de ThermoFisher Scientific: <http://www.thermoscientific.com/>
- Geissler, T. (Agosto de 2015). *Improving Processing of PET*. Obtido de ThermoFisher Scientific: <http://www.thermoscientific.com/>

- GLYCON. (2015). *Classifying Feed Screw Designs*. Obtido de Glycon Corp. | Feed Screw Design & Manufacturing Michigan: http://www.glycon.com/images/Classifying_Screw_Design.pdf
- Goodfellow. (2016). *Polyethylene terephthalate*. Obtido de Online catalogue source - supplier of research materials in small quantities: <http://www.goodfellow.com>
- Greene, J. (2000). *Extrusion*. Chico, EUA: California State University.
- Hakkens, D. (2013). *Precious Plastic*. Obtido em Março de 2016, de <https://preciousplastic.com/en/videos/build/shredder/>
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). *Plastics recycling: challenges and opportunities*. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, pp. 2115-2126.
- Huang, T., Wang, S., & He, K. (2015). *Quality Control for Fused Deposition Modeling Based Additive Manufacturing: Current Research and Future Trends*. *First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE)* (pp. 1-6). Pequim: IEEE.
- Hui, Z., Yuan, Z. H., Long, Z. Y., & Wen, W. Q. (2011). *Research of Wood Plastic Composites application based on Fused Deposition Modeling technology*. *International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology* (pp. 1560-1562). Heilongjiang, China: IEEE.
- IFA. (2014). *Polyethylene Terephthalate*. Obtido de institut für arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen unfallversicherung: <http://gestis-en.itrust.de/>
- innova. (2008). *Manual de Injecção*. Obtido de Videolar: <http://www.videolar-innova.com/inovacao-tecnologia>
- Kapelan, A. (Janeiro de 2015). *GrabCad*. Obtido em Março de 2016, de <https://grabcad.com/library/shredder-knife-1>
- Kim, C., Espalin, D., Cuaron, A., Perez, M., MacDonald, E., & Wicker, R. (2015). *A Study to Detect a Material Deposition Status in Fused Deposition Modeling Technology*. *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (pp. 779-783). Busan, Coreia: IEEE.
- Kinnaman, T. (22 de Outubro de 2015). *Are we recycling too much of our trash?*
- Kuhman, J. (2015). *Why screws are designed the way they are*. Obtido de Glycon Corp. | Feed Screw Design & Manufacturing Michigan: <http://www.glycon.com/resources/white-papers>
- LeGault, M. (16 de Junho de 2009). *The rise of rapid manufacturing*. *High performance composites*.
- Makerbot. (2016). *Makerbot 3D printing platform*. Obtido de 3D printing resources and tools | Makerbot: <http://store.makerbot.com/all-printers>

- Martin, C. (2014). Devolatilization via Twin Screw Extrusion: Theory, Tips and Test Results. *International Conference on Plastic Extrusion*. Bangkok: ICPE.
- McCracken, H. (2013). How an 83-Year-Old Inventor Beat the High Cost of 3D Printing. TIME. Obtido de <http://techland.time.com/2013/03/04/how-an-83-year-old-inventor-beat-the-high-cost-of-3d-printing/>
- Michaeli, W., & Schmitz, T. (2004). Processing Polyethylene Terephthalate on a Single Screw Extruder without Predrying Using Hopper- and Melt Degassing. *ANTEC 2004 Plastics: Annual Technical Conference* (pp. 294-298). Chicago: Society of Plastics Engineers.
- Mizuno, A., & Takahashi, K. (2005). Evaluating costs and environmental impacts of production policies in recycling system. *Fourth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing* (pp. 162-167). Tokyo: IEEE.
- Monzon, M., Diaz, N., Benitez, A., Marrero, M., & Hernandez, P. (2010). Advantages of Fused Deposition Modeling for making electrically conductive plastic patterns. *International Conference on Manufacturing Automation* (pp. 37-43). Hong Kong: IEEE.
- NAPCOR. (2010). *PET Basics*. Obtido de National Association for PET Container Resources: <http://www.napcor.com/>
- Nikzad, M., Masood, S. H., Sbarski, I., & Gorth, A. (June de 2009). A Study of Melt Flow Analysis of an ABS-Iron Composite in Fused Deposition Modeling Process. *Tsinghua Science and Technology*, pp. 29-37.
- Noztek. (2016). *Noztek Filament Extrusion Systems*. Obtido de <http://www.noztek.com/>
- Papathanasiou, T. D. (2011). *Extrusion Plastics*. Obtido de Thermopedia: <http://www.thermopedia.com/content/753/>
- Patel, R., Patel, J., & Patel, S. (2014). A Review on Optimization of Process Parameters of Fused Deposition Modeling For Better Dimensional Accuracy. *International Journal of Engineering Development and Research*, pp. 1620-1624.
- Pearce, J. (2014). Rapid innovation cycles define the future for 3-D printers. (V. Baya, & B. Parker, Entrevistadores)
- PETRA. (2015). *An introduction to PET*. Obtido de PET Resin Association: <http://www.PETresin.org>
- PlasticsEurope. (Abril de 2010). *Poly-ethyleneterephthalate (PET) - Bottle Grade*. Obtido de Eco-Profiles of the European Plastics Manufacturers: <http://www.plasticseurope.org/>
- PlasticsEurope. (2015). *Plastics - the Facts 2015*. Obtido de PlasticsEurope, Association of Plastics Manufacturers: <http://www.plasticseurope.org>

- PMMI. (2015). *Global Packaging Trends Report 2015*. Greenwich: Association for Packaging and Processing Technologies.
- Rauwendaal, C. (2002). How to fix vent-flow problems. *Plastics Technology*.
- ReDeTec. (2016). *Recycle Plastic into anything you want*. Obtido de <http://www.redetec.com/>
- Reichental, A. (5 de Julho de 2012). Ready to print the future. (P. Marsh, Entrevistador)
- Sarlink. (2002). *Guidelines for the Extrusion of Sarlink*. Obtido de Sarlink Extrusion: http://www.distrupol.com/sarlink_extrusion.pdf
- Schönfeld, S., Coperion, W., & Andersen, P. (2007). Processing of non-dried PET-Bottle-Scrap using Co-rotating Twin Screw Extruders. *Global Plastics Environmental Conference* (pp. 1-15). Lindale: GPEC.
- Sculptify. (2016). *David, The Next Step in 3D Printing*. Obtido de <http://sculptify.com/>
- Sharma, V. V., & Chawla, H. (2012). Integrated Renewable Systems. *2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems* (pp. 1-6). Allahabad: IEEE.
- Sukholthaman, P., & Shirahada, K. (2015). Evaluation of self-service technology on household waste management in emerging countries: A case of Bangkok, Thailand. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology* (pp. 21-27). Portland: IEEE.
- Tormento, L. (2015). Extrusão de compostos de borracha. LT Quimicos.
- Tsuchida, A., Kawazumi, H., Kazuyoshi, A., & Yasuo, T. (2009). Identification of shredded plastics in miliseconds using Raman Spectroscopy for Recycling. *IEEE Sensors 2009 conference* (pp. 1473-1476). Christchurch: IEEE.
- Ultimaker. (2016). *Ultimaker Products*. Obtido de Ultimaker: 3D Printers: <https://ultimaker.com/en/products>
- Wang, Y., Yang, T., & Li, J. (2012). Glass transition temperature and mechanical properties in amorphous region of transformer insulation paper by molecular dynamic simulations. *International Symposium on Electrical Insulation* (pp. 164-168). San Juan: IEEE.
- Wasari, K., & Paranonsatit, S. (2009). Laser Diode Sensors for Measuring Mechanical Properties of Recycled Plastics. *6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics* (pp. 490-493). Pattaya, Chonburi: IEEE.
- Wittbrodt, B. T., Glover, A. G., Laureto, J., Anzalone, G. C., Oppliger, D., Irwin, J. L., & Pearce, J. M. (2013). Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3D printers. *Mechatronics*, pp. 713-726.

Womer, T., Smith, W., & Wheeler, R. (2006). Comparison of two different cooling methods for extrusion processes. *Annual Technical Conference - ANTEC* (pp. 796-801). Charlotte: Society of Plastics Engineers.

Wormer, T. (2011). The evolution of screw design technology for the injection molding process. *Plastics Trends*.

Wormer, T. (2011). Things your screw designer never told you about screws.

Anexos

Anexo A - Desenhos técnicos

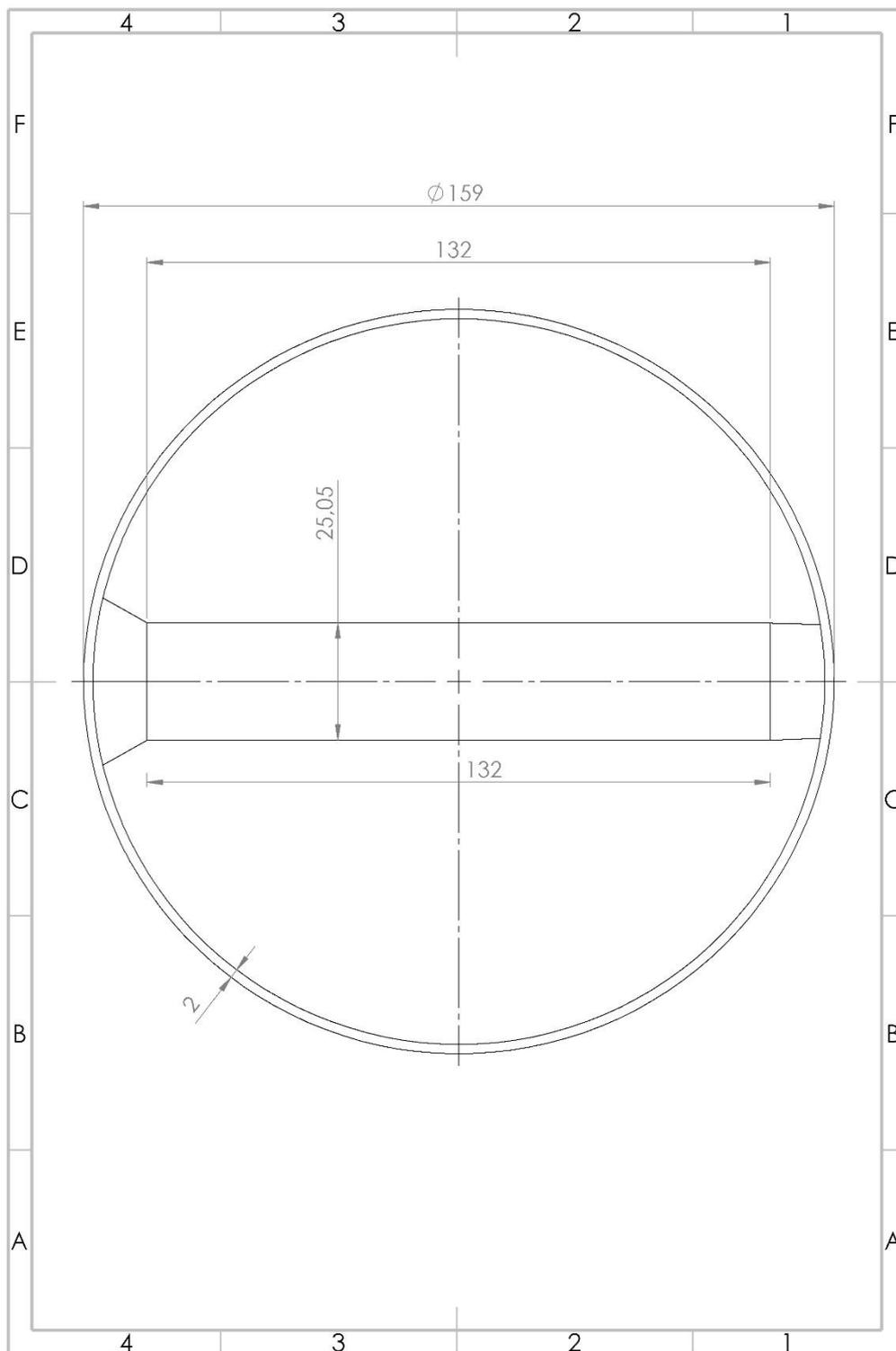


Figura 92. Desenho técnico do funil de alimentação, vista de cima.

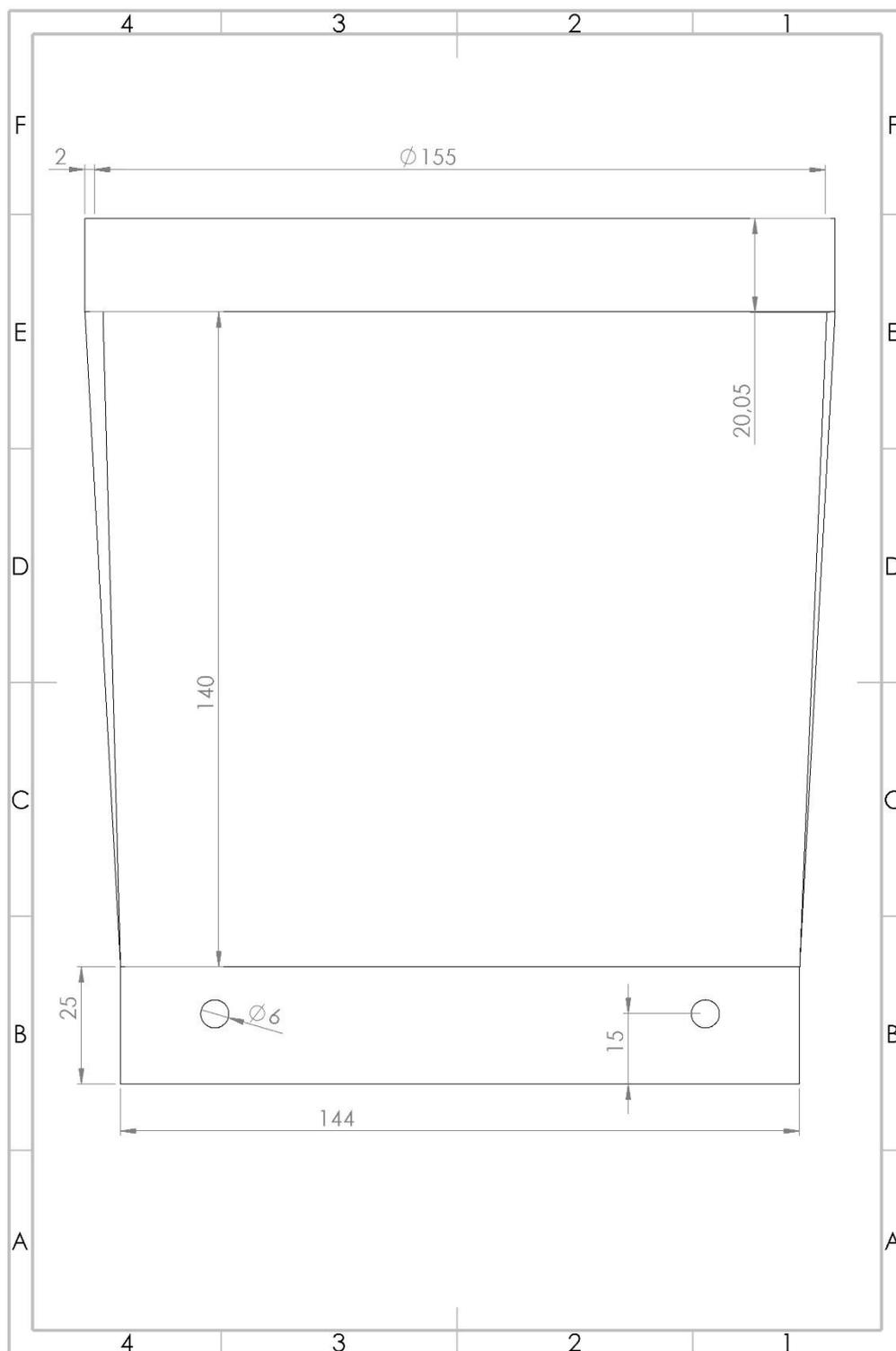


Figura 93. Desenho técnico do funil de alimentação, vista de frente.

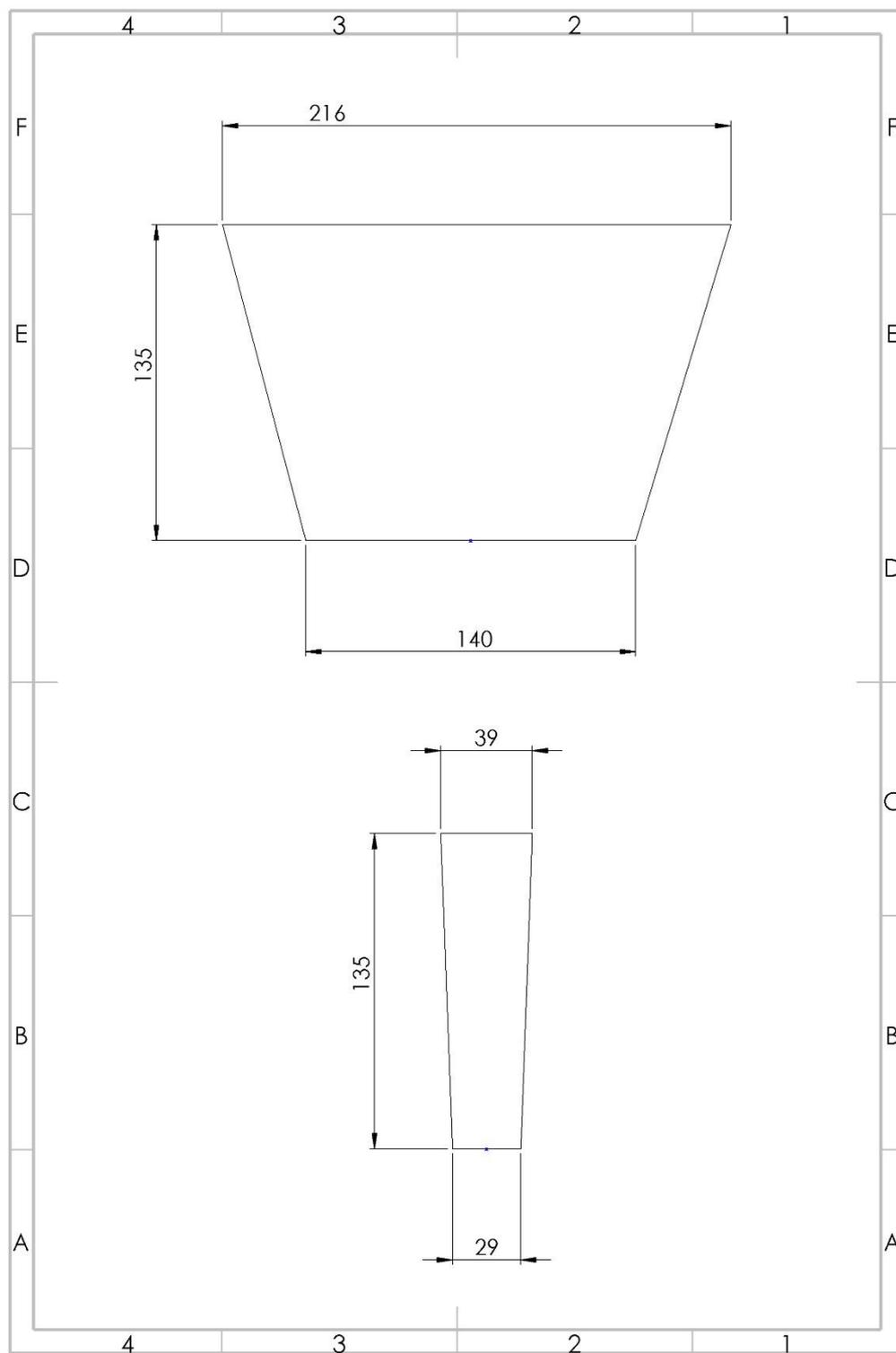


Figura 94. Desenho técnico da planificação do funil de alimentação, peças que unem a base ao topo.

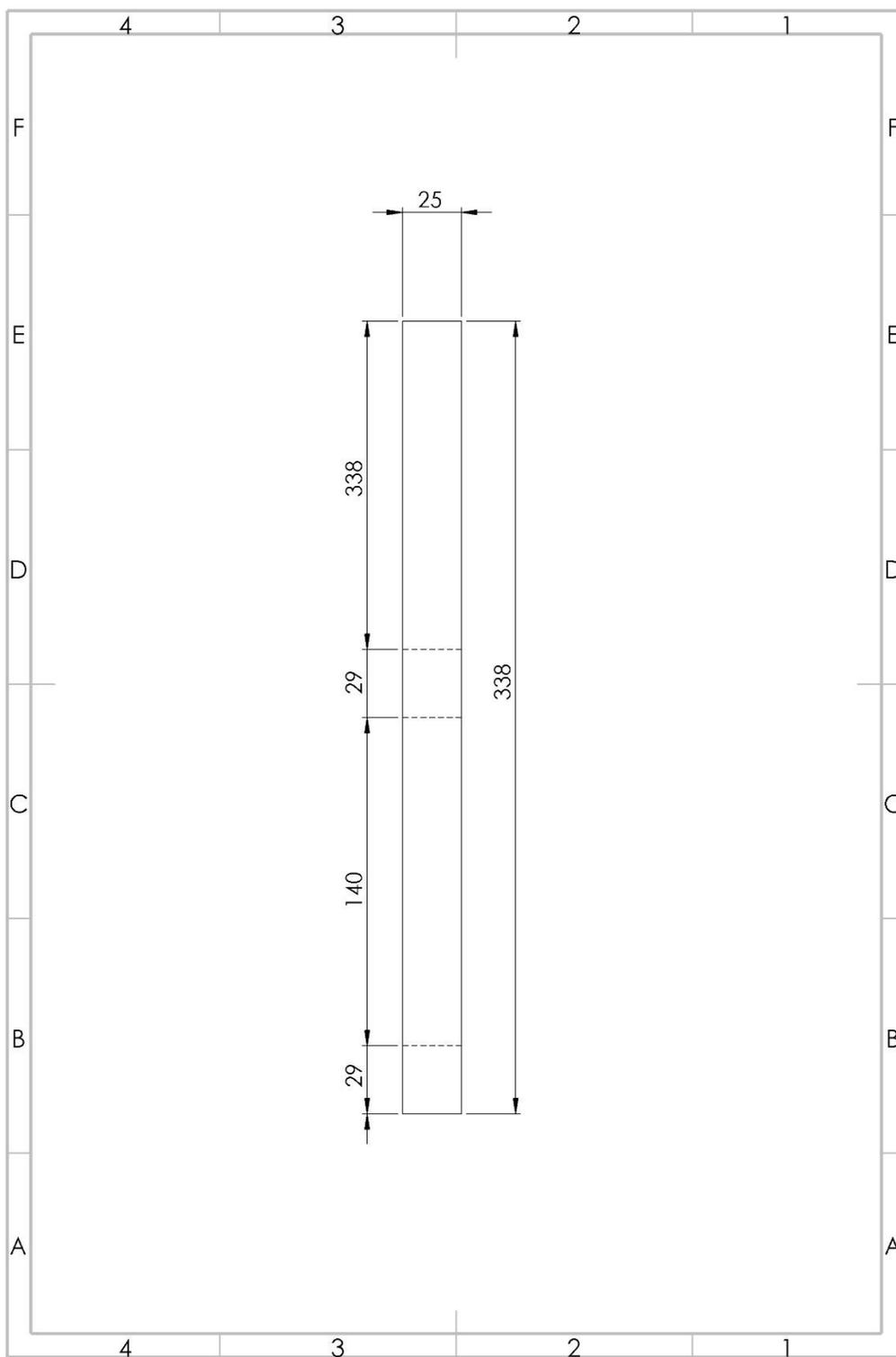


Figura 95. Desenho técnico da planificação do funil de alimentação, retângulo da base.

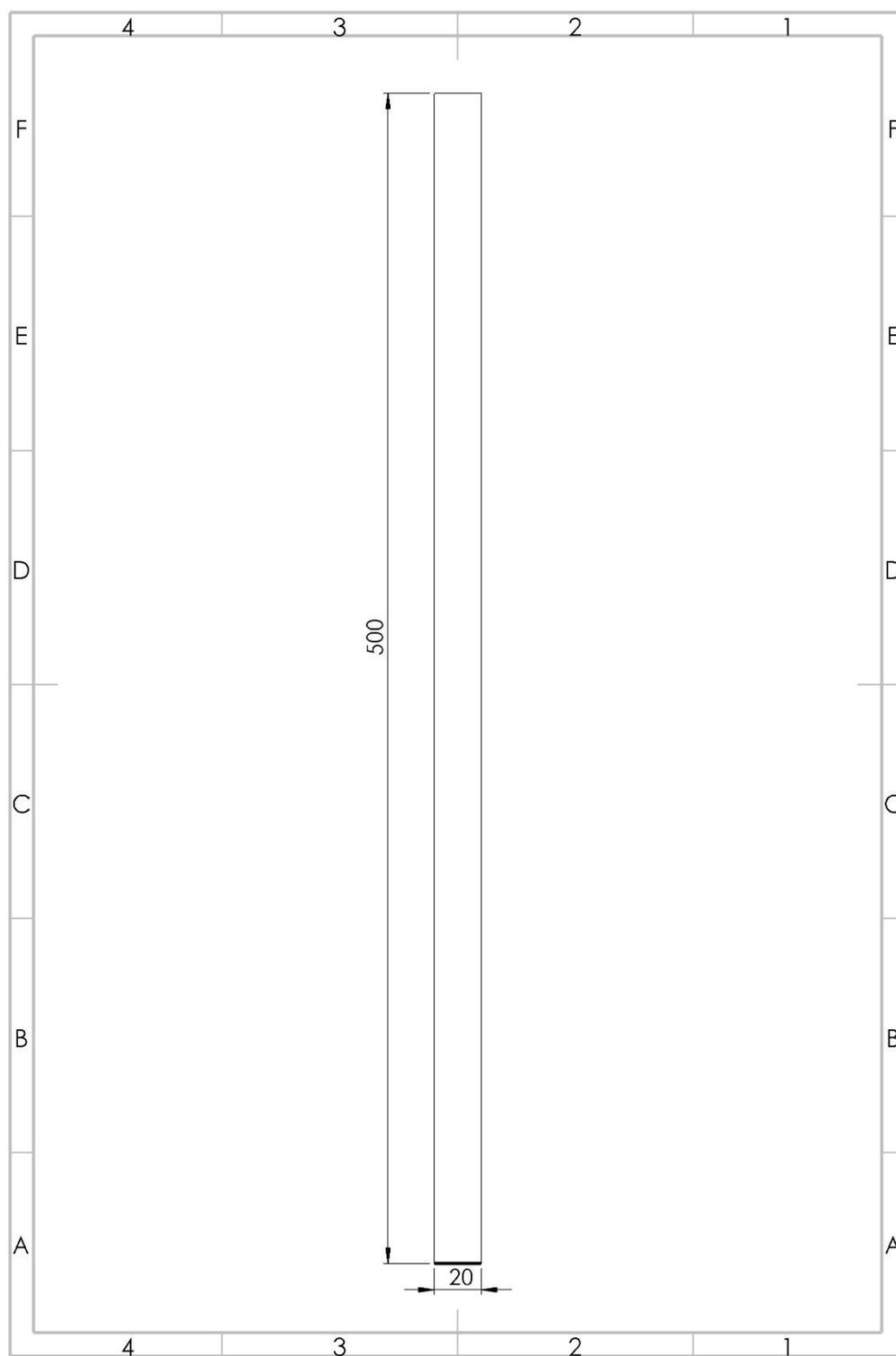


Figura 96. Desenho técnico da planificação do funil de alimentação, aro do topo.

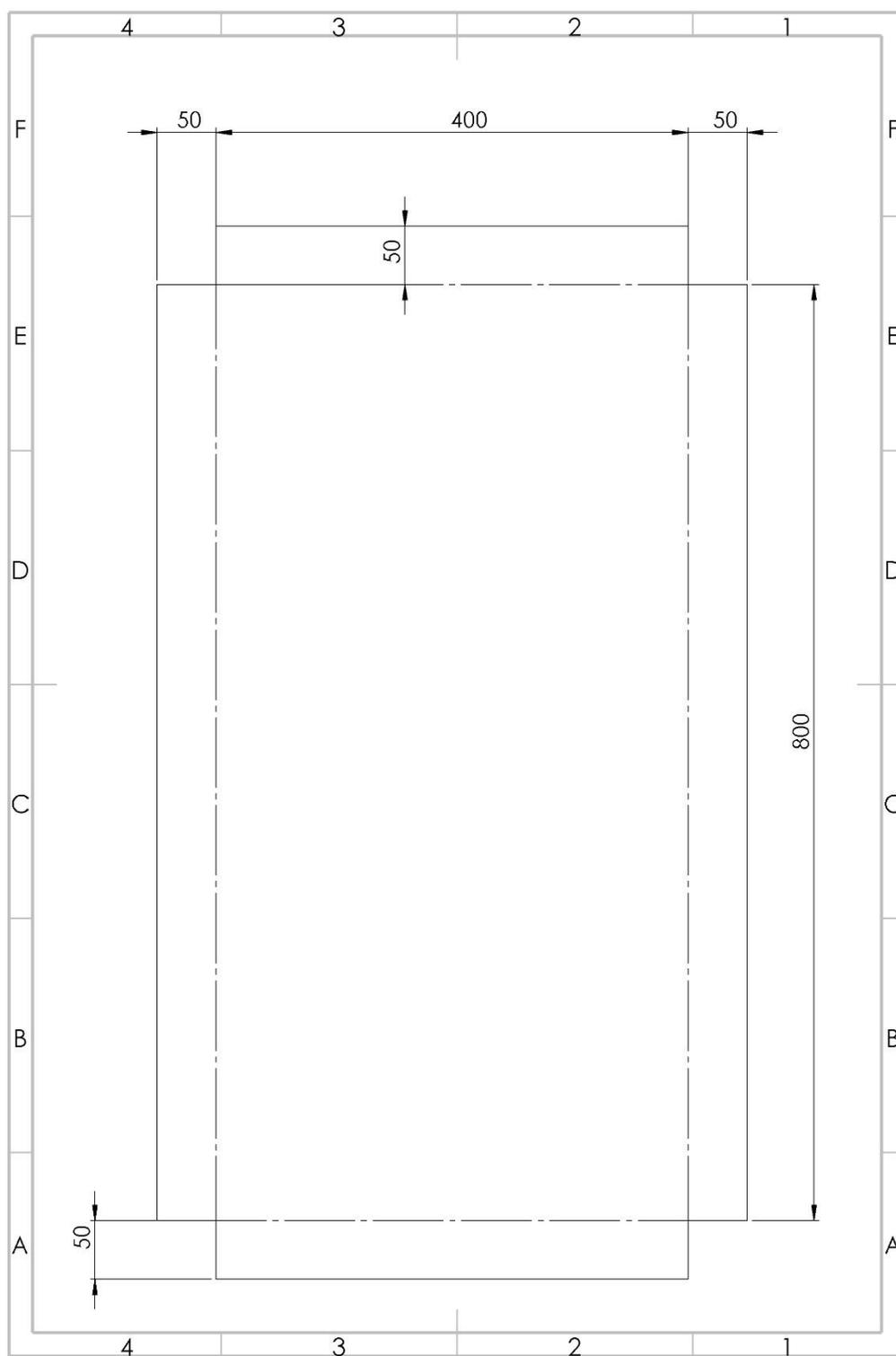


Figura 97. Desenho técnico da planificação do tabuleiro de refrigeração, tabuleiro de recolha.

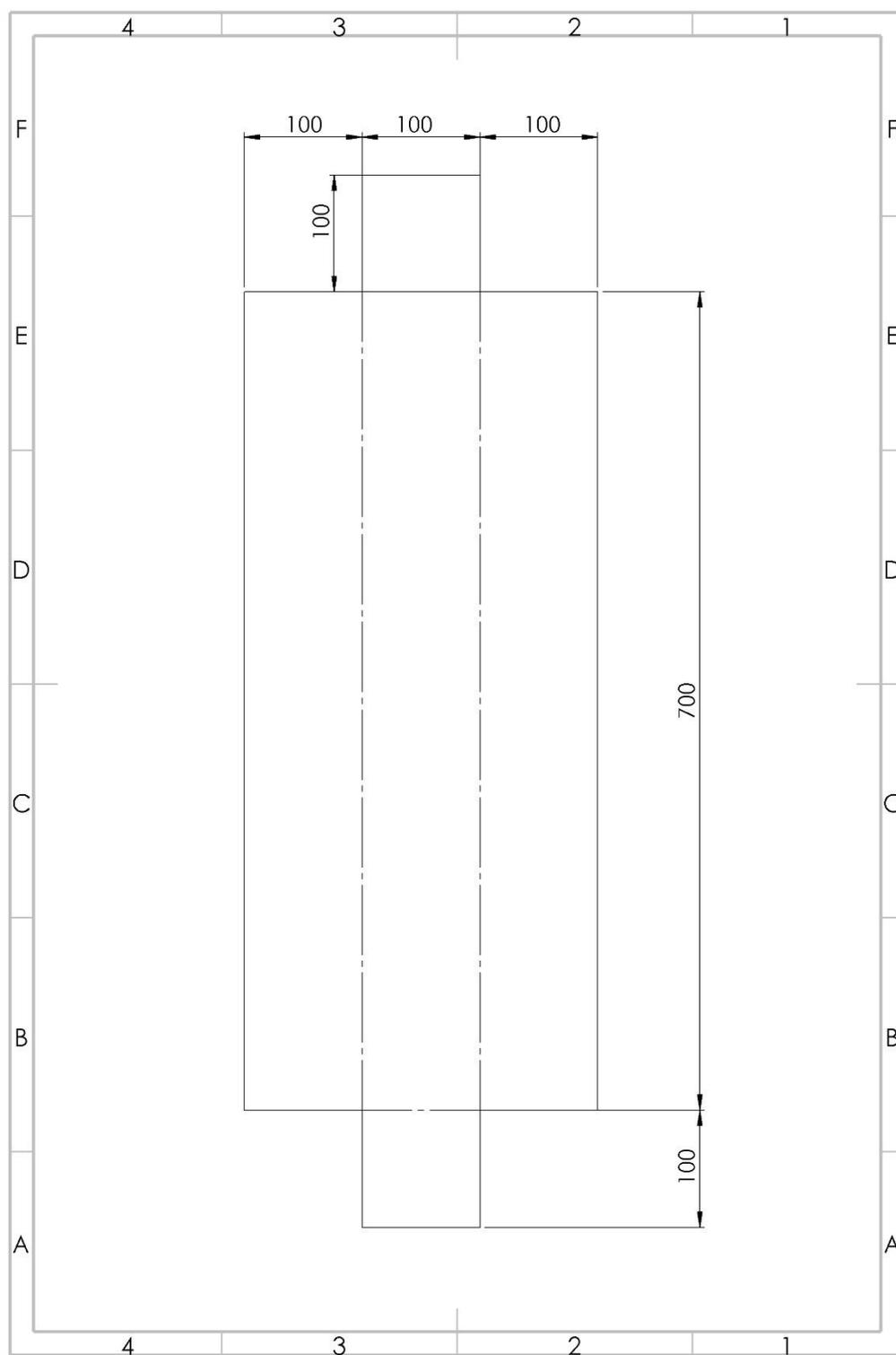


Figura 98. Desenho técnico da planificação do tabuleiro de refrigeração, tabuleiro de arrefecimento

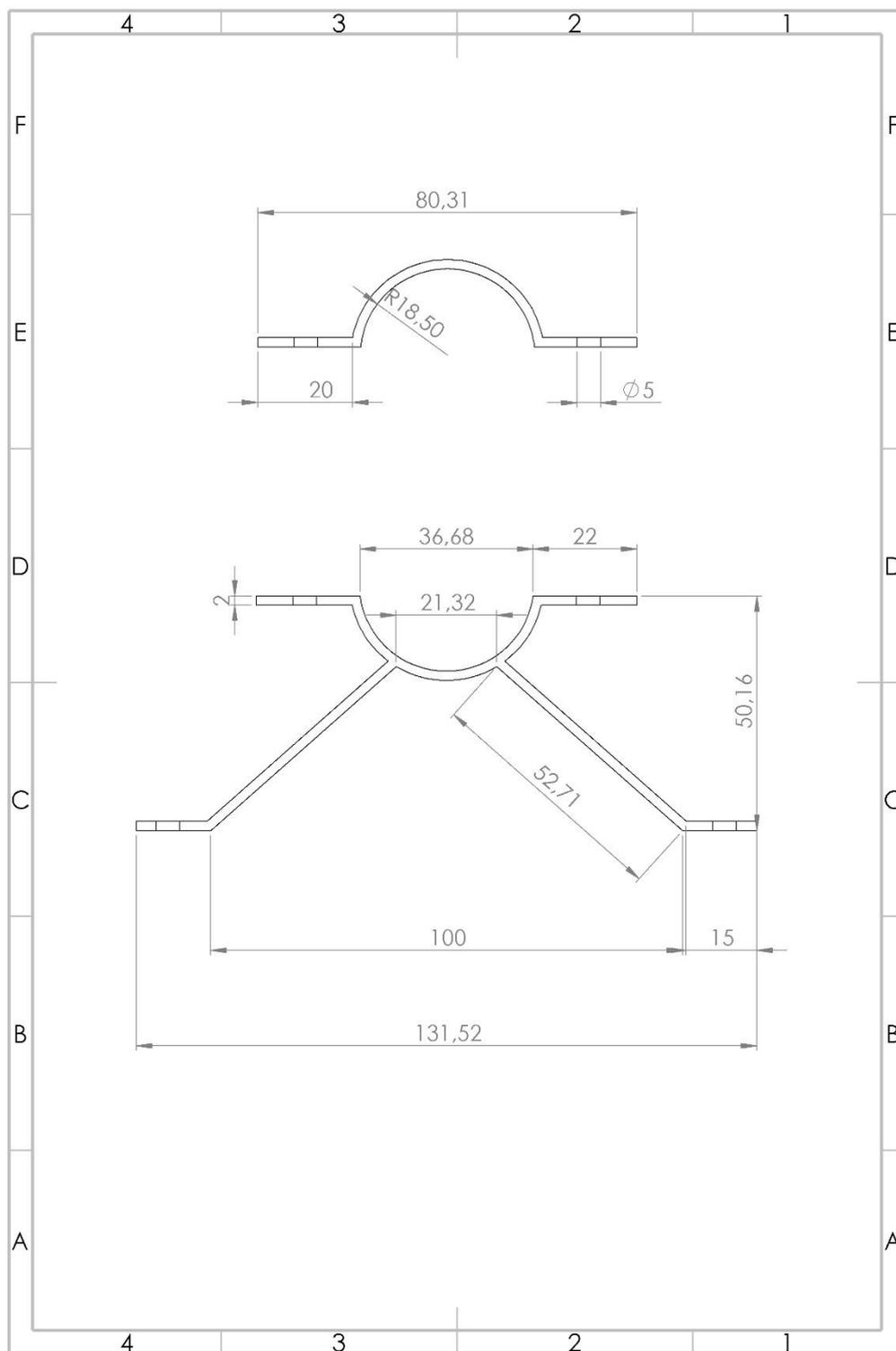


Figura 99. Desenho técnico da peça de fixação da camisa

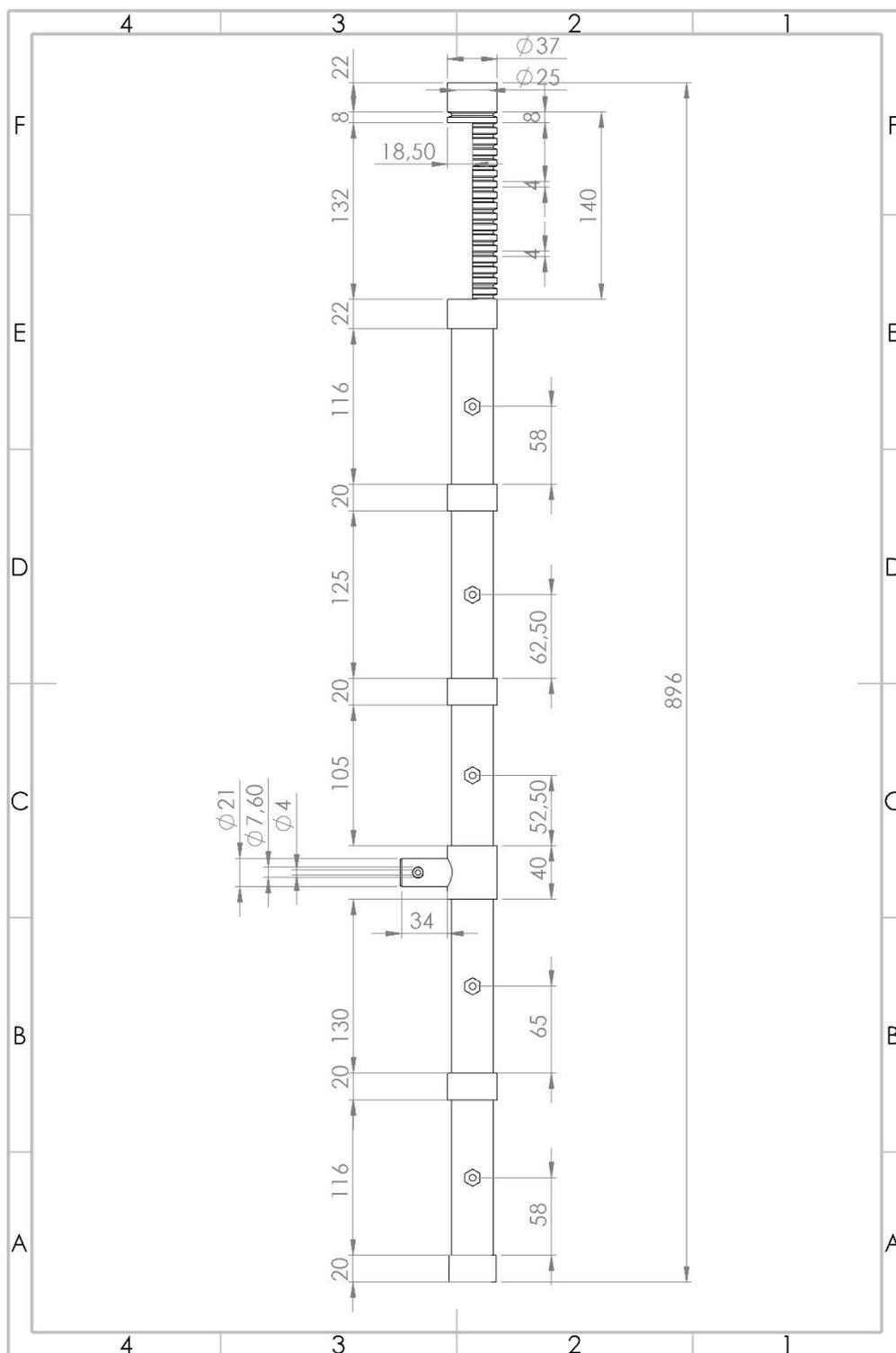


Figura 100. Desenho técnico da camisa da extrusora.

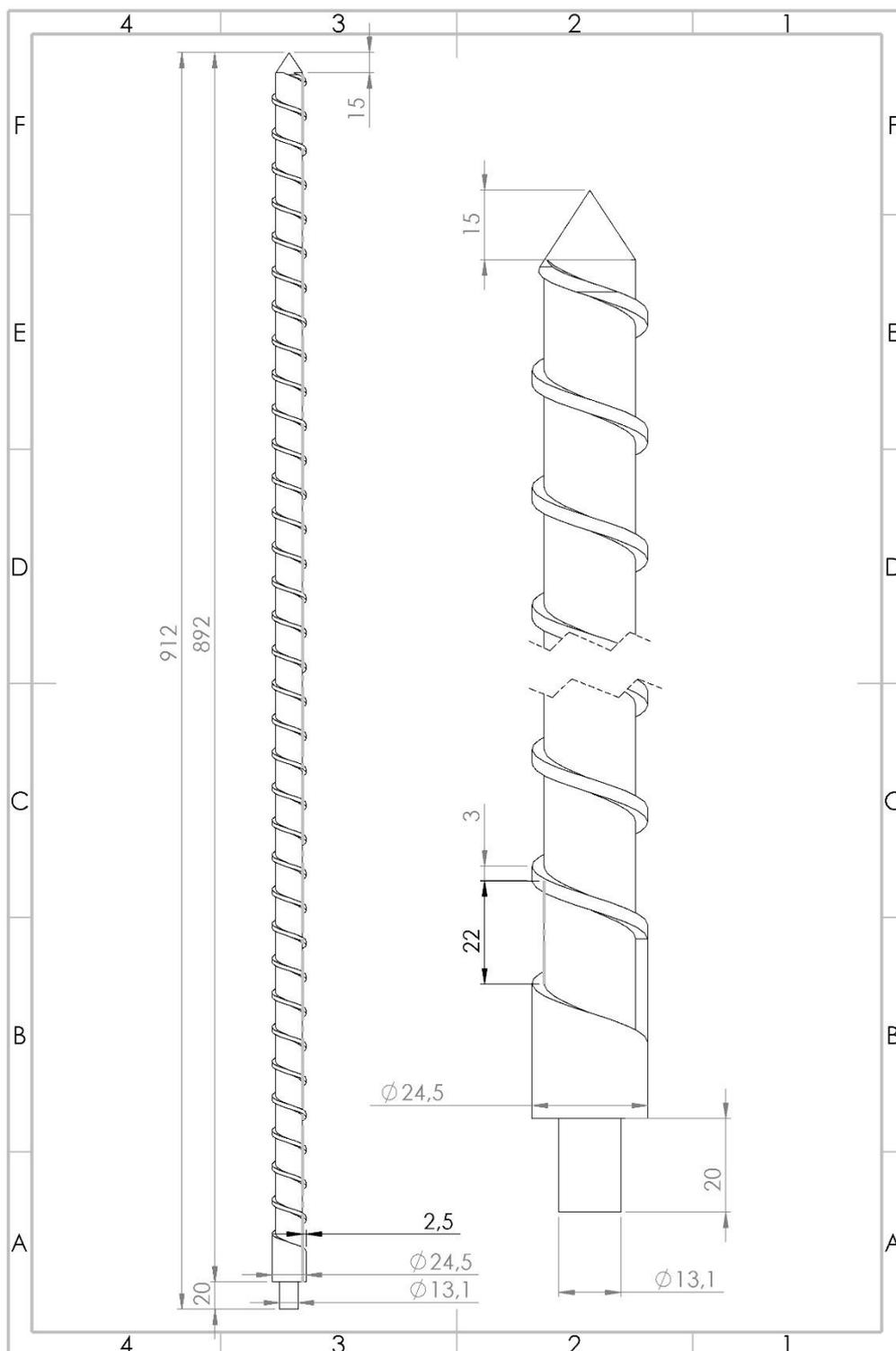


Figura 101. Desenho técnico de um fuso sem dupla hélice e sem variação da profundidade do canal.