



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Mariana Vieira Fernandes

Estudo de uma mini linha de extrusão protótipo para o fabrico de filamentos

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José António Colaço Gomes Covas

Outubro de 2018

DECLARAÇÃO

Nome: Mariana Vieira Fernandes

Título da dissertação: Estudo de uma mini linha de extrusão protótipo para fabrico de filamentos

Orientador: Professor Doutor José António Colaço Gomes Covas

Ano de conclusão: 2018

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

O processo de desenvolvimento e escrita desta dissertação foi, sem dúvida, a etapa mais difícil e desafiante, a nível académico, que alguma vez abracei. Foram várias as ocasiões de desmotivação, no entanto, esta viagem fez-me incontestavelmente crescer tanto a nível académico como pessoal.

Apesar de difícil, este desafio nunca teria sido levado avante se não fosse pelas valerosas pessoas com quem tenho a felicidade de partilhar a vida.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, professor José Covas, sem ele nunca teria terminado este projeto e desde já agradeço toda a disponibilidade e compreensão demonstrada e, ainda, por ter despendido do seu tempo e conhecimento para o desenvolvimento desta dissertação. Agradecer ainda a todos os técnicos que se disponibilizaram a ajudar sempre que precisei.

Um agradecimento muito especial aos meus familiares, aos meus pais, irmão, avós e tios paternos por toda a força e incentivo que sempre me deram e por, obviamente, serem os pilares da minha vida.

Ao meu namorado e acima de tudo amigo, um enorme obrigada por se manter sempre a meu lado neste percurso e sempre me ter encorajado a não desistir.

Por último, mas não menos importante, agradecer aos meus amigos, especialmente à minha melhor amiga Ana Coelho, por me ter acompanhado nesta viagem que foram estes 5 anos e por me ter dado sempre força e ajuda em todos os momentos.

RESUMO

O processo de extrusão é um dos principais métodos de processamento de polímeros, pelo que simplificar e reduzir as dimensões da maquinaria de extrusão convencional é um fator de inovação para indústria dos plásticos. Assim, foi desenvolvido no Departamento de Engenharia de Polímero da Universidade do Minho, em projetos anteriores, uma min linha de extrusão protótipo para o fabrico de pequenas quantidades de filamento. Deste modo, a presente dissertação consiste no estudo da capacidade do mesmo para processar adequadamente diferentes materiais e condições operatórias distintas.

Foram testados, com duas fieiras com diâmetros diferentes, cinco materiais (ABS, LDPE, PLA, PP e PS) com propriedades distintas, com o intuito de fabricar filamentos com diâmetro de 1,75 mm. Estudou-se a influência dos parâmetros de processamento, nomeadamente, temperatura e velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo, no processo e qualidade dos filamentos.

Os resultados indicam que com a fieira de 3mm não é possível produzir filamentos, devido à incapacidade da extrusora transportar material suficiente para manter um fluxo de material constante a baixas velocidades de rotação dos parafusos. Já com a fieira de 1,5 mm é possível produzir filamento com os diâmetros próximos dos pretendidos para polímeros com grades indicados para extrusão, nomeadamente para o LDPE, PP e PS, não se obtendo diâmetros próximos de 1,75mm com materiais com grades de injeção. Por outro lado, para o ABS, PLA, PP e PS foi possível obter secções transversais dos filamentos com geometria circular e uniforme, enquanto que com o LDPE estes apresentaram secção transversal não uniforme. No entanto foi possível obter-se filamentos com boa qualidade superficial para todos os materiais em estudo.

Como só foi possível produzir filamento com diâmetro próximo de 1,75mm para materiais com grades de extrusão e fieira de 1,5 mm, futuramente será necessário realizar alterações na conceção do equipamento para ampliar a gama de materiais exequíveis neste equipamento.

Palavras-Chave: Extrusão; Filamento; ABS; LDPE; PLA; PP; PS; Caraterização dimensional; Caraterização mecânica; Índice de fluidez.

ABSTRACT

The extrusion process is one of the main methods of processing polymers, so simplifying and reducing the dimensions of conventional extrusion machinery is a factor of innovation in the plastics industry. For this reason, a mini extrusion line prototype for the manufacture of small amounts of filament has been developed, in previous projects, in the department of polymer engineering at the University of Minho. The present dissertation is a study of the ability of this equipment to process adequately different materials and different operating conditions.

Were tested with two different dies with different diameters five materials (ABS, LDPE, PLA, PP and PS) with different properties, with the purpose of making filaments with a diameter of 1,75 mm. It was studied the influence of the processing parameter, such temperature and rotation speeds of the screws and pull rolls, in the process and quality of the filaments.

The results indicate it is not possible to produce filaments with the 3 mm die because of the inability of the extruder to carry enough material to maintain a constant flow of material at low speeds of rotation of the screws. With the 1,5 mm die it is possible to produce filaments with the desired diameter for polymers with grades for extrusion, such LDPE, PP and PS. Was not possible to obtain the desired diameter (1,75mm) with the materials with grades for injection molding. For ABS, PLA, PP and PP it was possible to obtain cross sections with circular and uniform geometry, whereas with LDPE the filaments presented non-uniform cross-section. However, it was possible to obtain filaments with good surface quality for all materials under study.

As it was only possible to produce filaments with a diameter of about 1,75mm for materials with extrusion grades and 1,5mm die, in the future it will be necessary to make changes in the design of the equipment to extend the range of materials feasible in this equipment.

Keywords: Extrusion; Filament; ABS; LDPE; PLA; PP; PS; Dimensional characterization; Mechanical characterization; Melt index.

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2. EXTRUSÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS	5
2.1 Enquadramento.....	5
2.2 Processo de extrusão	5
2.2.1. Extrusão de parafuso.....	6
2.2.2. Extrusão de filamento	11
2.2.3. Reologia na extrusão	15
3. PARTE EXPERIMENTAL	21
3.1 Mini linha de extrusão protótipo	21
3.2 Matérias-primas	24
3.3 Processamento dos filamentos	26
3.4 Caraterização dos filamentos.....	28
3.4.1. Caraterização dimensional	28
3.4.2. Avaliação da qualidade superficial	29
3.4.3. Caraterização mecânica	30
3.4.4. Medição do Índice de Fluidiez.....	30
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	32
4.1 Processo de extrusão com fieira de 1,5 mm de diâmetro	32

4.1.1.	ABS.....	32
4.1.2.	LDPE.....	36
4.1.3.	PLA.....	39
4.1.4.	PP.....	42
4.1.5.	PS.....	46
4.2	Processo de extrusão com fieira de 3 mm de diâmetro	49
4.2.1.	ABS e PLA.....	49
4.3	Avaliação superficial e caracterização dimensional dos filamentos.....	52
4.3.1.	ABS.....	52
4.3.2.	LDPE.....	57
4.3.3.	PLA.....	60
4.3.4.	PP.....	62
4.3.5.	PS.....	65
4.4	Caraterização mecânica	68
4.5	Medição do índice de fluidez	71
4.6	Limitações do protótipo da mini linha de extrusão	73
5.	CONCLUSÕES.....	79
5.1	Considerações finais e trabalhos futuros.....	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	Anexo I – Fichas técnicas dos materiais	85
	Anexo II – Norma NP 2914 de medição do índice de fluidez.....	90
	Anexo III – Imagens da geometria da secção transversal dos filamentos ao longo do comprimento.....	91
	Anexo IV – Ensaio de tração aos filamentos.....	96
	Anexo V – Desenho de fieira de 2 mm.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema típico de uma extrusora de parafuso. [5]	7
Figura 2 – Classificação de parafusos de extrusão contínua [6].	7
Figura 3 – Possíveis configurações das extrusoras duplo-fuso [4].....	9
Figura 4 – Ilustração simplificada do processo de extrusão de filamento [13].	12
Figura 5 – Extrusora Noztek Pro.....	13
Figura 6 – Extrusoras desktop mais populares. Fontes: [16]–[19].....	13
Figura 7 - Mini linha de extrusão fabricada na UFSC. [23]	15
Figura 8 – (a) extrusão através de uma fieira a baixa velocidade e (b) extrusão através de uma fieira a alta velocidade [28].	17
Figura 9 – Comportamento do inchamento em função da taxa de corte. [24]	17
Figura 10 – Série de fotografias que mostram de um extrudido estável a um extrudido com o efeito de <i>sharkskin</i> . [32]	18
Figura 11 – Fenómeno de <i>die drool</i> . [34]	19
Figura 12 – Progressão de uma superfície lisa para pele de tubarão e, posteriormente, fratura do fundido [36].	20
Figura 13 – Mini linha de extrusão com respectivos acessórios.	21
Figura 14 – Montagem da extrusora com motor.	22
Figura 15 – Motor e caixa de engrenagens utilizados.....	22
Figura 16 – Peça de encaixe do motor e peça de ligação entre motor e extrusora.	22
Figura 17 – (a) fieira de 1.5 mm e (b) fieira de 3 mm.	23
Figura 18 – Resistência quadrangular e termopar de medição de temperatura.	24
Figura 19 – Exemplo da observação típica da secção transversal de um filamento de LDPE à lupa.	29
Figura 20 - Aspeto superficial do filamento de ABS processado à temperatura de 230 °C. ...	32
Figura 21 – Fabrico de filamento de ABS à temperatura de processamento de 190 °C.	33
Figura 22 - Variação do débito de ABS em função do tempo	33
Figura 23 – Variação do débito do ABS com o aumento da velocidade de rotação dos parafusos.	34

Figura 24 - Processo de extrusão do LDPE à temperatura de processamento de 180 °C.	36
Figura 25 – Processo de extrusão do LDPE à temperatura de processamento de 150 °C.	36
Figura 26 – Variação do débito de LDPE em função do tempo.	37
Figura 27 – Variação do débito do LDPE com o aumento da velocidade de rotação dos parafusos.	37
Figura 28 – Processo de extrusão do PLA à temperatura de processamento de 170 °C.....	39
Figura 29 – Variação do débito de PLA em função do tempo.	40
Figura 30 – Variação do débito do PLA com o aumento da velocidade de rotação dos parafusos.	40
Figura 31 – Processo de extrusão do PP à temperatura da resistência de 200.....	42
Figura 32 – Variação do débito de PP em função do tempo definido.	43
Figura 33 – Variação do débito do PP com o aumento da velocidade de rotação dos parafusos.	43
Figura 34 – Curvas de tempo de residência do material.	45
Figura 35 – Processo de extrusão do PS à temperatura de processamento de 200 °C.....	46
Figura 36 – Grânulos colados na parede da extrusora impedindo a passagem para os parafusos.....	47
Figura 37 – Aglomerados de material resultantes da elevada temperatura da tremonha.....	47
Figura 38 – Variação do débito de PS em função do tempo definido.	47
Figura 39 – Variação do débito do PS com o aumento da velocidade de rotação dos parafusos.	48
Figura 40 – Extrusão de ABS com fieira de 3mm.	50
Figura 41 – Extrusão de PLA com fieira de 3mm.....	50
Figura 42 – Aspetto do filamento extrudido com fieira de 3 mm.	51
Figura 43 – Aspetto de filamentos extrudidos com fieira de 3 mm.	51
Figura 44 - Variação de diâmetro de filamento de ABS a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo a T=190 °C.	52
Figura 45 – Aparência superficial do filamento de ABS processado a 170 °C.	53
Figura 46 – Variação de diâmetro de filamento de ABS a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo a T=170 °C.	54

Figura 47 - Valores de diâmetro ao longo de 4 metros de filamento de ABS às velocidades de 3,5 RPM (parafusos) e 1,5 RPM (rolos de puxo).	54
Figura 48 – Variação da geometria da secção transversal do ABS ao longo de 1m de comprimento.....	55
Figura 49 – Aparecia superficial do ABS à lupa.	56
Figura 50 – Aparência superficial dos filamentos de LDPE processados a 150 °C.....	57
Figura 51 – Variação de diâmetro de filamento de LDPE a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo.	57
Figura 52 – Valores de diâmetro ao longo de 4 metros de filamento de LDPE às velocidades de 4,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).	58
Figura 53 – Variação da geometria da secção transversal do LDPE ao longo de 1m de comprimento.....	59
Figura 54 - Aparência superficial do LDPE à lupa.	59
Figura 55 – Aspeto superficial dos filamentos de PLA processados a 170 °C.....	60
Figura 56 - Valores de diâmetro ao longo de 4 metros de filamento de PLA às velocidades de 3,5 RPM (parafusos) e 3 RPM (rolos de puxo).	61
Figura 57 – Variação da geometria da secção transversal do PLA ao longo de 1m de comprimento.....	61
Figura 58 – Aparência superficial do PLA à lupa.	62
Figura 59 – Aparecia superficial dos filamentos de PP processados a 200 °C.....	62
Figura 60 – Variação de diâmetro de filamento de PP a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo.	63
Figura 61 - Valores de diâmetro ao longo de 4 metros de filamento de PP às velocidades de 3,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo)	64
Figura 62 – Variação da geometria da secção transversal do PP ao longo de 1m de comprimento.....	64
Figura 63 - Aparência superficial do PP à lupa.	65
Figura 64 – Aparência superficial dos filamentos de PS processados a 180 °C.	65
Figura 65 – Variação de diâmetro de filamento de PS a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo.	66
Figura 66 - Valores de diâmetro ao longo de 4 metros de filamento de PS às velocidades de 3,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).	66

Figura 67 – Exemplo da variação da secção transversal do PS ao longo de 1m de comprimento.	67
Figura 68 - Aparência superficial do PS à lupa.	67
Figura 69 – Valores médios de tensão máxima obtidos vs valores de tensão máxima fornecidos pelos fabricantes.	68
Figura 70 – Valores médios de deformação à tensão máxima obtidos para o ABS, PLA, PP e PS vs valores de deformação à tensão máxima fornecidos pelos fabricantes.	69
Figura 71 - Valor médio de deformação à tensão máxima do LDPE.	69
Figura 72 – Valores médios de tensão de rutura obtidos vs valores de tensão de rutura fornecidos pelos fabricantes.	69
Figura 73 – Valores médios de deformação de rutura obtidos vs valores de deformação de rutura fornecidos pelos fabricantes.	70
Figura 74 – Grânulos de material “agarrados” às paredes da tremonha devido ao sobreaquecimento da mesma.	74
Figura 75 – Medição da temperatura superficial no interior da tremonha.	74
Figura 76 – Tentativa de diminuição do sobreaquecimento da tremonha com recurso a um ventilador.	75
Figura 77 – Diferença de temperatura entre a resistência e a superfície da fieira.	76
Figura 78 – Diferença de temperatura entre a resistência e a superfície da fieira.	76
Figura 79 – Fratura da peça de ligação entre os parafusos e o motor.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Extrusora monofuso vs. Extrusora duplo-fuso contra-rotativ [8].	11
Tabela 2 – Comparação entre extrusoras desktop. [22]	14
Tabela 3 – Informações sobre os materiais utilizados.	25
Tabela 4 – Velocidades de rotação do parafusos e rolos de puxo utilizadas.	27
Tabela 5 – Intervalos de valores de temperatura de processamento para os diferentes materiais.	27
Tabela 6 – Taxas de corte na fieira durante o processamento do ABS em função da velocidade de rotação dos parafusos.	35
Tabela 7 – Taxas de corte na fieira durante o processamento do LDPE em função da velocidade de rotação dos parafusos.	38
Tabela 8 – Taxas de corte na fieira durante o processamento do PLA em função da velocidade de rotação dos parafusos.	41
Tabela 9 – Taxas de corte na fieira durante o processamento do PP em função da velocidade de rotação dos parafusos.	44
Tabela 10 – Taxas de corte na fieira durante o processamento do PS em função da velocidade de rotação dos parafusos.	48
Tabela 11 – Valores resultantes das medições do índice de fluidez para os diferentes materiais	71
Tabela 12 – Resultados obtidos dos ensaios de tração do ABS às condições de 3,5 RPM (parafusos) e 1,5 RPM (rolos de puxo).	96
Tabela 13 – Resultados obtidos dos ensaios de tração do LDPE às condições de 4,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).	97
Tabela 14 – Resultados obtidos dos ensaios de tração do PLA às condições de 3,5 RPM (parafusos) e 3 RPM (rolos de puxo).	98
Tabela 15 – Resultados obtidos dos ensaios de tração do PP às condições de 3,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).	99
Tabela 16 – Resultados obtidos dos ensaios de tração do PS às condições de 3,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).	100

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ABS - Acrilonitrilo butadieno estireno

DEP – Departamento de Engenharia de Polímeros

LDPE – Low density polyethylen

PC – Policarbonato

PLA - Políácido láctico

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

UM - Universidade do Minho

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Tendo em conta a constante evolução do mercado e as exigências impostas pelos consumidores, nos dias que correm existe uma maior procura por produtos novos e melhorados. Cabe aos Investigadores desenvolver soluções inovadoras indo de encontro às necessidades impostas, pois os prazos são cada vez mais curtos e a concorrência maior. As tendências vão-se alterando ao longo dos tempos pelo que é importante ter uma visão do futuro para procurar novas ferramentas que acompanhem esse progresso.

Sendo a extrusão uma das tecnologias de processamento mais utilizadas na era atual para as mais diversas áreas, a possibilidade realizar o processamento de forma mais simples e com menos custos associados torna-se atrativo para o consumidor. Haver a possibilidade de criar produtos a gosto, com o material, propriedades e cor desejadas no local de trabalho ou no conforto de casa, sendo possível deslocar o equipamento de fabrico de sítio facilmente, tornam-se pontos de interesse para o comprador.

Nos dias que correm os filamentos são produtos altamente procurados e, nesse sentido, vários estudos foram efetuados, surgindo assim uma solução alternativa às máquinas de extrusão convencionais, desenvolvida no DEP/UM, para o fabrico dos mesmos. Trata-se de uma mini linha de extrusão de filamento protótipo que possibilita o fabrico de pequenas quantidades de filamento. Não existindo uma ampla gama de estudos que demonstrem a exequibilidade deste equipamento, ou seja, quais os materiais possíveis de processar e a que condições operatórias, bem como quais são as suas possíveis limitações, é necessário compreender como este se comporta.

Deste modo, a elaboração desta dissertação vem no seguimento de perceber se este equipamento apresenta um bom funcionamento e se a sua forma de conceção é a mais adequada para o mesmo, estudando a sua capacidade de processar adequadamente diferentes materiais em condições operatórias distintas.

1.2 Objetivos

O estudo a desenvolver insere-se no âmbito da Tese de Mestrado do curso de Mestrado Integrado em Engenharia de Polímero e centra-se no objetivo principal de avaliar a capacidade de uma mini linha de extrusão de filamentos a processar diferentes materiais em condições operatórias distintas, realizando as seguintes tarefas:

1. Realizar processamento com duas fieiras distintas de diâmetros de 1,5mm e 3mm e verificar se o layout da linha de extrusão é o mais adequado para correto funcionamento da mesma;
2. Otimizar o processamento para fabrico de filamentos com diâmetro constante com dimensões de 1,75 mm ou 3 mm, uma vez que são as principais dimensões dos filamentos comercializados;
3. Caracterizar os filamentos produzidos através de caracterização dimensional dos filamentos (verificar se estes apresentam o diâmetro pretendido, se há variação do mesmo ao longo do comprimento e se a sua secção transversal é geometricamente circular e uniforme), assim como avaliação da sua qualidade superficial (existência de defeitos superficiais), caracterização mecânica e medição do índice de fluidez (comparando os resultados obtidos com os valores fornecidos pelos fabricantes, de forma a verificar se há alterações das propriedades dos materiais após o processamento).

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos com o intuito de expor o conteúdo do estudo da forma mais coerente possível, para que seja melhor compreendida pelo leitor. Neste primeiro capítulo faz-se um enquadramento ao tema e a importância do mesmo, bem como se apresentam os objetivos.

No segundo capítulo encontra-se a revisão bibliográfica, onde são abordados vários conceitos teóricos relevantes para este trabalho, nomeadamente o processamento por extrusão, o seu funcionamento e distintos equipamentos existentes, a importância da reologia nesta técnica e a influência dos materiais na mesma. São ainda evidenciados alguns equipamentos semelhantes ao que será estudado e é feita uma breve comparação entre eles.

O Capítulo 3 engloba a parte experimental, ou seja, apresenta-se o equipamento, os materiais utilizados e os vários procedimentos experimentais (processamento e caracterização).

No Capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos relativos ao processamento dos filamentos e caracterização. São também indicadas as dificuldades e limitações encontradas durante o processamento com a mini linha de extrusão protótipo.

O Capítulo 5 contém as conclusões finais acerca do trabalho, além de sugestões de melhorias e trabalho futuros.

2. EXTRUSÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

2.1 Enquadramento

Neste capítulo o objetivo é reunir informação disponível referente ao processo de fabrico dos filamentos, nomeadamente o processo de extrusão, visto este processo ser o principal foco deste trabalho. Inicialmente é apresentada informação geral sobre o processo e posteriormente são abordados conceitos mais específicos como a extrusão de parafuso, o seu funcionamento e diferentes equipamentos. De seguida reúne-se informação sobre o processo de extrusão de filamento e exemplos de mini linhas extrusão de filamento já comercializadas. Por último é incluído um tópico sobre a importância da reologia na extrusão, enumerando alguns defeitos frequentes neste processo, bem como a influência da escolha dos materiais nesta técnica.

2.2 Processo de extrusão

Os materiais termoplásticos, devido às duas características, constituem a maioria dos polímeros comerciais e, pelo facto de existir uma enorme variedade de materiais termoplásticos, permite que estes possam ser utilizados nas mais distintas tecnologias de processamento.

A extrusão é um dos principais métodos de processamento de polímeros, sendo utilizada no fabrico de produtos de grande consumo [1]. Existem inúmeros exemplos de produtos extrudidos, como:

- Filme tubular, para manufatura de sacos de embalagem;
- Tubos para transporte de fluidos e gases ou para aplicações médicas;
- Perfis (fabrico de imobiliário, aplicações elétricas e eletrónicas, entre muitas outras);
- Filme plano (por exemplo, aplicações agrícolas como impermeabilização de estufas);
- Filamentos, para fios de pesca, cordas, cabos etc.

Tem como designação de linha de extrusão o conjunto de componentes que formam um equipamento capaz de obter um extrudido com a forma e dimensão pretendida, a partir de uma matéria prima. Esta técnica envolve as seguintes etapas: (a) aquecimento e fusão do polímero, (b) transportar o material para a unidade que irá dar forma extrudido, (c) fornecer ao fundido a forma e dimensões desejadas e (d) arrefecimento e solidificação [2].

Na indústria dos plásticos, a grande maioria dos materiais passa, desde a sua origem, pelo menos uma vez por uma extrusora, fazendo com que a maquinaria de extrusão seja mais comum. Estes equipamentos podem apresentar distintos designs, podendo ser distinguidos também segundo o seu modo de operação: contínuo e descontínuo. As extrusoras do tipo contínuo são capazes de desenvolver um fluxo constante e contínuo de material e têm um membro rotativo, já as extrusoras do tipo descontínuo operam da maneira cíclica [3].

A extrusora utilizada no presente trabalho é do tipo contínuo e de parafuso, sendo que este género de equipamento apresenta pelo menos um parafuso que transporta e homogeneiza o material no seu interior.

2.2.1. Extrusão de parafuso

As extrusoras de parafuso são compostas por quatro partes principais [4]:

- Motor e caixa de engrenagens que transmitem a energia mecânica necessária ao processo de extrusão;
- O cilindro da extrusora onde está inserido o parafuso (ou parafusos) e onde o material é processado;
- A fieira, onde o material adquire a secção transversal da mesma;
- Sistema de controlo, que monitoriza as operações do equipamento.

O esquema típico de uma extrusora de parafuso está representado na Figura 1.

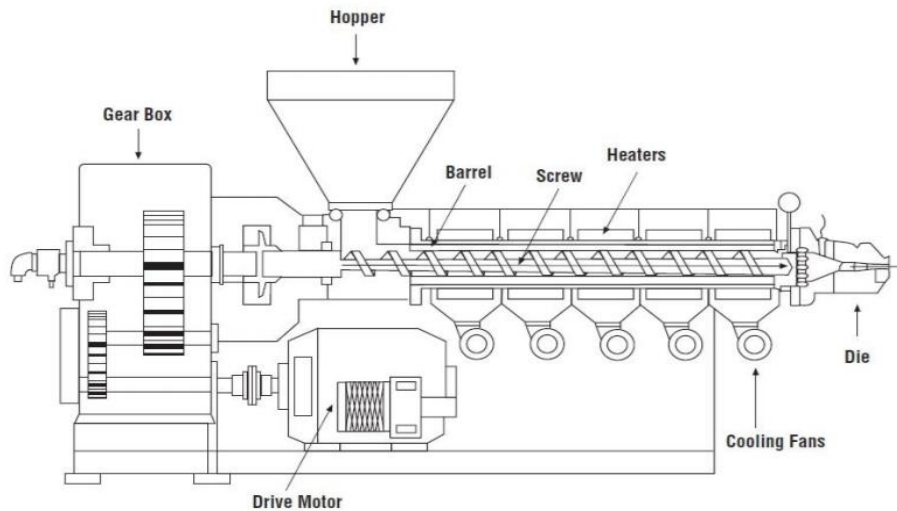


Figura 1 - Esquema típico de uma extrusora de parafuso. [5]

As extrusoras de parafuso dividem-se consoante o número de parafusos que estas possuem, sendo atualmente as mais comuns as extrusoras monofuso e as extrusoras duplo-fuso. A Figura 2 mostra vários tipos de extrusoras do tipo parafuso usadas na indústria dos polímeros.

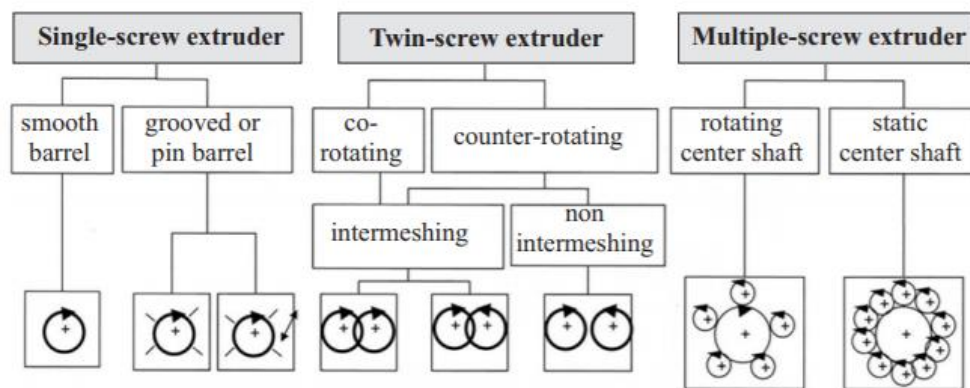


Figura 2 – Classificação de parafusos de extrusão contínua [6].

Dentro dos exemplos indicados na Figura 2, as extrusoras de parafuso único são o tipo mais usado na indústria dos polímeros, apresentando vantagens como baixo custo, em comparação com os outros equipamentos, design simples e boa relação desempenho/custo. Já as extrusoras multi-fuso (com 3 ou mais parafusos) são usadas apenas para produções de pequena escala ou para aplicações especiais [6]. Por outro lado, as extrusoras de duplo-fuso são frequentemente mais usadas para realizar composição e mistura de materiais por

apresentarem, de forma geral, melhor capacidade de fusão, mistura e desvolatilização do que as extrusoras monofuso [6].

A geometria do parafuso de uma extrusora deve considerar as propriedades térmicas, físicas e reológicas dos polímeros a processar.

Relativamente às extrusoras monofuso convencionais, estas apresentam geralmente três secções: alimentação, compressão e medição [4]. Da mesma forma o cilindro das extrusoras monofuso é normalmente aquecido em três zonas de aquecimento, sendo essas três zonas coincidentes com as três secções geométricas do parafuso [7].

Este tipo de extrusoras com geometria clássica do parafuso envolvendo três zonas geométricas distintas, ao longo dos tempos, revelou-se incapaz de exibir o desempenho desejado para determinadas aplicações, por exemplo, em termos de:

1. Qualidade de mistura, mostrando fraca homogeneidade do fundido em termos de composição [8].
2. Eficácia de fusão, sendo que no caso de esta ser ineficaz, poderá ter que se aumentar o comprimento disponível para a bombagem [8].
3. Estabilidade dinâmica do processo, eventualmente provocada pela rutura prematura do bloco de sólidos, ou por flutuações no comprimento do parafuso envolvido na fusão [8].

Por estes e outros motivos, atualmente são utilizados mais do que um parafuso e/ou apresentam maiores níveis de complexidade de construção, inclusive, maior comprimento [8].

No caso das extrusoras duplo-fuso, estas são amplamente utilizadas nas mais diversas áreas, como processamento de polímeros, processamento de alimentos, entre outras, através de vários processos como aquecimento, fusão, mistura, reação, etc. No caso do processamento de polímeros, as extrusoras duplo-fuso são maioritariamente usadas para desenvolver produtos com determinadas propriedades através da composição e mistura de polímeros, cargas ou aditivos mas também para realizar o processo de extrusão propriamente dito. Estas permitem a diminuição da dissipação viscosa, sendo adequadas para materiais sensíveis à temperatura e de difícil processamento [9] [10].

Como o nome indica as extrusoras duplo-fuso possuem dois parafusos, podendo ser, como representado na figura 3, extrusoras co-rotativas em que os parafusos rodam os dois na mesma direção ou contra-rotativas, em que os parafusos rodam em direções opostas. Ainda analisando a figura 3, pode ver-se que as extrusoras duplo-fuso podem ainda dividir-se em engrenadas, em que a rosca de um parafuso entra nos sulcos do outro parafuso, e não-engrenadas, em que os parafusos são tangentes e as extremidades das roscas ficam ao mesmo nível [4].

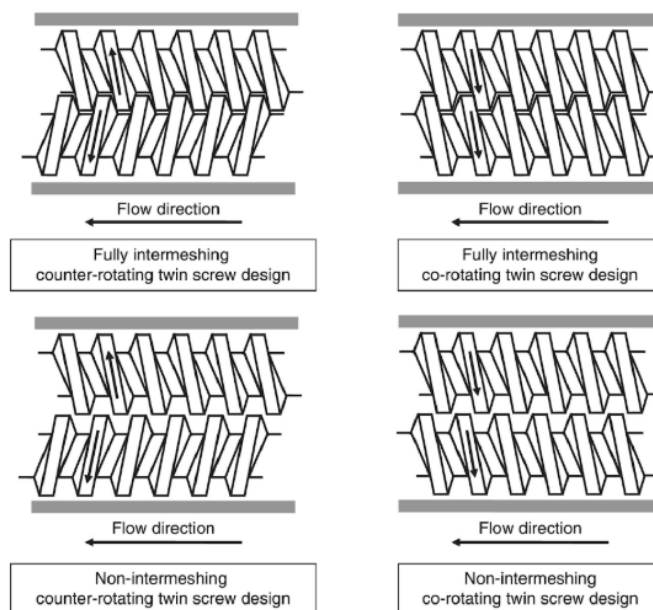


Figura 3 – Possíveis configurações das extrusoras duplo-fuso [4].

Apesar da vasta gama de equipamentos com características geométricas variadas existente, apenas as extrusoras de duplos-fusos contra-rotativos engrenados são utilizadas na extrusão propriamente dita [8]. O engrenamento que existe nestas máquinas impede que o material progrida ao longo do canal helicoidal de cada um dos parafusos, de acordo com o mecanismo de arraste por forças de atrito que se desenvolve nas extrusoras monofuso.

Nas extrusora duplo-fuso contra rotativos devido à estreita interligação entre os parafusos, existem espaços, as chamadas câmaras em forma de C, em cada parafuso. O material proveniente da tremonha através da abertura para alimentação do cilindro e enche parcialmente essas câmaras onde depois é transportado. No entanto, devido a essas folgas, a diferença de pressão entre duas câmaras consecutivas provoca o escoamento de retorno, podendo haver também escoamento através da folga parafuso/cilindro, permitindo o recuo

axial do material. No entanto, como as folgas são de dimensões reduzidas, o débito de retorno em comparação com a quantidade de material que avança em cada câmara é reduzido, pelo que a dependência do débito da pressão nestas máquinas é muito inferior ao que se verifica nas máquinas monofuso [11] [12].

Neste tipo de equipamentos as forças resultantes pelo material atravessar as folgas entre os parafusos fazem com que haja uma tendência dos parafusos a afastarem-se entre si, empurrando-os contra a parede do cilindro, acelerando o seu desgaste. Para minimizar este efeito obriga à limitação da velocidade máxima de rotação dos parafusos, havendo uma correspondente afetação do débito máximo [12].

A fusão do polímero ocorre rapidamente em poucas câmaras C, devido ao efeito combinado da transferência de calor proveniente do cilindro e do escoamento em hélice em cada câmara. Esse movimento proporciona o encapsulamento dos sólidos pelo fluido existente, facilitando a fusão.

As restantes soluções de extrusora duplo-fuso apresentadas na figura 3 são direcionadas principalmente para operações de composição, pois a sua complexidade geométrica induz características de escoamento também complexas, ajustando-se às necessidades de assegurar boa mistura [8].

O surgimento das extrusoras duplo-fuso vem assim no seguimento de solucionar lacunas inerentes às extrusoras monofuso, como por exemplo, na capacidade de mistura entre polímeros ou de polímeros com aditivos.

Na Tabela 1 são apresentadas algumas características que diferenciam as extrusoras monofuso das extrusoras duplo-fuso contra-rotativo.

Tabela 1 – Extrusora monofuso vs. Extrusora duplo-fuso contra-rotativo [8].

Monofuso	Duplo-fuso contra-rotativo
Transporte de sólidos fortemente dependente das propriedades de atrito.	Transporte de sólidos dependente das propriedades de atrito
O material sólido move-se em bloco, o fundido progride em hélice	O material avança axialmente dentro de câmaras em forma de C
O parafuso está rodeado por polímero	O escoamento na folga da calandra afasta os parafusos e empurra-os contra o cilindro
Velocidades de rotação podem ser elevadas	Velocidade de rotação baixas a moderadas
Qualidade de mistura regular, pode ser melhorada com dispositivos de mistura	Boa qualidade de mistura, distribuição estreita de tempos de residência
Boa capacidade de gerar pressão	Excelente capacidade de gerar pressão
Grande sensibilidade à variação da resistência da cabeça de extrusão	Pequena sensibilidade à variação da resistência da cabeça de extrusão

2.2.2. Extrusão de filamento

Em geral, as linhas de extrusão apresentam uma extrusora, a fieira e equipamento acessório. Neste processo, o material a ser processado é forçado a passar continuamente através de um canal com uma secção transversal específica (fieira), adquirindo a forma aproximada desta. No caso da extrusão de filamento a fieira apresenta com secção circular com diâmetro, por norma, igual ou superior ao desejado para o produto final [8]. No interior da extrusora são exercidas elevadas pressões e temperaturas, pelo que á saída da fieira o extrudido sofre inchamento, havendo um aumento do seu diâmetro. Por este motivo torna-se, por vezes, difícil controlar rigorosamente o diâmetro do filamento, trazendo implicações quando se pretendem produtos com baixas tolerâncias dimensionais relativamente ao diâmetro final pretendido.

De forma a ajudar a controlar o diâmetro existe o equipamento acessório, em que são usados rolos de puxo, que permitem estirar o filamento e reduzir a secção transversal do mesmo, se assim for necessário, além de garantirem o avanço regular e a velocidade constante do extrudido ao longo dos diversos componentes da linha existentes [8].

Uma vez formados os filamentos, estes podem ser arrefecidos num banho de água, a fim de preservar a secção transversal. Numa fase final de todo o processo, dependendo da posterior utilização, poderá ser necessário integrar equipamento de corte ou enrolamento do extrudido. O esquema geral da constituição da linha encontra-se na Figura 4.

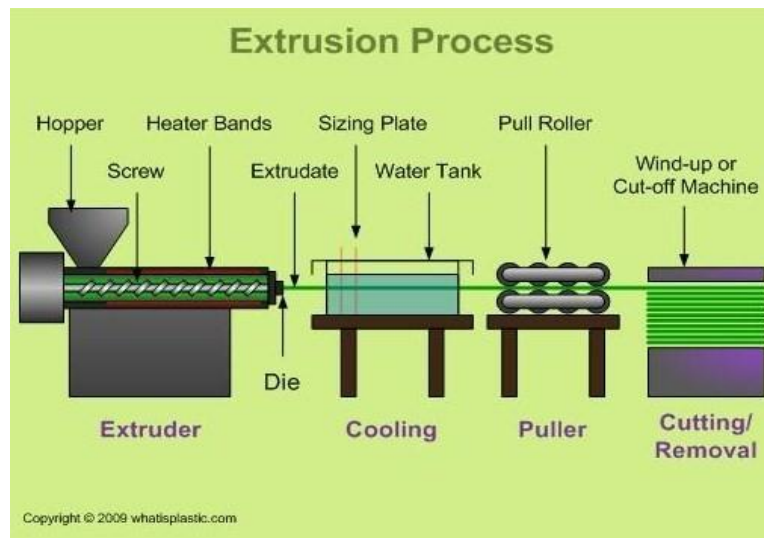


Figura 4 – Ilustração simplificada do processo de extrusão de filamento [13].

Industrialmente as linhas são mais complexas e concebidas para produzir grandes quantidades do produto pretendido. No entanto, hoje em dia já é possível encontrar no mercado fornecedores de equipamentos direcionados para o utilizador comum. Por exemplo, a grande procura de impressoras 3D resultou no desenvolvimento de extrusoras de filamento desktop, ou seja, extrusoras de reduzidas dimensões que podem ser inclusive usadas para uso doméstico. O uso de extrusoras de filamento desktop permitem qualquer pessoa produzir os seus próprios filamentos, sendo que cada utilizador pode testar novos materiais ou até modificá-los havendo, consequentemente, um gasto inferior em material [14].

O exemplo mais popular de uma extrusora de filamento para uso doméstico é a Noztek Pro, uma extrusora monofuso capaz de produzir 1kg de filamento em 2h, podendo usar ABS, PLA, PET, PP, HDPE ou até mesmo reciclados, em forma de grânulos ou pó. Apresenta duas fieiras (diâmetros de 1,75mm e 3mm), é possível processar à temperatura máxima de 300 °C e produzir filamentos com tolerâncias de $1,75 \pm 0,04$ mm. Esta tecnologia chega ao consumidor totalmente montada e pronta para ser usada, ou seja, não é vendida em forma de kit. [15] Na Figura 5 é mostrado o equipamento em questão.



Figura 5 – Extrusora Noztek Pro [15].

Segundo uma breve pesquisa pôde-se encontrar-se outros equipamentos, vendidos já montados ou em forma de kit, sendo algumas das mais populares extrusoras de dimensões reduzidas apresentadas na Figura 6.

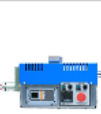
	
<p>FILABOT EX2 Filament Extruder</p>	<p>FILASTRUDER</p>
	
<p>WELLZOOM desktop filament extruder B</p>	<p>ProtoCycler</p>

Figura 6 – Extrusoras desktop mais populares. Fontes: [16]–[19]

Tanto a Filabot com a Wellzoom têm no seu catálogo vários tipos de extrusoras desktop, com os mais variados custos. No caso dos exemplos apresentados, a Filabot EX2 permite a utilização de vários matérias como ABS, PLA, PC, etc, opera a uma temperatura máxima de 450 °C e apresenta um débito aproximado de 1kg/h, sendo possível obter tolerâncias de +/- 0.05 mm. Permite a alteração fieiras para obter diâmetros de filamento numa gama ente 1mm e 4.5mm [17]. Já a Wellzoom desktop filament extruder B funciona a uma temperatura máxima de 300 °C, é comercializada com duas fieiras (1.75 mm e 3mm) podendo obter-se tolerâncias de +/- 0.05 mm e +/- 0.1mm para as duas fieiras, respetivamente. É possível processar vários materiais a uma taxa máxima aproximada de 66cm/min [18]. Por outro lado, a Filastruder, tal como a wellzoom, pode ser usada variando entre duas fieiras, no entanto as tolerâncias alteram-se consoante os materiais a ser processados (entre $\pm$ 0.01mm e 0.07mm), Por outro lado, apresenta uma temperatura máxima de extrusão de 260°C, inferior aos anteriores, e consegue processar uma vasta gama de materiais. O débito médio desta extrusora é cerca de 1kg por 5h [20].

A ProtoCycler é distintiva de todas devido ao facto de ter a função de reciclagem, convertendo os restos de plásticos em novos filamentos. Os materiais devem ser processados a uma temperatura inferior a 400 °C (temperatura máxima de o metal da máquina aguenta) e os filamentos têm uma tolerância de +/- 0.02 mm. O diâmetro pode ser ajustado entre 1,75 mm e 3 mm [21]. A Tabela 2 mostra uma comparação entre alguns dos equipamentos anteriormente mencionados.

Tabela 2 – Comparação entre extrusoras desktop. [22]

								
	DNA	Noztek	FilaFab	Filabot	Filastruder	Strooder	ProtoCycler	3devo
Price USD (MSRP)	\$800	\$1149	\$1149	\$1399	\$299	\$1025	\$899	\$3939
Extrusion Speed	1kg/hr ABS	1kg/2hr PLA	1kg/4hr PLA	1kg/4.3hr PLA	1kg/5-8hr PLA	1kg/3hr PLA	1kg/2.5hr PLA	0.7kg/hr PLA
Extrusion Temp (max)	250°C	300°C	250°C	450°C	260°C	250°C	260°C	350°C
Hopper Size	1kg	1kg	0.35kg	0.11kg	N/A	0.7kg	N/A	1kg
Dimensions cm (LxWxH)	41x12x21	80x30x30	49x16x24	46x18x23	46x10x15	32x16x22	38x23x36	50x22x45
Weight	4.7kg	13kg	8kg	13.5kg	N/A	N/A	20kg	24.5kg
Voltage	User Selectable	Preset	User Selectable	Preset	User Selectable	User Selectable	Preset	230V

Existem outros projetos de protótipos desenvolvidos, como o exemplo do projeto e construção de uma mini linha de extrusão para fabrico de filamento para impressão 3D elaborado Universidade Federal de Santa Catarina mostrado na figura 7, sobre o qual não existe informação relevante.

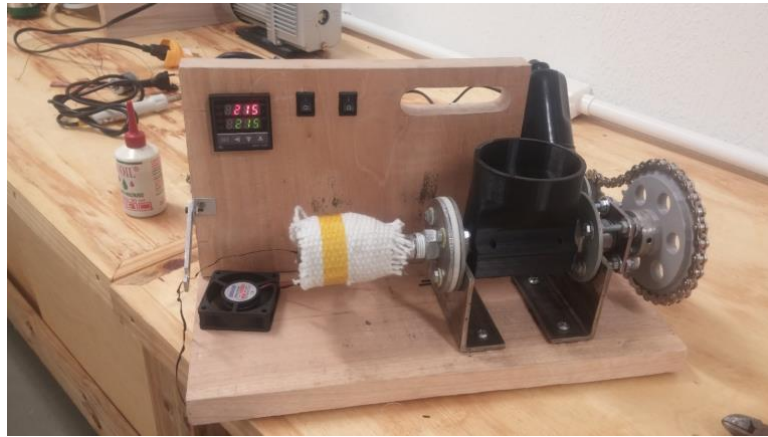


Figura 7 - Mini linha de extrusão fabricada na UFSC. [23]

2.2.3. Reologia na extrusão

A reologia pode ser definida como a ciência que estuda o escoamento e a deformação da matéria. A reologia no processamento de polímeros torna-se de grande importância pois, aquando do mesmo, existe deformação do material e, desse modo, a caracterização reológica permite o controlo e a otimização do processo. Através desta ciência é possível compreender a origem de defeitos e minimizar a sua ocorrência durante o processo, ajudar na seleção do material mais adequado para uma determinada aplicação e trata-se, ainda, de uma ferramenta eficaz na caracterização e controlo de qualidade do material [24] [25].

Na questão da escolha dos materiais poliméricos, estes apresentam propriedades que condicionam a operação e desempenho das linhas de extrusão. Entre estas está a elevada viscosidade, na ordem dos 10^2 a 10^4 Pa.s para polímeros fundidos [8]. Esta característica apresenta consequências como:

- Desenvolvimento de pressões elevadas nas fieiras, o que exige à extrusora boa capacidade de pressurização e, consequentemente, motor de extrusora potente e uso de materiais com boa resistência mecânica [8].
- A rotação do parafuso fornece energia mecânica e, através da dissipação viscosa a maior parte da energia é convertida em calor no material processado. Assim, em determinadas condições, a temperatura do fundido pode ser superior à estipulada pelas bandas de aquecimento, dificultando o controlo do processo [8], [26].
- Incorporação de aditivos, nomeadamente de lubrificantes, com a finalidade de baixar os níveis de viscosidade ou minimizar a degradação térmica provocada pelos aumentos excessivos de temperatura.

Por outro lado está o comportamento não newtoniano, em que a viscosidade dos polímeros fundidos não é constante devido ao seu comportamento reofluidificante, diminuindo com o aumento da taxa de corte. Deste modo, a duplicação do débito não exige a duplicação da pressão, mas sim de um aumento inferior [24].

Em extrusão, a reologia vem sendo utilizada como meio para perceber quais as razões que existem por detrás dos defeitos exibidos pelos polímeros durante o seu processamento, de forma a encontrar-se soluções para os eliminar/minimizar. Um dos defeitos mais frequentes é o chamado inchamento, em que o fluído, quando abandona a fieira, aumenta a sua dimensão podendo atingir dimensões muito superiores à do canal. Este fenómeno acontece uma vez que as moléculas poliméricas são forçadas a orientar-se na direção do fluxo quando atravessa a fieira e, aquando da sua saída, existe a passagem de tensões elevadas para tensões inferiores, fazendo com que o material tenda a recuperar o seu estado inicial não orientado e, consequentemente, recupere entrelaçamentos entre as cadeias [27] [25]. A Figura 8 mostra um exemplo do defeito mencionado.

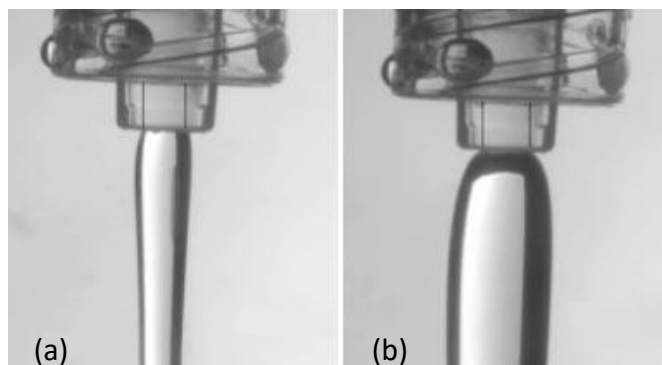


Figura 8 – (a) extrusão através de uma fieira a baixa velocidade e (b) extrusão através de uma fieira a alta velocidade [28].

O inchamento é influenciado por vários fatores, nomeadamente este aumenta com a taxa de deformação até um limite próximo de uma tensão/taxa de deformação crítica (a partir da qual o material fratura) e diminui posteriormente. (Figura 9) [24].

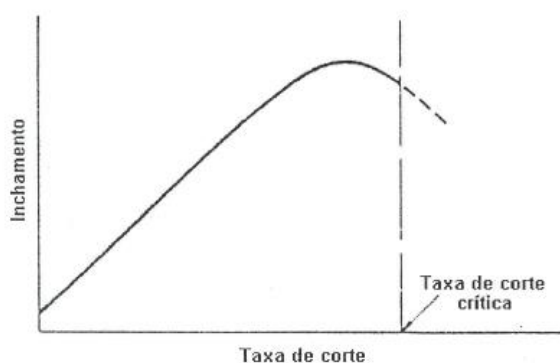


Figura 9 – Comportamento do inchamento em função da taxa de corte. [24]

Para uma determinada taxa de deformação o inchamento diminui com a temperatura, sendo que o aumento da mesma permite uma diminuição da viscosidade e, consequentemente, da tensão. Este aumento da temperatura proporciona maiores débitos, mas, em contrapartida, a dissipação viscosa aumenta e altera a estabilidade dimensional do material podendo gerar outro tipo de problemas como, por exemplo, a nível de degradação térmica. Por outro lado, o inchamento diminui com o tempo de residência no capilar, uma vez que o extrudado tem menos tempo para relaxar tensões [24].

Em extrusão, estudos efetuados indicam também que um aumento da velocidade de rotação do parafuso envolve um aumento do inchamento [29]. Em contrapartida, a temperatura é alterada, aumentando com o aumento da velocidade de rotação do parafuso. Segundo *Sombatsompop e Panapoy* [30] parâmetros como comprimento do canal, condução de calor e aquecimento por fricção têm efeitos consideráveis na temperatura de fusão e, consequentemente, na viscosidade do material.

Outro fenómeno comum na extrusão é a pele de tubarão ou *sharkskin*, caracterizado pela perda de brilho superficial e pela existência de um padrão repetitivo ondulado perpendicular à direção do fluxo, como mostra a Figura 8. Este fenómeno é provocado pela rotura do extrudido resultante de uma tensão de corte crítica à saída da fiação. A pele de tubarão pode ser retardada ou até mesmo eliminada através do aumento da temperatura, por ser muito sensível a esta [31] [27].

A Figura 10 mostra o aspeto do extrudido aquando do aparecimento do fenómeno de pele de tubarão.

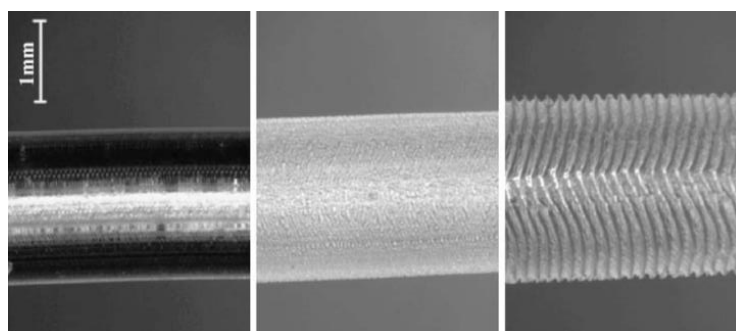


Figura 10 – Série de fotografias que mostram de um extrudido estável a um extrudido com o efeito de *sharkskin*. [32]

Por vezes, durante o processo de extrusão, existe a possibilidade de algum material de polímero extrudido aderir aos bordos da saída da fiação, como demonstrado na Figura 11. Este defeito é o chamado *die drool*, em que o material depositado à saída da fiação tende a acumular-se podendo obstruir parcialmente o fluxo do produto extrudido e assim danificar a superfície do mesmo. Para remover o material acumulado à superfície da fiação é necessário interromper o processo de extrusão havendo, consequentemente, uma quebra na produtividade [33] [27].



Figura 11 – Fenómeno de *die drool*. [34]

Embora as causas da formação de *die drool* não sejam completamente conhecidas, na literatura existente é possível encontrar algumas das causas que podem estar relacionadas com o aparecimento deste fenómeno indesejado e métodos de o eliminar ou reduzir. Entre estes está alteração do desenho da fieira, mudança do material polimérico, desumificação do material, redução da temperatura de extrusão ou adição de estabilizadores [33].

Um defeito que limita o débito em processamento de polímeros é a chamada fratura do fundido. Este fenómeno manifesta-se através de uma quebra estrutural, havendo distorção evidenciada do extrudido ao sair da fieira, podendo assumir várias formas [24]. Quando o material passa de secções transversais mais largas para secções mais estreitas a mesma quantidade de material tem que passar no mesmo espaço de tempo por uma secção mais estreita, fazendo com que o material esteja sujeito a maiores velocidades e, portanto, ocorre um aumento da tensão e taxa de corte nessa secção [35]. Esta diferença de deformação imposta pelo fluxo convergente pode gerar distorções no extrudido. Acima de um valor crítico de tensão e taxa de corte o grau de distorções torna-se significativo e pode ocorrer fratura do fundido [35]. Apesar do exposto, as causas deste efeito não são ainda completamente conhecidas e aceites. Contudo, existem algumas características que se podem revelar uteis no processamento de polímeros, contribuindo para a diminuição deste efeito [24]. Assim, uma forma possível de evitar o seu aparecimento passa por aumentar a temperatura do fundido [24]. Na Figura 12 está retratado o aparecimento do efeito de fratura do fundido.

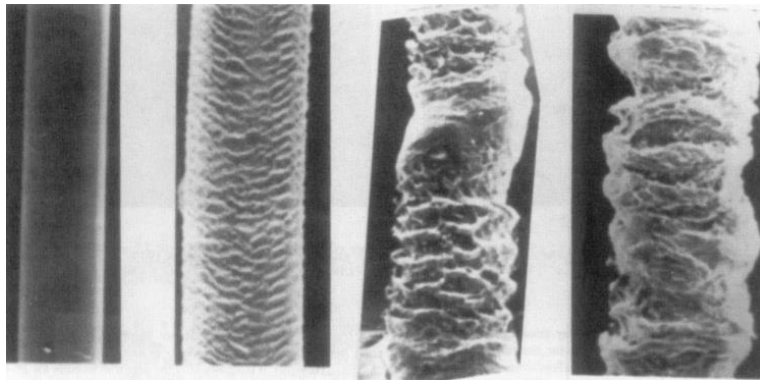


Figura 12 – Progressão de uma superfície lisa para pele de tubarão e, posteriormente, fratura do fundido [36].

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Mini linha de extrusão protótipo

O equipamento em estudo trata-se de uma mini linha de extrusão protótipo para o fabrico de pequenas quantidades de filamento. A linha contempla vários componentes, nomeadamente a extrusora, fieira, motores, sistema de aquecimento, controlador de temperaturas, rolos de puxo e controlador de velocidades de rotação dos parafusos e dos rolos de puxo.

As Figuras 13 e 14 mostram a montagem completa da mini linha de extrusão com os equipamentos acessórios.

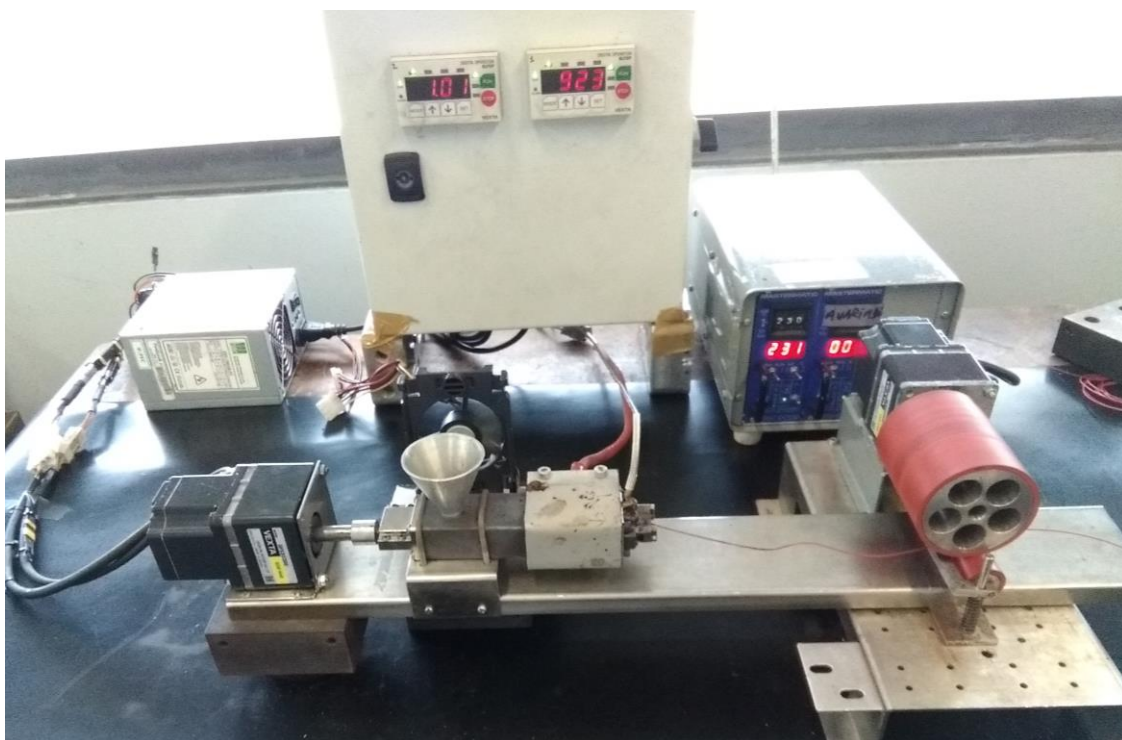


Figura 13 – Mini linha de extrusão com respetivos acessórios.

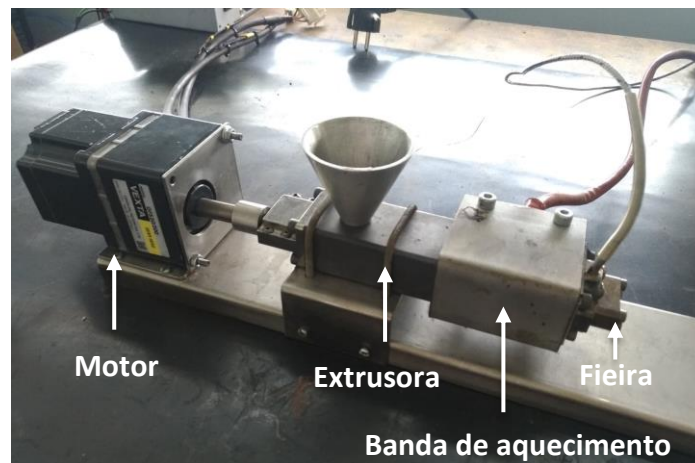


Figura 14 – Montagem da extrusora com motor.

Fazendo uma análise individualizada a extrusora contempla um cilindro com um duplo-fuso contra-rotativo de dimensões reduzidas que permite extrudir materiais poliméricos em forma de grânulos ou pó.

Como base de suporte e fixação para todos os componentes da linha tem-se uma calha de aço inoxidável. A esta está fixada uma peça que permite o encaixe do motor (Figura 16). Para haver movimento de rotação dos parafusos é necessário um motor que garanta que velocidades de rotação dos parafusos constantes para que o material avance também de forma constante ao longo dos mesmos e garantir assim um débito uniforme. Para isso, usou-se o motor BLFM230-GFS, do tipo Brushless DC Motor, da marca VEXTA. As Figuras 15 e 16 mostram os componentes mencionados anteriormente.



Figura 15 – Motor e caixa de engrenagens utilizados.

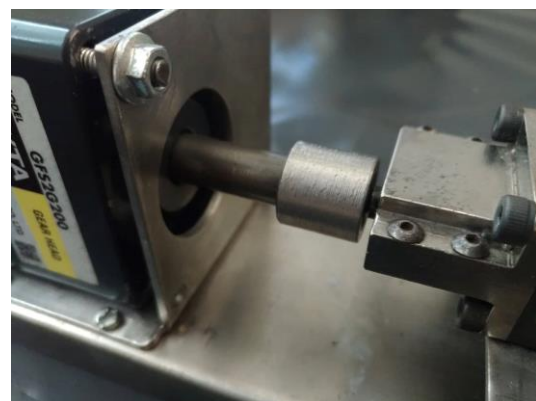


Figura 16 – Peça de encaixe do motor e peça de ligação entre motor e extrusora.

Acoplado ao motor está um controlador de velocidades, para controlar a velocidade de rotação dos parafusos. Este controlador está também ligado a outro equipamento acessório, nomeadamente aos rolos de puxo, que são responsáveis pelo estiramento dos filamentos e promovem o movimento dos mesmos ao longo da linha.

Para este mesmo equipamento foram fabricadas duas fieiras, constituídas por bronze, uma com um diâmetro de 1.5 mm e outra com um diâmetro de 3 mm, conforme representadas na Figura 17, que se podem ser facilmente trocadas.



Figura 17 – (a) fieira de 1.5 mm e (b) fieira de 3 mm.

Como sistema de aquecimento a extrusora apresenta uma secção revestida com uma resistência de banda quadrangular, de modo a que o aquecimento seja uniforme. Esta foi fabricada de aço inoxidável, com uma potência de 300W e uma voltagem de 230V. Entre a resistência e a extrusora está colocado um termopar, sensor de temperatura que permite medir a mesma num local específico. Este estabelece a ligação entre a resistência e o controlador de temperatura, permitindo medir a temperatura de forma adequada para o processamento. Na Figura 18 é mostrada a resistência e o termopar descritos anteriormente.



Figura 18 – Resistência quadrangular e termopar de medição de temperatura.

Para selecionar a temperatura de extrusão foi utilizado um controlador de temperatura, ligado à resistência e ao termopar, da marca MASTERMATIC.

3.2 Matérias-primas

Foram selecionados 5 materiais, nomeadamente um ABS, PLA, LDPE, PP e PS, materiais esses com diferentes aplicações e propriedades entre si, sendo assim possível verificar quais as diferenças que ocorrem ao longo de processamento de cada um. Entre estes há alguns que, à priori, são mais viáveis para processo de extrusão que outros, uma vez que estes são direcionados para essa aplicação e, por esse motivo, apresentam índices de fluidez mais baixos. Estes materiais mostram boa capacidade de formação de extrudidos enquanto que materiais com baixo peso molecular (maior fluidez) quando extrudidos não apresentam tão boa capacidade de formação de extrudidos de forma uniforme.

Porém foram todos testados para verificar o funcionamento do protótipo, como ir-se-á verificar nos capítulos seguintes. Todos os materiais foram fornecidos em grânulos e as informações relevantes acerca dos mesmos encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Informações sobre os materiais utilizados.

Material	Fabricante	Grade	Densidade (kg/m³)	MFI (g/10min)	Aplicação
ABS	Poliversal	FA4475 Bordeaux	1050	34 (220 °C – 10kg)	Moldação por injeção
LDPE	Repsol	ALCUDIA 2221FG	922	2.1 (190 °C – 2.16kg)	Extrusão de filme
PLA	NatureWorks	Ingeo Bioolymer 3052D	1240	14 (210 °C – 2.16kg)	Moldação por injeção
PP	Repsol	ISPLEN PR230C1E	902	1.6 (230 °C – 2.16kg)	Extrusão de folhas planas, moldação sopro e termoformação
PS	Ineos Styrolution	Styrolution PS 165N	1040	3.4 (200 °C – 5kg)	Extrusão de lâminas, perfis, chapas e outros tipos de extrusão

Materiais higroscópicos como o ABS e PLA apresentam uma grande afinidade com a humidade e precisam de ser secos adequadamente para garantir um acabamento de qualidade ao produto final. Assim sendo foi necessário secar estes materiais e, para isso, começou-se por deixar o ABS na estufa a 80 °C durante aproximadamente 4h e o PLA a 50 °C, segundo indicado nas suas fichas técnicas.

As fichas técnicas relativas a todos os materiais encontram-se no Anexo I.

3.3 Processamento dos filamentos

O processo de extrusão com o protótipo da mini linha de extrusão apresenta 4 variáveis que podem ser otimizadas de modo a obter-se os melhores resultados. Estas são a velocidade de rotação dos parafusos, velocidade de rotação dos rolos de puxo, temperatura de extrusão e distância entre extrusora e rolos de puxo.

Sendo uma extrusora duplo-fuso contra rotativo, em que os dois parafusos giram para lados opostos, é necessário operar a baixas velocidades de rotação dos parafusos, devido ao facto das forças resultantes pelo material atravessar as folgas entre os parafusos fazerem com que haja uma tendência dos parafusos a afastarem-se entre si, empurrando-os contra a parede do cilindro, acelerando o seu desgaste, como referido no Capítulo 2. Desse modo, e seguindo instruções indicadas de que não se deviam exceder velocidades acima de 5 RPM, na realização deste estudo foram utilizadas baixas velocidades de rotação dos parafusos e consequentemente dos rolos de puxo, de forma a garantir a segurança do processo. Para existir um modo de comparação, foram fixados valores de velocidades a utilizar para o processamento dos diferentes materiais de forma a uniformizar a recolha de dados. Deste modo é possível verificar as diferenças existentes no processamento de cada material às mesmas velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo.

De modo a saber-se a velocidade linear dos rolos de puxo mediu-se o seu diâmetro. Com essa informação e aplicando a equação de velocidade linear (eq. 1) é possível calcular e determinar a velocidade linear de rotação dos rolos de puxo.

$$(eq.1) \quad v = \frac{2\pi r}{T}$$

Na Tabela 4, está descrita a seleção de velocidades dos parafusos e rolos de puxo utilizadas.

Tabela 4 – Velocidades de rotação do parafusos e rolos de puxo utilizadas.

Velocidade de rotação dos parafusos (RPM)	Velocidade de rotação rolos de puxo (RPM)	Velocidade linear rolos de puxo (mm/s)
3	1	3,45
3,5	1,25	4,32
4	1,5	5,18
4,5	1,75	6,05

A velocidade linear dos rolos de puxo é, consequentemente, proporcional à velocidade a que o extrudido avança ao longo da linha. Isto porque a superfície dos rolos está em contacto com o filamento, pelo que o comprimento da superfície que está em rotação é equivalente ao comprimento de material que avança.

Relativamente às temperaturas de extrusão foram testadas temperaturas de 10°C em 10°C dentro da faixa de valores indicados nas fichas técnicas dos materiais fornecidas pelos fabricantes, até se obter a temperatura mais indicada ao correto fabrico de filamentos. Não é possível definir um perfil de temperaturas ao longo da extrusora, uma vez que só existe uma banda de aquecimento e, portanto, só é possível seleccionar uma temperatura e para o local onde esta está inserida. Os intervalos de temperatura estudados para os diferentes materiais encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Intervalos de valores de temperatura de processamento para os diferentes materiais.

Material	Temperatura mínima de processamento (°C)	Temperatura máxima de processamento (°C)
ABS	220	260
LDPE	150	180
PLA	170	205
PP	185	215
PS	180	240

Numa fase de teste da linha foi-se alterando a distância entre a extrusora e os rolos de puxo entre aproximadamente 50 cm e 150 cm, no sentido de verificar se havia alterações na qualidade do processamento dos filamentos. O que se verificou foi que como foram utilizadas velocidades tanto dos parafusos como dos rolos de puxo baixas, o material avançava lentamente ao longo da linha, pelo que à distância mínima (50cm) o material arrefecia o suficiente até chegar aos rolos de puxo e por esse motivo a utilização de distâncias superiores não interferiam em nada no processamento dos filamentos e não havia alteração dos resultados.

Para verificar se a extrusora é capaz de debitar material de forma constante, durante o processamento foram medidos os débitos mássicos para cada material em estudo às diferentes velocidades de rotação dos parafusos e, para isso, foram retiradas amostras de material, de 1 em 1 minuto, num intervalo de 5 minutos consecutivos, às diferentes velocidades de rotação dos parafusos utilizadas, sendo posteriormente pesadas.

3.4 Caraterização dos filamentos

Os filamentos produzidos com os diferentes materiais foram caraterizados em termos dimensionais, propriedade mecânicas, qualidade da superfície e MFI.

3.4.1. Caraterização dimensional

Foram realizadas medições das variações de diâmetro usando a velocidade de rotação dos parafusos constante e alternando a velocidade dos rolos de puxo e registados os valores médios de diâmetro para cada condição. As medições para as diferentes condições de processamento foram realizadas ao longo de 4 metros de comprimento dos filamentos, num intervalo de 10 em 10 cm, com o intuito de perceber a sua variabilidade. Para o efeito, usou-se um paquímetro digital TengTools de 150mm com uma resolução de 0,01mm.

O uso de paquímetro faz com que no caso de haver ovalização do filamento, as medições não sejam fidedignas, uma vez que consoante a posição em que se realizar a medição podem obter-se valores distintos.

Por outro lado, utilizou-se a Lupa Estereoscópica Olympus para verificar se os filamentos apresentam uma geometria circular ou oval ao longo do seu comprimento. Para isso foram cortadas amostras de 10 e 10 cm ao longo de um metro de comprimento de filamento, e analisaram-se as seções transversais das mesmas. Para poder efetuar-se a análise foi utilizada uma base com plasticina, para ser possível fixar a amostra no sentido vertical e visualizar-se a área pretendida. A ampliação utilizada foi de 2x1.67 e, com o auxílio de uma câmara digital Leica DFC 280, foi possível retirar imagens do que estava a ser observado.

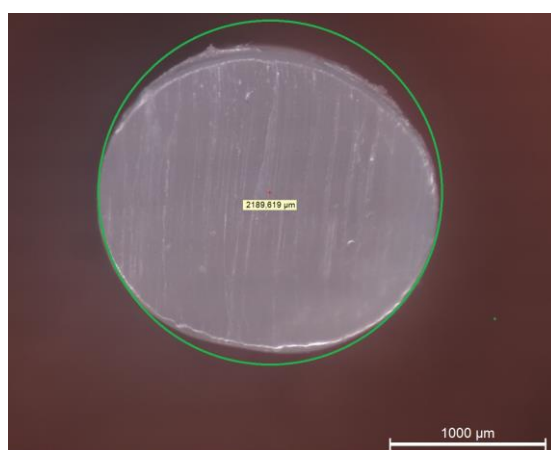


Figura 19 – Exemplo da observação típica da secção transversal de um filamento de LDPE à lupa.

3.4.2. Avaliação da qualidade superficial

Os filamentos fabricados, foram avaliados em termos de qualidade superficial através de uma análise a olho nu e através do toque, de forma a perceber se existem bolhas no seu interior de grandes dimensões (nos materiais transparentes), rugosidades superficiais e/ou outros possíveis defeitos.

Foi também utilizada uma Lupa Estereoscópica Olympus para observar a superfície dos mesmos mais detalhadamente. Para esse fim foi utilizada uma ampliação de 0.67x1.67.

3.4.3. Caracterização mecânica

Foram realizados ensaios de tração aos filamentos com resultados dimensionais mais próximos dos pretendidos e melhores condições superficiais para cada material. Os resultados são depois comparados com os valores indicados nas fichas técnicas dos materiais, de forma a saber se as propriedades mecânicas dos filamentos se mostram distintas comparativamente com os dados fornecidos pelos fabricantes.

Os ensaios de tração foram conduzidos no equipamento *Zwick/Roell Z005*, com uma célula de carga máxima de 5 kN. A este equipamento está sincronizado o computador, que através do software testXpert é possível monitorizar e controlar todo o processo.

As amostras foram cortadas com dimensões aproximadas de 150mm de comprimento e foram realizados 6 ensaios para cada material. Todos os ensaios procederam-se a uma velocidade de 50mm/min e iniciaram-se com uma distância entre amarras de 80mm.

3.4.4. Medição do Índice de Fluidez

Para comprovar que se as características de escoamento dos materiais eram alteradas após o processamento realizaram-se ensaios de MFI para filamentos dos cinco termoplásticos

O propósito da realização deste ensaio vem no seguimento de no caso de existirem alterações na capacidade de escoamento dos materiais após o processamento, pode gerar influência dependendo da aplicação para a qual forem sujeitos posteriormente. Dando o exemplo da impressão 3D, em que é necessário que os filamentos tenham determinados índices de fluidez, se as propriedades de escoamento dos materiais são alteradas após o processamento terá, conseqüentemente, influência no processo de impressão 3D uma vez que o MFI do material virgem pode não ser o mesmo que o MFI dos filamentos após processamento.

Começou-se por garantir que o equipamento estava a uma temperatura correspondente à indicada nas fichas técnicas de cada material e, posteriormente, colocaram-

se fragmentos dos filamentos na fieira. Aguardou-se que o material fundisse e montou-se o pistão e o peso.

Os ensaios decorreram de acordo com a norma portuguesa NP 2914 (Anexo II), sendo que as temperaturas e pesos aplicados foram seleccionados de acordo com a informação das fichas técnicas de cada material de forma a garantir que houvesse um meio de comparação, e retiraram-se amostras em intervalos de 10 segundos, 30 segundos e 1 minuto, consoante a capacidade de escoamento do material em estudo.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Processo de extrusão com fiação de 1,5 mm de diâmetro

4.1.1. ABS

Segundo as temperaturas indicadas para o processamento do ABS, numa primeira tentativa, começou-se por definir 230 °C.



Figura 20 - Aspeto superficial do filamento de ABS processado à temperatura de 230 °C.

Utilizando a faixa de temperaturas indicadas para este material o filamento obtido aparentava o aspeto indicado na Figura 20, possivelmente devido a degradação térmica.

Assim foi-se alterando a temperatura da resistência da extrusora até se obter filamento sem defeitos aparentes. Na prática, foi necessário seleccionar temperaturas abaixo da janela operatória sugerida pelo fabricante para se conseguir filamentos sem defeitos, uma vez às temperaturas definidas para o processamento do mesmo o extrudido não apresentava boa qualidade superficial. A Figura 21 mostra o processamento do ABS a 190 °C, temperatura mínima da resistência à qual foi possível extrudir material com boa qualidade superficial.

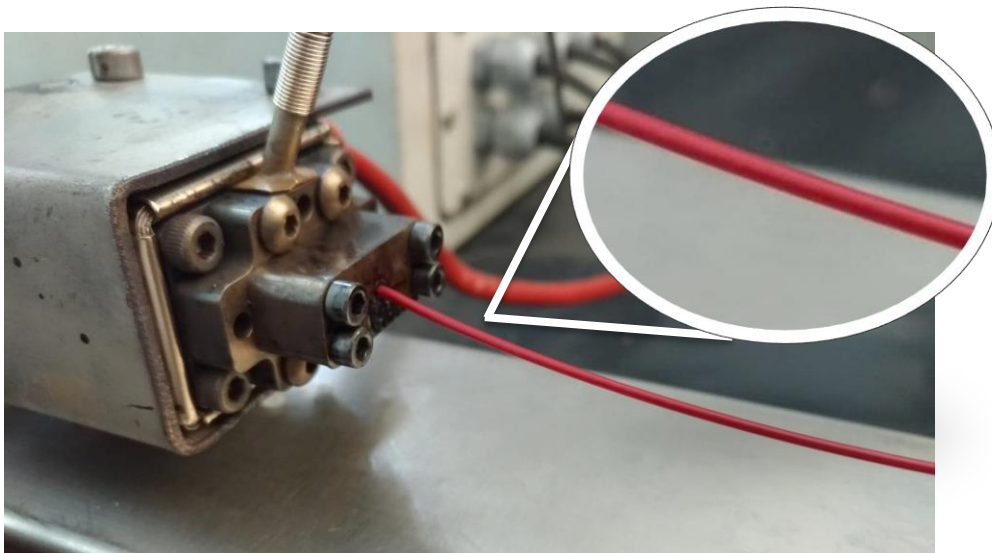


Figura 21 – Fabrico de filamento de ABS à temperatura de processamento de 190 °C.

Para esta temperatura fizeram-se medições do débito mássico às diferentes velocidades de rotação dos parafusos estipuladas para verificar se a extrusora é capaz de extrudir material uniformemente. Para isso foram retiradas amostras de material, de 1 em 1 minuto, num intervalo de 5 minutos consecutivos, às diferentes velocidades de rotação dos parafusos utilizadas, sendo posteriormente pesadas. Os resultados encontram-se nas Figuras 22 e 23.

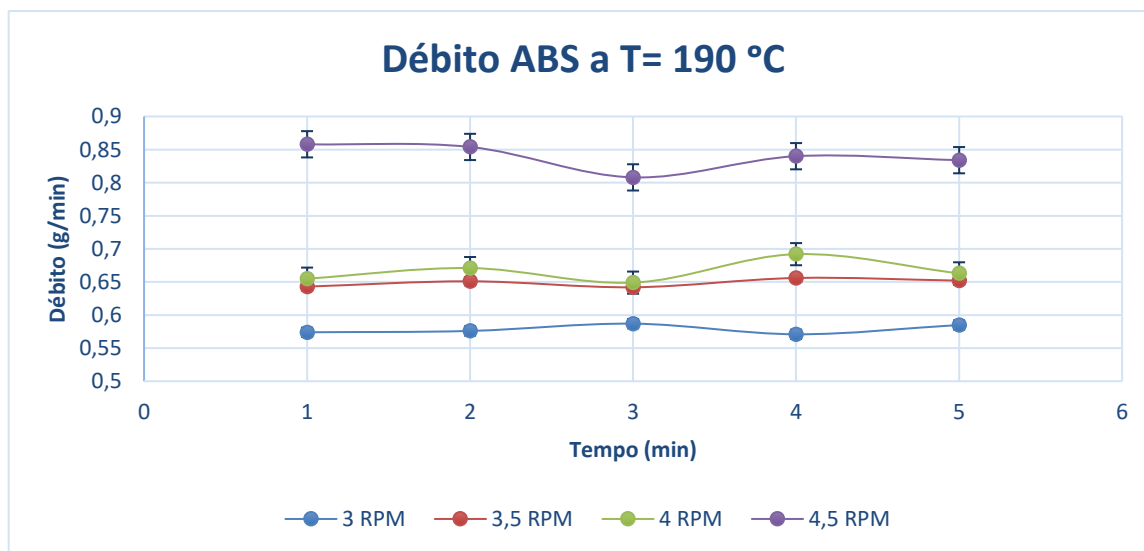


Figura 22 - Variação do débito de ABS em função do tempo

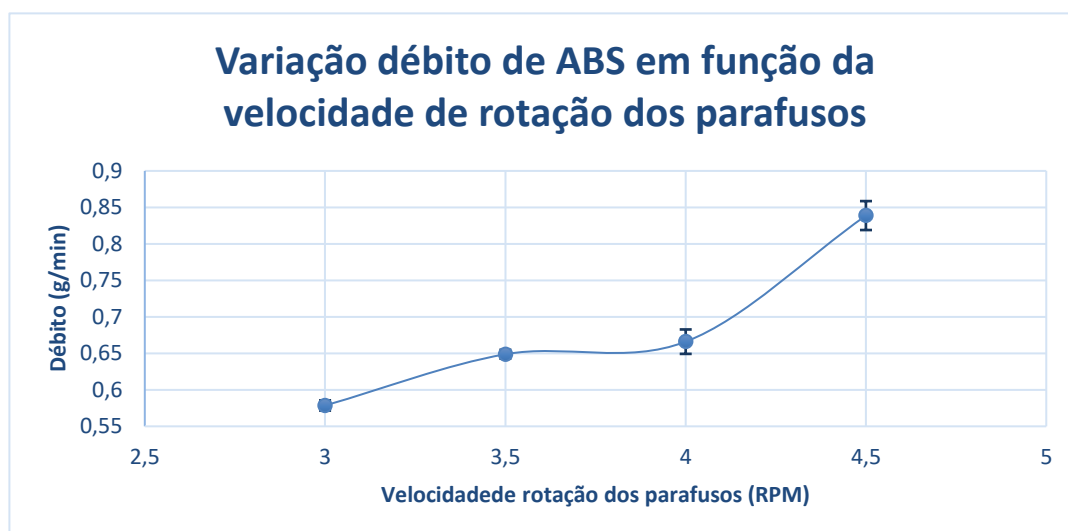


Figura 23 – Variação do débito do ABS com o aumento da velocidade de rotação dos parafusos.

Na prática, a variação da velocidade de rotação dos parafusos implica uma variação quase proporcional do débito mássico [8]. Analisando as Figuras 22 e 23 constata-se que a variação do débito em função da velocidade de rotação dos parafusos não se mostrou completamente linear. Esta situação pode dever-se à possibilidade de o material não entrar para os parafusos de forma uniforme ou devido a possíveis hesitações na recolha das amostras a pesar.

Como se verifica pela Figura 23, à velocidade máxima utilizada neste estudo o débito médio com o ABS é cerca de 50g/h, muito inferior à capacidade das mini extrusoras já existentes. Isto pode dever-se à utilização de velocidades de rotação dos parafusos muito baixas.

Posteriormente realizou-se o cálculo dos valores de taxa de corte existentes na fieira. Para isso recorreu-se ao débito volúmico (resultante da divisão do débito mássico pela densidade do material em estudo indicada na ficha técnica do mesmo) para cada velocidade de rotação dos parafusos e ao diâmetro da fieira. Com estas informação e através da equação adequada é então possível obter os valores de taxa de corte na fieira. Os valores obtidos para o ABS estão assim registados na Tabela 6.

Tabela 6 – Taxas de corte na fieira durante o processamento do ABS em função da velocidade de rotação dos parafusos.

Velocidade de rotação dos parafusos (RPM)	Débito volúmico (m³/s)	Taxa de corte (s⁻¹)
3	9,19x10 ⁻⁹	27,7
3,5	1,03x10 ⁻⁸	31,09
4	1,06x10 ⁻⁸	31,99
4,5	1,33x10 ⁻⁸	40,19

Para o processo de extrusão o espectro típico de taxas de corte é entre 10⁰ – 10³ s⁻¹ [24].

O aumento da velocidade de rotação de parafuso induz num aumento de débito e, consequentemente, no aumento da taxa de corte. Tal se verificou nesta situação, no entanto obtendo-se taxas de corte dentro dessa gama, embora baixas devido à utilização de baixas velocidades de rotação dos parafusos.

Como foi referido no Capítulo 2, aumento das taxas de corte implica um aumento de inchamento logo, teoricamente, resultará num possível aumento do diâmetro dos filamentos. No entanto, durante o processamento do ABS observou-se ainda que, devido ao facto de ser um material indicado para injeção e apresentar fluidez superior quando comparado com materiais indicados para o processo de extrusão, não era possível obter um valor considerável de inchamento que permitisse produzir filamento com diâmetro pretendido. Sendo a fieira de 1,5mm e o objetivo ser alcançar diâmetros de 1,75mm é necessário que haja inchamento suficiente para isso. Para todas as condições definidas não foi viável, sendo este facto abordado mais detalhadamente na secção de caracterização dimensional.

Seria necessário a utilização de uma fieira de 1,75mm para de obterem diâmetros próximos dessa medida, no entanto não existia uma fieira desse tamanho para este equipamento e não houve a possibilidade de fabricar uma nova atempadamente durante o decurso do trabalho, devido à pouca disponibilidade da máquina para utilização.

4.1.2. LDPE

No processamento de LDPE foi utilizada uma temperatura de 150 °C, sendo que a temperaturas superiores o extrudido mostrava defeitos superficiais, como o caso do ABS. A Figura 24 mostra o processamento de LDPE à temperatura de 170 °C com muitas irregularidades, apesar de estar dentro da faixa de temperaturas de processamento recomendadas.

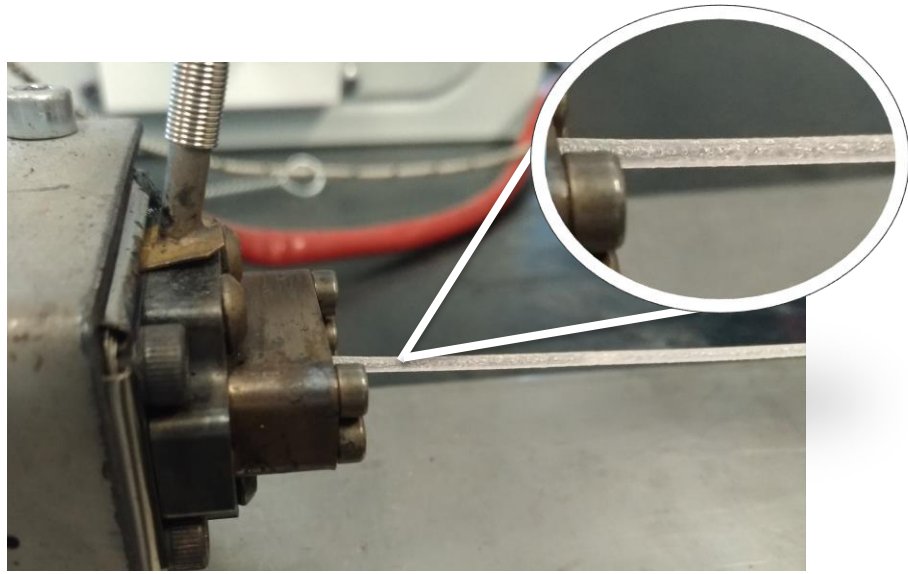


Figura 24 - Processo de extrusão do LDPE à temperatura de processamento de 180 °C.

Baixou-se a temperatura até se obter um filamento sem defeitos aparentes. Esta situação deu-se à temperatura 150 °C (temperatura mínima de processamento para este material) como se pode observar pela Figura 25.

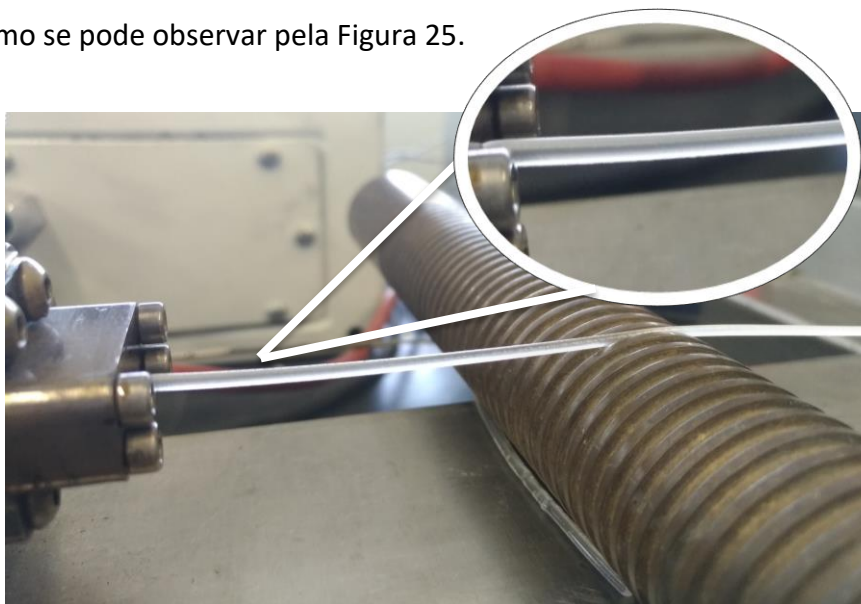


Figura 25 – Processo de extrusão do LDPE à temperatura de processamento de 150 °C.

Como forma de delinear um caminho de extrusão para o filamento, foi utilizada a peça presente na Figuras 25, meramente por facilidade de processo e suporte.

Reunidas condições favoráveis para o processo deu-se início à recolha de informação acerca da extrusão de LDPE. Nas Figuras 26 e 27 apresentam-se os valores de débitos obtidos ao longo do tempo para as várias velocidades de rotação dos parafusos.

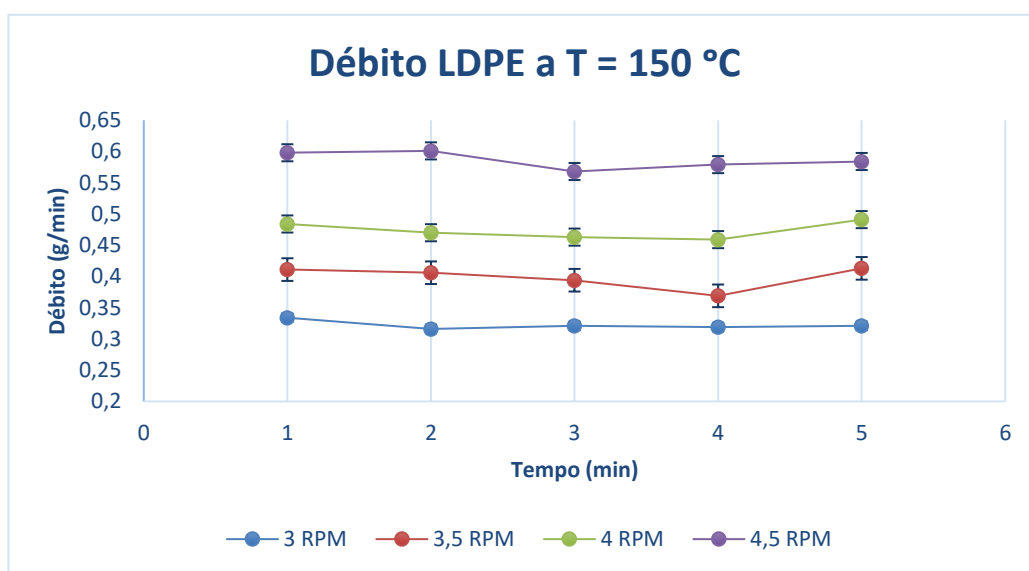


Figura 26 – Variação do débito de LDPE em função do tempo.

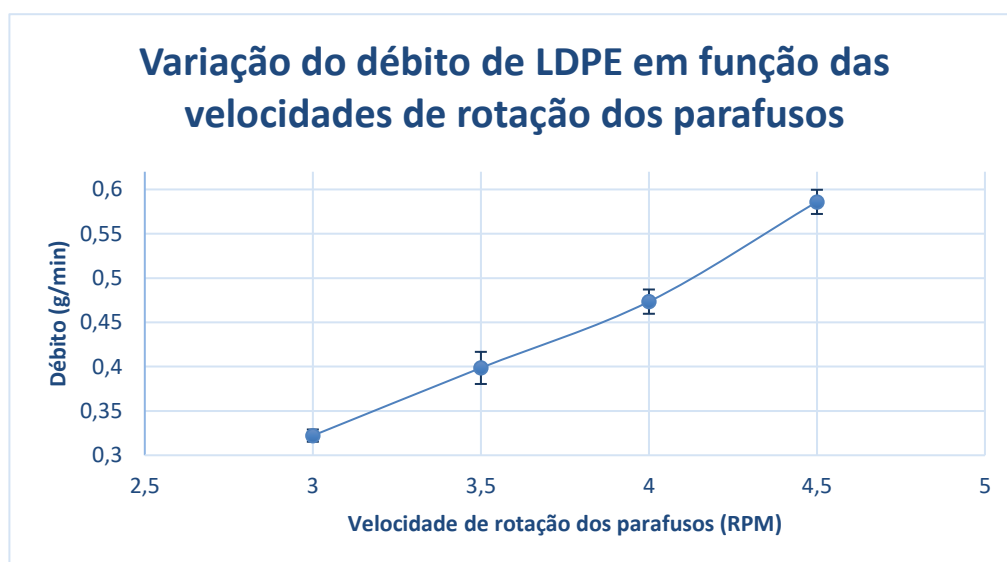


Figura 27 – Variação do débito do LDPE com o aumento da velocidade de rotação dos parafusos.

No caso em análise as variações do débito para as diferentes velocidades não se mostraram muito significativas ao longo dos 5 minutos definidos, mostrando ainda que à velocidade mais baixa a variação é menor. Como seria de esperar, aumentando a velocidade de rotação dos parafusos, há um aumento do débito, sendo que neste caso se mostrou praticamente linear.

O facto de ser um material mais viscoso induz em valores de débitos mássicos mais baixos quando, por exemplo, comparado com o ABS. Como este apresenta maior fluidez, consequentemente apresenta maior capacidade de escoamento e, portanto, será normal que haja um avanço de material mais lento para o LDPE do que para o ABS, por esse motivo.

Neste caso, à velocidade de 4,5 RPM consegue-se um débito médio de cerca 35 g/h, muito abaixo da capacidade das mini extrusoras existentes.

Com os valores de débito resultantes calculou-se então as taxas de corte na fieira, a partir dos débitos volúmicos resultantes, uma vez mais, da divisão do débito mássico pela densidade do material indicada na ficha técnica do mesmo (Tabela 7).

Tabela 7 – Taxas de corte na fieira durante o processamento do LDPE em função da velocidade de rotação dos parafusos.

Velocidade de rotação dos parafusos (RPM)	Débito volúmico (m³/s)	Taxa de corte (s⁻¹)
3	5,82x10 ⁻⁹	17,57
3,5	7,21x10 ⁻⁹	21,76
4	8,55x10 ⁻⁹	25,80
4,5	1,06x10 ⁻⁸	31,94

Obtiveram-se valores dentro do esperados, no entanto um pouco mais baixos do que os do ABS, devido aos valores inferiores de débito resultantes.

4.1.3. PLA

A temperatura que mais se adequou ao processamento deste material foi a 170 °C, temperatura mínima para realizar o seu processamento. A temperaturas superiores o material apresentava-se demasiado fluído havendo rompimento do filamento quando estirado pelos rolos de puxo e com defeitos superficiais. O aspeto do processamento do PLA encontra-se na Figura 28.

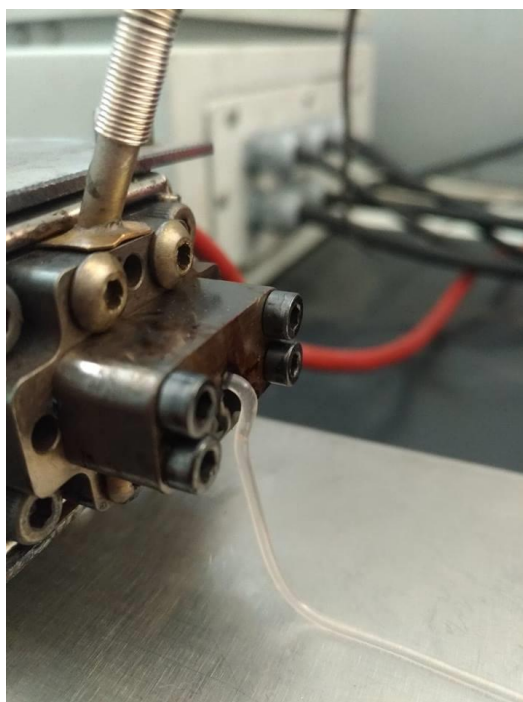


Figura 28 – Processo de extrusão do PLA à temperatura de processamento de 170 °C.

Sendo um material de elevada fluidez será de esperar que se obtenham valores de débito superiores para a velocidades fixadas. Estes encontram-se ilustrados nas Figuras 29 e 30.

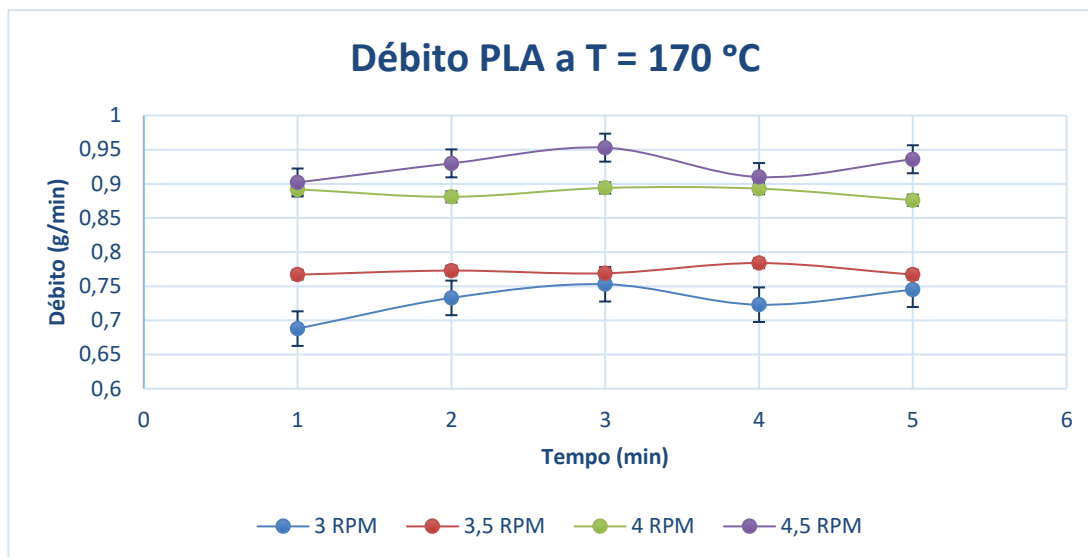


Figura 29 – Variação do débito de PLA em função do tempo.

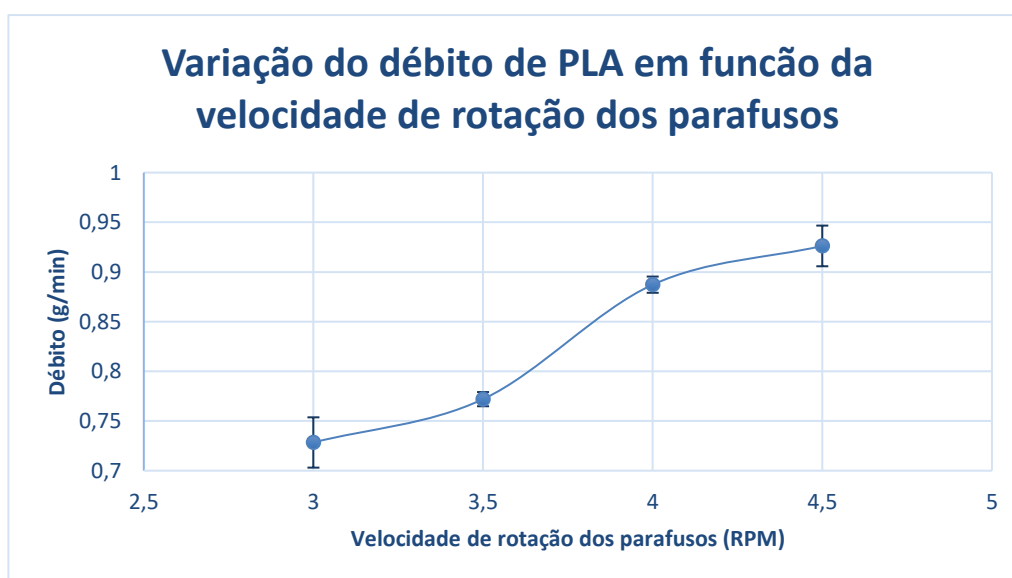


Figura 30 – Variação do débito do PLA com o aumento da velocidade de rotação dos parafusos.

O facto do PLA ser o material com maior índice de fluidez comparativamente com todos os outros processados traduz-se, teoricamente, numa maior facilidade de escoamento e, conseqüentemente, num maior débito mássico. Como se pode comprovar a partir das Figuras 29 e 30, os valores foram efetivamente ligeiramente superiores aos conseguidos com os outros materiais em estudo para as mesmas velocidades de rotação dos parafusos selecionadas.

Segundo a Figura 30, verifica-se que a variação do débito em função da velocidade de mostra quase linear, havendo maior variação ao longo do tempo para as velocidades de 3 e 4,5 RPM.

Na Tabela 8 são apresentados os valores de taxa de corte na fieira, para as diferentes velocidades de rotação dos parafusos.

Tabela 8 – Taxas de corte na fieira durante o processamento do PLA em função da velocidade de rotação dos parafusos.

Velocidade de rotação dos parafusos (RPM)	Débito volúmico (m³/s)	Taxa de corte (s⁻¹)
3	9,78x10 ⁻⁹	29,52
3,5	1,04x10 ⁻⁸	31,39
4	1,19x10 ⁻⁸	35,9
4,5	1,24x10 ⁻⁸	37,42

A taxas de corte obtidas na fieira mostraram-se expectáveis, conforme se foi analisando nas secções anteriores e semelhantes aos outros materiais.

À luz do que aconteceu com o ABS, sendo a fieira de um diâmetro de 1.5 mm é necessário que ocorra inchamento para que se cumpra o requisito de se obter um filamento com diâmetro de 1.75 mm. O facto de o material apresentar um índice de fluidez de 14g/10min, devido ao peso próprio e efeitos da gravidade, o filamento tende a relaxar e cair logo à saída da fieira (como mostra a Figura 28) fazendo com que não seja possível produzir filamentos com as dimensões desejadas com as condições definidas. Esta situação será abordada com mais detalhe na secção de caracterização dimensional.

4.1.4. PP

Foi-se variando a temperatura dentro da faixa operatória de temperaturas do PP até se obter um filamento com, aparentemente, boas características. Essa situação foi conseguida a uma temperatura de 200°C, sendo que acima dessa temperatura o extrudido apresentava defeitos superficiais, como nos casos anteriores. A Figura 31 mostra o processamento deste material.

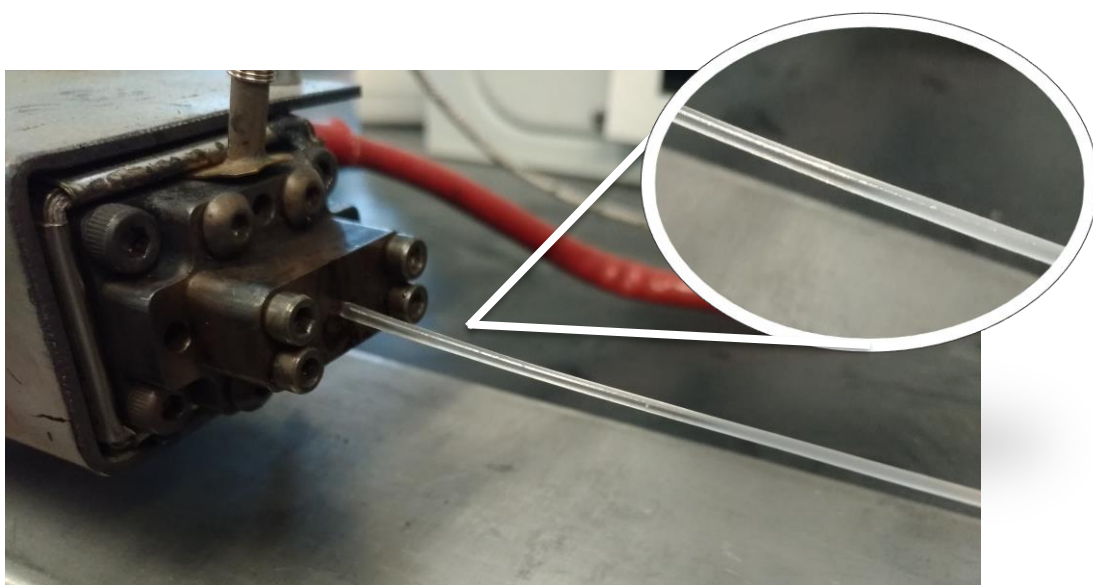


Figura 31 – Processo de extrusão do PP à temperatura da resistência de 200 °C.

Após a estabilização do processo iniciou-se a recolha dos fragmentos para medição do débito. Foram então alternadas as velocidades de extrusão e foram retirados fragmentos de filamento de 1 em 1 minuto, durante um período de 5 minutos, para serem posteriormente pesados. Os resultados obtidos estão representados na Figura 32 e 33.

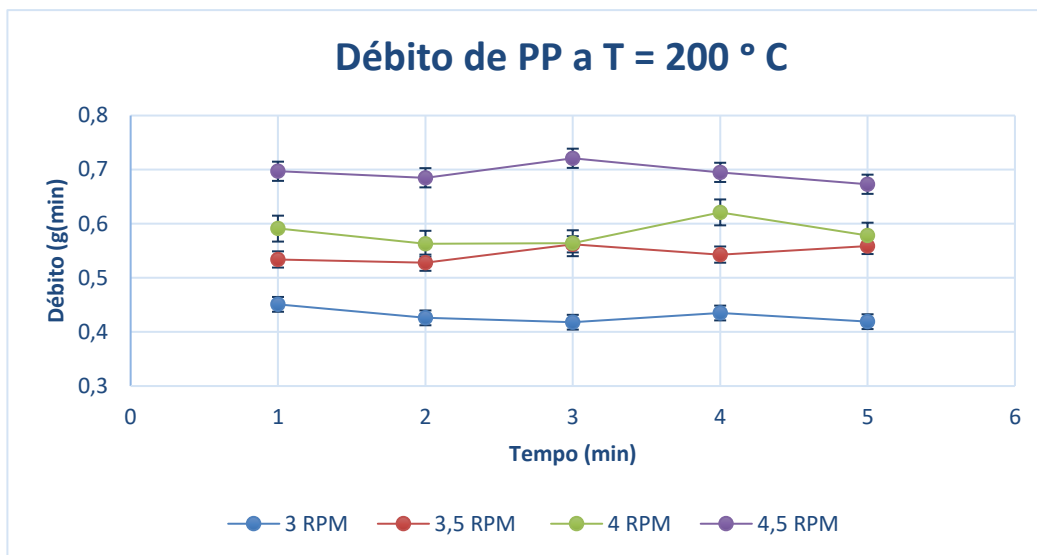


Figura 32 – Variação do débito de PP em função do tempo definido.

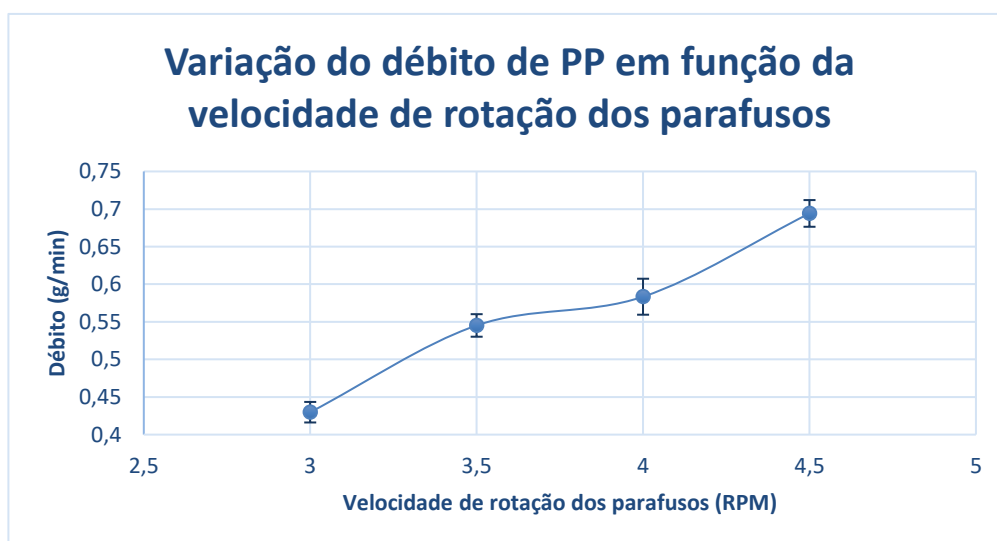


Figura 33 – Variação do débito do PP com o aumento da velocidade de rotação dos parafusos.

Analisando os valores de débitos obtidos, verifica-se que a variação dos mesmos em função da velocidade rotação dos parafusos se mantém também aproximadamente linear, havendo maior variação de débito ao longo do tempo para as duas velocidades superiores. O débito médio para a velocidade máxima é de 41,6 g/h.

Na Tabela 9 encontram-se os valores de débitos volúnicos e taxas de corte obtidas para este material.

Tabela 9 – Taxas de corte na fieira durante o processamento do PP em função da velocidade de rotação dos parafusos

Velocidade de rotação dos parafusos (RPM)	Débito volúmico (m³/s)	Taxa de corte (s⁻¹)
3	7,93x10 ⁻⁹	23,92
3,5	1,01x10 ⁻⁸	30,48
4	1,08x10 ⁻⁸	32,59
4,5	1,28x10 ⁻⁸	38,63

Uma vez mais, as taxas de corte obtidas enquadram-se dentro a gama indicada para o processo de extrusão, embora uma vez mais se obtenham valores baixos devido às baixas quantidades de débitos conseguidos.

Durante o processamento do PP foram ainda medidos os valores de residência mínimo e máximo do material, para as quatro velocidades de rotação dos parafusos utilizadas, para se estimar o tempo aproximado que os materiais podem demorar a percorrer a extrusora desde a sua entrada nos parafusos até à saída na fieira.

Esse processo foi realizado durante processamento do PP a 200 °C, em que se inseriu um grânulo de polímero com pigmento vermelho diretamente nos parafusos e deu-se início à contagem do tempo até se verificar o aparecimento de cor no extrudido à saída da fieira, sendo esse considerado o tempo mínimo de residência. Para saber-se qual o tempo máximo de residência procedeu-se de igual forma, no entanto espera-se que a cor no extrudido volte a desaparecer. Os valores registados encontram-se na Figura 34.

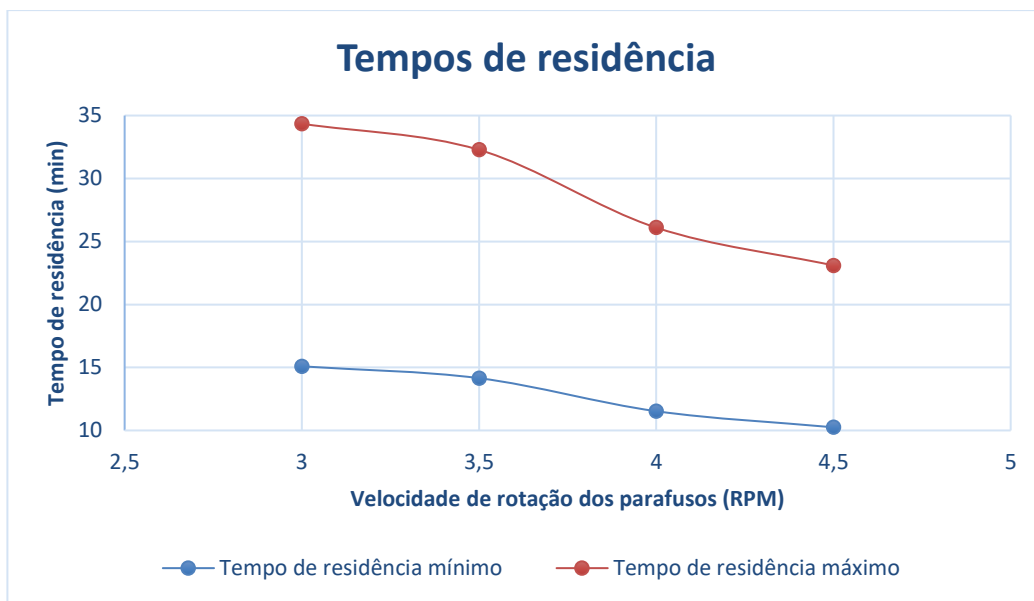


Figura 34 – Curvas de tempo de residência do material.

Com o aumento da velocidade o material permanece durante menos tempo no interior da extrusora, pelo que há um aparecimento mais rápido do pigmento e, consequentemente, desaparece também mais depressa. Isto implica que haja um menor intervalo de tempo em que o material permanece no interior da extrusora, conforme vai aumentando a velocidade. Analisando o gráfico da Figura 34 verifica-se que tanto o tempo residência mínimo como máximo apresentam uma diminuição aproximadamente linear em função do aumento da velocidade de rotação dos parafusos. Um menor tempo de residência no material ajuda a minimizar o aparecimento de defeitos, como por exemplo, degradação térmica.

Os dados recolhidos poderão não ser completamente exatos e, por esse motivo não haver uma proporcionalidade do tempo de residência completamente linear em função das velocidades de rotação dos parafusos, devido a possíveis hesitações na medição do tempo.

4.1.5. PS

O processo de extrusão do poliestireno deu-se a uma temperatura de 180 °C, temperatura mínima de processamento do mesmo. Uma vez mais, a temperaturas superiores a esta o material apresentava muito defeitos superficiais, como o exemplo da figura 35.

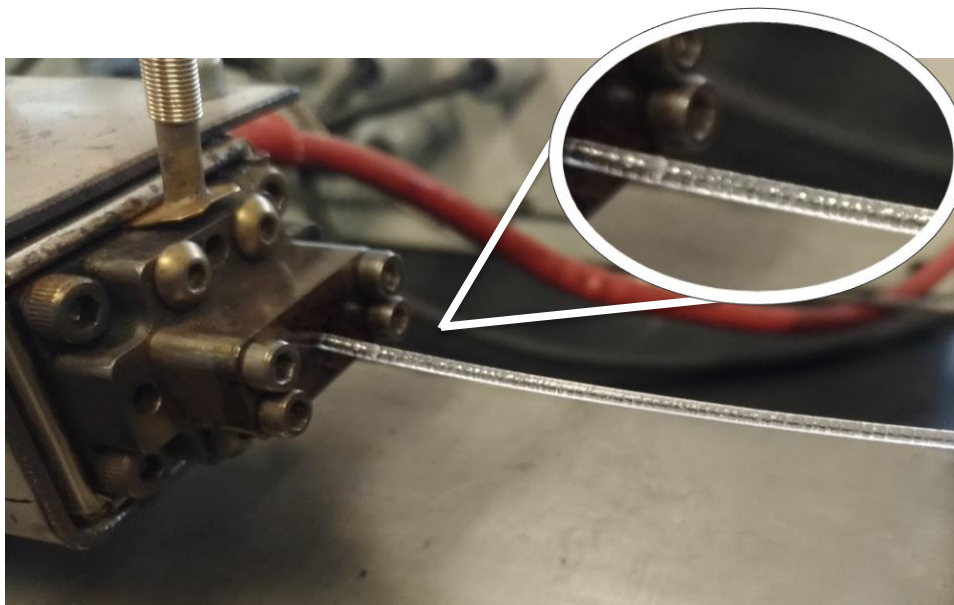


Figura 35 – Processo de extrusão do PS à temperatura de processamento de 200 °C.

O processamento deste material apresentou dificuldades no controlo de material que entra na extrusora. Isto aconteceu porque quando introduzido na tremonha, com o efeito da temperatura elevada na mesma, tendia a aglomerar impedindo a sua passagem para os parafusos. Como se pode ver pelas Figuras 36 e 37, o material ficava colado entre si e nas paredes da extrusora à entrada dos parafusos fazendo com que este não avançasse ao longo da extrusora. Para evitar este acontecimento foi necessário introduzir poucas quantidades de material de cada tremonha, fazendo com que este permanecesse pouco tempo na mesma, evitando que aquecesse em demasia e se desse este problema.



Figura 36 – Grânulos colados na parede da extrusora impedindo a passagem para os parafusos.



Figura 37 – Aglomerados de material resultantes da elevada temperatura da tremonha.

Tendo sido possível combater este efeito da forma mencionada anteriormente, deu-se então início à recolha de informação acerca do processamento de PS.

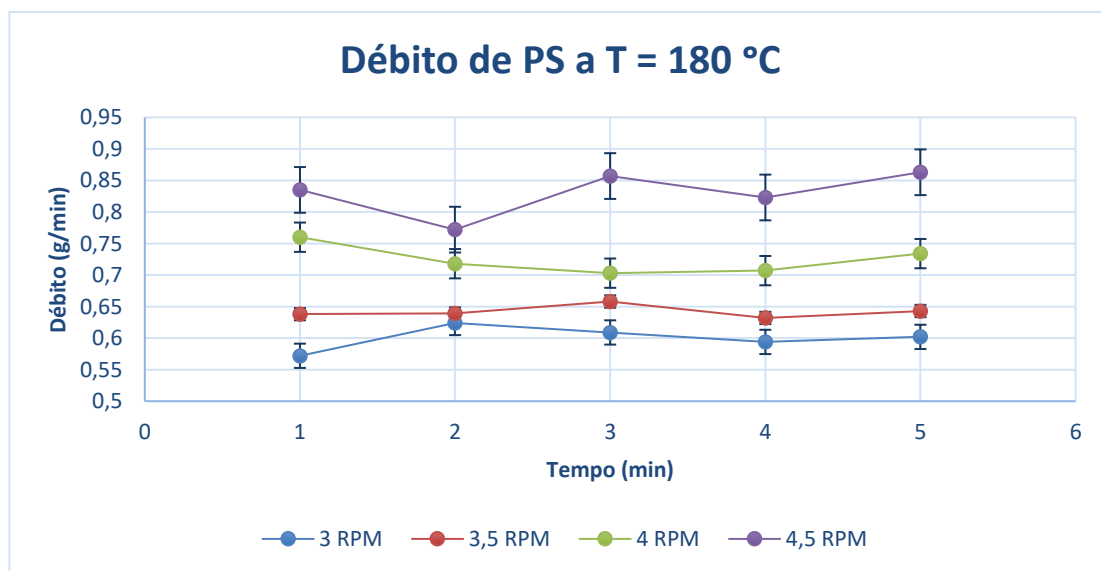


Figura 38 – Variação do débito de PS em função do tempo definido.

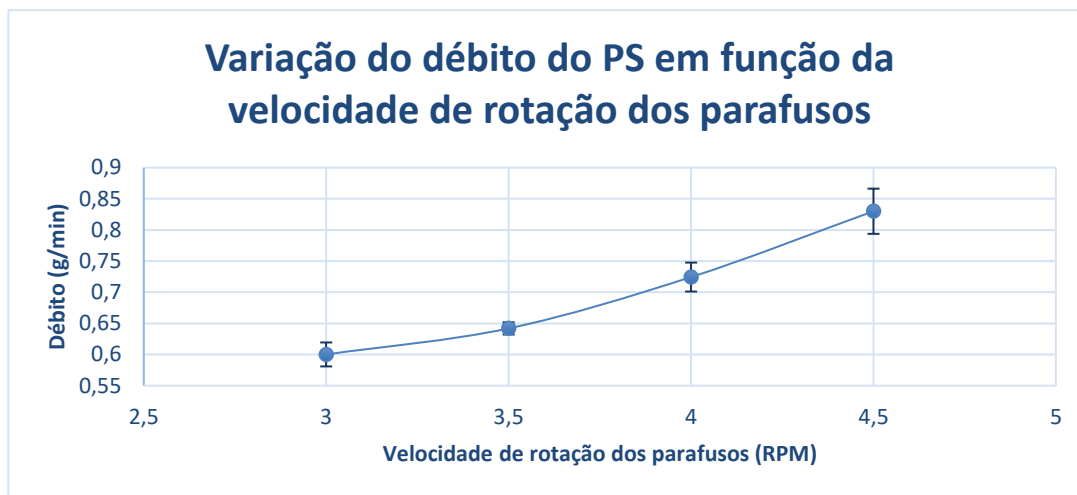


Figura 39 – Variação do débito do PS com o aumento da velocidade de rotação dos parafusos.

A partir das figuras 38 e 39 verifica-se que a variação de débito em função da velocidade também se mostrou aproximadamente linear e que as variações em função do tempo para mais significativas nas duas velocidades superiores. O débito para a velocidade máxima utilizada foi cerca de 50g/h, uma vez mais muito inferior aos débitos conseguidos nas mini extrusoras comercializadas.

Com os valores de débito procedeu-se ao cálculo das taxas de corte na fieira, como se pode ver pela tabela 10.

Tabela 10 – Taxas de corte na fieira durante o processamento do PS em função da velocidade de rotação dos parafusos

Velocidade de rotação dos parafusos (RPM)	Débito volúmico (m ³ /s)	Taxa de corte (s ⁻¹)
3	9,67x10 ⁻⁹	29
3,5	1,03x10 ⁻⁸	31,08
4	1,16x10 ⁻⁸	35,01
4,5	1,33x10 ⁻⁸	40,14

Os valores de taxa de corte apresentaram-se semelhantes a todos os obtidos para os materiais anteriores e expectáveis.

No processamento do PS, o facto de não se poder encher a tremonha e deixar o processo correr, torna a utilização deste material neste equipamento pouco viável, pois é necessário estar um operador constantemente a introduzir material em quantidades pequenas para que não ocorra o problema descrito anteriormente.

Outra limitação na utilização deste material passa pelo facto de não ser possível enrolar os filamentos. No mercado os filamentos são comercializados em forma de bobines, ou seja, são enrolados para se ter uma maior quantidade de material num espaço mais reduzido e de forma a facilitar o seu acondicionamento. Sendo o PS material amorfo e apresentar características como ser pouco flexível e extremamente quebradiço, na tentativa de enrolar os filamentos estes partiam com muita facilidade, tornado o PS um material impossível de acondicionar em forma de bobines.

4.2 Processo de extrusão com fieira de 3 mm de diâmetro

4.2.1. ABS e PLA

No seguimento dos comentários descritos no processamento com a fieira de 1.5 mm e como se poderá comprovar na secção de caracterização dimensional, verificou-se que o facto PLA ser um material demasiado fluído não era possível formar filamentos com o diâmetro requerido, nem aproximado. No sentido de se tentar obter filamentos com as dimensões pretendidas com este polímero, optou-se por testar este mesmo material com a outra fieira existente para a mini extrusora, a de 3 mm. A utilização desta fieira para o fabrico de filamento com dimensões de 1.75 mm de diâmetro veio com o sentido de se usar velocidades de rolos de puxo mais elevadas de forma a estirar o filamento logo à saída da mesma e diminuir assim a sua secção transversal. Por outro lado, optou-se também por tentar testar o ABS, por também não ter sido possível obter um produto final com as dimensões pretendidas.

Foram então inseridas as mesmas condições segundo o processamento anterior, nomeadamente temperatura de 190 °C para o ABS e 170 °C para o PLA. Relativamente à velocidade de rotação dos parafusos esta foi sendo alternada entre os 3 RPM e 5 RPM até que se conseguisse obter um débito constante. No entanto, como mostram as Figuras 40, 41, 42 e 43 não foi possível produzir filamento com a fieira de 3 mm, às condições definidas.

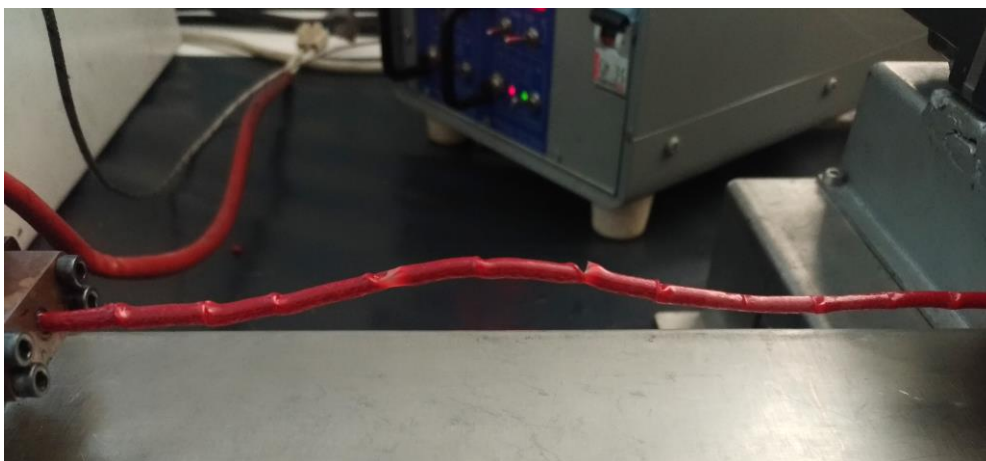


Figura 40 – Extrusão de ABS com fieira de 3mm.

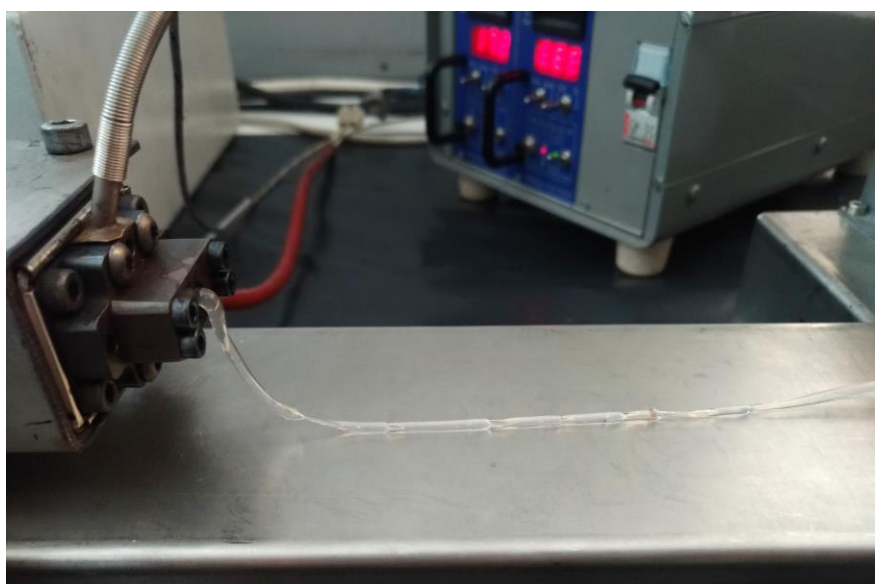


Figura 41 – Extrusão de PLA com fieira de 3mm.

Como se pode comprovar a partir das Figura 40 e 41, durante o processamento dos dois materiais dentro da faixa operatória anteriormente descrita, o fluxo de material não se mostrou constante à saída da fieira, havendo interrupções do mesmo, saindo o material de forma segmentada.

No ponto de vista de transporte, pode considerar-se uma extrusora duplo-fuso contra-rotativa como equivalente a um número par de câmaras de C independentes e dispostas em série, que recebem e bombeiam determinada quantidade de material por rotação dos parafusos.

O débito destas máquinas é determinado pelo número de entradas da rosca, m , velocidade dos parafusos, N , e volume, V , conforme a (eq.2):

$$(eq.2) \quad Q = 2mNV$$

Por outro lado, na prática, nas extrusoras duplo-fuso contra-rotativas existem folgas mecânicas e, devido à diferença de pressão entre duas câmaras consecutivas, pode haver escoamento de retorno através das folgas, havendo um possível recuo axial do material.

Devido às características anteriormente mencionadas subentende-se que a mini extrusora, para a velocidades estipuladas, não é capaz de transportar material suficiente para garantir um fluxo de material constante para uma fieira de secção de diâmetro de 3mm. As falhas de material observadas poderão ser assim equivalentes à quantidade de material que avança por rotação dos parafusos. Nesse sentido, seria necessário, possivelmente, usar velocidade de rotação dos parafusos mais elevadas para ser possível conseguir um fluxo de material constante e fabricar filamento para esta fieira.

Assim, as Figuras 42 e 43 exibem exemplos dos resultados da tentativa de fabricar filamentos com a fieira de 3mm.



Figura 42 – Aspeto do filamento extrudido com fieira de 3 mm.



Figura 43 – Aspeto de filamentos extrudidos com fieira de 3 mm.

4.3 Avaliação superficial e caracterização dimensional dos filamentos

Apenas foi possível fabricar filamentos com a fieira de 1,5mm de diâmetro, sendo o pretendido obter-se filamentos com diâmetros iguais ou próximos de 1,75mm. Assim, nesta secção, serão analisados os diâmetros dos filamentos conseguidos em função da variação das velocidades de rotação dos parafusos e de rolos de puxo para a fieira de 1,5mm e avaliada a qualidade superficial dos mesmos. Os resultados mais próximos dos pretendidos foram expostos indicando a variação de diâmetro longo de 4 metros e analisada a secção transversal de cada um.

4.3.1. ABS

Como referido na secção de processamento com fieira de 1,5mm de diâmetro, foi necessário processar o ABS a uma temperatura abaixo da janela operatória para se obterem filamentos sem defeitos superficiais, nomeadamente a 190 °C. Para esta temperatura e com as velocidades inicialmente estipuladas realizou-se o estudo da variação do diâmetro de ABS em função da velocidade de rotação dos parafusos e rolos de puxo, conforme mostra a Figura 44.

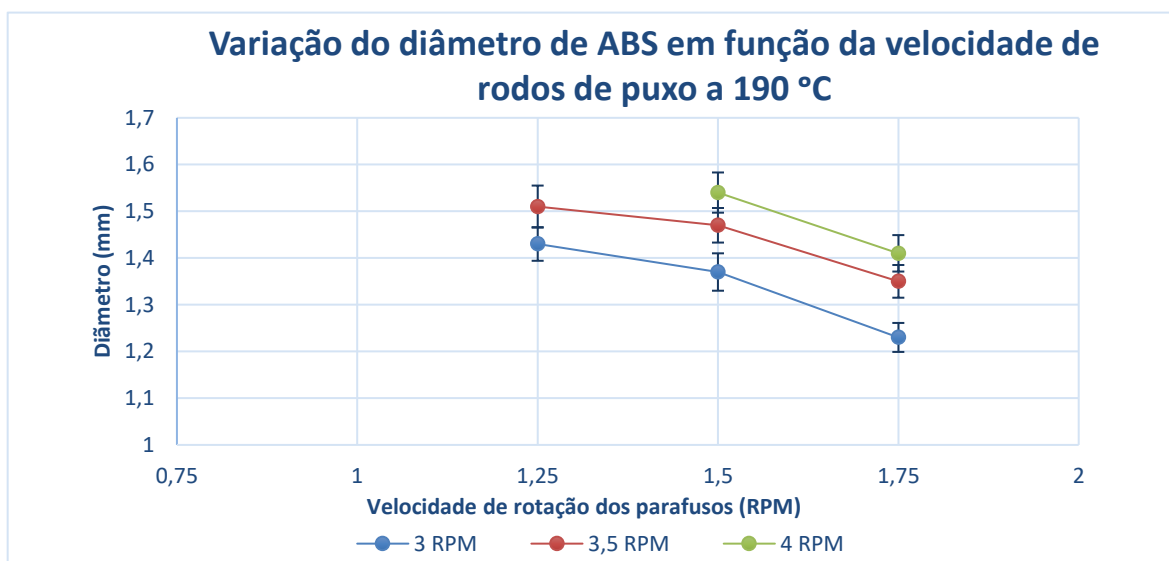


Figura 44 - Variação de diâmetro de filamento de ABS a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo a T=190 °C.

Os valores de diâmetro indicados para as diferentes velocidades são valores médios resultantes de medições de diâmetro feitas ao longo de 4 metros de comprimento de filamento, em intervalos de 10 em 10 cm, sendo o mesmo método realizado para todos os materiais seguintes em estudo.

Pelo facto de ser um material indicado para moldação por injeção e apresentar fluidez superior à indicada para o processo de extrusão, fez com que não fosse possível realizar o estudo para todas as combinações de velocidades de rotação dos parafusos com as velocidades de rolos de puxo definidas. Pelo mesmo motivo verificou-se que às condições definidas não era possível obter-se diâmetros próximos de 1,75mm, conforme pretendido.

Optou-se assim por reprocessar este material e utilizar uma temperatura um pouco mais baixa para o extrudido ficar mais viscoso (pois em geral o inchamento dos polímeros aumento com a diminuição da temperatura) e tentar obter-se diâmetros mais próximos dos pretendidos. Os melhores resultados para este material, em que o filamento não apresentou defeitos superficiais e diâmetros ligeiramente superiores, foram conseguidos a uma temperatura de 170 °C. A Figura 45 mostra a aparência do filamento processado a essa temperatura.



Figura 45 – Aparência superficial do filamento de ABS processado a 170 °C.

Como se usaram temperaturas muito baixas o extrudidos arrefecia rapidamente, pelo que a velocidades de rotação de parafusos altas e velocidades de rotação dos rolos de puxo baixas tornou-se muito difícil o controlo do avanço do filamento pela linha. Assim, o processamento deste material com as velocidades estipuladas não foi totalmente bem conseguido, pelo que só foi possível o uso de 5 condições distintas, como exemplifica a Figura 46.

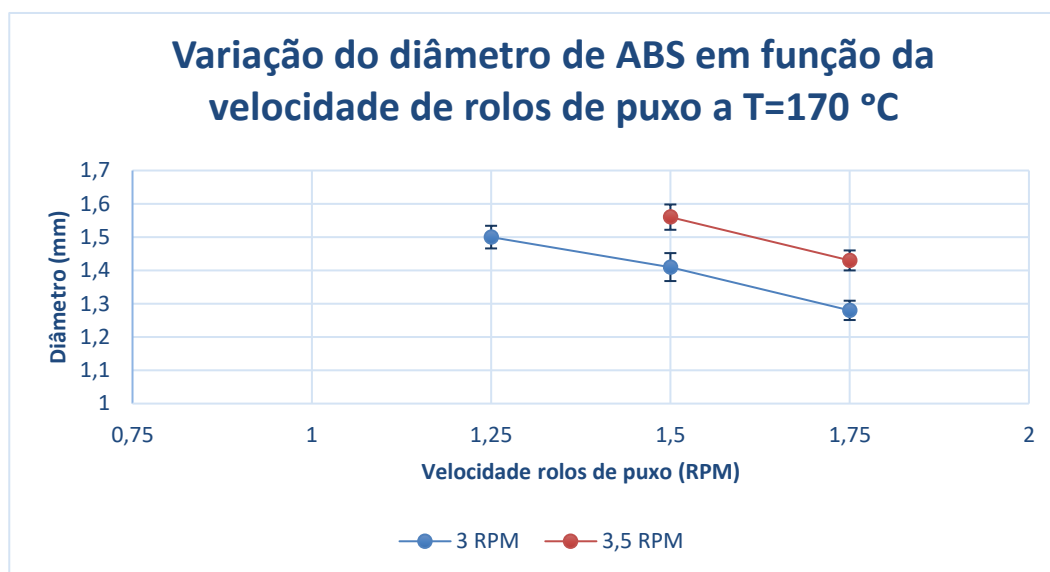


Figura 46 – Variação de diâmetro de filamento de ABS a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo a T=170 °C.

Para as 5 condições foram obtidos valores de desvio-padrão inferiores a 0,1 mm em relação às médias. O diâmetro mais próximo do pretendido deu-se a uma velocidade de rotação dos parafusos de 3,5 RPM e de rolos de puxo de 1,5 RPM, como se pode ver pelas Figuras 46 e 47.

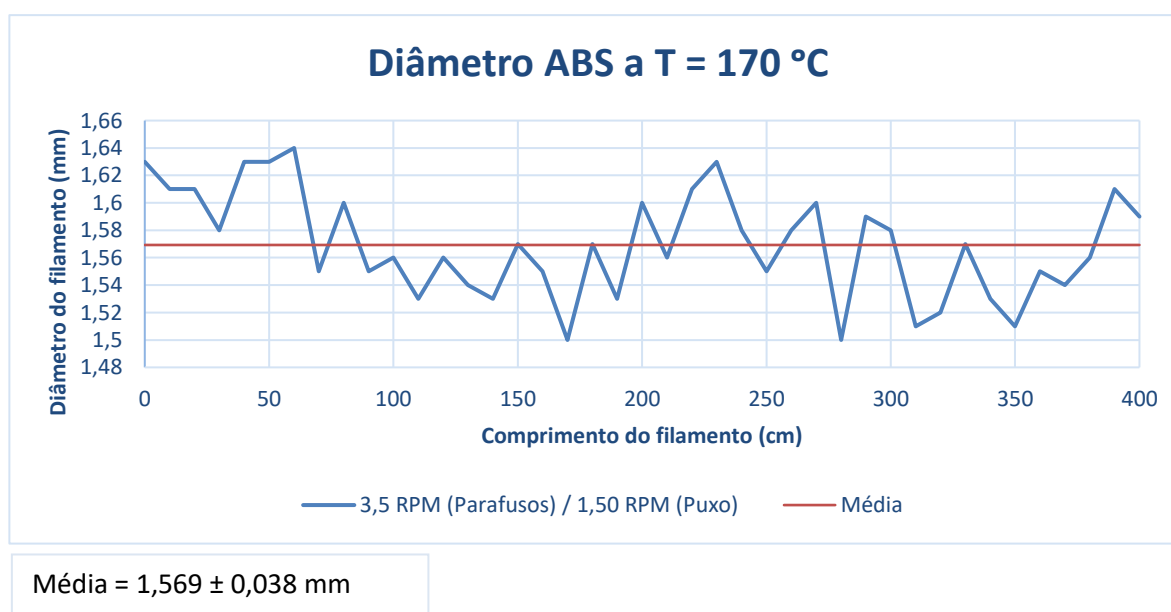


Figura 47 - Valores de diâmetro ao longo de 4 metros de filamento de ABS às velocidades de 3,5 RPM (parafusos) e 1,5 RPM (rolos de puxo).

Ainda que não se tenham atingido valores de diâmetro perto dos requeridos, a oscilação de diâmetros ao longo do comprimento do filamento, segundo as 40 medições realizadas, mostrou-se pouco discrepante, como é possível verificar através média e do desvio-padrão em relação à mesma conseguidos de $1,569 \pm 0,038$ indicado na Figura 47.

Com as observações à lupa da secção transversal do comprimento do filamento de ABS que se encontram na Figura 48 e Anexo III verificou-se que a secção se mantém com uma geometria circular e constante.

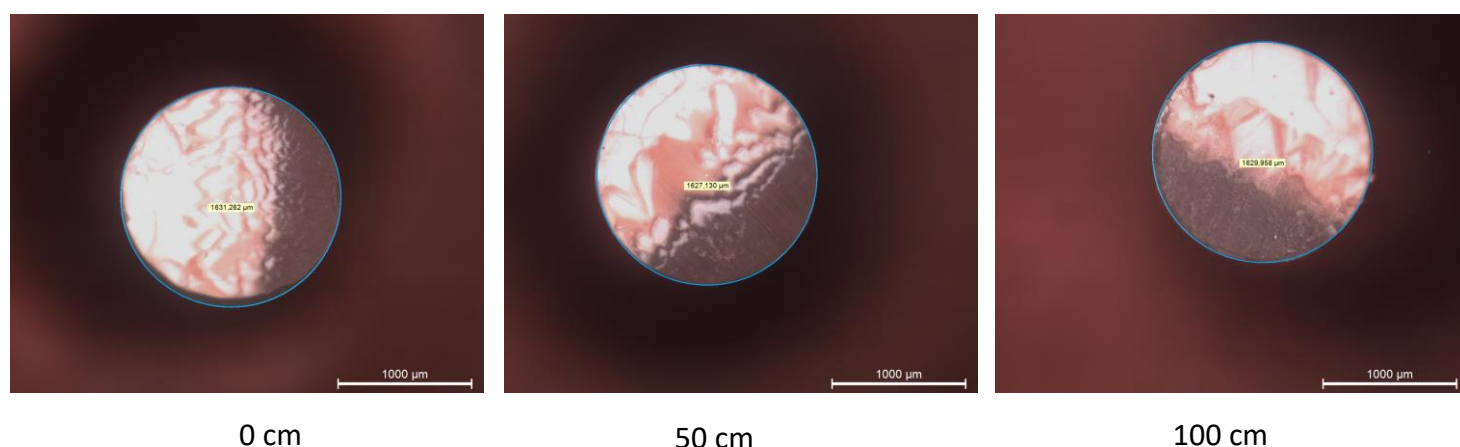


Figura 48 – Variação da geometria da secção transversal do ABS ao longo de 1m de comprimento.

A partir do desvio-padrão conseguido relativamente à média e da geometria das secções transversais conseguidas indicam que é possível obter filamento com boa estabilidade dimensional para este material, embora com dimensões inferiores às requeridas.

Segundo a Figura 49, através da observação da superfície novamente com recurso à lupa, confirma-se que o filamento não apresenta defeitos superficiais observáveis a partir da mesma, tendo uma boa qualidade.

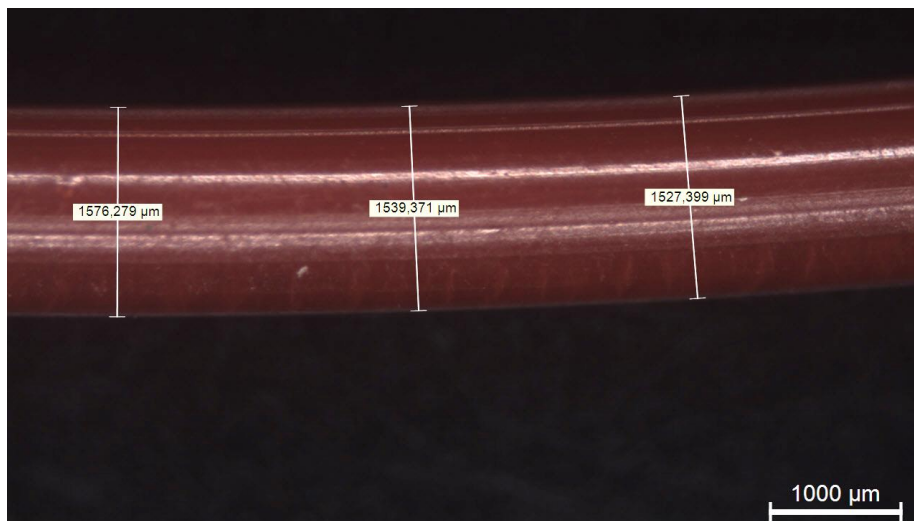


Figura 49 – Aparecia superficial do ABS à lupa.

Uma questão relevante foi o facto de se ter descido em demasia a temperatura da extrusora relativamente a faixa operatória indicada para este material fez com que os grânulos perto da tremonha não tivessem tempo para atingir a temperatura de fusão e houvesse um esforço acrescido para fornecer velocidade de rotação aos parafusos e transportar o material, levando a que se danificasse um componente da máquina.

Por esse motivo, nos restantes materiais não se optou por baixar mais a temperatura além da mínima indicada para o processamento de cada um, de forma a não causar mais danos na extrusora.

4.3.2. LDPE

À temperatura de 150 °C foi possível obter filamentos com boa qualidade superficial, como mostra a Figura 50.

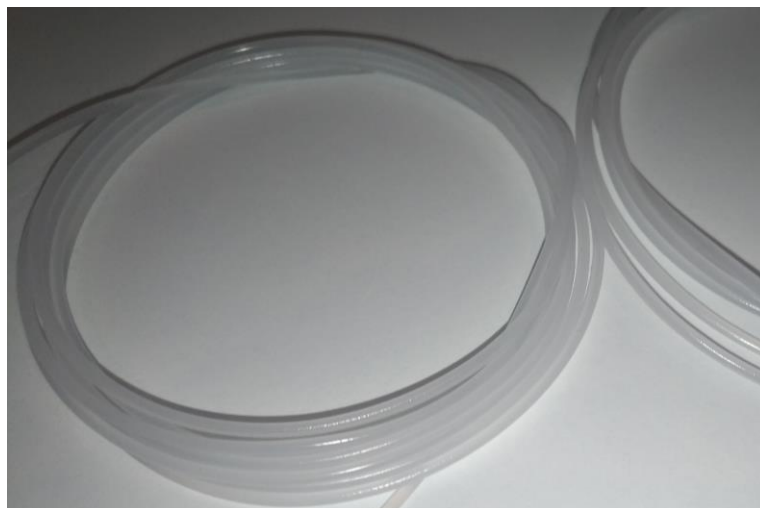


Figura 50 – Aparência superficial dos filamentos de LDPE processados a 150 °C.

Foi assim efetuado o estudo da variação do diâmetro para as diferentes velocidades de rotação de parafusos e rolos de puxo com utilização da fieira de 1,5mm, através do mesmo processo realizado para o ABS, tendo sido os valores organizados no gráfico da Figura 51.

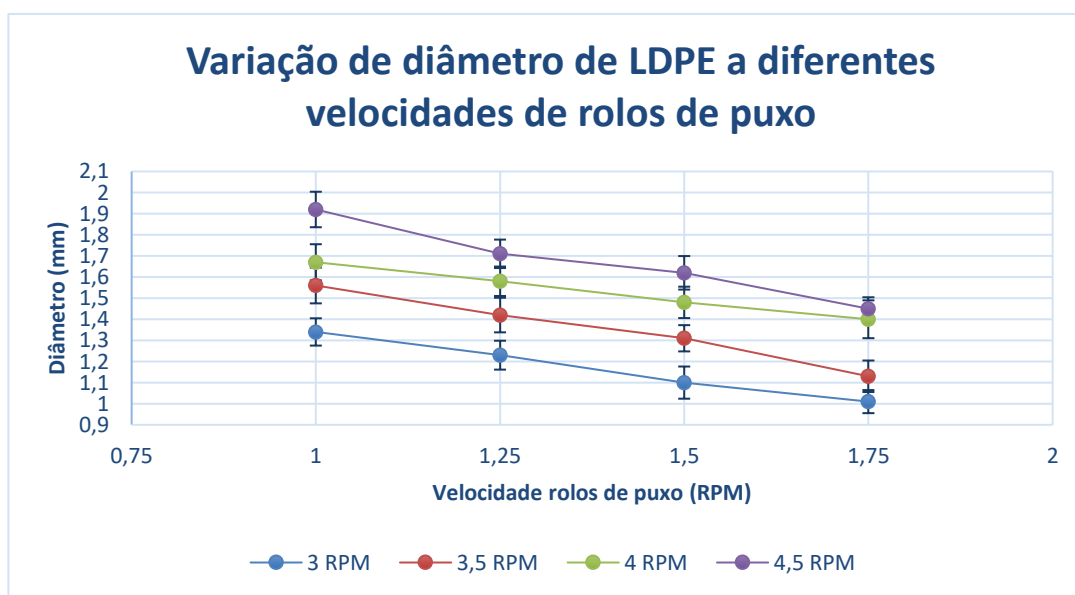


Figura 51 – Variação de diâmetro de filamento de LDPE a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo.

O aumento da velocidade de rotação dos rolos de puxo induz numa diminuição da secção transversal do extrudido, tendo sido possível obter-se valores de diâmetro aproximados aos pretendidos para velocidades de rotação dos parafusos e de rolos de puxo de 4,5/1,25 RPM e 4/1 RPM. No entanto com a primeira condição obtiveram-se valores mais próximos dos pretendidos, como se pode ver na Figura 51.

A partir da Figura 52 pode-se observar a variação de diâmetro ao longo de 4 metros de comprimento de filamento para a condição em que se obteve um resultado mais próximo de 1,75mm.

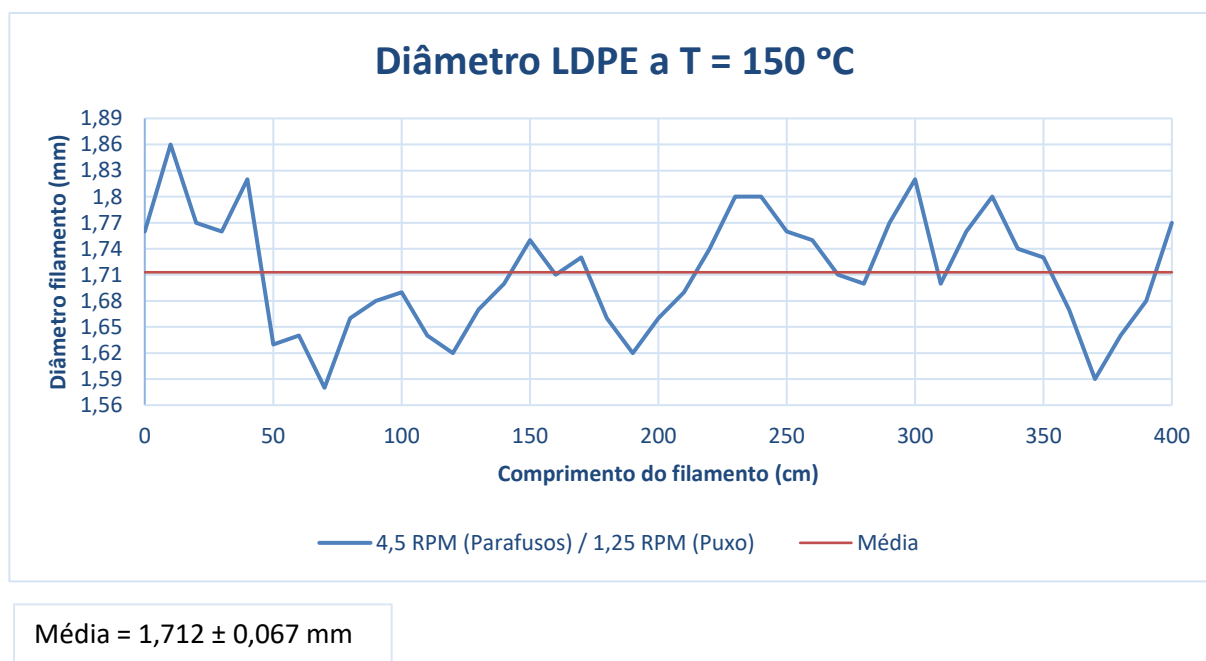


Figura 52 – Valores de diâmetro ao longo de 4 metros de filamento de LDPE às velocidades de 4,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).

Analisando o gráfico vê-se que este caso apresenta valores próximos do diâmetro de 1,75 mm, sendo as condições mais ideais para objetivo do trabalho. Visto ser um material extremamente flexível dificulta que seja possível obter filamentos de diâmetros com tolerâncias mais apertadas.

Pelo mesmo motivo anteriormente referido, após realizadas as observações do formato da secção transversal com recurso da lupa (Figura 53 e Anexo III), apurou-se que o LDPE apresenta secções disformes ao longo do comprimento do filamento, não se apresentando circular.

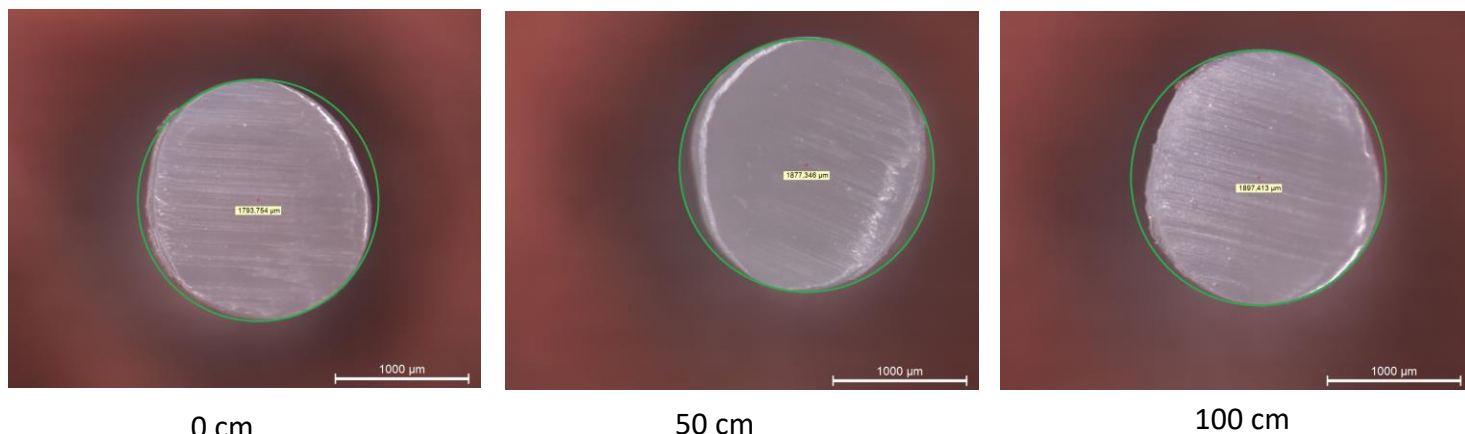


Figura 53 – Variação da geometria da secção transversal do LDPE ao longo de 1m de comprimento.

Esta situação causa transtorno, uma vez que interfere na correta medição do diâmetro, induzindo em possíveis erros. Por este motivo, os valores de diâmetro conseguidos para os filamentos deste material às diferentes condições de processamento utilizadas podem não ser totalmente fidedignos devido à ovalização que existe para este caso.

Após uma observação mais detalhada da superfície do filamento de LDPE, comprova-se que este aparenta uma superfície sem irregularidades a apontar (Figura 54).

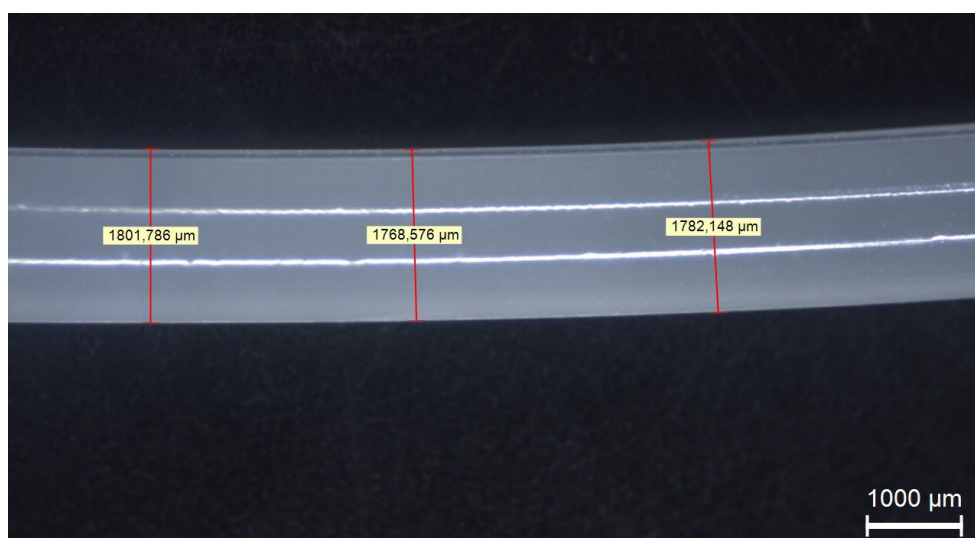


Figura 54 - Aparência superficial do LDPE à lupa.

4.3.3. PLA

Para o PLA foi possível obter-se um filamento sem irregularidades superficiais à temperatura de 170 °C, conforme mostrado na Figura 55.



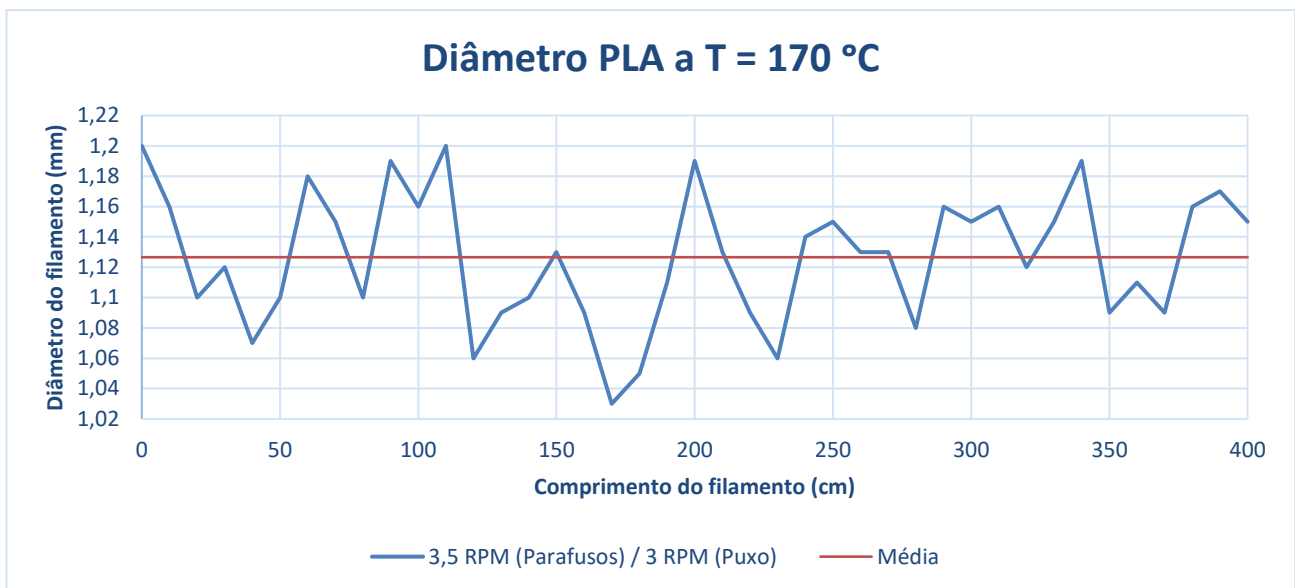
Figura 55 – Aspeto superficial dos filamentos de PLA processados a 170 °C.

Como já foi referido, este material apresentou o maior índice de fluidez comparativamente com os restantes materiais em estudo, pelo que a obtenção de um efeito de inchamento necessário para se atingir diâmetros próximos de 1,75mm foi impossibilitado. Pelo mesmo motivo para se realizar o processamento foi necessário utilizar velocidades de rotação dos rolos de puxo superiores às estipuladas inicialmente e, assim, não se realizou um estudo da variação de diâmetro em função das velocidades de puxo fixadas, pois o material avançava muito rapidamente ao longo da linha.

Por exemplo, à temperatura selecionada conseguiu-se uma secção transversal de diâmetro máximo de 1,20mm para as condições de 3,5 RPM de velocidade de rotação dos parafusos aliada a uma velocidade de rolos de puxo mínima de 3 RPM, conforme mostrado na Figura 56, sendo significativamente abaixo do diâmetro da fieira e diâmetro de filamento pretendido.

Como forma de combater este efeito foram testadas velocidades de extrusão superiores às fixadas (até 6 rpm), no entanto não se verificou um aumento de diâmetro significativo. Por outro lado, além de aumentar a velocidade de extrusão, ao mesmo tempo tentou-se diminuir a velocidade dos rolos de puxo, o que tornou o processo inviável, uma vez

que o extrudido começava a depositar-se na calha em vez de aumentar o diâmetro do filamento.



Média = 1,126 ± 0,043 mm

Figura 56 - Valores de diâmetro ao longo de 4 metros de filamento de PLA às velocidades de 3,5 RPM (parafusos) e 3 RPM (rolos de puxo).

Segundo a Figura 57 e o Anexo III comprova-se que os filamentos de PLA, embora apresentem dimensões muito reduzidas, ao longo de um metro de comprimento apresenta uma secção transversal circular constante e uniforme. Além disso obteve-se um desvio-padrão relativamente à média baixo, indicando que apresenta boa estabilidade dimensional.

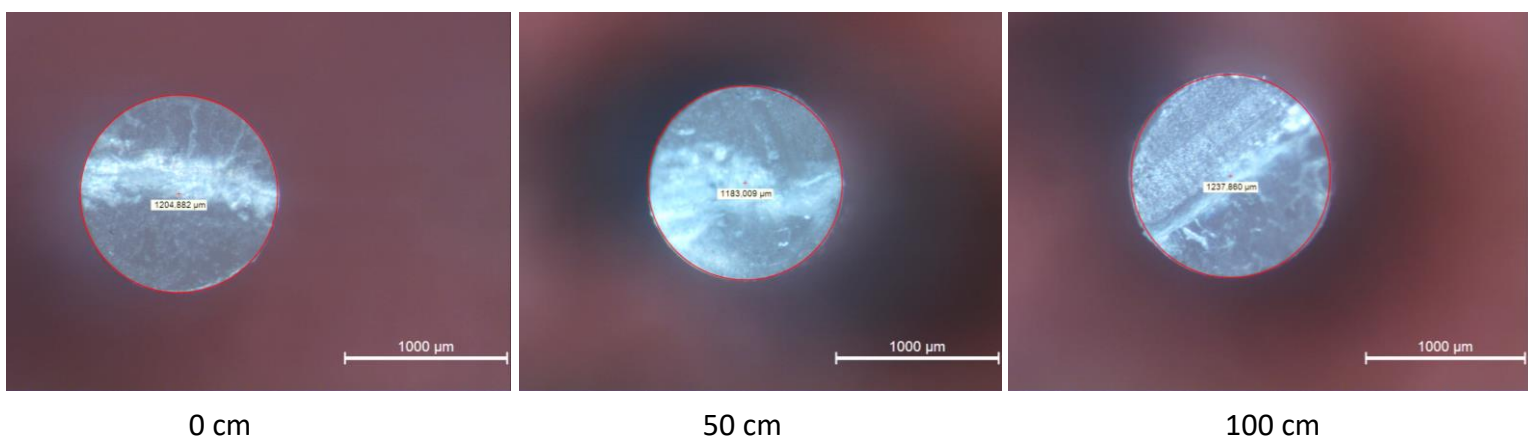


Figura 57 – Variação da geometria da secção transversal do PLA ao longo de 1m de comprimento.

Segundo visualizações à lupa da superfície do PLA da Figura 58, sendo um material transparente, notou-se a presença pequenas formas circulares no seu interior que indicam que poderão ser bolhas. No entanto, estas apresentam-se com dimensões pouco relevantes e, por outro lado, tampouco é perceptível a existência de rugosidades superficiais ou outros defeitos.

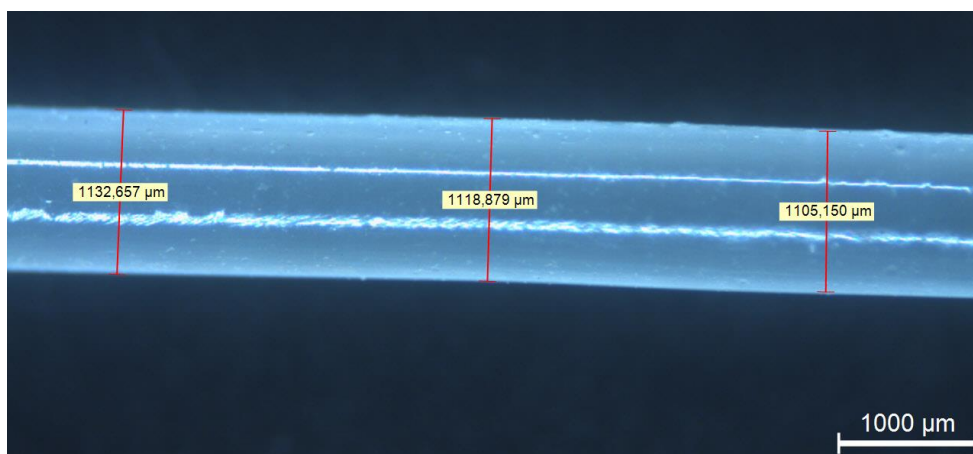


Figura 58 – Aparência superficial do PLA à lupa.

4.3.4. PP

Os filamentos resultantes do processamento a 200 °C estão apresentados na Figura 59, não existindo defeitos a apontar acerca da qualidade da superfície dos mesmos.

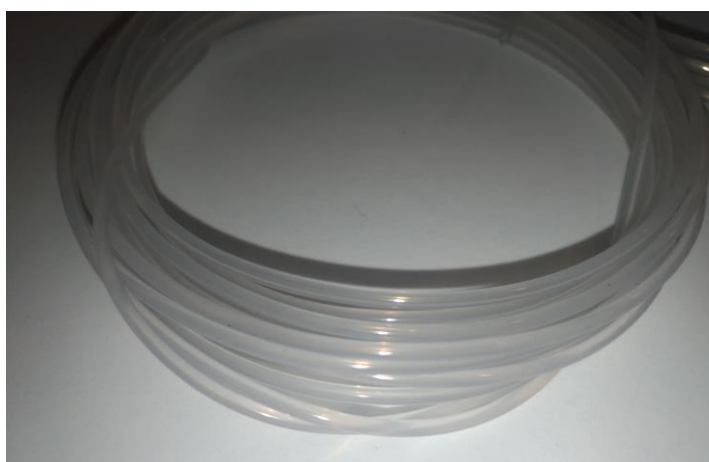


Figura 59 – Aparecia superficial dos filamentos de PP processados a 200 °C.

Realizou-se a análise da variação de diâmetros a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e dos rolos de puxo, de forma a verificar quais as melhores condições para o processo. Os resultados encontram-se na Figura 60.

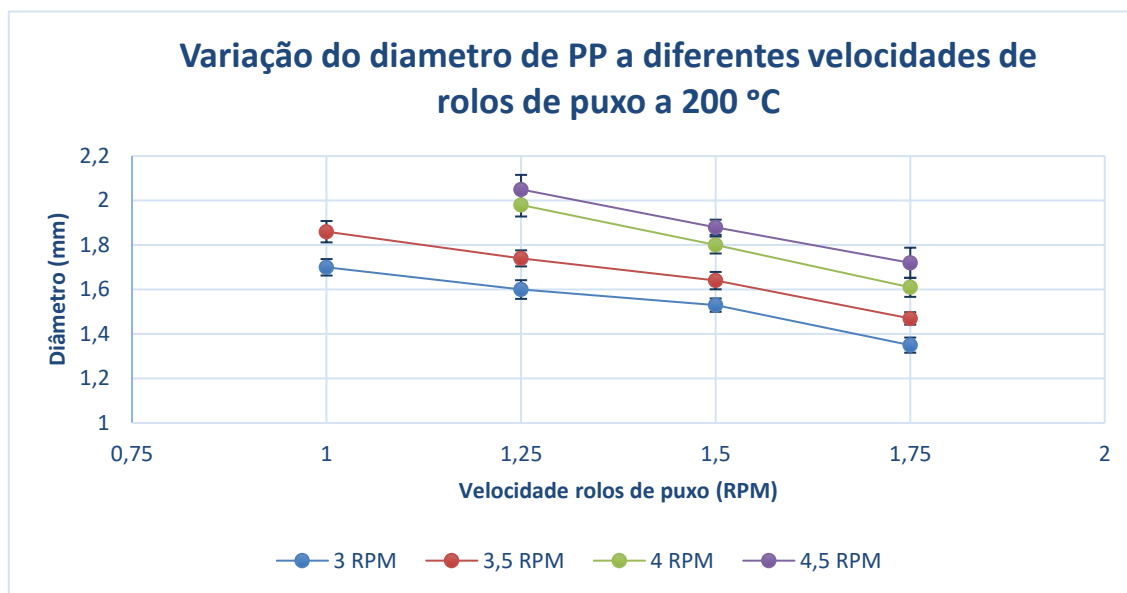
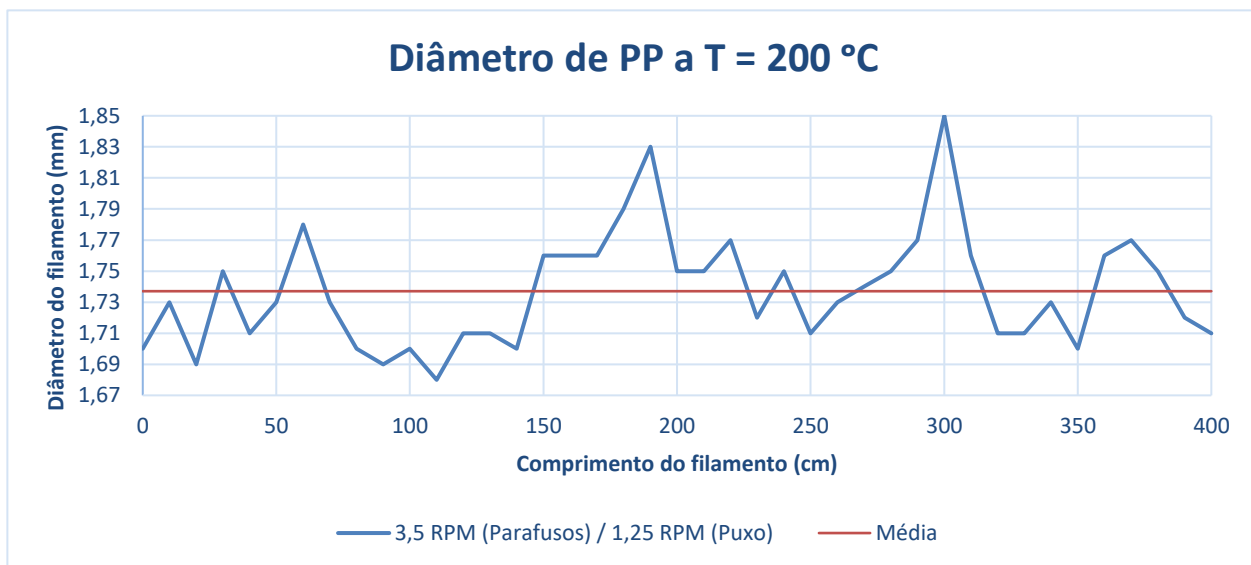


Figura 60 – Variação de diâmetro de filamento de PP a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo.

O processamento do PP mostrou-se mais facilitado comparativamente com os outros materiais, havendo várias condições que permitiram chegar aos valores requeridos, como por exemplo, às velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo de 3/1 RPM, 3,5/1,25 RPM e 4/1,5 RPM. No entanto, a condição que se mostrou mais favorável deu-se a uma velocidade de rotação dos parafusos de 3,5 RPM e de rotação dos rolos de puxo de 1,25 RPM. A Figura 61 comprova os resultados obtidos.



Média = $1,737 \pm 0,036$ mm

Figura 61 - Valores de diâmetro ao longo de 4 metros de filamento de PP às velocidades de 3,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).

Uma vez mais foram conseguidos desvios-padrão em relação às médias inferiores a 0,1mm, como o caso apresentado, indicando que também exibe boa estabilidade dimensional. O facto de apresentar um MFI muito baixo e seja um grade indicado para extrusão permite que seja facilmente atingido o diâmetro pretendido através do efeito de inchamento.

À semelhança do que aconteceu com os outros materiais, à exceção do LDPE, o PP apresenta ótima secção circular ao longo do comprimento imposto. Este facto é perceptível a partir da visualização da Figura 62 e do Anexo III.

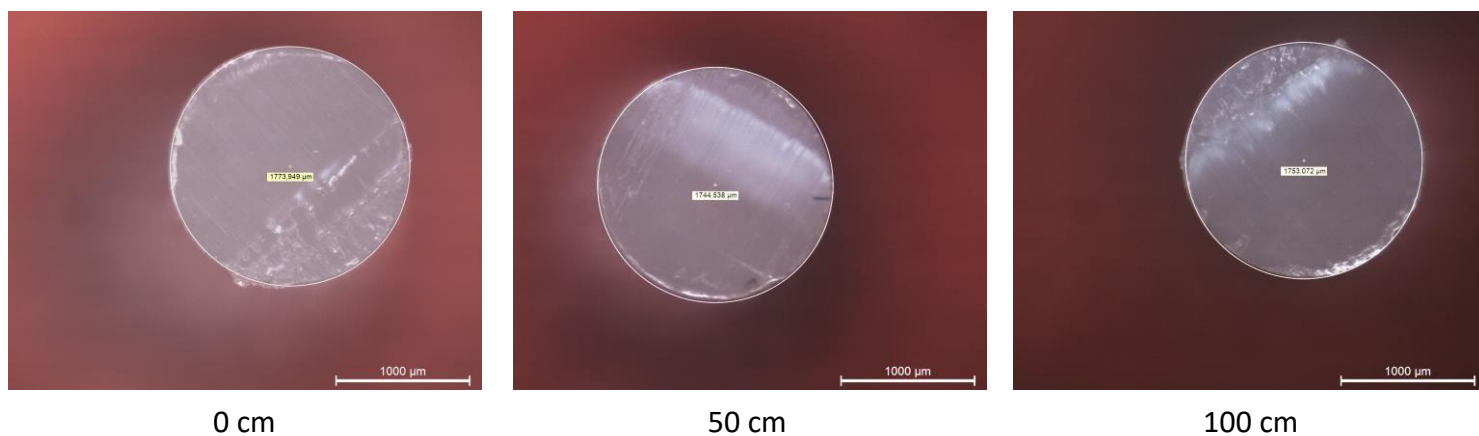


Figura 62 – Variação da geometria da secção transversal do PP ao longo de 1m de comprimento.

Através de uma análise mais detalhada da superfície com recurso à uma lupa estereoscópica não se verificou o aparecimento defeitos consequentes do processo de extrusão no filamento de PP (Figura 63).

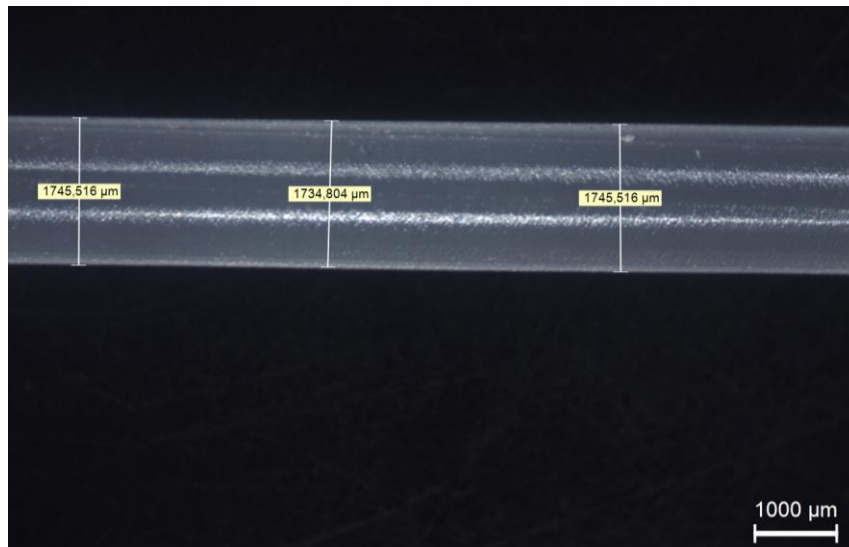


Figura 63 - Aparência superficial do PP à lupa.

4.3.5. PS

Como já foi referido, a temperatura de processamento foi de 180 °C e os filamentos conseguidos apresentaram bom qualidade superficial, como indica a Figura 64. A essa temperatura foi realizado o estudo da variação do diâmetro em função das velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo (Figura 65).



Figura 64 – Aparência superficial dos filamentos de PS processados a 180 °C.

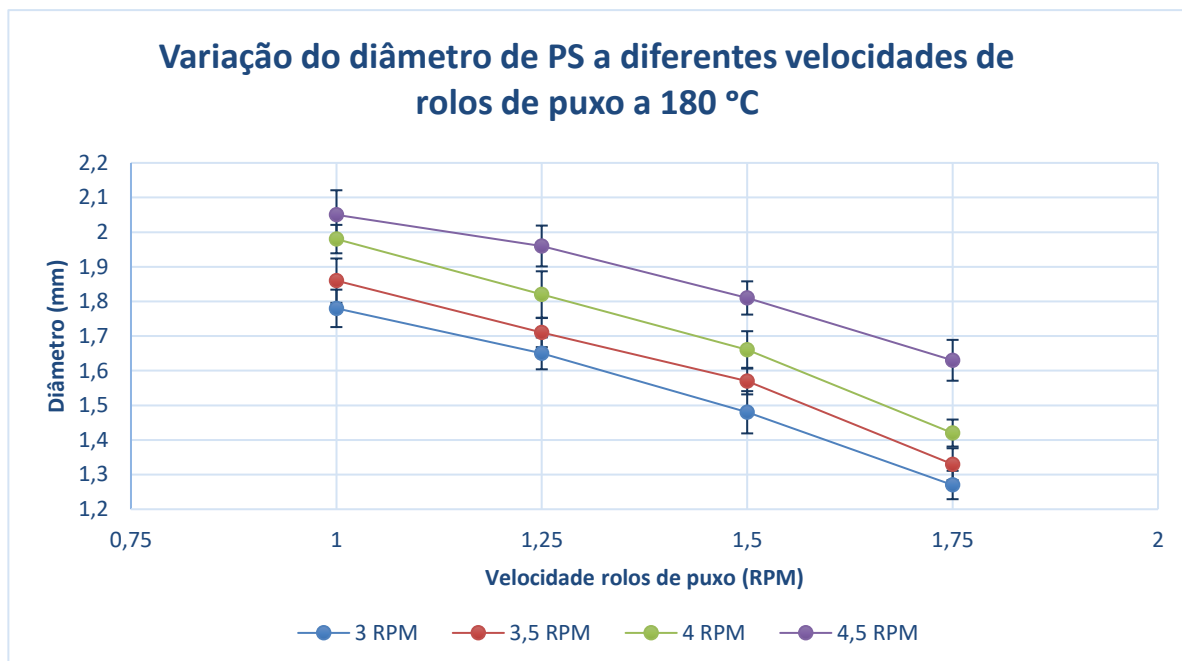
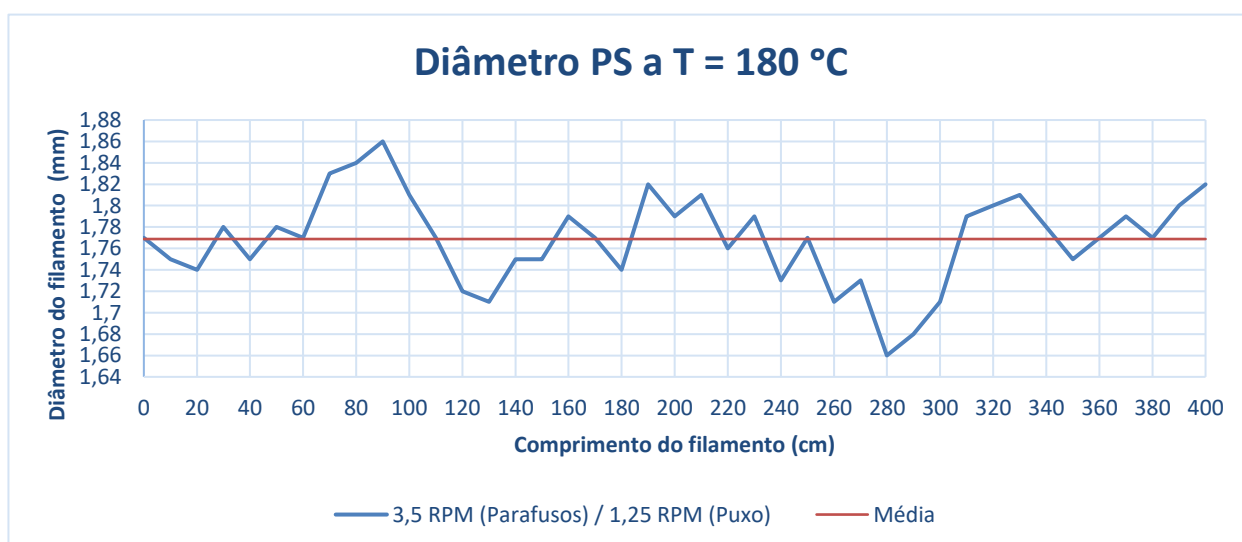


Figura 65 – Variação de diâmetro de filamento de PS a diferentes velocidades de rotação dos parafusos e rolos de puxo.

Foram conseguidos resultados próximos dos requeridos às velocidades de 3/1 RPM e 3,5/1,25 RPM, como se pode comprovar pela Figura 65. Feitas as medições verificou-se que os filamentos com dimensões mais próximas das pretendidas deram-se a 3,5 RPM (parafusos)/1,25 RPM (Puxo). A Figura 66 mostra os valores resultantes.



Média = 1,769 ± 0,042 mm

Figura 66 - Valores de diâmetro ao longo de 4 metros de filamento de PS às velocidades de 3,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).

Ao longo do comprimento de filamento em análise verifica-se que o PS apresenta uma baixa variação de diâmetro, perceptível a partir do desvio-padrão obtido para as 40 medições realizadas.

Relativamente às observações feitas através da lupa, uma vez mais trata-se de um material com boa estabilidade dimensional, apresentando secção transversal circular e contante ao longo do comprimento da amostra em estudo, conforme exemplificado na Figura 67 e Anexo III.

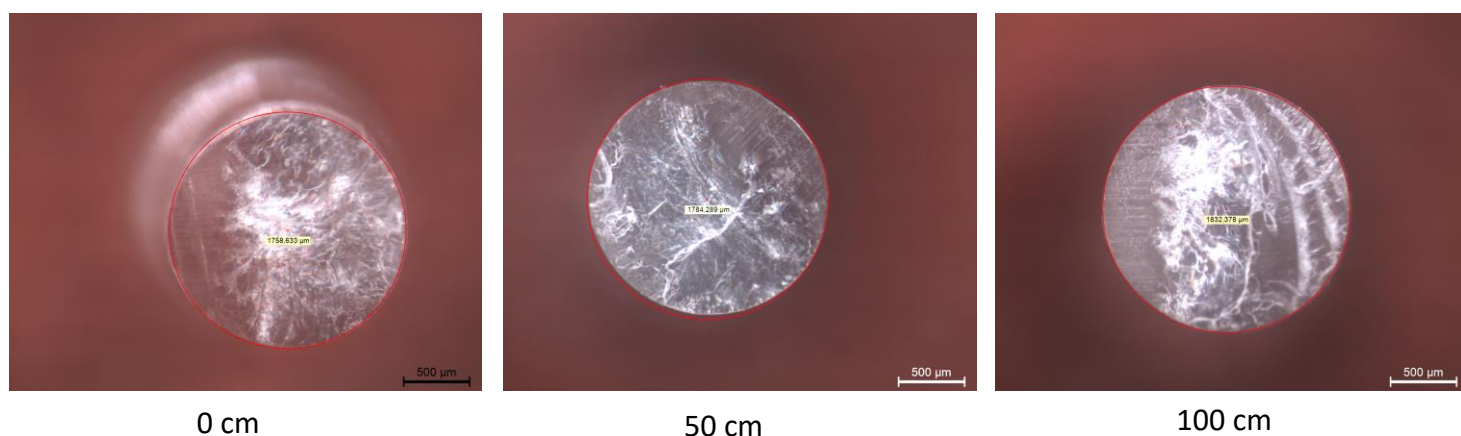


Figura 67 – Exemplo da variação da secção transversal do PS ao longo de 1m de comprimento.

Feitas observações da superfície também à lupa, não foi possível encontrar defeitos relevantes que demonstrem um mau processamento, de acordo com a Figura 68.

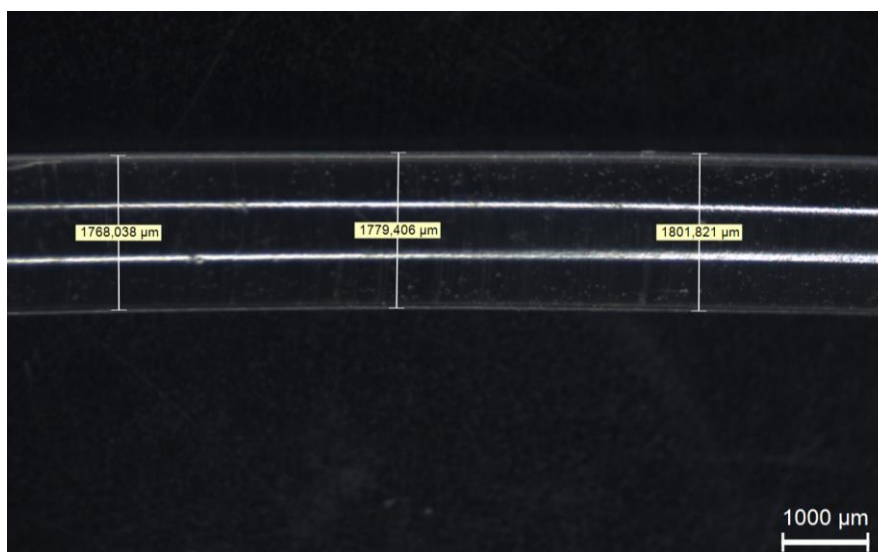


Figura 68 - Aparência superficial do PS à lupa.

4.4 Caraterização mecânica

Para a realização dos ensaios de tração foram testados os filamentos cujas dimensões se aproximaram mais das pretendidas, conforme exposto na secção de caraterização dimensional. Seguidamente estão representados gráficos, nas Figuras 69, 70, 71, 72 e 73, com os valores médios obtidos para as tensões máxima e de rutura e para as deformações à tensão máxima e de rutura de cada material. Como o objetivo é comparar com os valores indicados nas fichas técnicas dos fornecedores, foram introduzidos os dados existentes para cada propriedade.

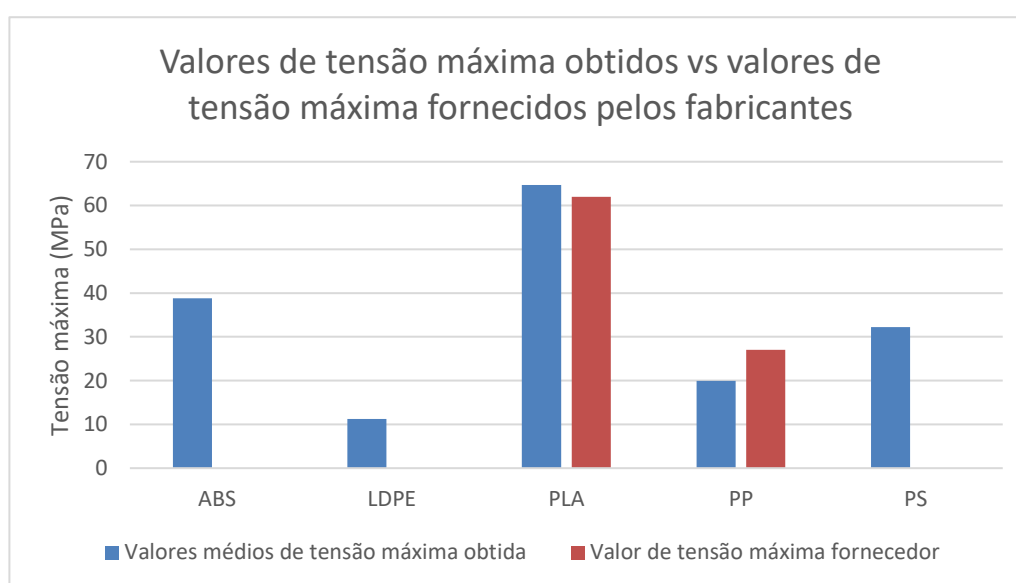


Figura 69 – Valores médios de tensão máxima obtidos vs valores de tensão máxima fornecidos pelos fabricantes.

Relativamente aos valores de tensão máxima indicados na Figura 69 não é possível retirar ilações conclusivas uma vez que apenas foi possível comparar dois materiais com as suas respetivas fichas técnicas, obtendo-se para o PLA valores superiores e para o PP valores inferiores aos fornecidos pelos fabricantes. O mesmo aconteceu com os valores de deformação à tensão máxima das Figuras 70 e 71, havendo apenas informação para comparação de dois materiais, no entanto obtendo-se valores de deformação inferiores aos das fichas técnicas para ambos.

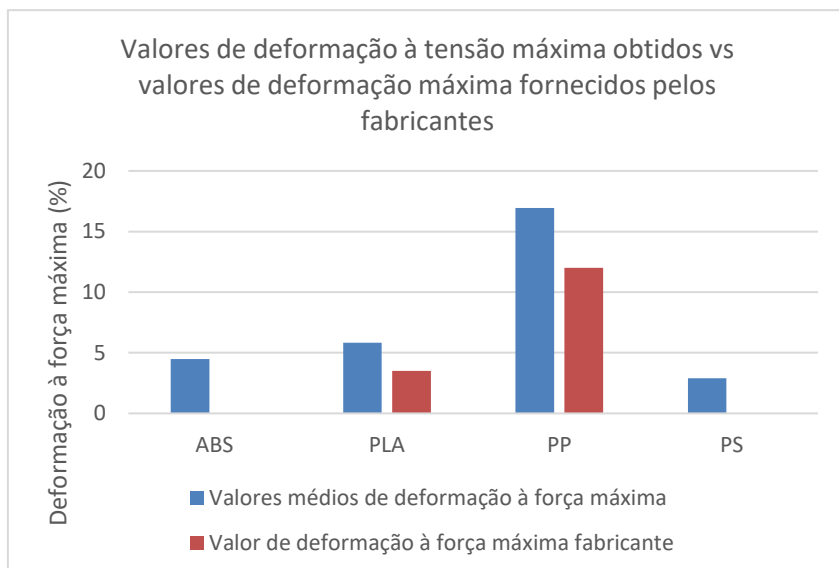


Figura 70 – Valores médios de deformação à tensão máxima obtidos para o ABS, PLA, PP e PS vs valores de deformação à tensão máxima fornecidos pelos fabricantes.

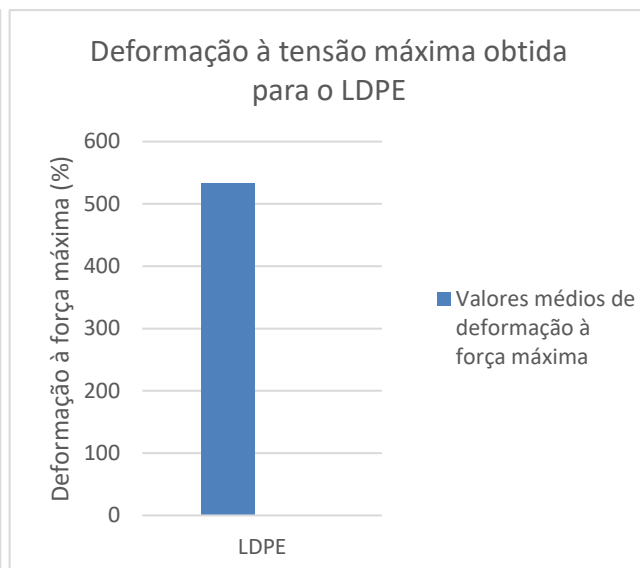


Figura 71 - Valor médio de deformação à tensão máxima do LDPE.

Em relação aos valores de rutura, Figuras 72 e 73, pode-se verificar pelos gráficos de tensão e deformação à rutura que não se apresentam os valores de LDPE e PP. Isto porque o equipamento apresenta um limite de alongamento e ambos os materiais não atingiram a rutura até esse valor, pelo seria necessário utilizar um equipamento com um limite superior para se observar a rutura destes ou realizar os ensaios com amostras com menor comprimento.

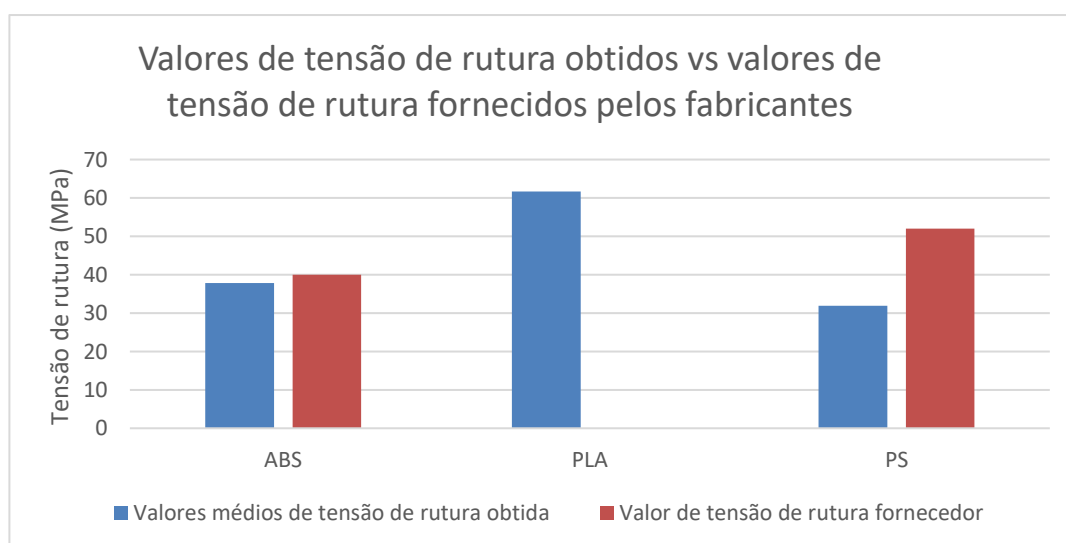


Figura 72 – Valores médios de tensão de rutura obtidos vs valores de tensão de rutura fornecidos pelos fabricantes.

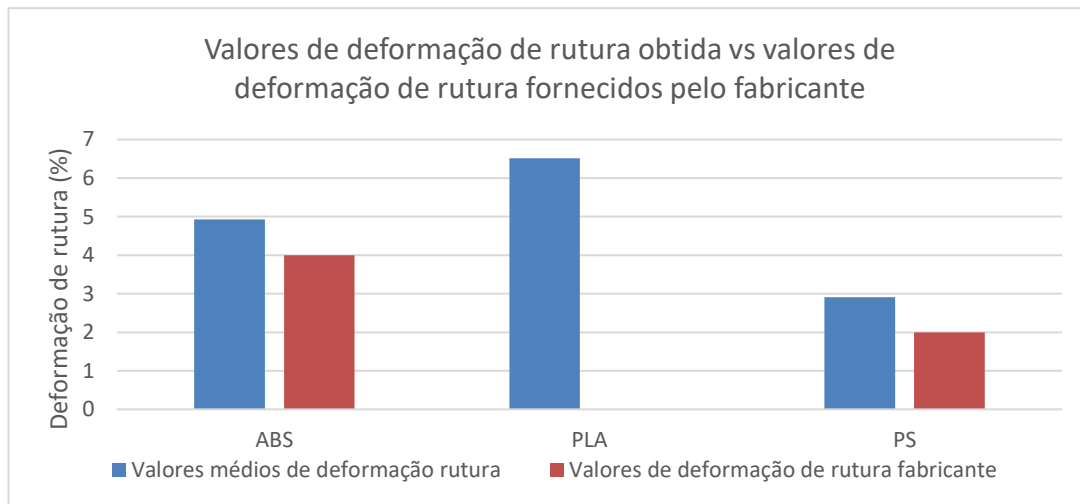


Figura 73 – Valores médios de deformação de rutura obtidos vs valores de deformação de rutura fornecidos pelos fabricantes.

Verificou-se pelas Figuras 72 e 73 que para os valores de tensão rutura, quando comparados com os valores fornecidos pelos fabricantes, os resultados obtidos são inferiores aos das fichas técnicas e que os valores de deformação de rutura são ligeiramente superiores.

O LDPE e PP são materiais de natureza mais flexível e com viscosidade superior, daí os valores resultantes de deformação serem significativamente superiores aos restantes materiais. Já para o PS foram obtidos os valores de deformação mais baixos devido à fragilidade inerente deste material.

No geral, os resultados que foram possíveis comparar foram de encontro ao esperado, uma vez que os dados fornecidos pelos fabricantes são resultantes de testes efetuados com provetes de tração fabricados através do processo de injeção. Nesse processo, quando comparado com o de extrusão, são utilizadas velocidades muito superiores, fazendo com que os provetes obtenham orientação no sentido axial superior. Uma maior orientação traduz-se numa menor deformação. Sendo que os materiais foram processados através de extrusão e, portanto, apresentam menor orientação no sentido axial, é natural obter-se maiores valores de deformação para tensões inferiores.

Como se pode comprovar pela maioria dos resultados em que houve um meio de comparação com as fichas técnicas, os resultados foram de encontro aos expectáveis (à exceção dos valores de tensão máxima do PLA), no entanto pouco conclusivos devido à falta de informação de todas as propriedades para todos os materiais. Todos os valores obtidos e

os gráficos resultantes dos ensaios efetuados para os diferentes materiais encontram-se no Anexo IV.

4.5 Medição do índice de fluidez

Para verificar se existiram alterações das propriedades de escoamento dos materiais em relação às indicadas pelos fabricantes e após o processamento dos mesmos procedeu-se à medição do índice de fluidez. As comparações efetuadas encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores resultantes das medições do índice de fluidez para os diferentes materiais.

Material	Temperatura (°C)	Peso (kg)	MFI fabricante (g/10min)	MFI grânulos (g/10min)	MFI filamentos (g/10min)
ABS	220	10	35	23,58	40,44
ABS	220	2,16	-	0,85	2,22
LDPE	190	2,16	2,1	2,07	2
PLA	210	2,16	14	28,42	31,87
PP	230	2,16	1,6	1,47	2,69
PS	200	2,16	-	1,08	1,13
PS	200	5	3,4	3,78	5,39

Primeiramente, comparando os valores dos grânulos com os fornecidos pelos fabricantes verificou-se que para o LDPE, PP e PS os valores obtidos foram muito próximos, indicando que os valores fornecidos se apresentam fidedignos. Por outro lado, os valores de ABS foram inferiores e os do PLA superiores. Estes são os dois materiais em que havia necessidade de secar, pelo que os resultados obtidos podem ter relação com as temperaturas e tempo de secagem a que foram submetidos.

Comparando o MFI dos grânulos com o dos filamentos a menor variação verificou-se com o LDPE, em que os valores são muito próximos. Este facto indica que este é um material

muito termicamente estável e que este não tenha sofrido degradação durante o processo pelo que as propriedades do mesmo se mantiveram.

Para o PLA, PP e PS existiram ligeiros aumentos de índice de fluidez para os filamentos comparativamente com os grânulos, podendo ter havido uma pequena percentagem de degradação, possivelmente devido aos elevados tempos de residência. Por outro lado, para o ABS houve um aumento mais significativo para os filamentos comparativamente com os dados fornecidos pelo fabricante e com os valores obtidos para os grânulos, indicando que este tenha sofrido uma degradação superior. Este material foi o mais difícil de processar, tendo sido necessário processá-lo a temperaturas abaixo da sua janela operatória pelo que os resultados obtidos podem dever-se ao facto de ser material indicado para injeção, onde os tempos de residência são inferiores e durante o processamento de extrusão ter sido sujeito a elevados tempos de residência, causando assim uma degradação superior, alterando as suas propriedades de escoamento.

Para existir uma menor degradação por parte dos materiais em geral, seria necessário, possivelmente, utilizar velocidades de rotação dos parafusos superiores para que assim estes obtivessem menores tempos de residência e, portanto, houvesse menor alteração de MFI entre grânulos e filamentos.

Como já foi referido, as alterações de MFI dos filamentos comparativamente com os grânulos pode trazer consequências consoante a aplicação posterior a que estes estejam sujeitos, conforme explicado no Capítulo 3.4.4.

4.6 Limitações do protótipo da mini linha de extrusão

Ao longo do trabalho experimental foram encontrados entraves/limitações que foram dificultando o estudo e o bom processamento dos diferentes materiais utilizados. Estes serão exposto seguidamente.

1. Utilização de velocidades baixas de rotação dos parafusos

Como é aconselhado usar velocidades de rotação dos parafusos baixas devido ao facto de ser uma extrusora duplo-fuso contra-rotativo e pelos motivos já mencionados ao longo do documento, faz com que se obtenham baixas quantidades de débito (muito abaixo dos equipamentos semelhantes já existentes) e consequentemente traduz-se num processo demorado, obtendo-se tempos de residência também elevados trazendo problemas para o material a ser processado.

2. Sobreaquecimento da tremonha

Devido ao facto de ser uma extrusora muito pequena e a resistência estar muito próxima da tremonha, faz que esta adquira temperaturas tanto mais elevadas quanto mais elevada for a temperatura da resistência. Este problema leva a que os grânulos de material, devido às elevadas temperaturas das paredes da tremonha, tendam a ficar “colados” às mesmas limitando a sua entrada no cilindro, como o exemplo da Figura 74.



Figura 74 – Grânulos de material “agarrados” às paredes da tremonha devido ao sobreaquecimento da mesma.

Na Figura 75 mostra a medição, com recurso a um termopar, da temperatura na superfície interior da tremonha.

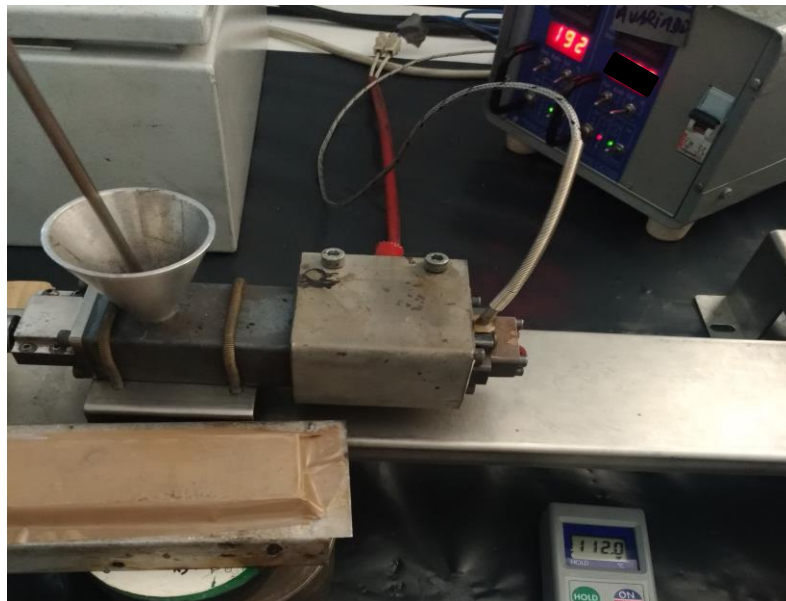


Figura 75 – Medição da temperatura superficial no interior da tremonha.

Como se pode visualizar na Figura 75, a uma temperatura de extrusão de cerca de 192°C a tremonha encontra-se a 112 °C. Neste local esta temperatura acaba por ser demasiado elevada, dificultando um bom processamento.

Como tentativa de combater este problema introduziu-se um ventilador direcionado para a tremonha (Figura 76), que ajudou a diminuir bastante este efeito.

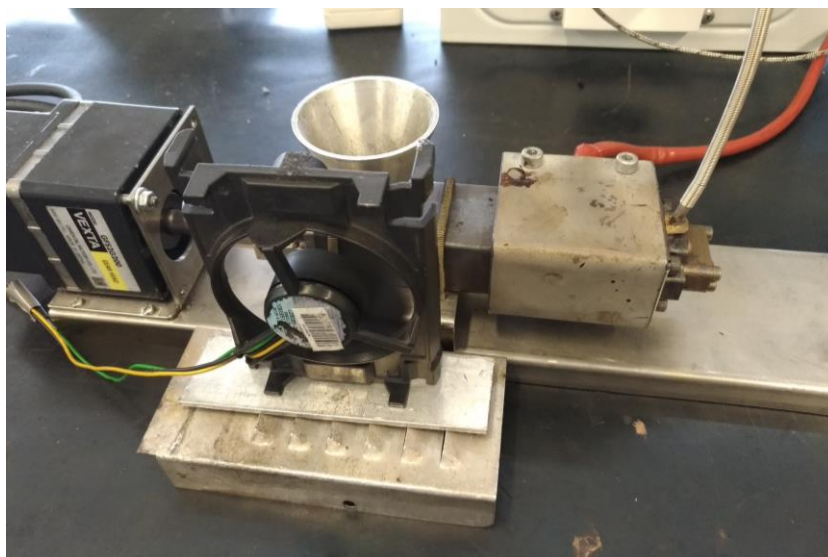


Figura 76 – Tentativa de diminuição do sobreaquecimento da tremonha com recurso a um ventilador.

3. Instabilidade térmica

Regularmente, após ter-se o processo estabilizado e a obter-se filamentos com boa qualidade superficial, sem haver qualquer alteração das condições de processamento, o extrudido ia alterando a sua qualidade até ficar cheio de imperfeições como bolhas de ar e rugosidade e o mesmo acontecia no sentido inverso, melhorando sem haver qualquer alteração. Este acontecimento leva a crer que possa haver algum problema a nível do aquecimento ou de leitura do mesmo. Uma irregularidade que poderá estar associada ao defeito em questão, foi encontrada na fieira que, aparentemente, por vezes, não se encontrava a uma temperatura próxima da estipulada. Após algumas medições da temperatura superficial da fieira, verificou-se que esta tanto se encontra consideravelmente mais baixa como mais alta em relação à temperatura da resistência.

Na Figura 77, observa-se que a temperatura da resistência selecionada é 220°C e a temperatura superficial da fieira de 192,5 °C. Apesar de ser natural esta ser inferior, não o é que seja cerca de 30 °C inferior.

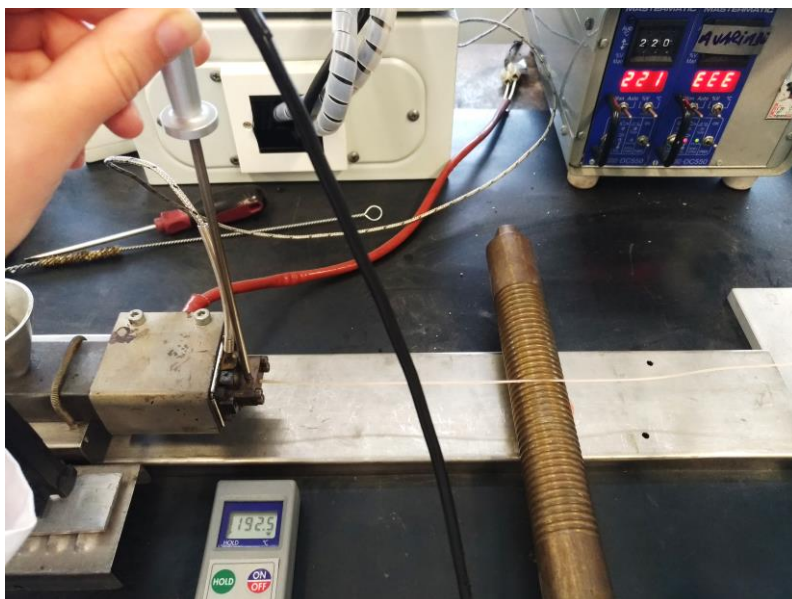


Figura 77 – Diferença de temperatura entre a resistência e a superfície da fieira.

Por outro lado, noutra fase de processamento introduziu-se uma temperatura de 175°C, esperou-se a estabilização da mesma e foi feita a medição da temperatura na superfície da fieira através de outro termopar. Como mostra a Figura 78, a temperatura medida foi de 201°C, ou seja, aproximadamente 30 °C superior.

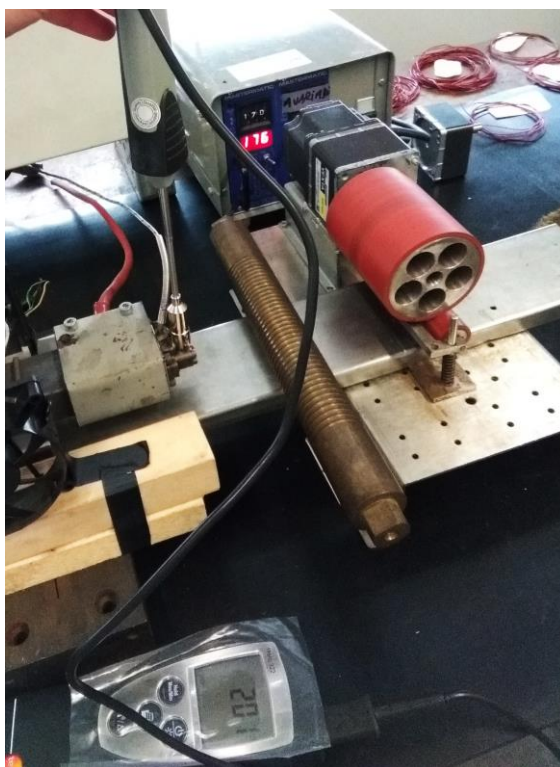


Figura 78 – Diferença de temperatura entre a resistência e a superfície da fieira.

Esta discrepância de valores pode dever-se ao facto de a fieira ser um componente exterior à extrusora e não possuir um sistema de aquecimento individualizado, podendo haver oscilações da temperatura por não haver forma de controlo.

Por outro lado, esta instabilidade térmica que acontece com os extrudidos poderá estar associada ao facto do material poder estar a sofrer degradação térmica, devido às temperaturas que se fazem sentir desde a tremonha até à fieira aliado um elevado tempo de residência por se usarem velocidades muito baixas.

Ter-se-iam que efetuar mais estudos para se verificar se se confirma alguma destas possibilidades, no entanto a introdução de uma resistência individualizada para a fieira iria trazer um melhor controlo da temperatura na mesma. Não foi possível realizar este passo, uma vez mais, devido à impossibilidade de se fabricar uma resistência atempadamente e devido pouca disponibilidade da máquina para utilização.

4. Diâmetro da fieira inadequado

Diâmetro das fieiras não se mostrou o mais adequado para produzir filamentos com a dimensão pretendida (diâmetro de 1,75mm) para uma vasta gama de materiais e com a condições definidas, pelo que uma melhoria que poderá ser implementada futuramente passará pelo fabrico de uma ou duas fieiras intermédias, nomeadamente de 2mm, como a ilustrada no Anexo V, ou de 1,75mm. Como já foi referido, não foi possível fabricar uma nova fieira durante o decurso do trabalho devido pouca disponibilidade da máquina para utilização da mesma.

5. Peça de ligação entre motor e extrusora de reduzidas dimensões

A peça de ligação dos parafusos ao motor apresenta um diâmetro de cerca 4mm, pelo que se trata de um elemento frágil, levando a que o manuseamento do equipamento tenha que ter um cuidado acrescido. Como foi referido, durante o processamento de ABS foram utilizadas temperaturas baixas, causando que este componente partisse (Figura 79).

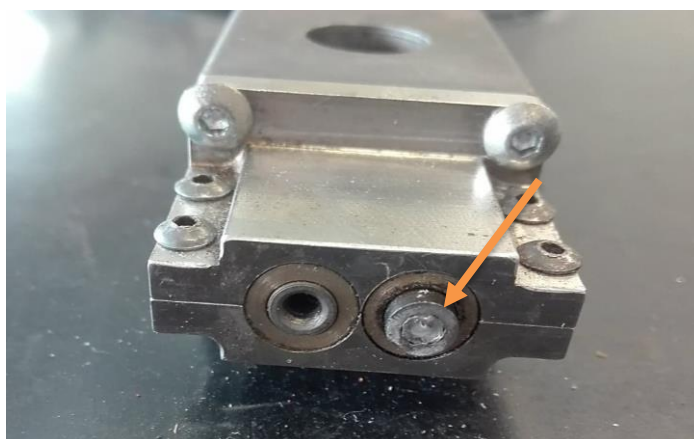


Figura 79 – Fratura da peça de ligação entre os parafusos e o motor.

Para evitar que esta situação aconteça é importante realizar o processamento com condições adequadas para cada material, usando velocidades de rotação dos parafusos relativamente baixas e usando temperaturas adequadas ao processamento de cada um, evitando utilizar temperaturas muito inferiores às suas janelas operatórias indicadas.

5. CONCLUSÕES

A nível de conclusões verificou-se que o equipamento, da forma como foi projetado não se mostrou viável para o fabrico de filamentos com 1,75 mm de diâmetro para todos os materiais selecionados às condições que foram definidas.

Ao longo do processamento com a fieira de 1,5mm conseguiram-se obter débitos poucos discrepantes ao longo tempo para cada material (havendo, no geral, uma variação ligeiramente superior a velocidades mais elevadas) e um aumento praticamente linear em função do aumento da velocidade de rotação dos parafusos, mostrando que a mini extrusora é capaz de debitar material de forma uniforme.

A partir dos resultados obtidos na caracterização dimensional verificou-se que com a fieira de 1,5 mm de diâmetro apenas foi possível fabricar com filamentos com dimensões próximas de 1,75mm para materiais cujos grades são indicados para extrusão (LDPE, PP e PS), em que é possível criar um efeito de inchamento que o permita, devido ao seu baixo MFI. Por outro lado, o mesmo não foi possível para os materiais com grades de injeção (ABS e PLA), devido à sua fluidez superior e impossibilidade de criar inchamento que permitisse obter-se os diâmetros próximos dos pretendidos. Observou-se ainda que o diâmetro dos filamentos é superior quando se utilizam velocidades elevadas de rotação dos parafusos e baixas velocidades de rolos de puxo. Para se obterem diâmetros próximos de 1,75mm é necessário ajustar as velocidades e estas têm de ser alteradas consoante as características do material em estudo. Descartando as dimensões, foi viável para todos fabricar filamentos com boa qualidade superficial utilizando baixas temperaturas, dentro da faixa operatória de cada um.

Para todos os materiais, à exceção do LDPE, que é um material extremamente flexível, obtiveram-se secções transversais ao longo do comprimento dos filamentos com geometria circular e uniforme, conforme era desejado para existir uma correta medição do diâmetro.

Para a fieira de 3 mm não foi possível fabricar filamentos, devido ao diâmetro elevado da mesma. A utilização de baixas velocidades de rotação dos parafusos aliada à geometria dos mesmos, faz com que a extrusora não seja capaz de transportar material que proporcione um fluxo de material suficiente constante para formar filamentos.

Por último conclui-se que o protótipo necessita de alterações e melhorias para ser viável para na utilização de mais e diferentes materiais e condições operatórias.

5.1 Considerações finais e trabalhos futuros

O trabalho da presente dissertação foi condicionado por vários fatores, nomeadamente por uma avariada temporária no equipamento e pela grande afluência de pessoas a necessitar de usar os rolos de puxo para outros projetos, condicionando o processamento, pois ficou um componente a faltar recorrentemente. Por esse motivo o tempo ficou muito reduzido para ser possível integrar melhorias no equipamento.

Como proposta de trabalhos futuros sugere-se:

- Efetuar um estudo com a utilização velocidades de rotação dos parafusos superiores, se possível, para diminuir tempos de residência e verificar se é possível criar em efeito de inchamento maior para materiais com índices de fluidez mais elevado;
 - Neste caso poderá haver a necessidade de introduzir um sistema de arrefecimento para o extrudido ou utilizar distâncias em extrusora e rolos de puxo superiores.
- Testar outros materiais com propriedades distintas;
- Fabricar fieiras intermédias (ex: 1.75mm e 2mm) para facilitar o fabrico de filamentos com diâmetro de 1,75mm para uma maior variedade de materiais e condições operatórias;
- Projetar e fabricar um suporte ao nível da fieira que permita um melhor alinhamento do extrudido à saída da mesma e proporcionar uma trajetória até aos rolos de puxo, que se pode mostrar benéfico para o processamento;
- Possível introdução de uma resistência individualizada para a fieira para melhor controlo da temperatura na mesma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Kortrokrax, "Hot Melt Extrusion Technology," vol. 3, 2011.
- [2] C. G. Gogos, Z. Tadmor, D. M. Kalyon, P. Hold, and J. A. Biesenberger, "Polymer Processing: an Overview.," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 83, no. 6, pp. 33–58, 1987.
- [3] C. Rauwendaal, "Polymer Extrusion," *Polym. Extrus.*, pp. 1–337, 2014.
- [4] J.-M. Bouvier and O. H. Campanella, *Extrusion Processing Technology : Food and Non-Food Biomaterials*. Wiley, 2014.
- [5] Dynisco, "An Introduction to Single Screw Extrusion," vol. 24, no. mm, 2017.
- [6] T. Sakai, "Screw extrusion technology - Past, present and future," *Polimery/Polymers*, vol. 58, no. 11–12, pp. 847–857, 2013.
- [7] G. A. Campbell and M. A. Spalding, "Single-Screw Extrusion: Introduction and Troubleshooting," *Anal. Troubl. Single-Screw Extruders*, p. 796, 2013.
- [8] J. A. Covas, "O processo de extrusão e as suas aplicações," *Apontamentos das aulas Process. Polímeros I*, 2015.
- [9] Y. Nakayama, E. Takeda, T. Shigeishi, H. Tomiyama, and T. Kajiwara, "Melt-Mixing by Novel Pitched-Tip Kneading Disks in a Co-Rotating Twin-Screw Extruder," 2010.
- [10] "Thermo Scientific Twin-Screw Extruders A Better Mix of Science and Technology."
- [11] K. J. Ganzeveld, "The counter-rotating twin screw extruder as a polymerization reactor." pp. 36–50, 1992.
- [12] RICHARD ARTHUR LAI-FOOK, "MELT CONVEYING IN COUNTER-ROTATING TWIN-SCREW EXTRUDERS," 1984.
- [13] Mich, "An introduction to DIY filament extrusion and extruders | 3D Printing for Beginners," 2014. [Online]. Available: <http://3dprintingforbeginners.com/how-to-make-diy-filament-for-your-3d-printer/>. [Accessed: 26-Apr-2018].
- [14] T. N. A. T. Rahim, A. M. Abdullah, H. M. Akil, D. Mohamad, and Z. A. Rajion, "Preparation and characterization of a newly developed polyamide composite utilising an affordable 3D printer," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 34, no. 19, pp. 1628–1638, 2015.
- [15] "The Noztek Pro Pellet & Powder Filament Extruder for 3D Printing - Noztek Extrusion SystemsNoztek Extrusion Systems." [Online]. Available: <http://www.noztek.com/product/the-noztek-pro-abs-and-pla-filament-extruder-for-3d-printers/>. [Accessed: 26-Apr-2018].

- [16] "Filastruder Kit." [Online]. Available: <https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit?variant=338125655>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [17] "Filabot EX2 Filament Extruder." [Online]. Available: <https://www.filabot.com/collections/filabot-core/products/filabot-original-ex2>. [Accessed: 26-Apr-2018].
- [18] "Wellzoom desktop filament extruder B – Wellzoom." [Online]. Available: <http://wellzoomextruder.com/product/wellzoom-desktop-filament-extruder-b/>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [19] "3D Printer Filament Recycling – ReDeTec." [Online]. Available: <https://redetec.com/>. [Accessed: 14-Sep-2018].
- [20] "Filastruder Kit." [Online]. Available: <https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit>. [Accessed: 26-Apr-2018].
- [21] "ProtoCycler: Free, Sustainable 3D Printer Filament | Indiegogo." [Online]. Available: <https://www.indiegogo.com/projects/protocycler-free-sustainable-3d-printer-filament#/>.
- [22] "3D Printing on Kickstarter: A Fast Filament Extruder for Less than \$1,000 and 3D Printed Houses to Match Your Own | 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing." [Online]. Available: <https://3dprint.com/186974/filament-extruder-3d-print-houses/>. [Accessed: 12-Nov-2018].
- [23] "LabCTI." [Online]. Available: <http://www.labcti.ufsc.br/projeto-e-construcao-de-uma-mini-extrusora-para-fabricacao-de-filamento-para-impressao-3d-2/>. [Accessed: 25-Sep-2018].
- [24] J. M. Maia and J A Covas, "Fundamentos de Processamento e Reologia." 1999.
- [25] P. Sunthar, "Polymer rheology," *Rheol. Complex Fluids*, pp. 171–191, 2010.
- [26] D. J. van and L. Pbm, *Engineering Aspects of Extrusion*. .
- [27] J. Vlachopoulos and D. Strutt, "The role of rheology in polymer extrusion," *New Technol. Extrus. ...*, no. January, pp. 1–26, 2003.
- [28] C. W. Macminn and G. H. Mckinley, "Tubeless Siphon and Die Swell Demonstration," 2004.
- [29] A. C.-Y. Wong and J. Z. Liang, "Relationship between die swell ratio and melt flow index," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 52, no. 18, pp. 3219–3221, Sep. 1997.

- [30] N. Sombatsompop and M. Panapoy, "Comments on temperature profiles of PP melt in the barrel of a twin screw extruder," *Polym. Test.*, vol. 20, no. 2, pp. 217–221, Oct. 2001.
- [31] L. M. Calado, "Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos : Estudo da sua Reologia e Extrusão," 2015.
- [32] E. Miller and J. P. Rothstein, "Control of the sharkskin instability in the extrusion of polymer melts using induced temperature gradients," *Rheol. Acta*, vol. 44, no. 2, pp. 160–173, 2004.
- [33] J. Musil and M. Zatloukal, "Historical review of die drool phenomenon in plastics extrusion," *Polym. Rev.*, vol. 54, no. 1, pp. 139–184, 2014.
- [34] T. Cunningham, "Stop Die Buildup : Plastics Technology," 2009. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/stop-die-buildup>. [Accessed: 20-Aug-2018].
- [35] J. P. D. Alves and A. R. Jr, "Analysis of the gelation process of suspension PVC resins and compounds," *Polímeros Ciência e Tecnol.*, vol. 16, pp. 165–173, 2006.
- [36] J. Vlachopoulos and D. Strutt, "The Role of Rheology in Polymer Extrusion."

ANEXO I – FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS

Technical data sheet

Chemicals



LDPE REPSOL ALCUDIA 2221FG

The grade REPSOL ALCUDIA 2221FG is a low density polyethylene grade, produced by high pressure autoclave technology, suitable for thin blown film applications. This material offers easy processability and good balance of mechanical and optical properties. It contains antioxidant, slip (500 ppm) (erucamide), and antiblock (850 ppm) additives.

Applications

- Thin pouches.
- General packaging film.

Recommended melt temperature range from 150 to 180°C. Processing conditions should be optimised for each production line.

PROPERTIES	VALUE	UNIT	TEST METHOD
General			
Melt Flow Rate (190°C, 2.16kg)	2.1	g/10 min	ISO 1133
Density at 23°C	922	kg/m ³	ISO 1183
Mechanical			
Dart drop (F ₅₀)	100	g	ISO 7765-1
Tear resistance (Elmendorf) (MD/TD)	500 / 300	cN	ISO 6383-2
Tensile stress at break (MD/TD)	26 / 20	MPa	ISO 527-3
Elongation at break (MD/TD)	350 / 600	%	ISO 527-3
Coefficient of friction (Dynamic)	0.1	-	ISO 8295
Gloss (45°)	85	-	ASTM D-2457
Haze	7	%	ASTM D-1003
Others			
Vicat softening temperature (load 10 N)	95	°C	ISO 306

40 µm thickness film, blow up ratio 2.5:1

The grade REPSOL ALCUDIA 2221FG complies with the European Directives regarding materials intended for contact with foodstuffs. The product mentioned herein is not intended to be used for medical, pharmaceutical or healthcare applications and we do not support their use for such applications. For further information, please contact our Technical Service and Development Laboratory or our Customer Care Service.

Storage

The grade REPSOL ALCUDIA 2221FG should be stored in a dry atmosphere, on a paved, drained and not flooded area, at temperatures under 50°C and protected from UV radiation. Storage under inappropriate conditions could initiate degradation processes or undesired migration of additives included in its formulation which may have a negative influence on the processability and properties of the transformed product.

January 2017

This information is offered in good faith and meant only as a guide.
The transformer or user will be, in each case, responsible for the
processing conditions and the final use of the product. Freedom
under patents, copyright and registered designs cannot be assumed.

Technical Service and Development:
Repsol Technology Centre
Ctra. de Extremadura AS, 109 BB
28931 Móstoles, Madrid
Tel. +34 91 753 86 00
ext.polioles@repsol.com

Headquarters:
Minister Alvaro, 44
28045 Madrid
Spain
www.chemicals.repsol.com

Customer Care:
scc@repsol.com

Ingeo™ Biopolymer 3052D Technical Data Sheet

Injection Molding Process Guide

Ingeo biopolymer 3052D, a NatureWorks LLC product, is designed for injection molding applications where the requirements are clarity with heat deflection temperatures lower than 120°F (49°C). See table at right for typical properties.

Applications

The variety of products made with Ingeo 3052D continues to grow rapidly. Applications include cutlery, cups, plates and saucers, and outdoor novelties, and this is just the beginning.

Processing Information

3052D resin can be processed on conventional injection molding equipment.

The material is stable in the molten state, provided that proper drying procedures are followed. Mold flow is highly dependent on melt temperature. It is recommended to balance screw speed, back pressure, and process temperature to control melt temperature. Injection speed should be medium to fast.

Process Details (*)

Startup and Shutdown

Ingeo biopolymer 3052D is not compatible with a wide variety of resins and special purging sequence should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum and wipe out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce 3052D biopolymer into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
4. Once 3052D has completely purged the system, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.
- 6.

*Detailed Purging recommendations available at natureworkslc.com.

Typical Material & Application Properties ⁽¹⁾		
Physical Properties	Ingeo Resin	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	14	D1238
Relative Viscosity	3.3	
Crystalline Melt Temperature (°C)	145-160	D3418
Glass Transition Temperature (°C)	55-60	D3418
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	9,000 (62)	D638
Tensile Elongation, %	3.5	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16.0)	D256
Flexural Strength (MPa)	15,700 (108)	D790
Flexural Modulus (MPa)	515,000 (3600)	D790
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.

Processing Temperature Profile ⁽¹⁾		
Melt Temperature	390°F	200°C
Feed Throat	70°F	20°C
Feed Temperature	330°F	165°C
Compression Section	380°F	195°C
Metering Section	400°F	205°C
Nozzle	400°F	205°C
Mold	75°F	25°C
Screw Speed	100-175 rpm	
Back Pressure	50-100 psi	3.5-6.9 bar
Mold Shrinkage	.004 in/in. +/- .001	

(1) These are starting points and may need to be optimized. For thin walled molding temperatures up to 450°F may be required.

Drying

In-line drying is recommended for Ingeo resins. A moisture content of less than 0.025% (250 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Polymer is supplied in foil-lined boxes or bags dried to <400 ppm when packaged. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly dry and reseal any unused material. The drying curves for both amorphous and crystalline resins are shown to the right. It is important to consider accurate initial moisture, when calculating necessary drying time.

Note: Amorphous polymer must be dried below 120°F (50°C).



PR REPSOL ISPLEN PR230C1E

REPSOL ISPLEN PR230C1E is a medium-low melt flow rate propylene-ethylene random copolymer with good transparency, high gloss and excellent surface finish. It is formulated with additives according to the end use of the item in order to reinforce the thermal stability.

REPSOL ISPLEN PR230C1E can be easily coloured during the extrusion process using the right pigments, preferably in the form of concentrates with a higher melt flow rate than that of the base polymer.

Applications

- Blow-moulding extrusion. Specially recommended for detergents and cosmetics due to its high ESCR
- Sheet Extrusion
- Thermoforming

Recommended melt temperature range from 185 to 215°C. Processing conditions should be optimized for each production line.

PROPERTIES	VALUE	UNIT	TEST METHOD
General			
Melt Flow Rate (230°C, 2.16 kg)	1.6	g/10 min	ISO 1133
Density at 23°C	902	kg/m ³	ISO 1183
Mechanical			
Tensile Strength at Yield	27	MPa	ISO 527-2
Elongation at yield	12	%	ISO 527-2
Flexural modulus of elasticity	800	MPa	ISO 178
Izod Impact Strength, (23°C, notched)	22	kJ/m ²	ISO 180/1A
Other			
Melting Point	143	°C	ISO 11357-3
Vicat Softening Temperature (10 N)	130	°C	ISO 306
HDT 0.45 MPa	70	°C	ISO 75

* Typical values – Not to be considered as specification

REPSOL ISPLEN PR230C1E complies with the European Directives regarding materials intended for contact with foodstuffs. The product mentioned herein is not intended to be used for medical, pharmaceutical or healthcare applications and we do not support their use for such applications. For further information, please contact our Technical Service and Development Laboratory or our Customer Care Service.

Storage

REPSOL ISPLEN PR230C1E should be stored in a dry atmosphere, on a paved, drained and not flooded area, at temperatures under 60°C and protected from UV radiation. Storage under inappropriate conditions could initiate degradation processes or undesired migration of additives included in its formulation which may have a negative influence on the processability and properties of the transformed product.

January 2017

This information is offered in good faith and meant only as a guide. The transformer or user will be, in each case, responsible for the processing conditions and the final use of the product. Freedom under patents, copyright and registered designs cannot be assumed.

Technical Service and Development:
Repsol Technology Centre
Ctra. de Extremadura 45, Km 18
28931 Móstoles, Madrid
Tel. +34 92 753 85 00
ard_polefinas@repsol.com

Headquarters:
Méndez Álvaro, 44
28045 Madrid
Spain
www.chemicals.repsol.com

Customer Care:
sacrq@repsol.com

CAMPUS® Ficha de especificação

Styrolution® PS 165N - PS
INEOS Styrolution Europe GmbH

INEOS
STYROLUTION

Informação do produto

Styrolution® PS 165N is a high molecular weight, good flowing grade, often blended with high impact extrusion grades.

Propriedades reológicas	Valor	Unidade	Método de ensaio
Índice de fluidez volumétrico, MVR	3.4	cm³/10min	ISO 1133
Temperatura	200	°C	ISO 1133
Carga	5	kg	ISO 1133
Propriedades mecânicas	Valor	Unidade	Método de ensaio
Módulo de tração	3300	MPa	ISO 527-1/-2
Tensão na ruptura	52	MPa	ISO 527-1/-2
Deformação na ruptura	2	%	ISO 527-1/-2
Módulo de tensão de fluência, 1h	3300	MPa	ISO 899-1
Módulo de tensão de fluência, 1000h	2600	MPa	ISO 899-1
Res. impacto Charpy C/entalhe, +23°C	3	kJ/m²	ISO 179/1eA
Propriedades térmicas	Valor	Unidade	Método de ensaio
Temp. de transição vítrea, 10°C/min	90	°C	ISO 11357-1/-2
Temperatura de deflexão térmica, 1.80 MPa	76	°C	ISO 75-1/-2
Temperatura de deflexão térmica, 0.45 MPa	84	°C	ISO 75-1/-2
Temperatura de amolecimento Vicat, 50°C/h 50N	89	°C	ISO 306
Coef.de expansão térmica linear, paralelo	80	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Flamabilidade UL94 a 1.5mm esp. nom.	HB	class	IEC 60695-11-10
Espessuras do tubo de teste	1.5	mm	IEC 60695-11-10
Cartão Amarelo (yellow card) disponível	Yes	-	-
Flamabilidade UL94 a espessura h	HB	class	IEC 60695-11-10
Espessuras do tubo de teste	3.2	mm	IEC 60695-11-10
Cartão Amarelo (yellow card) disponível	Yes	-	-
Flamabilidade conforme índice de oxigênio	18	%	ISO 4589-1/-2
Propriedades elétricas	Valor	Unidade	Método de ensaio
Constante dielétrica, 100Hz	2.5	-	IEC 62631-2-1
Constante dielétrica, 1MHz	2.5	-	IEC 62631-2-1
Fator de dissipação dielétrica, 100Hz	0.9	E-4	IEC 62631-2-1
Fator de dissipação dielétrica, 1MHz	0.7	E-4	IEC 62631-2-1
Índice comparativo de linha de fuga	375	-	IEC 60112
Outras propriedades	Valor	Unidade	Método de ensaio
Densidade	1040	kg/m³	ISO 1183
Propriedades específicas do material	Valor	Unidade	Método de ensaio
Índice de viscosidade	119	cm³/g	ISO 307, 1157, 1628
Propriedades para cálculos reológicos	Valor	Unidade	Método de ensaio
Densidade do fundido	936	kg/m³	-
Condutividade térmica do fundido	0.155	W/(m K)	-
Capacidade térmica específica do fundido	2300	J/(kg K)	-
Temperatura de ejeção	82	°C	-
Produção de amostra para teste	Valor	Unidade	Método de ensaio
Moldagem por injeção, temperatura da massa.	230	°C	ISO 294

Styrolution® PS 165N - PS

INEOS Styrolution Europe GmbH

Injection molding, Melt temperature, recommended: 230 °C
Injection molding, Mold temperature, range: 10 - 60 °C
Injection molding, Mold temperature, recommended: 40 °C

Polystyrol 165N can be injection molded at temperatures between 180 and 280°C. Recommended mold temperatures are between 10 and 60°C.

Extrusão de lâminas

PROCESSING

Extrusion, Blown film, Melt temperature: 180 - 210 °C
Extrusion, Flat film, Melt temperature: 200 - 240 °C

Extrusion melt temperature should not exceed 240°C.

Outros tipos de extrusão

PROCESSING

Extrusion, Pipes, Melt temperature: 180 - 210 °C

Extrusão de perfis

PROCESSING

Extrusion, Profiles, Melt temperature: 210 °C

Extrusão de chapas

PROCESSING

Extrusion, Plates, Melt temperature: 200 - 230 °C

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed. NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED OR DESIGNS, DATA OR INFORMATION SET FORTH, OR THAT THE PRODUCTS, DESIGNS, DATA OR INFORMATION MAY BE USED WITHOUT INFRINGING THE INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS OF OTHERS.

In order to check the availability of products please contact us or our sales agency.

For more information about our products contact

Ineos Styrolution Infopoint
<mailto:INSTY.emea@ineos.com>
Tel.: +49-2133-9309 168

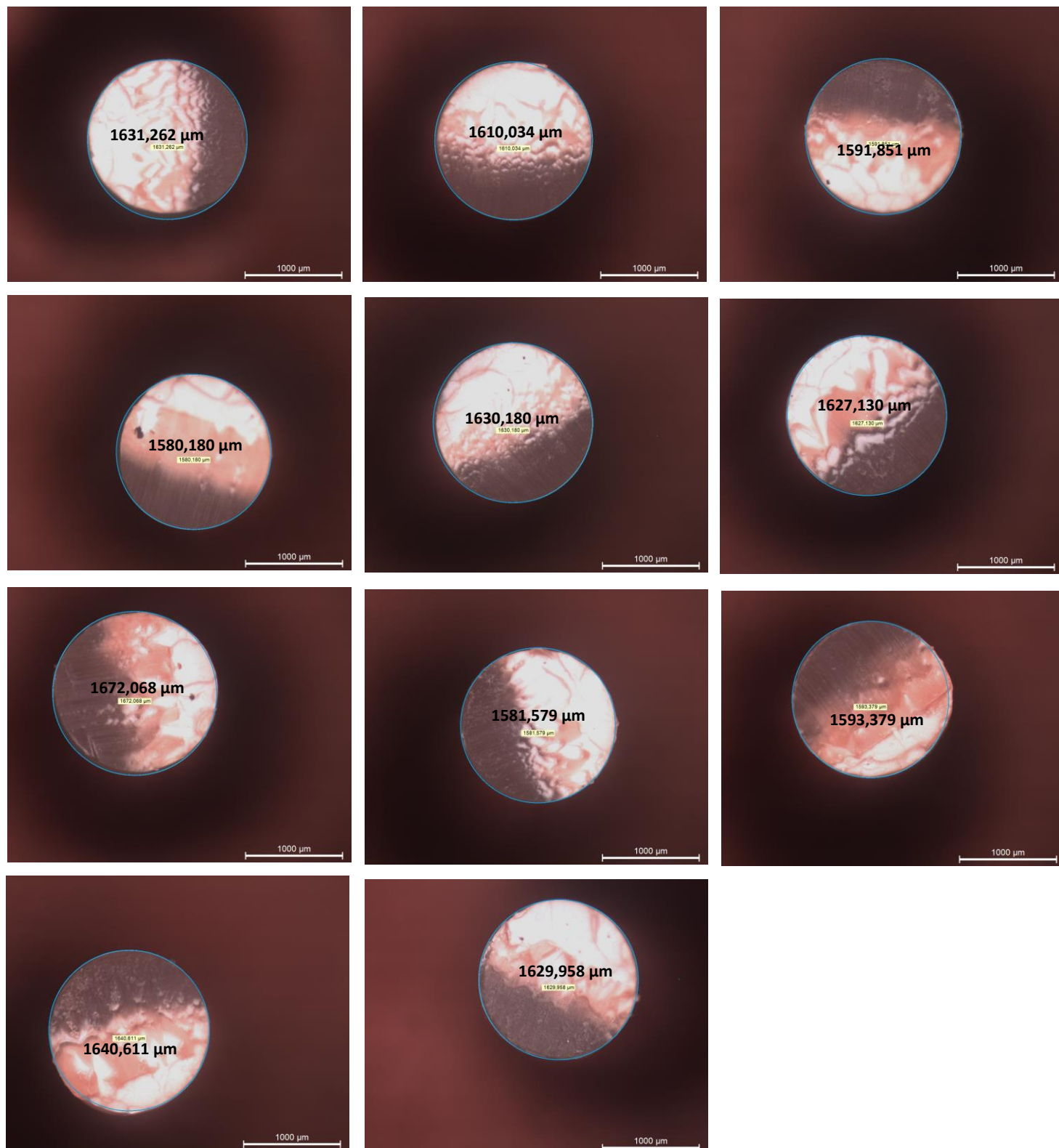
CAMPUS® is a registered trademark of CWFG (Chemie Wirtschaftsfoerderungsgesellschaft GmbH, Frankfurt)

ANEXO II – NORMA NP 2914 DE MEDIÇÃO DO ÍNDICE DE FLUIDEZ

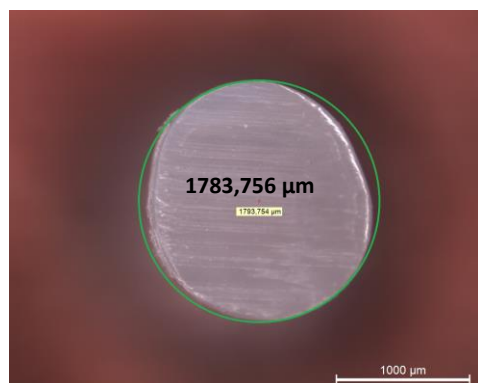
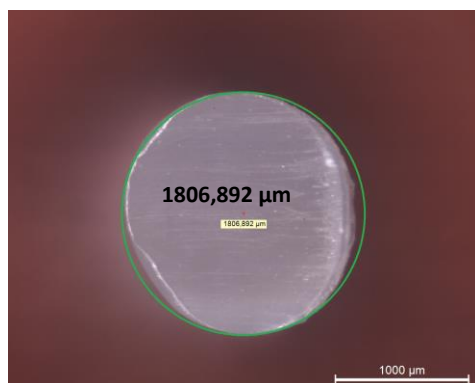
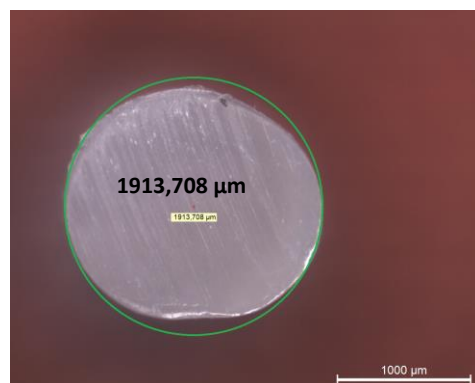
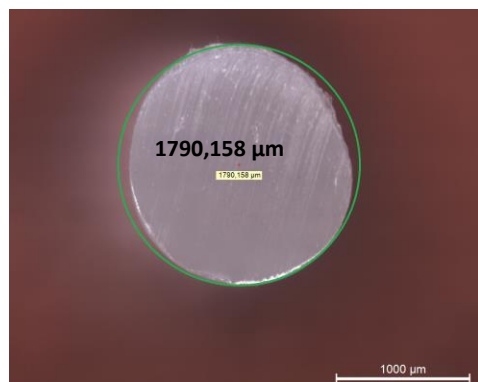
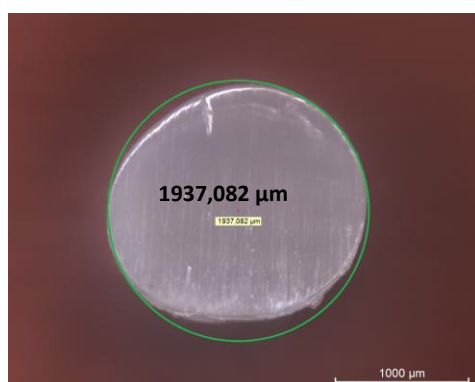
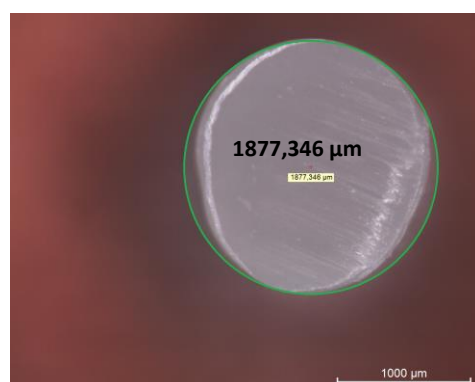
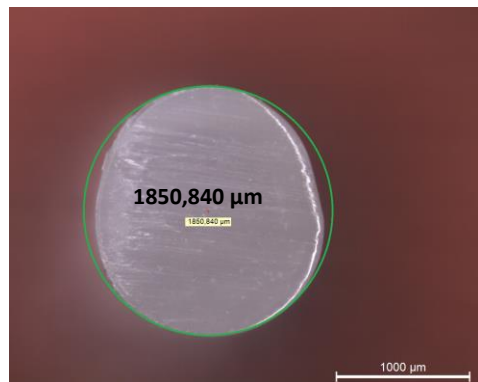
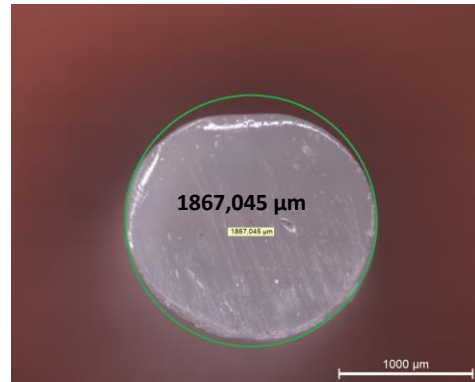
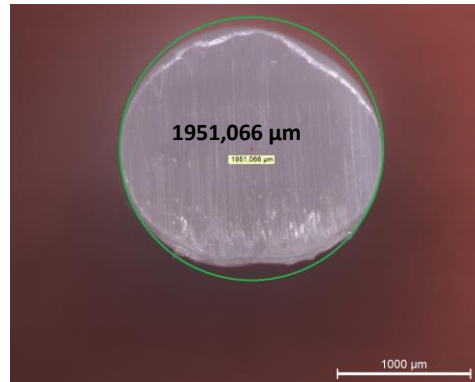
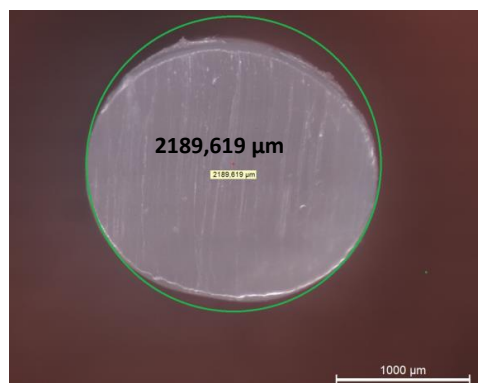
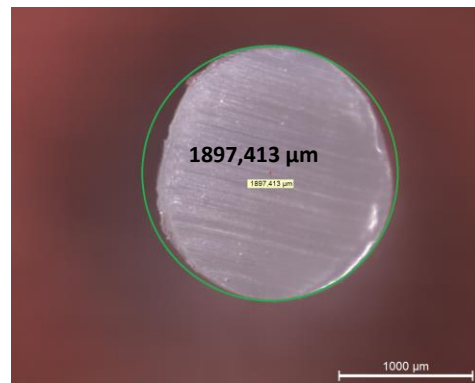
CDE 678.073: 536.421.2		
PROJECTO DE NORMA PORTUGUESA	MATERIAIS PLÁSTICOS Determinação do índice de fluidez dos termoplásticos	prNP-2914
Matériaux plastiques. Détermination de l'indice de fluidité à chaud des thermoplastiques		
<div style="text-align: right;">  </div> <p>1 - OBJECTIVO E CAMPO DE APLICAÇÃO</p> <p>1.1 - A presente Norma destina-se a estabelecer o método de determinação do índice de fluidez dos termoplásticos fundidos, em condições definidas de temperatura e pressão. Quando as condições do ensaio são indicadas na especificação de um material, este método pode ser utilizado para caracterizar a velocidade de escoamento do material fundido.</p> <p>NOTA: As condições do ensaio correntemente adoptadas são indicadas no Anexo.</p> <p>1.2 - O índice de fluidez dos altos polímeros depende da velocidade de corte.</p> <p>Neste ensaio, as velocidades de corte são mais fracas do que as que se encontram em condições normais de processamento e, por consequência, os resultados obtidos para vários termoplásticos nem sempre correspondem ao seu comportamento em condições reais.</p> <p>O método é útil em controle da qualidade.</p> <p>1.3 - Quando o método é aplicado a certos materiais, é preciso ter em atenção os factores que podem diminuir a reprodutibilidade dos resultados, tais como:</p> <p>a) a degradação térmica ou a reticulação do material que conduza a uma modificação da velocidade de escoamento durante o pré-aquecimento ou no decurso do ensaio; os materiais em pó, que necessitam de longos períodos de pré-aquecimento, são sensíveis a este efeito. Em certos casos, é necessária a adição de estabilizantes para reduzir a dispersão dos resultados;</p> <p>b) a presença de cargas ou reforços no material ensaiado, cuja distribuição ou orientação pode afectar a velocidade de escoamento.</p>		
Este Projecto Norma está sujeito a inquérito público, durante o prazo de 60 dias a contar da data da publicação do respectivo anúncio em dois jornais de Lisboa e Porto.		CT 58
REPRODUÇÃO PROIBIDA		Edição Jan. 71

ANEXO III – IMAGENS DA GEOMETRIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DOS FILAMENTOS AO LONGO DO COMPRIMENTO

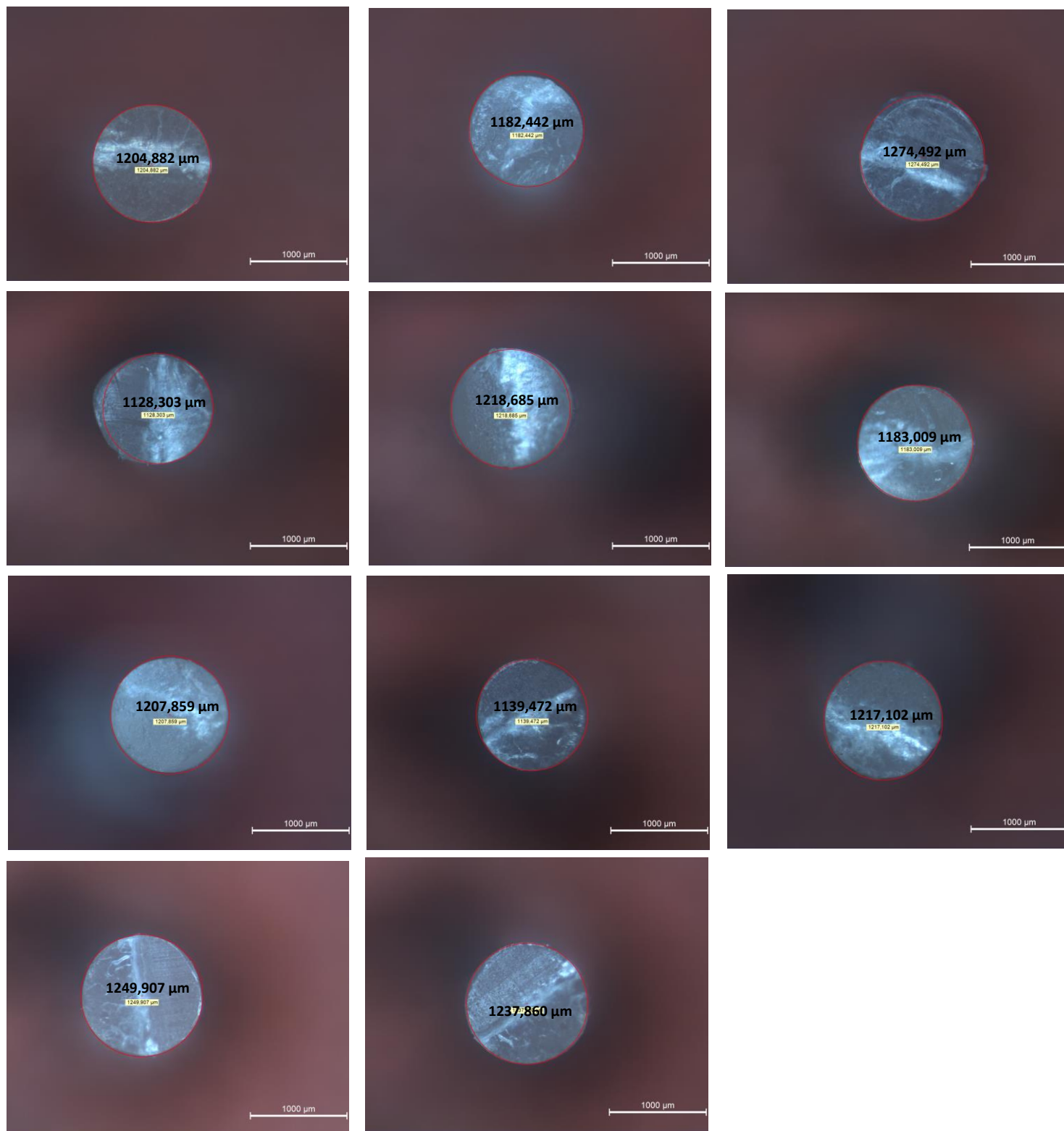
○ ABS



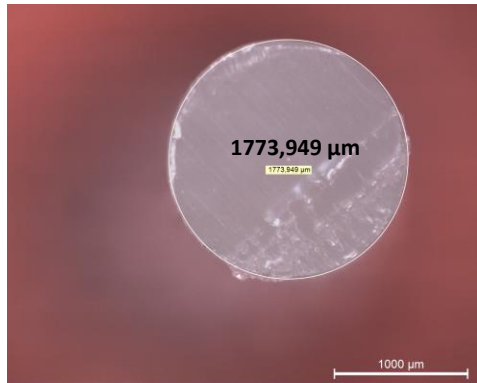
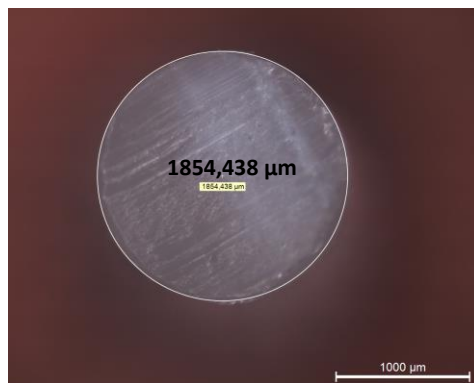
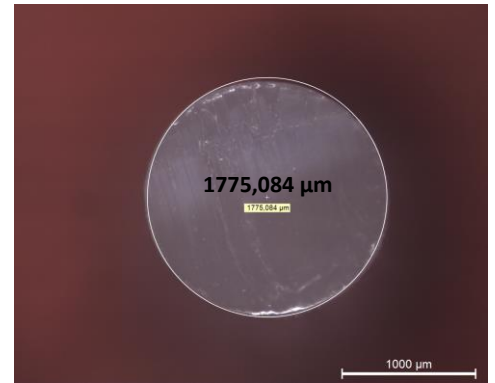
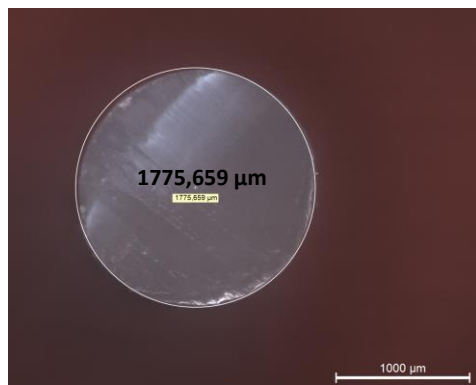
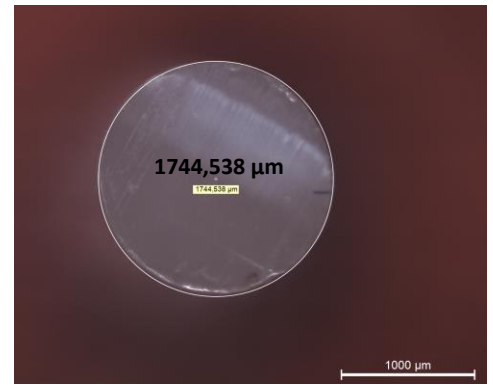
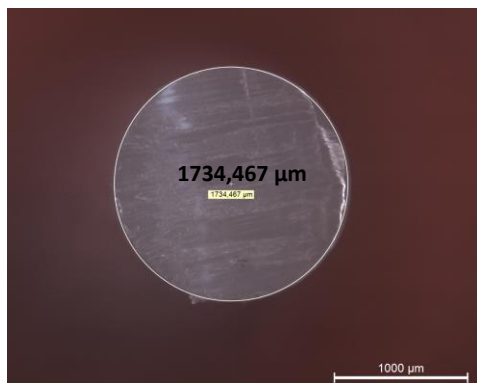
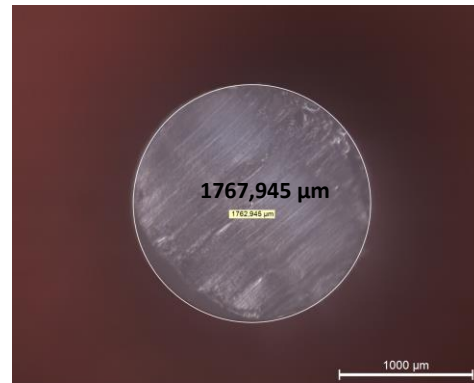
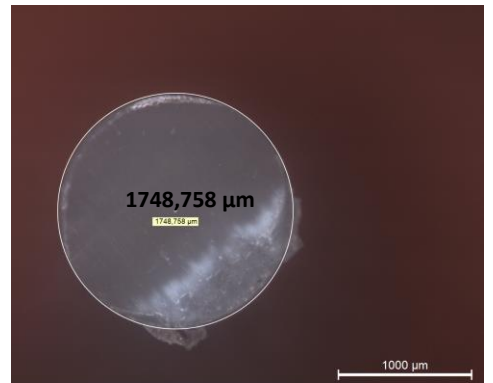
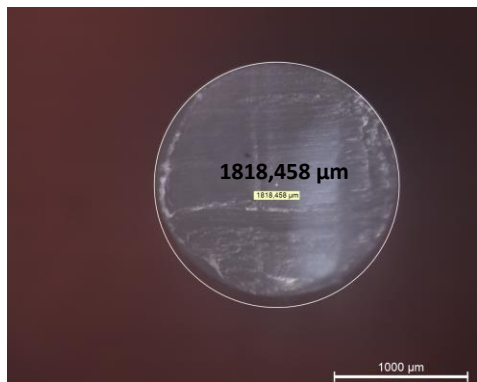
○ LDPE



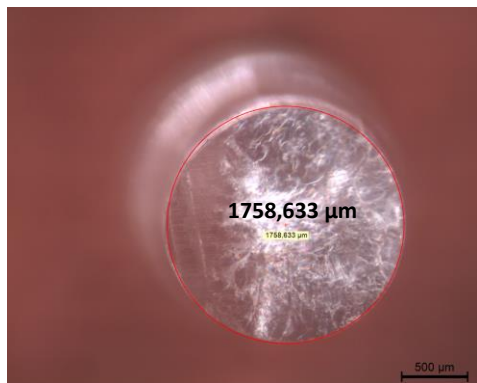
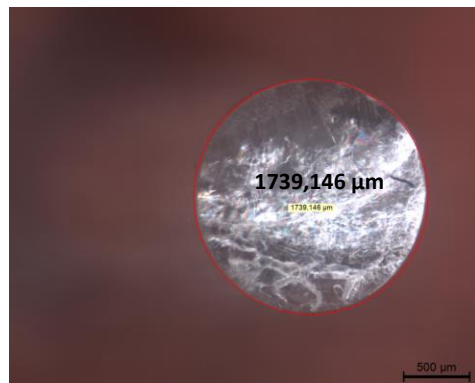
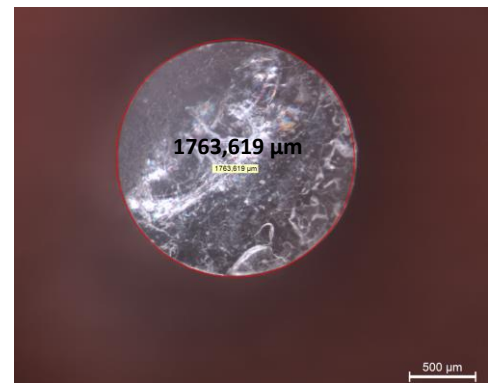
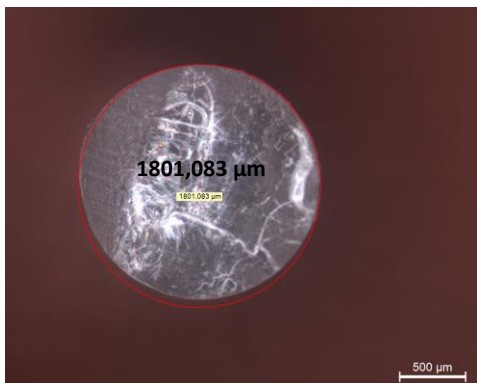
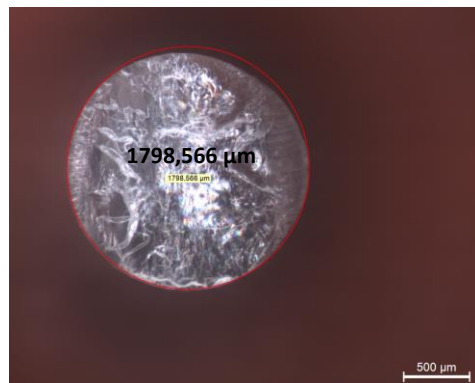
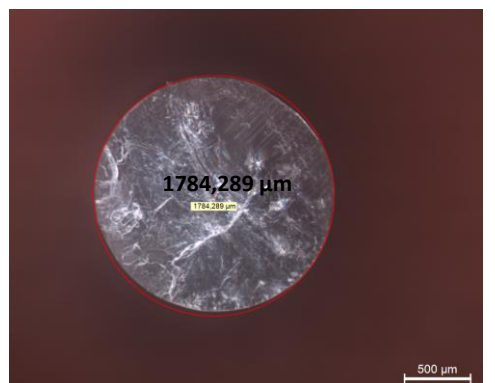
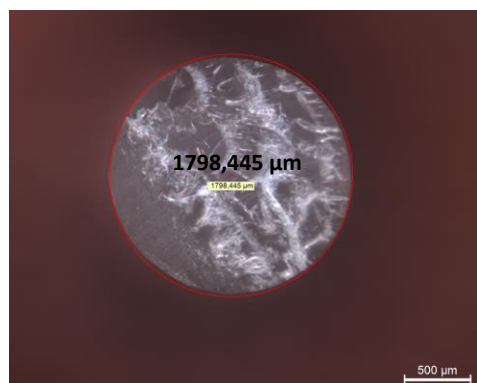
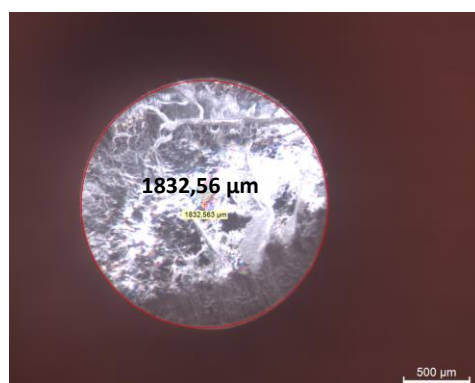
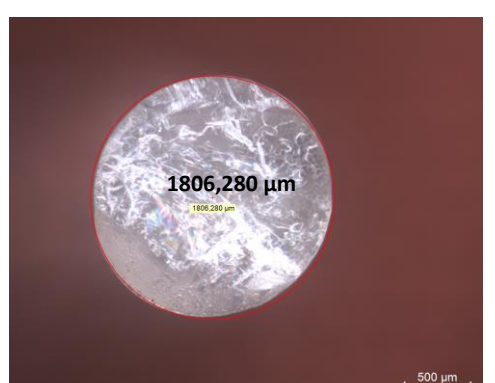
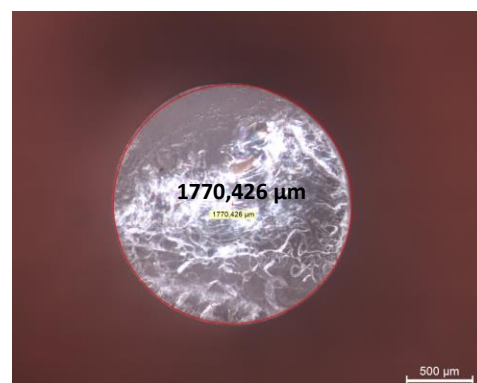
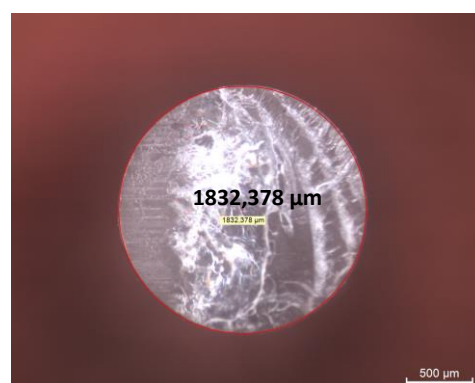
○ PLA



○ PP



○ PS



ANEXO IV – ENSAIOS DE TRAÇÃO AOS FILAMENTOS

Tabela 12 – Resultados obtidos dos ensaios de tração do ABS às condições de 3,5 RPM (parafusos) e 1,5 RPM (rolos de puxo).

Amostra	Tensão máxima (MPa)	Deformação à tensão máxima (%)	Tensão de rutura (MPa)	Deformação de rutura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	39,53	4,16	39,53	4,16	214,33
2	41,21	4,92	37,44	7,29	124,81
3	37,27	4,14	36,92	4,15	76,77
4	36,89	4,46	35,76	4,70	491,98
5	39,47	5,03	39,37	5,09	52,20
6	38,25	4,16	37,80	4,18	189,72

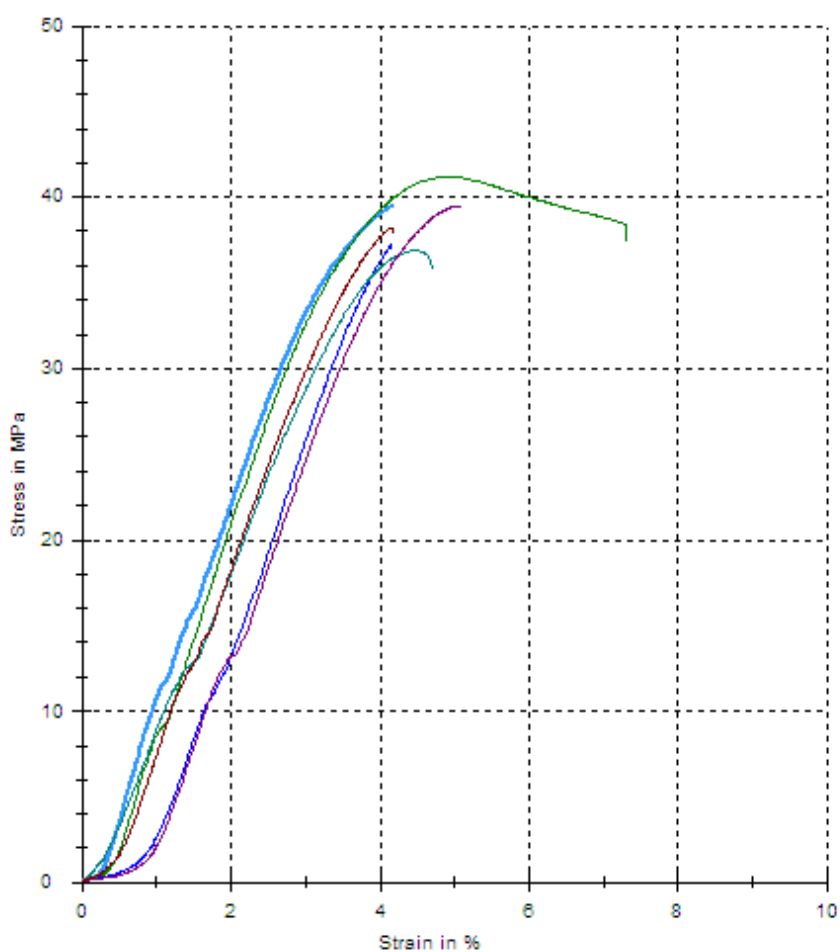


Tabela 13 – Resultados obtidos dos ensaios de tração do LDPE às condições de 4,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).

Amostra	Tensão máxima (MPa)	Deformação à tensão máxima (%)	Tensão de rutura (MPa)	Deformação de rutura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	11,03	601,68	-	-	37,21
2	11,23	446,60	-	-	90,80
3	11,90	610,69	-	-	45,22
4	10,44	365,08	-	-	113,11
5	11,26	561,60	-	-	119,72
6	11,68	611,74	-	-	25,91

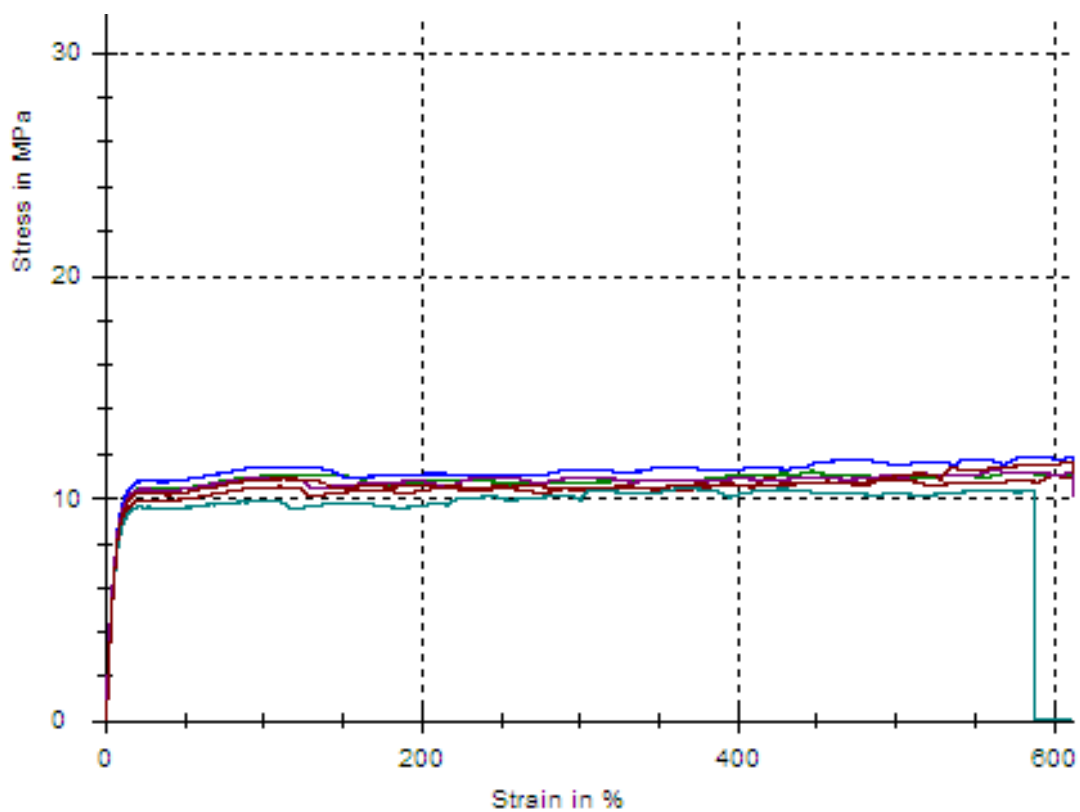


Tabela 14 – Resultados obtidos dos ensaios de tração do PLA às condições de 3,5 RPM (parafusos) e 3 RPM (rolos de puxo).

Amostra	Tensão máxima (MPa)	Deformação à tensão máxima (%)	Tensão de rutura (MPa)	Deformação de rutura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	65,29	4,51	62,92	4,52	79,86
2	62,41	8,05	60,36	8,68	40,79
3	62,91	5,59	57,46	7,04	53,77
4	61,81	5,10	59,60	5,11	206,91
5	65,30	5,87	61,06	6,92	107,71
6	70,35	6,31	68,72	6,81	62,18

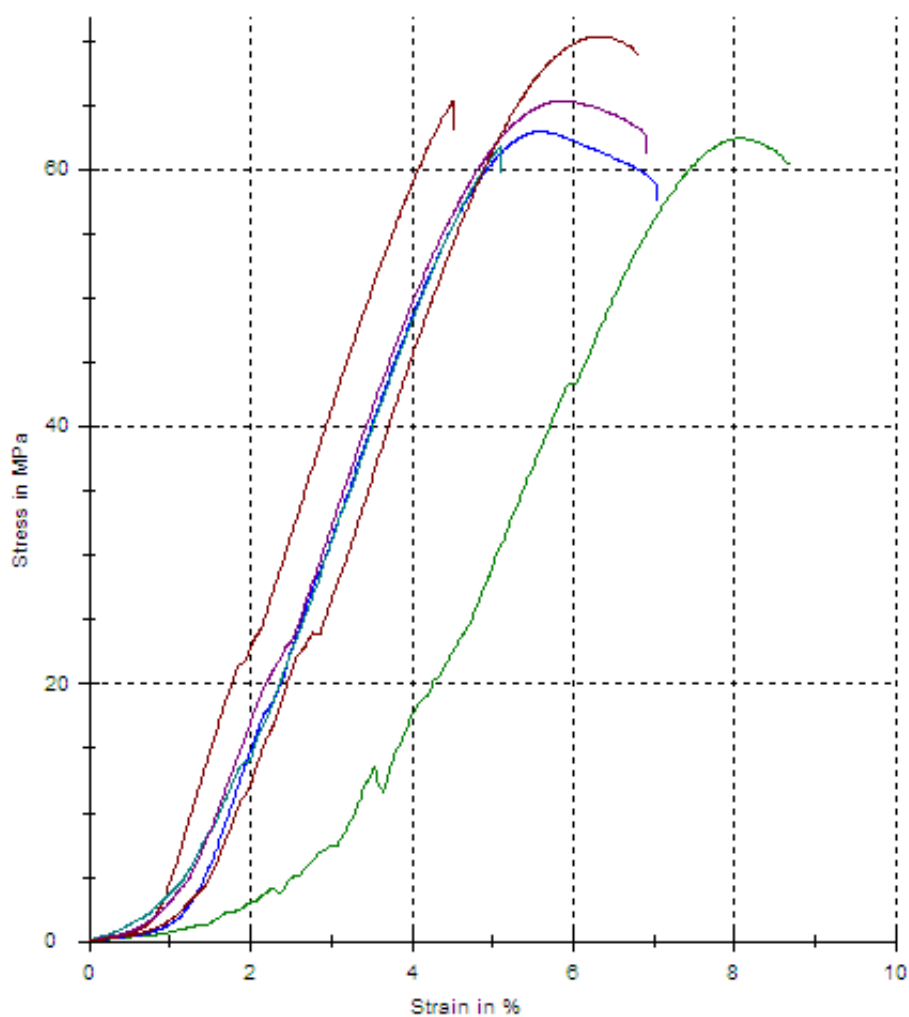


Tabela 15 – Resultados obtidos dos ensaios de tração do PP às condições de 3,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).

Amostra	Tensão máxima (MPa)	Deformação à tensão máxima (%)	Tensão de rutura (MPa)	Deformação de rutura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	19,12	17,20	-	-	59,38
2	20,95	15,40	-	-	79,47
3	19,48	19,20	-	-	24,06
4	19,89	17,3	-	-	66,69
5	18,95	15,68	-	-	31,58
6	21,33	15,48	-	-	43,28

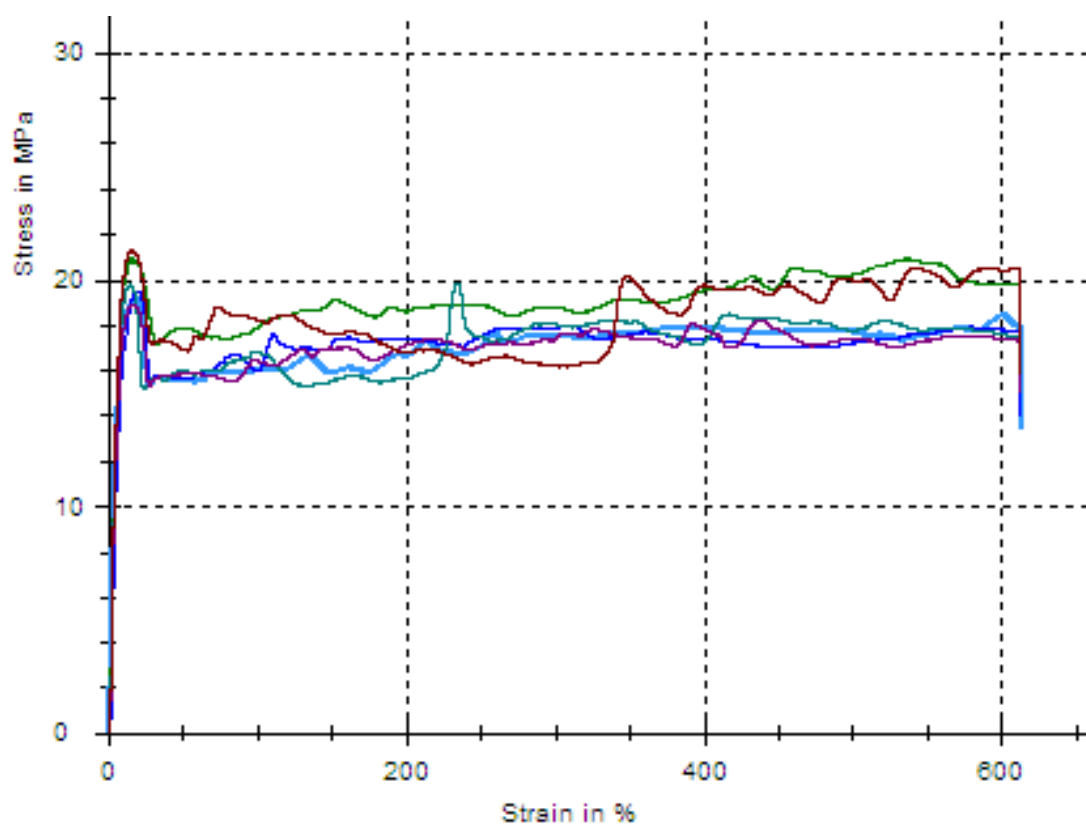
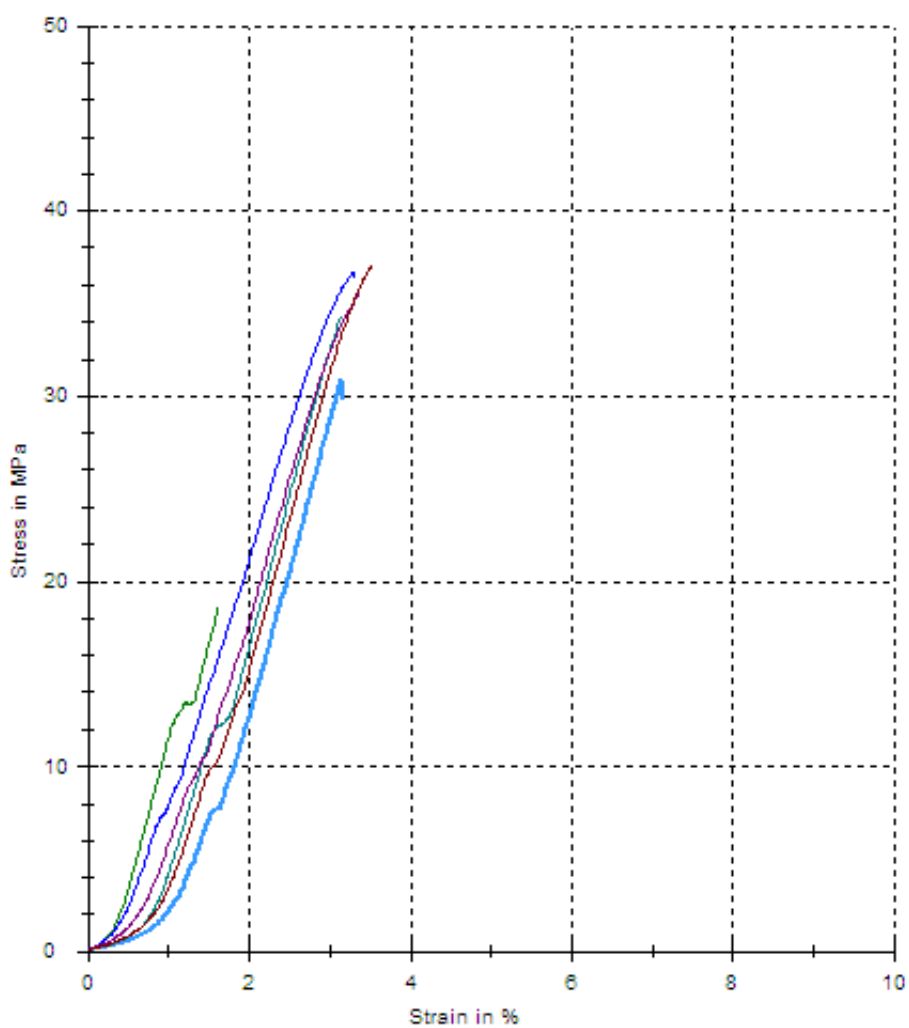


Tabela 16 – Resultados obtidos dos ensaios de tração do PS às condições de 3,5 RPM (parafusos) e 1,25 RPM (rolos de puxo).

Amostra	Tensão máxima (MPa)	Deformação à tensão máxima (%)	Tensão de rutura (MPa)	Deformação de rutura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	30,92	3,14	29,89	3,15	94,19
2	18,69	1,62	18,64	1,62	315,17
3	36,74	3,28	36,38	3,28	299,57
4	34,37	3,14	34,37	3,14	119,15
5	35,51	3,36	35,31	3,36	184,31
6	37,09	3,51	37,09	3,51,	122,48



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.