





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Diana Sofia Ribeiro de Sousa

**Estudo da processabilidade de misturas de
Polietileno reciclado para a produção de
filmes**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor António Gaspar Lopes Cunha

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Durante todo o meu percurso académico, muitas foram as pessoas que me fizeram evoluir tanto a nível académico como a nível pessoal e profissional. Assim, quero deixar um agradecimento a todos os envolvidos.

Agradeço à Universidade do Minho e ao seu distinto corpo docente por todo o apoio, dedicação e orientação que recebi ao longo de toda a minha jornada académica.

Ao meu orientador, Professor Gaspar Cunha, pelo seu apoio incondicional e dedicação ao ensino, pelos conselhos e palavras de encorajamento e entusiasmo na partilha de conhecimentos que foram fatores importantes que me permitiram superar todos os desafios ao longo do desenvolvimento da dissertação.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho, nomeadamente, ao Sr. Manuel e Sr. Mateus por todo o apoio na realização de todos os trabalhos experimentais.

Aos meus pais, por me terem permitido e encorajado seguir com os estudos nesta área e por me acompanharem e apoiarem incondicionalmente em todos os momentos da minha vida académica.

À minha irmã, pela presença, apoio e palavras de encorajamento nos momentos mais difíceis.

Um agradecimento aos meus amigos e colegas de curso, com quem partilhei desafios e conquistas. As discussões e trocas de ideias enriqueceram o meu percurso académico.

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projeto EMBALAGEM DO FUTURO | + Ecológica + Digital + INCLUSIVA, Referência PPR/59_EMBALAGEMDOFUTURO, financiado pela Agência para a Competitividade e Inovação – IAPMEI, I.P. no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), programa operacional: C5. Capitalização e Inovação Empresária.

A todos, muito obrigada!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, 31/10/2023

Nome Completo: Diana Sofia Ribeiro de Sousa

Assinatura:

RESUMO

Os plásticos desempenham um papel significativo na sociedade, com aplicações que abrangem desde embalagens, dispositivos médicos e eletrônicos. No entanto, o uso predominante dos plásticos tem sido linear, com produção, uso e desperdício frequentes, resultando em quantidades consideráveis de resíduos e consequentes crescentes pressões ambientais. O modelo de economia circular procura mudar este cenário, através da promoção da reciclagem, reutilização e redução de resíduos. No contexto dos filmes plásticos, que constituem o setor com uma elevada percentagem de participação no mercado de plásticos, a geração de resíduos é um problema face à sua natureza de uso singular frequente.

As poliolefinas, mais especificamente o polietileno, são amplamente utilizadas na produção de filmes plásticos devido às suas excelentes propriedades de flexibilidade, resistência e capacidade de selagem, para além da leveza e baixo custo. Oferece versatilidade, permitindo a criação de filmes com diferentes espessuras e propriedades para atender às necessidades de diversas indústrias como da alimentação, embalagens industriais e agricultura.

Assim, o presente projeto tem como principal objetivo o estudo da processabilidade da mistura de LDPE e LLDPE, em vários ciclos de processamento por forma a simular os efeitos da reciclagem. Através da caracterização, será possível averiguar a influência que a reciclagem tem nas propriedades finais da mistura ao longo de seis ciclos de processamento. Serão então estudadas as propriedades reológicas, com a Reometria Capilar, e mecânicas, através de ensaios de tração, que fornecerão dados acerca do comportamento do material após sofrer ciclos de degradação térmica e mecânica. Para além disto, também se testou o desenvolvimento de um método mais expedito de analisar a viabilidade das misturas recicladas utilizando uma linha de extrusão de monofilamentos com o objetivo de estudar o “estiramento”, ou seja, a processabilidade do material processado.

Concluiu-se que a mistura LDPE/LLDPE, de composição 80/20, sofre alterações nas suas propriedades reológicas e mecânicas após sofrer determinados ciclos de processamento. No entanto, estas alterações não são consideradas significativas, indicando que o uso da mistura na produção de filmes poderá ser viável. Mesmo assim, recomenda-se a análise e verificação das propriedades requeridas para o produto final.

Palavras-Chave: Degradação, Misturas, Poliolefinas, Reciclagem

ABSTRACT

Plastics play a significant role in society, with applications ranging from packaging, medical devices, to electronics. However, the predominant use of plastics has been linear, with frequent production, consumption and disposal, leading to substantial waste generation and growing environmental pressures. The circular economy model seeks to change this scenario by promoting recycling, reuse and waste reduction. In the context of plastics films, waste generation is a challenge due to their frequent single-use nature.

Polyolefins, specifically polyethylene, are widely used in the production of plastic films due to their excellent properties, including flexibility, strength and sealing capabilities, in addition to being lightweight and cost-effective. They offer versatility, allowing the creation of films with varying thicknesses and properties to meet the needs of diverse industries such as food packaging, industrial packaging and agriculture.

Therefore, the main objective of this project is to study the processability of a LDPE and LLDPE blend through several processing cycles to simulate the effects of recycling. Characterization will help determine the influence of recycling on the final properties of the blend over six processing cycles. Rheological properties will be studied using Capillary Rheometry, and mechanical properties will be evaluated through tensile tests, providing data on the material's behaviour after experiencing cycles of thermal and mechanical degradation. Additionally, the development of a more efficient method to assess the viability of recycled blends using a monofilament extrusion line was tested with the purpose of studying the "stretching" i.e., the processability of the processed material.

It was concluded that the LDPE/LLDPE blend, with a 80/20 composition, undergoes changes in its rheological and mechanical properties after undergoing specific processing cycles. However, these changes are not considered relevant, indicating that the use of the blend in film production may be feasible. Nevertheless, it is recommended to analyze and verify the required properties for the final product.

Keywords: Blends, Degradation, Polyolefins, Recycling

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização da dissertação	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Economia Circular	7
2.2. Polímeros	11
2.2.1. Poliolefinas	12
2.2.2. Degradação do Polietileno	14
2.2.3. Misturas de LDPE/LLDPE na produção de filmes	16
2.3. Processabilidade de filamentos	20
3. ESTUDO EXPERIMENTAL	22
3.1. Matérias-Primas	22
3.2. Mistura das Matérias-Primas	23
3.3. Ciclos de processamento	23
3.4. Técnicas de caracterização	28
3.4.1. Caracterização Reológica - Reometria Capilar	28
3.4.2. Caracterização Mecânica - Ensaio de tração	32
3.4.3. Estiramento	35
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	37
4.1. Reometria Capilar	37
4.2. Ensaio de Tração	39
4.3. Estiramento	41
5. CONCLUSÃO	47

6. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
ANEXOS.....	53
Anexo I – Fichas técnicas dos materiais	53
Anexo II – Exemplo de cálculos efetuados e valores obtidos na Reometria Capilar - ciclo 0.....	58
Anexo III – Comprimentos dos filamentos.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mercado global de plástico em 2021. Obtido de [1].....	1
Figura 2: Mercado americano de plástico, 2020-2030. Obtido de [1].....	2
Figura 3: Fluxograma das etapas do projeto.....	4
Figura 4: Diagrama de fluxo do modelo de economia linear. Adaptado de [6].....	7
Figura 5: Diagrama de fluxo do modelo de economia circular. Obtido de [8].....	8
Figura 6: Influência do MFI na massa volúmica para vários tipos de polietilenos. Adaptado de [14].....	13
Figura 7: Esquema de degradação oxidativa nos polímeros. Obtido de [16].....	15
Figura 8: Viscosidade extensional para polietilenos puros e suas misturas, a 140°C e uma taxa de deformação de 0,05 s ⁻¹ . Obtido de [17].....	17
Figura 9: Viscosidade extensional para polietilenos puros e suas misturas, a 180°C e uma taxa de deformação de 0,05 s ⁻¹ . Obtido de [17].....	17
Figura 10: Desenho esquemático do processo de extrusão monofuso. Obtido de [20].....	24
Figura 11: Gráfico representativo da variação da pressão no interior da extrusora monofuso. Obtido de [20].....	25
Figura 12: Exemplo esquemático de linha de extrusão de monofilamentos. Obtido de [21].....	26
Figura 13: Esquema dos ciclos de processamento do material.....	26
Figura 14: Representação esquemática da linha de extrusão de monofilamentos. Adaptado de [21, 22].....	27
Figura 15: Esquema de um reómetro capilar. Obtido de [23].....	28
Figura 16: Gráfico efetuado para calcular a queda de pressão real na fiação, correção de Bagley. Obtido de [24].....	30
Figura 17: Relação entre taxa de corte aparente e taxa de corte corrigida. Obtido de [24].....	31
Figura 18: Representação de um ensaio de tração. Obtido de [25].....	32
Figura 19: Gráfico típico de tensão-deformação para polímeros (a) frágeis, (b) plásticos, (c) elastómeros. Obtido de [25].....	33
Figura 20: Máquina de moldação por Injeção BOY 22A.....	34
Figura 21: Corpo de prova, de secção transversal retangular, para ensaio de tração. Obtido de [24]...34	34
Figura 22: Viscosidade em função da taxa de corte para as misturas dos ciclos 0, 1, 3, 5 e 6.....	37
Figura 23: Gráficos tensão-deformação obtidos dos ensaios de tração.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tamanho da Janela de Operação (SOW) para produção de balão estável no processo de extrusão de filme tubular investigados a duas temperaturas. Obtido de [17].....	17
Tabela 2: (A) viscosidade extensional da mistura 90/10 LL-1/LD-1 a 150°C para diferentes taxas de deformação; (B) viscosidade extensional da mistura 70/30 LL-1/LD-1 a 150°C para diferentes taxas de deformação; (C) viscosidade extensional de todas as misturas LL-1/LD-1 a 150°C para diferentes taxas de deformação. Adaptado de [18].....	18
Tabela 3: Resultados da análise térmica de LLDPE, LDPE e respectivas misturas. Obtido de [18].....	19
Tabela 4: Propriedades dos dois materiais utilizados.....	23
Tabela 5: Quantidades necessárias e retidas de material para cada ciclo.....	27
Tabela 6: Valores obtidos relativos ao Módulo de Young, tensões e deformações de rutura.....	40
Tabela 7: Valores médios de espessura e desvios padrão, em mm, associados às amostras dos seis ciclos e oito velocidades, em m/s.....	41
Tabela 8: Pesos das 8 amostras dos 6 ciclos.....	42
Tabela 9: Débito mássico das amostras.....	43
Tabela 10: Comprimento dos filamentos do ciclo 6.....	44
Tabela 11: Valores das oito velocidades reais nos rolos.....	44
Tabela 12: Razões de estiramento para as oito velocidades estabelecidas nos seis ciclos.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

PRR – Plano de Recuperação e Resiliência

LDPE – Polietileno de Baixa Densidade

LLDPE – Polietileno Linear de Baixa Densidade

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

EU – União Europeia

PE – Polietileno

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PC – Policarbonato

UV – Radiação Ultravioleta

MFI – Índice de Fluidez

SOW – Tamanho da Janela de Operação

DSC – Calorimetria Diferencial de Varrimento

FDA – Administração de Medicamentos e Alimentos

QI – Quantidade Inicial

QR – Quantidade Retida

DP – Desvio Padrão

RE – Razão de Estiramento

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Como é do conhecimento geral, o plástico é um material que está sempre presente no nosso quotidiano. Em substituição de materiais tradicionais, e muitas vezes mais dispendiosos e mais difíceis de manipular, o plástico é usado em diversas áreas como a indústria automóvel, a construção civil, a saúde, a alimentação, a agricultura, entre outras, permitindo o fabrico de produtos com características únicas. Por sua vez, o uso exponencial do plástico gera uma elevada quantidade de resíduos dado que nem todo ele é reciclável e, a percentagem que é reciclada, apenas suporta um determinado tempo de vida útil, ou seja, de ciclos de reciclagem, necessitando posteriormente de ser descartado.

Neste contexto torna-se pertinente o estudo da possibilidade de incorporação de material reciclado em novos produtos. Esta pertinência é ainda mais relevante quando se trata da indústria de embalagem sendo que estas são, muitas vezes, descartadas após um único uso. Como se pode observar nas figuras 1 e 2, em 2021, o setor da embalagem detinha a maior percentagem de participação na receita do mercado com mais de 36% e, em 2020, o polietileno representava mais de 25% do mercado de plásticos americano [1].

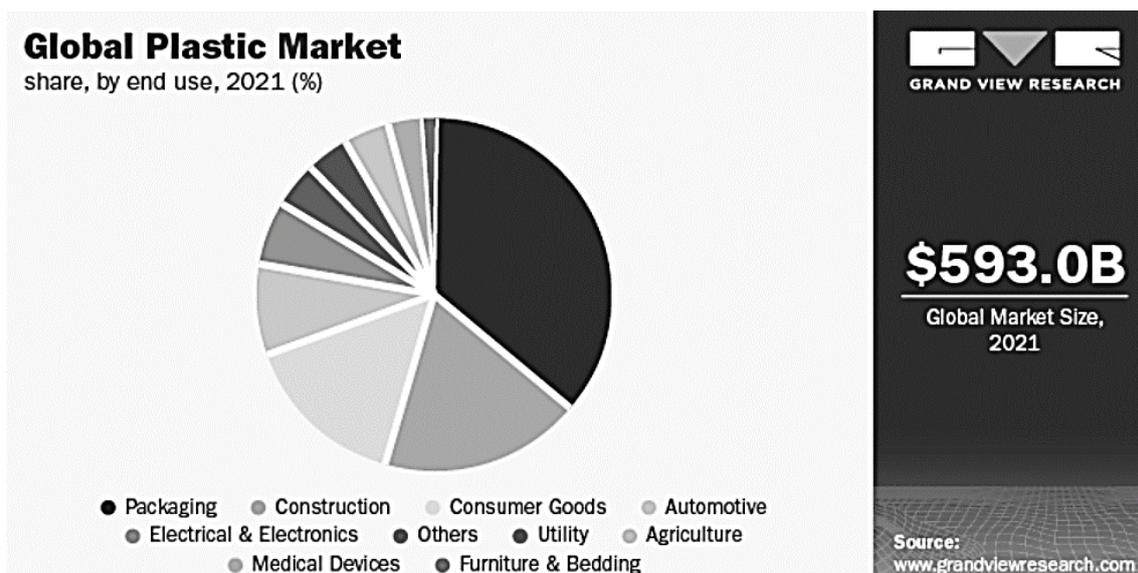


Figura 1: Mercado global de plástico em 2021. Obtido de [1].

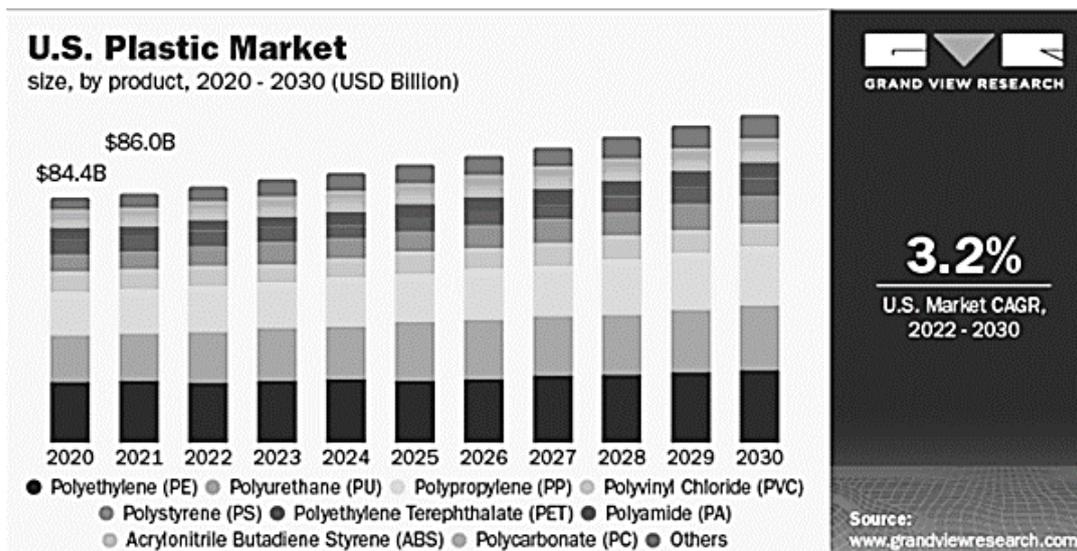


Figura 2: Mercado americano de plástico, 2020-2030. Obtido de [1].

Assim, como se verifica, é de extrema importância encontrar soluções sustentáveis para este problema em crescimento.

Em setembro de 2020, o governo português apresentou o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). Consiste num programa de investimento a médio prazo destinado a impulsionar a recuperação económica do país após os impactos da pandemia COVID-19. O PRR é financiado principalmente através do Mecanismo de Recuperação e Resiliência da União Europeia, que disponibiliza fundos para os Estados Membros com o principal objetivo de estimular a recuperação económica e promover a resiliência em áreas-chave.

O PRR, em Portugal, abrange um período de seis anos, de 2021 a 2026, e visa promover a transformação e modernização da economia portuguesa, bem como a sua resiliência face a futuras crises. O plano está estruturado em torno de três pilares principais:

- Resiliência: visa fortalecer a capacidade de Portugal para resistir a choques económicos e sociais, incluindo os causados por pandemias. Isso envolve investimentos em áreas como saúde, educação, formação profissional e inclusão social;
- Transição Climática: Portugal compromete-se a fazer a sua parte para combater as alterações climáticas. O país pretende investir em energias renováveis, eficiência energética, mobilidade sustentável e outras iniciativas relacionadas com a transição para uma economia de baixo carbono;

- Transição Digital: o objetivo deste pilar é impulsionar a digitalização da economia portuguesa, promovendo a inovação e a adoção de tecnologias digitais. Isso inclui investimentos em infraestruturas digitais, capacitação digital e digitalização de serviços públicos essenciais.

Assim, o PRR inclui um conjunto de projetos e reformas que abrangem várias áreas, desde a saúde e a educação até à ciência e investigação, passando pela habitação e pela cultura. Além disso, o plano estabelece metas claras e indicadores de desempenho para monitorizar a implementação e os resultados ao longo do tempo.

A implementação do PRR envolve a coordenação de várias entidades governamentais e a interação com parceiros sociais, setor empresarial e outros atores relevantes. A Comissão Europeia desempenha um papel fundamental na avaliação e aprovação dos planos nacionais de recuperação e resiliência, garantindo que os fundos sejam utilizados de forma eficaz e alinhada com os objetivos da União Europeia [2].

Tendo em conta a elevada percentagem de consumo de polietilenos na indústria da embalagem, nomeadamente os polietilenos de baixa e alta densidade e o polietileno linear de baixa densidade, o presente trabalho tem como principal objetivo o estudo da processabilidade de filmes com uma mistura de dois tipos de Polietilenos [3].

Pretende-se estudar a viabilidade das características e propriedades dos produtos finais, assim como as condições de processamento que permitem a obtenção de produtos viáveis. Neste caso, o reciclado será constituído por uma mistura de Polietilenos de Baixa Densidade ou “Low Density Polyethylene” – LDPE e Polietilenos Lineares de Baixa Densidade ou “Linear Low Density Polyethylene” – LLDPE.

1.2. Objetivos

Espera-se, com este trabalho, atingir um duplo objetivo. Por um lado, o trabalho experimental realizado deverá permitir estudar a processabilidade da mistura de LDPE e LLDPE e, por outro lado, pretende-se desenvolver uma metodologia que permita às empresas, de uma forma, expedita, estudarem a viabilidade de processamento de novas misturas de polietileno reciclado.

Através da caracterização, será possível averiguar a influência que a reciclagem tem nas propriedades finais das misturas ao longo de seis ciclos de processamento. Serão estudadas as

propriedades reológicas e mecânicas, que fornecerão dados acerca do comportamento do material após sofrer ciclos térmicos e mecânicos.

Na figura 3 está representado o fluxograma com as etapas do projeto.

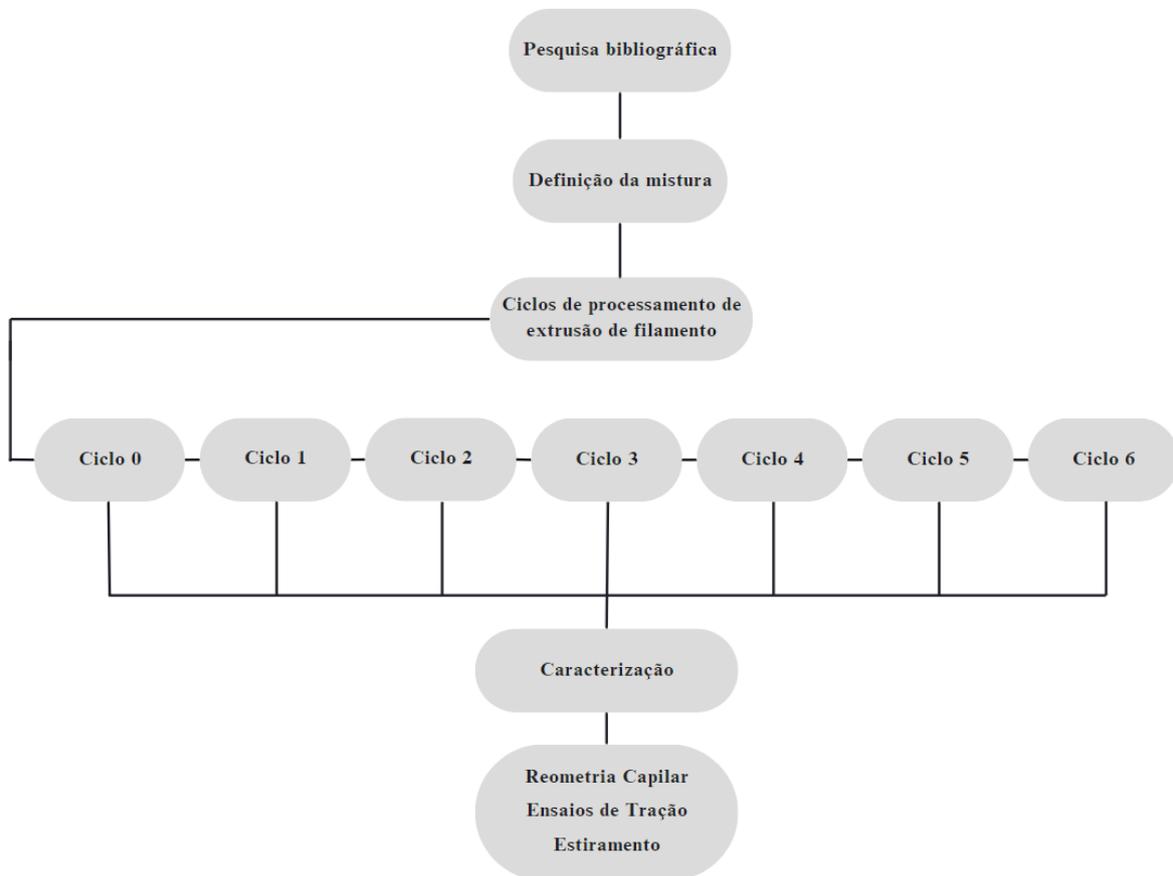


Figura 3: Fluxograma das etapas do projeto.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação de mestrado está dividida em cinco capítulos.

O primeiro capítulo, denominado de Introdução, descreve o que inspirou a realização deste trabalho, os objetivos que se pretendem alcançar, o fluxograma de atividades que vão ser realizadas e, finalmente, uma descrição sobre a organização da dissertação.

O segundo capítulo, denominado por Revisão Bibliográfica, aborda importantes conceitos teóricos como economia linear e circular, estatísticas e diretivas relacionadas com a reciclagem, noção do

conceito de polímero, mais especificamente poliolefinas e os principais mecanismos de degradação das mesmas relacionadas com o processo de extrusão e a análise de um trabalho científico realizado na área em estudo sobre a utilização de misturas de polímeros para o processo de extrusão de filme tubular.

O terceiro capítulo, denominado por Estudo Experimental, expõe as matérias-primas utilizadas e sua mistura, o procedimento experimental e as condições de processamento definidas, os equipamentos utilizados e a descrição das técnicas de caracterização.

No quarto capítulo, denominado por Apresentação e Discussão de Resultados, são expostos os resultados obtidos a partir das técnicas de caracterização realizadas, assim como a discussão dos mesmos.

O quinto capítulo, denominado por Conclusão, resume as principais conclusões do trabalho.

No sexto capítulo são propostos trabalhos futuros que visam complementar o trabalho desenvolvido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Economia Circular

A reciclagem dos plásticos é uma das questões mais desafiadoras do nosso tempo. Com o aumento da produção e consumo de plástico nas últimas décadas, a gestão responsável dos resíduos plásticos tornou-se uma necessidade urgente para preservar o meio ambiente e garantir um futuro sustentável.

A produção de plástico aumentou exponencialmente desde a década de 1950. De acordo com os dados da PlasticsEurope, a produção mundial de plástico atingiu cerca de 368 milhões de toneladas em 2019, um número alarmante que representa um aumento de mais de 200 vezes em relação a 1950. Esse aumento na produção de plástico resultou numa crise ambiental global, com a poluição por plástico a afetar oceanos, vida marinha e ecossistemas terrestres [4].

A economia linear e economia circular representam dois modelos fundamentais de gestão de recursos e produção que têm implicações significativas para o meio ambiente, a sustentabilidade e a economia global.

A economia linear, representada pela figura 4, é o modelo tradicional de produção e consumo que tem predominado na maior parte do século vinte e ainda é amplamente utilizada em muitas partes do mundo. O termo “linear”, neste contexto, refere-se ao facto de que o fluxo de recursos segue uma única direção, desde a extração de recursos à produção, consumo e, finalmente, desperdício [5, 6].

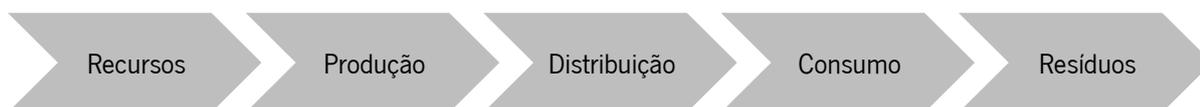


Figura 4: Diagrama de fluxo do modelo de economia linear. Adaptado de [6].

Os principais elementos que caracterizam a economia linear incluem a extração de recursos naturais como minerais, madeira, petróleo, para atender às necessidades da produção industrial. Essa

extração é intensiva e pode ter impactos significativos nos ecossistemas naturais; produção orientada para a fabricação de grandes quantidades de produtos, muitas vezes com o objetivo de reduzir os custos unitários. A produção em massa tem sido um dos pilares da economia linear e tem como objetivo satisfazer uma procura crescente; os produtos fabricados são então consumidos pelo cliente. Em muitos casos, há uma ênfase na obsolescência programada, onde produtos são projetados para ter uma vida útil limitada, incentivando os consumidores a comprar novos produtos com frequência; após o uso, os produtos tornam-se resíduos e são descartados em aterros sanitários ou incinerados, havendo o risco de poluição do meio ambiente, causando problemas de contaminação [7].

Em suma, a economia linear é um modelo que se desenvolveu historicamente e que tem as suas raízes na Revolução Industrial. Embora tenha trazido benefícios significativos, também enfrenta críticas devido aos seus impactos ambientais negativos e ao desperdício de recursos [7]. Como resultado, nas últimas décadas, tem havido uma crescente consciencialização sobre a necessidade de adotar modelos mais sustentáveis, como a economia circular, que visa minimizar o desperdício e promover o uso mais eficiente de recursos [8]

A economia circular, ilustrada pela figura 5, é um conceito fundamental que tem ganhado um crescente destaque nas discussões sobre sustentabilidade e gestão de recursos. Trata-se de um modelo económico e ambiental que procura transformar a forma como se produz, consome e se descartam produtos, promovendo a redução dos resíduos através da reutilização e reciclagem [9].

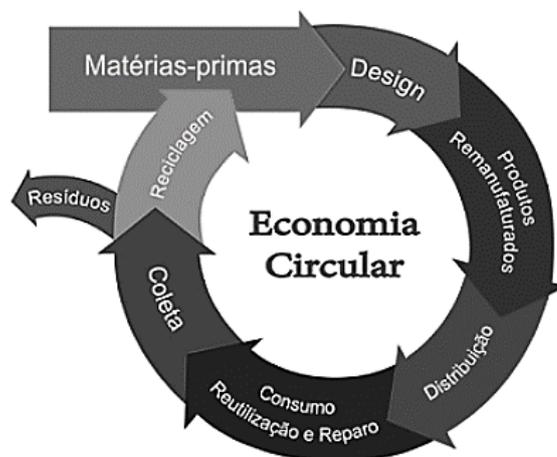


Figura 5: Diagrama de fluxo do modelo de economia circular. Obtido de [8].

É uma abordagem que contrasta com o modelo tradicional de economia linear, baseando-se em três princípios essenciais [10]:

1. Design Regenerativo: os produtos são projetados para serem duráveis, reparáveis e, no final de vida útil, facilmente reutilizados ou reciclados.
2. Cadeia de Produtos Circular: os materiais e produtos são mantidos em ciclos contínuos, com a recuperação, reutilização e reciclagem sendo priorizadas. Isso requer uma abordagem holística em toda a cadeia de produtos.
3. Mudança de Mentalidade: tanto os consumidores como as empresas são incentivados a adotar uma mentalidade de responsabilidade ambiental, optando por produtos sustentáveis, evitando o desperdício e apoiando práticas de produção ecologicamente corretas.

A economia circular visa minimizar a extração de recursos naturais, reduzir a geração de resíduos e diminuir o impacto ambiental, ao mesmo tempo que promove a eficiência e a inovação nos processos de produção e consumo. É uma resposta crucial aos desafios ambientais globais, como as alterações climáticas, a poluição e a depleção dos recursos naturais [8].

Os filmes plásticos, especificamente, desempenham um papel essencial em muitos aspetos do quotidiano sendo que oferecem mais conveniência, higiene e proteção de outros produtos. No entanto, a gestão sustentável dos mesmos representa um desafio significativo devido à sua ubiquidade, ou seja, devido ao facto de terem uma grande área de abrangência, estando presentes em todo o lado. Os filmes plásticos frequentemente se tornam resíduos após um único uso, contribuindo para o desperdício de recursos. A embalagem excessiva em filmes plásticos, muitas vezes, também resulta num consumo desnecessário de plástico pois os produtos são embalados individualmente.

Para entender a escala do problema dos filmes plásticos e a sua relação com a economia circular, é crucial analisar alguns dados estatísticos relevantes, nomeadamente, a produção mundial de plástico, o uso de plástico em embalagens, a reciclagem de plásticos e a poluição pelo plástico. Em 2019, a produção mundial de plástico atingiu cerca de 368 milhões de toneladas, de acordo com a PlasticsEurope. Esse número representa um aumento significativo em relação às décadas anteriores [4]. A embalagem é um dos principais setores de uso de plásticos, representando aproximadamente 40% do uso total de plásticos. Muitos desses produtos são filmes plásticos [1]. Segundo a Ellen MacArthur

Foundation, apenas 14% dos plásticos globais são recolhidos para reciclagem, e apenas 2% são efetivamente reciclados em circuitos fechados, onde se tornam produtos da mesma qualidade. Isso demonstra os desafios na reciclagem de plásticos, incluindo filmes plásticos [9]. Estima-se que 8 milhões de toneladas de plástico entram nos oceanos anualmente, causando danos significativos aos ecossistemas marinhos. Os filmes plásticos contribuem para essa poluição devido à leveza e mobilidade [9].

As leis e diretivas relacionadas com a reciclagem de plásticos em Portugal fazem parte de um quadro legal mais amplo da União Europeia (UE) e das regulamentações nacionais específicas. A UE estabeleceu diretrizes e metas para a gestão de resíduos e a promoção da reciclagem, e Portugal implementou essas políticas no sistema jurídico. Algumas das principais leis e diretivas que afetam a reciclagem de plásticos em Portugal passam pela diretiva da UE sobre resíduos (2008/98/CE), que estabelece o quadro geral para a gestão de resíduos na UE e define metas para a redução, reciclagem e tratamento de resíduos, exigindo que os Estados membros, incluindo Portugal, estabeleçam planos nacionais de gestão de resíduos para cumprir essas metas; Diretiva da UE sobre Embalagens e Resíduos de Embalagens (94/62/CE), que estabelece metas para a reciclagem e a recuperação de resíduos de embalagens plásticas. Portugal implementa esta diretiva por meio de legislação nacional; Programa Nacional para os Resíduos Urbanos (PNRU), que estabelece as diretrizes e metas para a gestão de resíduos urbanos de plástico, abordando questões relacionadas à recolha seletiva, reciclagem e tratamento de resíduos urbanos em todo o país; Lei da Gestão de Resíduos (Lei n.º 58/2005), que estabelece o regime jurídico da gestão de resíduos em Portugal e inclui disposições relacionadas com a recolha seletiva, reciclagem e a responsabilidade dos produtores de embalagens plásticas. Portugal também implementou um sistema de ecovalor, que implica que os produtores e importadores de produtos embalados em plástico paguem uma taxa para financiar a recolha seletiva e a reciclagem desses resíduos, servindo como um incentivo económico para promover a reciclagem de plásticos. Além das leis e diretivas, Portugal desenvolveu programas de recolha seletiva a nível local e regional para recolher resíduos recicláveis, incluindo plásticos, envolvendo a instalação de contentores de reciclagem e campanhas de conscientização para incentivar os cidadãos a separar os seus resíduos de forma adequada.

Estas leis e regulamentações formam o arcabouço legal que orienta a gestão de resíduos e a reciclagem de plásticos em Portugal. O país está comprometido em cumprir as metas estabelecidas pela

UE para reduzir a produção de resíduos e aumentar as taxas de reciclagem, contribuindo assim para a proteção do meio ambiente e a promoção da economia circular.

2.2. Polímeros

Os polímeros desempenham um papel de inegável magnitude no contexto contemporâneo, sendo ubíquos numa variedade de aplicações que abrangem desde embalagens para produtos alimentares até vestuário, e desde dispositivos médicos sofisticados até componentes automóveis. A adaptabilidade no ajuste de propriedades específicas conferiu-lhes um estatuto essencial na tessitura da sociedade moderna.

Os polímeros, macromoléculas constituídas por unidades repetitivas conhecidas como monómeros, estabelecem ligações covalentes que resultam em cadeias longas. A topologia destas cadeias pode ser linear, ramificada ou reticulada, sendo que as suas características e propriedades manifestam-se consoante a composição dos monómeros e as circunstâncias de polimerização [11].

As propriedades dos polímeros estão intrinsecamente ligadas à sua estrutura molecular. Polímeros lineares tendem a evidenciar uma flexibilidade superior, enquanto os polímeros reticulados exibem maior rigidez devido às ligações transversais entre cadeias. A incorporação de grupos funcionais distintos nos monómeros pode conferir atributos singulares aos polímeros, tais como resistência térmica, condutividade elétrica e biodegradabilidade [11, 12].

Os polímeros podem ser classificados como termoplásticos e termoendurecíveis. Os termoplásticos podem ser submetidos a ciclos de fusão e moldação repetitivos, conservando as suas propriedades originais, o que os torna preeminentes em processos fabris, como a injeção e extrusão. Em contraste, os termoendurecíveis, uma vez submetidos a processos em que ocorra fusão, não podem ser convertidos novamente ao estado fundido sem sofrerem degradação [11, 12].

Paralelamente, os polímeros dividem-se em duas categorias: naturais e sintéticos. Os polímeros naturais são preexistentes na natureza, a exemplo das proteínas e celulose. Em contrapartida, os polímeros sintéticos são concebidos pelo ser humano e englobam um espectro amplo de materiais como o polietileno (PE), polipropileno (PP), poliéster (PS) e policarbonato (PC) [11, 12].

2.2.1. Poliolefinas

As poliolefinas são uma classe de polímeros amplamente utilizados na indústria devido às suas características e propriedades únicas. Estas incluem dois principais tipos de polímeros: polietileno e polipropileno. Ambos são derivados de hidrocarbonetos, tornando-os materiais plásticos versáteis e de baixo custo. Tanto o polietileno quanto o polipropileno são recicláveis, o que contribui para a sustentabilidade e a redução do impacto ambiental. Além disso, esses polímeros podem ser modificados com aditivos para obter propriedades específicas, como resistência UV ou até mesmo características antibacterianas [12].

Em suma, as poliolefinas desempenham um papel vital em diversos setores industriais devido à versatilidade, baixo custo e propriedades personalizáveis.

O PE é um termoplástico amplamente difundido e utilizado devido às suas notáveis propriedades físicas e químicas. É composto por unidades repetitivas de etileno ($[-CH_2CH_2-]_n$), onde n representa o grau de polimerização [12-13]. As ligações covalentes entre os átomos de carbono na cadeia polimérica conferem ao polietileno uma elevada resistência molecular. A estrutura química do polietileno resulta em diversas propriedades que influenciam o seu comportamento nas suas variadas aplicações. O polietileno existe em diferentes graus, com densidades e índices de fluidez, como o polietileno de alta densidade, polietileno de média densidade, polietileno de baixa densidade [13].

O índice de fluidez de massa, MFI, expresso em $g/10min$, indica a taxa de fluxo do polietileno fundido sob uma carga padrão e temperatura. O MFI pode variar amplamente entre diferentes tipos de polietileno que, por sua vez, irá influenciar nos diferentes tipos de processamento. Quanto maior o índice de fluidez (IF), menor será a viscosidade. Portanto, conhecer o índice de fluidez é fundamental para antecipar as condições de processamento. A figura 6 relaciona a massa volúmica com o índice de fluidez de diferentes tipos de polietileno nos diferentes processos produtivos em que estes devem ser utilizados [13-14].

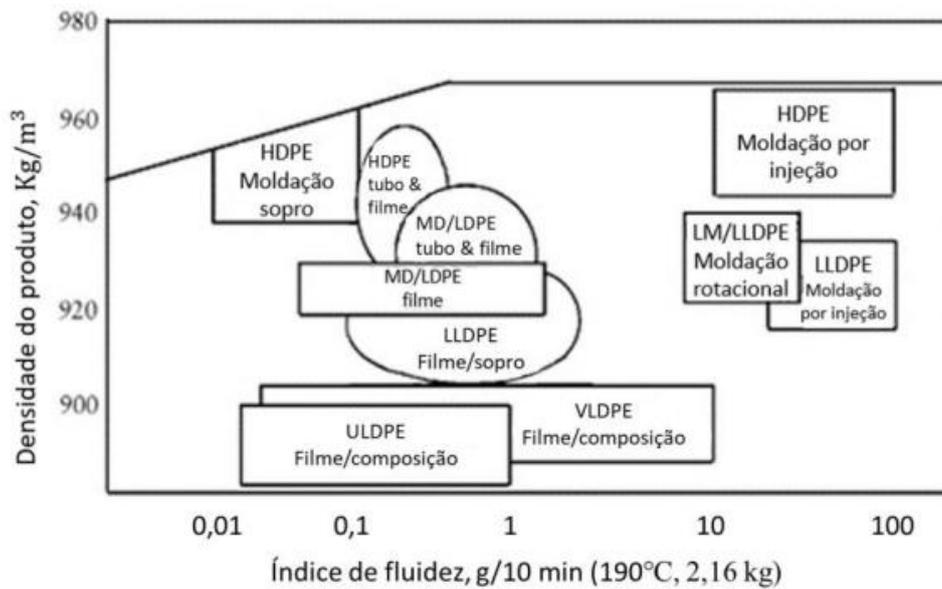


Figura 6: Influência da massa volúmica no MFI para vários tipos de polietilenos. Adaptado de [14].

A massa específica é uma propriedade intrínseca que reflete a relação entre a massa e o volume. O polietileno de alta densidade, HDPE, apresenta uma densidade relativamente maior, tipicamente entre $0,94$ a $0,97 \text{ g/cm}^3$. Já o polietileno de baixa densidade, LDPE, apresenta uma densidade mais baixa, variando de $0,91$ a $0,93 \text{ g/cm}^3$ [14]. Esta diferença de densidade contribui para características distintas no desempenho, tais como a rigidez e a resistência. Outro aspecto relevante é a distribuição de massa molecular do polietileno, que pode influenciar as suas propriedades mecânicas e térmicas. A massa molecular média e a distribuição de massas moleculares podem ser ajustadas durante a síntese, permitindo a obtenção de polietilenos com diferentes graus de cristalinidade. O HDPE é conhecido pelo seu elevado grau de cristalinidade, resultando numa maior rigidez e resistência, enquanto que o LDPE apresenta menor grau de cristalinidade, o que lhe confere uma maior flexibilidade. Além disso, a estrutura do polietileno também determina as suas propriedades térmicas, como o ponto de fusão. O HDPE apresenta um ponto de fusão mais elevado, geralmente acima de 130°C , enquanto que o LDPE tem um ponto de fusão mais baixo, em torno de 110°C [14, 15].

O polietileno linear de baixa densidade, LLDPE, pertence à mesma categoria do LDPE. No entanto, apresenta algumas diferenças na sua estrutura molecular e, conseqüentemente, nas suas propriedades e aplicações. O LLDPE apresenta uma estrutura com menos ramificações, o que contribui para uma maior regularidade na organização molecular resultando numa maior densidade, tipicamente entre

0,920 a 0,940 g/cm^3 . Assim, o LLDPE pode evidenciar um processamento mais desafiador, mas também pode resultar em melhores propriedades de moldação em determinados contextos [14, 15].

2.2.2. Degradação do Polietileno

O polietileno é um termoplástico comumente utilizado nos processos de extrusão, nos quais pode sofrer degradação térmica, caso certas condições não sejam adequadamente selecionadas. As elevadas temperaturas e prolongada exposição a essas mesmas temperaturas podem causar a quebra das cadeias poliméricas, levando à degradação. Os principais fatores que contribuem para a degradação térmica do polietileno durante o processo de extrusão incluem a temperatura, tempo de residência, taxas de corte e tensões de corte, presença de oxigênio ou substâncias reativas [13 - 15].

A degradação oxidativa no polietileno refere-se às quebras da cadeia polimérica devido à reação com o oxigênio na presença de calor, luz ou determinados catalisadores. Assim, o polietileno é suscetível a oxidar quando sujeito a ambientes de elevada temperatura ou exposição à luz UV [14, 15]. O processo de degradação oxidativa do polietileno envolve os seguintes passos, que se encontram representados na figura 7 [16].

1. Iniciação (A-B). O processo de iniciação envolve a geração de radicais livres, que são espécies altamente reativas que dão início ao processo de degradação. No caso do LDPE, a iniciação pode ocorrer, tipicamente, através de diferentes mecanismos.
 - a. Cisão das cadeias poliméricas: a elevadas temperaturas, as ligações mais fracas na cadeia polimérica quebram, resultando na formação de radicais livres.
 - b. Oxidação: o oxigênio presente no processo pode reagir com os átomos de hidrogênio na cadeia polimérica, criando radicais livres.
 - c. Impurezas: as impurezas presentes no processo podem servir como catalisadores para dar início à degradação térmica.
2. Propagação (C-D). A propagação ocorre após o processo de iniciação. Durante esta etapa:
 - a. Podem ocorrer reações com radicais livres, que podem reagir com a ramificação da cadeia polimérica mais próxima, criando uma reação em cadeia, onde o processo de degradação propaga-se ao longo de toda a cadeia polimérica.
 - b. Ligações cruzadas. Em alguns casos, em vez de ocorrer cisão ao longo da cadeia polimérica, os radicais livres podem estabelecer ligação entre as diferentes ramificações da cadeia polimérica, alterando a estrutura tridimensional, influenciando as propriedades físicas e mecânicas do LDPE.

- c. Encurtamento das cadeias poliméricas. Com o processo de degradação, a cadeia polimérica torna-se mais curta resultando numa diminuição de massa molecular. Esta redução pode afetar as propriedades mecânicas do LDPE.
3. Terminação (E). A terminação ocorre quando a etapa de propagação finaliza. Esta finalização pode ser devida a diferentes processos.
- Reação de combinação. Dois radicais livres podem reagir entre si, resultando na neutralização da reatividade de ambos.
 - Reação com impurezas. Impurezas ou substâncias reativas presentes no polímero podem reagir com os radicais livres, eliminando-os do sistema e terminando o processo de degradação.

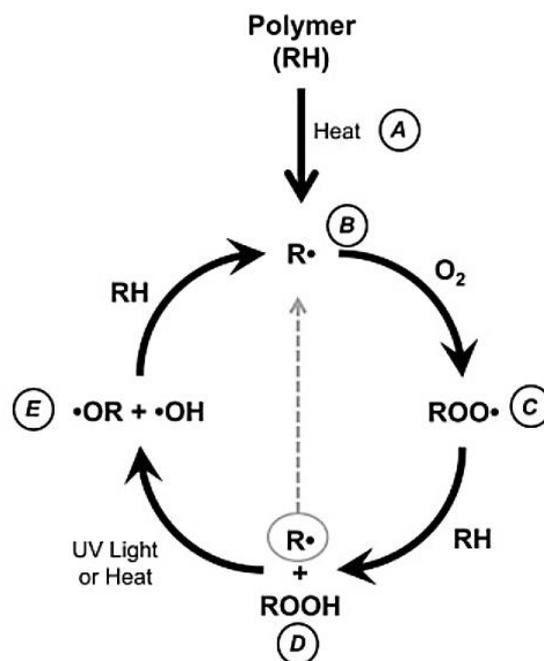


Figura 7: Esquema de degradação oxidativa nos polímeros. Obtido de [16].

O LDPE e o LLDPE poderão apresentar comportamentos ligeiramente diferentes aquando o processo de extrusão dado ao facto de apresentarem estruturas moleculares distintas. O LDPE possui mais ramificações na sua cadeia molecular principal, enquanto que o LLDPE apresenta uma estrutura mais linear e ramificações mais curtas. Assim, a presença de uma maior quantidade de ramificações no LDPE permite mais localizações para a iniciação do processo de degradação térmica; o LDPE possui um ponto de fusão mais baixo do que o LLDPE. Logo, a exposição a uma temperatura mais elevada por parte

do LDPE aquando do processo de extrusão é um fator que potencia a degradação térmica; tanto o LDPE como o LLDPE podem sofrer cisão das cadeias moleculares, no entanto, as diferenças na estrutura da própria cadeia polimérica resultam numa maior suscetibilidade por parte do LDPE; as ramificações mais curtas do LLDPE tornam-no menos propenso a estabelecer ligações entre as mesmas [16].

2.2.3. Misturas de LDPE/LLDPE na produção de filmes

O desempenho insatisfatório do LLDPE em processos onde a deformação extensional predomina sobre a deformação de corte é atribuída, em grande parte, à baixa viscosidade extensional do LLDPE, principalmente devida à sua estrutura linear. Por outro lado, o LDPE apresenta um bom desempenho nesses processos devido à sua elevada viscosidade extensional, que está relacionada com a presença de uma estrutura molecular mais ramificada. Durante o processo de extrusão de filme tubular verificam-se elevadas taxas de alongação, o que significa que se torna mais difícil o controlo da estabilização do balão para o caso do LLDPE [17].

P. Micic et al. Investigaram o efeito da temperatura na viscosidade extensional de misturas de LLDPE/LDPE e a sua relevância para a estabilidade do balão no processo de extrusão de filme tubular. Para o efeito, utilizaram um reómetro extensional para medir a viscosidade extensional dos polímeros a diferentes temperaturas [17].

Os gráficos obtidos através da reometria extensional, representados nas figuras 8 e 9, sugerem que aumentar a temperatura diminui consideravelmente a viscosidade extensional em toda a faixa de taxas de deformação. Observou-se que o LLDPE e as misturas ricas em LLDPE exibem um aumento mais rápido na viscosidade extensional na região de endurecimento sob deformação em temperaturas mais elevadas. Pode-se concluir que a viscosidade extensional varia com a temperatura, com um aumento mais acentuado na região de endurecimento sob deformação para temperaturas mais elevadas [17].

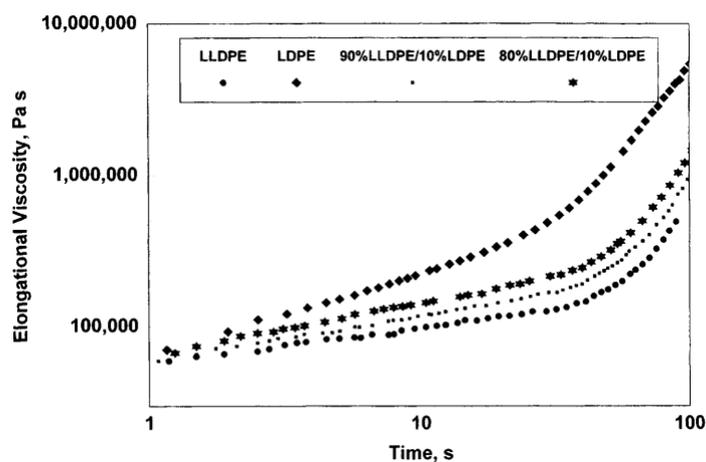


Figura 8: Viscosidade extensional para polietilenos puros e suas misturas, a 140°C e uma taxa de deformação de $0,05 \text{ s}^{-1}$. Obtido de [17].

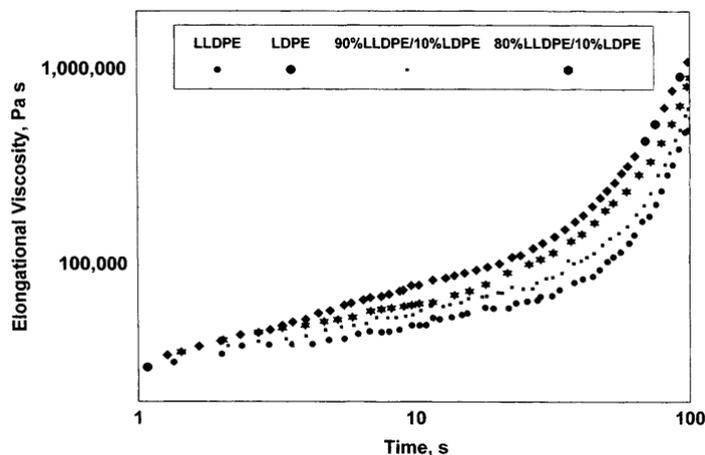


Figura 9: Viscosidade extensional para polietilenos puros e suas misturas, a 180°C e uma taxa de deformação de $0,05 \text{ s}^{-1}$. Obtido de [17].

Para melhor aferir os efeitos da temperatura na estabilidade do balão, os materiais puros e as suas misturas foram processados numa linha de extrusão de filme tubular a duas temperaturas e a janela de operação para a estabilização do balão para todos os materiais foi determinada, cujos valores se encontram na Tabela 1.

Tabela 1: Tamanho da Janela de Operação (SOW) para produção de balão estável no processo de extrusão de filme tubular investigados a duas temperaturas. Obtido de [17].

Polymer Grade	Size of Operating Window (SOW)	
	SOW at 180°C (%)	SOW at 220°C (%)
LLDPE	49	not measurable
LDPE	100	99
90% LLDPE/10% LDPE	66	69
80% LLDPE/20% LDPE	85	88

De acordo com os gráficos representados na tabela 2, as principais conclusões do estudo são as seguintes [18]:

- A adição de LDPE ao LLDPE melhora o comportamento de endurecimento por deformação do LLDPE. Mesmo uma quantidade reduzida de LDPE de 10%, melhora significativamente o endurecimento por deformação do LLDPE.
- A adição de LDPE em concentrações de 10-30% não apresenta diferenças significativas no endurecimento por deformação das misturas. Portanto, de uma perspectiva reológica, uma concentração de 10-20% de LDPE é suficiente para obter o melhor comportamento de endurecimento por deformação das misturas.

Para além disto, também se realizaram ensaios de DSC por forma a analisar as variações nas temperaturas de fusão e de cristalização das misturas. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da análise térmica de LLDPE, LDPE e respetivas misturas. Obtido de [18]

Sample	Tm (Peak) melting-heating mode (°C)	Heat of fusion (J/g)	% Crystallinity heating mode (%)	Tc (Peak) crystallinity cooling mode (°C)	Heat of crystallinity cooling mode (%)	Crystallinity cooling mode (%)
LL-1	123.3	135.1	48.3	106.4	136.9	48.9
LL-2	126.0	149.3	53.3	111.6	166.6	59.5
LL-3	122.7	120.1	42.9	108.1	146.5	52.3
LD-1	112.6	120.5	43.0	99.1	150.8	53.9
LD-2	114.5	134.1	47.9	98.8	163.1	58.3
LD-3	114.5	126.3	45.1	98.2	157.5	56.3
LL-1-/LD-1 90/10	122.9	112.9	40.3	108.4	162.3	58.0
LL-1/LD-1 80/20	122.8	122.1	43.6	108.6	149.1	53.3
LL-1/LD-1 70/30	114.6	117.1	41.8	108.3	138.2	49.4
LL-1/LD-1 30/70	112.5	124.2	44.4	98.6	135.9	48.5
LL-1/LD-3 90/10	122.7	119.2	42.6	106.4	143.5	51.3
LL-1/LD-3 80/20	121.7	124.4	44.4	105.8	149.4	53.4
LL-1/LD-3 70/30	116.8	125.5	44.8	105.3	141.7	50.6
LL-1/LD-3 30/70	114.8	121.3	43.3	101.1	145.0	51.8

Conclui-se que [18]:

- A temperatura de fusão das misturas de LDPE/LLDPE é semelhante à do LLDPE puro para concentrações de LDPE de 10% e 20%.
- A temperatura de fusão não é significativamente afetada pela adição de LDPE em concentrações abaixo de 20% em peso.

- A temperatura de cristalização das misturas de LDPE/LLDPE é quase a mesma que a do LLDPE puro para concentrações de LDPE de 10%, 20% e 30%.
- A adição de LDPE em concentrações abaixo de 20% não afeta significativamente as temperaturas de fusão e cristalização das misturas.

2.3. Processabilidade de filamentos

A processabilidade de poliolefinas e suas misturas na produção de filmes plásticos está relacionada com a sua capacidade de estiramento às condições de processamento definidas. Isto deve-se à necessidade da promoção do estiramento do material à saída da fiação. Por este motivo são utilizados graus específicos de poliolefinas que possuem propriedades ideais de estiramento nas condições de processamento referidas, especificamente na temperatura do material à saída da fiação. É importante notar-se que, uma vez que o estiramento é elevado na produção de filmes, o filme fica muito fino e arrefece rapidamente. Assim, é difícil controlar essa temperatura.

Simultaneamente, nas empresas, torna-se difícil determinar se as misturas de polímeros virgens com material reciclado mantêm as suas propriedades. Por esta razão, pretende-se desenvolver um método expedito para a realização desses estudos, tendo sido necessário o uso dos equipamentos existentes para esse efeito.

A simulação do estiramento será realizada usando a linha de extrusão de monofilamentos referida, de modo a simular as condições de processamento de filme e, simultaneamente, poder controlar diferentes razões de estiramento aplicadas ao material como se descreve neste trabalho.

3. ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1. Matérias-Primas

Foram utilizadas duas matérias-primas para este projeto, nomeadamente, um polietileno de baixa densidade e um polietileno linear de baixa densidade, cujas fichas técnicas se encontram no Anexo I.

O primeiro material é um polietileno de baixa densidade, designado por ExxonMobil™ LDPE LD 100 Series Blown Low Density Polyethylene Resin. É uma série que oferece um bom equilíbrio de propriedades óticas e mecânicas. Existem vários pacotes de aditivos disponíveis de acordo com as propriedades de superfície necessárias, no entanto, para este projeto, será utilizado o LD 100AC, que detém aditivos de antibloqueio, deslizamento e estabilizadores térmicos. Tem uma densidade de 0,923 (ASTM D1505), c (“ExxonMobil Method”) e índice de fluidez de 2,0 g/10 min a 190°C com um peso de 2,16 kg (ASTM D1238). É utilizado em várias aplicações como material de mistura, embalagens alimentares, revestimentos e filmes.

O segundo material utilizado é um polietileno linear de baixa densidade, designado por DOWLEX™ 2045.01 G Linear Low Density Polyethylene Resin. Tem aditivos de antibloqueio e deslizamento. Apresenta uma densidade de 0,922 (ASTM D792), índice de fluidez de 1,0 g/10 min (ASTM D1238) e uma faixa de temperatura de extrusão recomendada entre 190 e 240°C. É desenvolvido para a produção de uma ampla variedade de filmes industriais e de consumo. Os filmes feitos a partir desta resina apresentam uma combinação de excelente resistência à fratura e ao rasgo. Oferece uma boa processabilidade, embora não contenha aditivos adicionais para o efeito. Esta resina está em conformidade com as regulamentações da União Europeia (EU, No 10/2011) e da Administração de Alimentos e Medicamentos dos Estados Unidos (U.S. FDA 21 CFR 177.1520(c)3.2(a).

Assim as propriedades consideradas mais importantes para a realização deste trabalho, presentes nas fichas técnicas de ambos materiais, encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades dos dois materiais utilizados.

	ExxonMobil™ LDPE LD 100 Series Blown Low Density Polyethylene Resin	DOWLEX™ 2045.01 G Linear Low Density Polyethylene Resin
Densidade g/cm ³	0,923	0,922
$T_{fusão}$ °C	110	122
MFI g/10 min	2,0 g/10 m	1,0 g/10 min
$T_{processamento}$ <i>recomendada</i>	171 – 192°C	190 – 240°C

3.2. Mistura das Matérias-Primas

A mistura das matérias-primas foi realizada com grânulos a seco e à temperatura ambiente. Os materiais foram colocados num misturador de tambor, numa proporção de 80% LDPE e 20% LLDPE, sujeitos a uma mistura mecânica durante dois minutos, totalizando 7 kg de material.

3.3. Ciclos de processamento

O processo utilizado para a produção do material será a extrusão monofuso de monofilamentos, dado que os materiais a processar são compatíveis permitindo a mistura necessária entre os mesmos.

A miscibilidade de polímeros refere-se à capacidade de dois ou mais polímeros de misturarem de uma forma homogênea, formando uma única fase quando combinados numa mistura, resultando em propriedades físicas e mecânicas mais desejáveis. A importância da miscibilidade de polímeros no processo de extrusão, utilizando uma extrusora monofuso está relacionada com a capacidade de mistura de forma eficaz para a obtenção de produtos com propriedades desejáveis. Alguns pontos chave são:

- Qualidade do produto: a miscibilidade entre polímeros é crucial para a obtenção de uma mistura homogênea e uniforme aquando a extrusão. É especialmente importante quando se produzem produtos como filmes, tubos, perfis e revestimentos, nos quais a uniformidade do material é essencial para a estabilidade e qualidade do produto final;
- Desempenho mecânico: os polímeros miscíveis proporcionam, geralmente, produtos com melhores propriedades de resistência, alongamento e durabilidade;

- Processabilidade: a mistura de polímeros miscíveis é mais fácil de processar, pois os materiais comportam-se como um único durante a extrusão, o que aumenta a eficiência do processo, reduz o tempo de ciclo e o consumo de energia;
- Reciclagem: a miscibilidade é um fator importante na reciclagem de plásticos. Materiais miscíveis podem ser mais facilmente reciclados e reutilizados em novos produtos, contribuindo para a sustentabilidade e a redução do desperdício.

Portanto, a miscibilidade entre polímeros é considerada um fator crítico a ser considerado na seleção de materiais e no controle de processos durante a extrusão, neste caso, monofuso, uma vez que influencia significativamente a qualidade, desempenho e a eficiência do processo de fabricação.

A extrusão monofuso de monofilamentos é um processo de fabrico contínuo que envolve o uso de uma linha de extrusão composta por diferentes componentes que podem ter uma grande influência na fabricação do produto final, uma vez que permitem controlar diversos parâmetros do processo, tais como a temperatura, a velocidade de rotação e as razões de estiramento, assim como a geometria do equipamento. Estes parâmetros têm uma grande influência nas propriedades dos produtos extrudidos [19, 20].

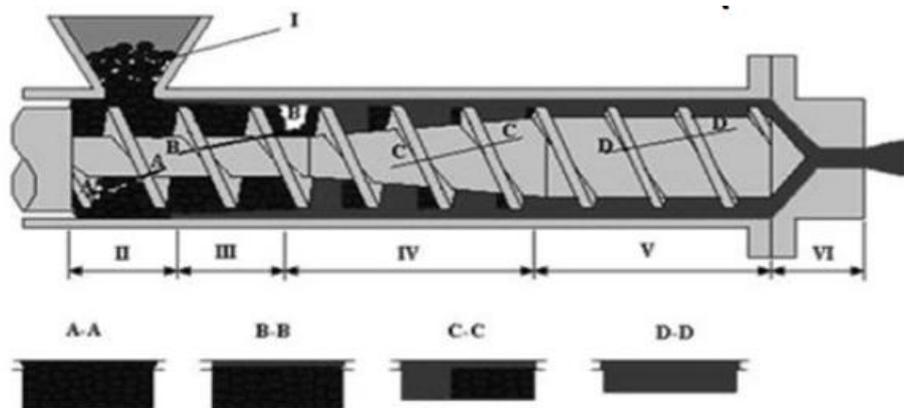


Figura 10: Desenho esquemático do processo de extrusão monofuso. Obtido de [20].

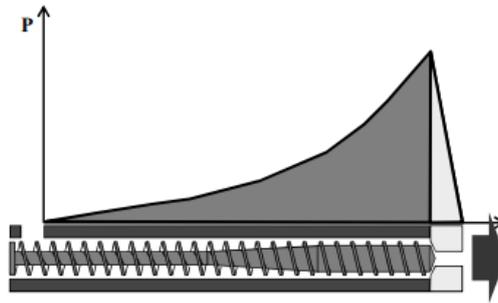


Figura 11: Gráfico representativo da variação da pressão no interior da extrusora monofuso. Obtido de [20].

As funções básicas de uma extrusora, representadas na figura 10, passam por:

Alimentação e aquecimento do material (I e II) – o processo começa com a alimentação do material na tremonha da extrusora por ação da gravidade. O material pode ser na forma de grânulos, pellets ou pó. O material é então transportado para a secção de alimentação, onde é gradualmente aquecido por meio de resistências.

Transporte e compactação (III) – no interior da extrusora, o parafuso com a forma helicoidal gira e o material é empurrado gradualmente ao longo da extrusora enquanto que sofre aquecimento e compactação.

Mistura e homogeneização (IV) – a combinação do atrito, gerado pelo movimento do parafuso, e do calor das resistências, promove a fusão e conseqüente mistura e homogeneização do material. É especialmente importante quando são utilizados diferentes polímeros ou aditivos, pois o objetivo da plasticização é a obtenção de uma mistura uniforme.

Pressurização (V) – o material fundido é pressurizado à medida que é empurrado através de uma área de compressão da extrusora. Esta pressão proporciona a saída do material na feira. Esta variação de pressão está representada na figura 11, que mostra um aumento significativo na zona contígua à feira.

Extrusão (VI) – o material fundido passa pela feira, a uma taxa constante, formando um extrudido contínuo, de secção transversal constante.

Assim, são identificadas três zonas funcionais distintas, que correspondem à presença de sólidos – zona de sólidos (A-A) , fundido (D-D) e à coexistência de ambos (B-B e C-C). [20]

Como, neste trabalho, se pretende estudar apenas a processabilidade por extrusão das misturas referidas anteriormente, não serão produzidos filmes. Assim que o material extrudido sair da feira da

extrusora, este será estirado numa linha de extrusão de monofilamentos, semelhante à representada na figura 12, que são constituídas por uma extrusora, uma zona de puxo, de arrefecimento, de estiramento (primário, secundário, etc) recozimento e enrolamento. Os equipamentos que constituem esta linha de extrusão podem variar consoante as necessidades dos produtos que se pretendem obter [20].

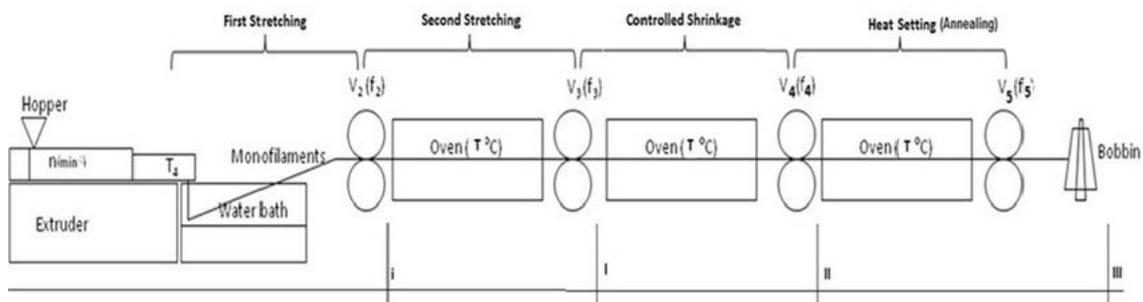


Figura 12: Exemplo esquemático de linha de extrusão de monofilamentos. Obtido de [21].

Assim, numa fase inicial do projeto, os 7 kg de matéria-prima foram utilizados em seis ciclos de processamento, conforme representado na figura 13, onde QI representa a quantidade inicial de material no ciclo e QR a quantidade de material reservada após o respetivo ciclo de processamento.

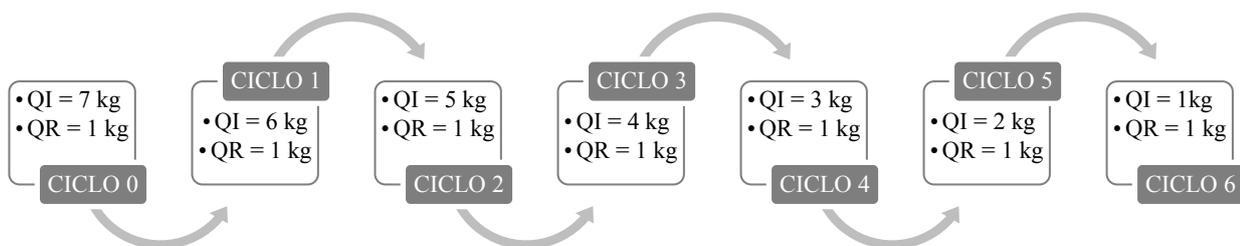


Figura 13: Esquema dos ciclos de processamento do material.

Portanto, assim como está exposto na tabela 5, o 1 kg de material reservado no ciclo zero corresponde a material virgem. Já essa quantidade no primeiro ciclo corresponde a material que passou pela extrusora uma vez, significando que sofreu um ciclo de processamento, assim sucessivamente até ao sexto ciclo.

Tabela 5: Quantidades necessárias e retidas de material para cada ciclo.

Ciclos	Quantidade Inicial	Necessário	Retido	Ciclo seguinte
0	7	1	1	6
1	6	1	1	5
2	5	1	1	4
3	4	1	1	3
4	3	1	1	2
5	2	1	1	1
6	1	1	1	0

Para a produção de filamento, a extrusora foi programada com um perfil de temperaturas de 170°C (zona 1), 200°C (zona 2) e 220°C (zonas 3 e 4), como representado pela figura 14.

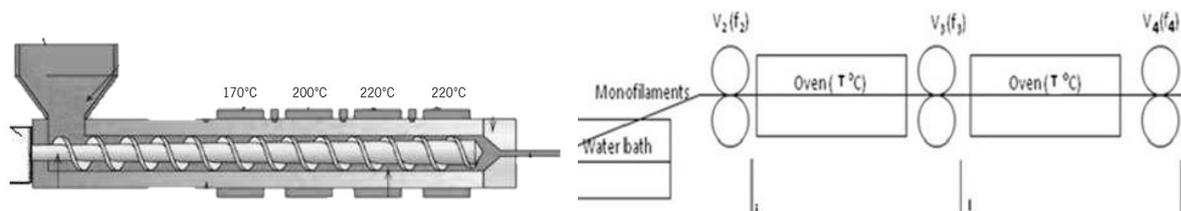


Figura 14: Representação esquemática da linha de extrusão de monofilamentos. Adaptado de [21, 22].

A velocidade de rotação do parafuso foi de 17,2 rpm e as velocidades de estiramento nos rolos foram definidas com valores iguais na máquina de 3,2 metros/minuto pois o principal objetivo desta etapa seria apenas a produção de material para ser utilizado na fase de estiramento. Por conseguinte, os fornos mantiveram-se desligados. No final de cada ciclo, o filamento produzido foi triturado de modo a ser usado no ciclo seguinte, recorrendo à utilização de um granulador.

3.4. Técnicas de caracterização

3.4.1. Caracterização Reológica - Reometria Capilar

A reometria é o ramo da reologia que trata da medição experimental das características reológicas dos materiais. Os ensaios reológicos possibilitam aferir a variação no tempo da tensão e da deformação de um material. A reometria capilar permite medir as propriedades reológicas do material, tornando possível evitar ou minimizar a ocorrência de anomalias durante o processamento do polímero [23].

Na reometria capilar, uma amostra é forçada a fluir dentro do capilar de secção transversal simples, geralmente circular, anelar ou retangular, sofrendo variação da velocidade no sentido axial, como demonstrado pela figura 15. O perfil de velocidades gerado tem velocidade máxima no centro, pelo que quer a deformação, quer a taxa de deformação são máximas junto à parede e nulas no centro, tratando-se de um fluxo não homogêneo. Os reómetros capilares são constituídos por um reservatório, um capilar e um pistão acionado a gás ou um sistema mecânico capaz de manter a pressão ou velocidade de deslocamento constantes [23].

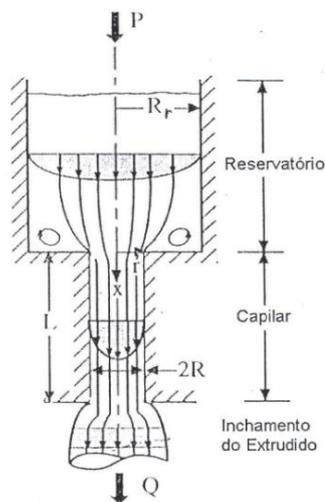


Figura 15: Esquema de um reómetro capilar. Obtido de [23].

Aumentando o débito, a velocidade axial também aumenta e, como resultado, o polímero fundido vai exibindo defeitos havendo a possibilidade de rotura. Enquanto as propriedades reológicas de um fluido newtoniano são completamente caracterizadas através de uma só medição (permitindo definir a viscosidade), no estudo de fluidos não newtonianos é preciso identificar a dependência entre a tensão e a taxa de deformação. O material exibe um comportamento não-newtoniano pelo facto de a viscosidade

variar com a taxa de deformação, o modelo que descreve este comportamento é a lei da potência [22].

$$\sigma = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Sendo:

σ – Tensão

k – Coeficiente de consistência

$\dot{\gamma}$ – Taxa de corte

n – Índice de escoamento ($n = 1$ para newtonianos, $0 < n < 1$ para pseudoplásticos, $n > 1$ para dilatantes)

Começou-se por programar o reómetro para a temperatura de 220°C, temperatura a que o material fora extrudido anteriormente nos diversos ciclos de processamento. Colocou-se, primeiramente, a fieira curta e o pistão no reómetro. Introduziu-se os grânulos da mistura no reservatório, comprimindo-o até se observar uma subida repentina na pressão, significando que fora introduzida a quantidade máxima possível de material. Após aguardar cerca de dez minutos para que ocorra a fusão do material, iniciou-se o processo em modo slow e registaram-se os valores de pressão para os valores de velocidade que se considerou. Finalmente, com o mesmo material ainda no reservatório, repetiu-se o processo em modo fast.

No ensaio de reometria capilar há a necessidade de efetuar duas correções importantes, nomeadamente [23]:

- Correção de Bagley – correção do valor de pressão lido.
- Correção de Rabinowitsch – correção da taxa de corte aparente.

Devido ao sensor de pressão não se encontrar exatamente na entrada da fieira, não é possível a medição exata da pressão no mesmo. Por este motivo, efetua-se a correção de Bagley, que consiste na utilização das duas fieiras de diferentes razões L/r e raio r , constante. Obtém-se um gráfico, representado na figura 16 [24].

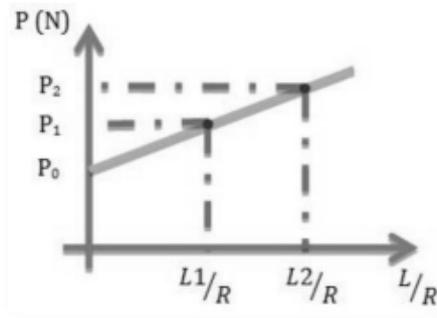


Figura 16: Gráfico efetuado para calcular a queda de pressão real na feira, correção de Bagley. Obtido de [24].

P_0 representa o valor de pressão lido numa feira de comprimento L nulo, que deve ser subtraído aos valores de pressão obtidos com a feira longa.

Assim, a pressão medida no sensor deverá ser considerada como o somatório entre a pressão medida no capilar e a pressão de entrada que é denominada por $\Delta P_{entrada}$, tendo-se:

$$\Delta P_{sensor} = \Delta P_{capilar} + \Delta P_{entrada} \quad (2)$$

Desta forma, é possível calcular a tensão de corte:

$$\tau = \frac{P_c \cdot r}{2L} \quad (3)$$

Onde P_c é a pressão do capilar, r o raio da feira e L o comprimento da mesma.

Através das diferentes velocidades de pistão, conseguiu-se calcular o caudal e, posteriormente, o caudal volúmico:

$$Q = v_{pistão} \cdot \rho_{polímero} \cdot A_{reservatório} \quad (4)$$

$$Q_v = \frac{Q}{\rho_{polímero}} \quad (5)$$

Assim, para um mesmo caudal, quanto maior for a velocidade maior será a taxa de corte aparente $\dot{\gamma}_{ap}$, representada por:

$$\dot{\gamma}_{ap} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot r^3} \quad (6)$$

O polietileno é um polímero que, quando fundido, comporta-se como um fluido não-Newtoniano, logo é possível determinar a taxa de corte real, por cada velocidade do pistão, havendo a necessidade de corrigir a equação 6, da taxa de corte aparente, efetuando a correção de Rabinowitsch [23].

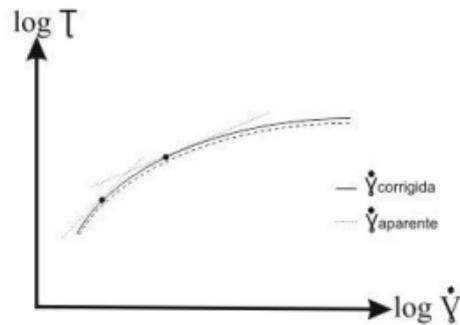


Figura 17: Relação entre taxa de corte aparente e taxa de corte corrigida. Obtido de [24].

Na figura 17 verifica-se que existe uma diferença entre a taxa de corte aparente e a taxa de corte corrigida. Assim, é necessário ajustar a equação para melhor descrever o comportamento do polímero fundido, obtendo-se:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi r^3} \cdot \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \quad (7)$$

Onde n é o declive das retas tangentes traçadas nos dois pontos representados no gráfico da figura 17. Representa a característica reológica do material em que, para fluidos pseudoplásticos, é inferior a 1 pois a taxa de corte corrigida será sempre superior à taxa de corte aparente.

Assim, recorrendo ao gráfico de $\log(\sigma)$ em função de $\log(\dot{\gamma})$ é possível determinar os parâmetros n e k da lei de potência representada na equação 1, obtendo:

$$\log(\sigma) = \log(k) + n \log(\dot{\gamma}) \quad (8)$$

Por fim, determinou-se a viscosidade do polímero através da equação:

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (9)$$

Este processo realizou-se para as amostras dos ciclos 0, 1, 3, 5 e 6. O reómetro utilizado foi o reómetro capilar Daventest, do Departamento de Engenharia de Polímeros. As feiras utilizadas têm diâmetro de 2mm e comprimentos de 10mm (feira curta) e 20mm (feira longa)

3.4.2. Caracterização Mecânica - Ensaio de tração

O ensaio de tração é um procedimento fundamental na caracterização mecânica de polímeros, projetado para avaliar as propriedades de resistência e deformação de um material quando submetido a forças de tração uniaxiais. Envolve os seguintes passos [25]:

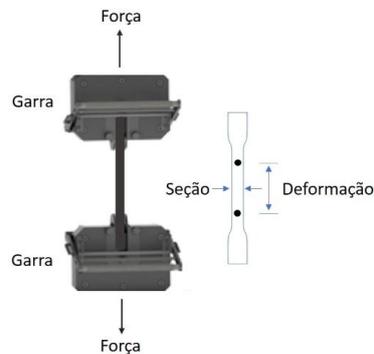


Figura 18: Representação de um ensaio de tração. Obtido de [25].

1. Preparação das amostras: as amostras são moldadas na forma de provetes, com uma determinada largura, comprimento e espessura.
2. Fixação das amostras: as amostras são fixadas nas amarras da máquina de tração, que modo a que o comprimento original da amostra seja conhecido.
3. Início do ensaio: a amostra é então submetida a uma força uniaxial de tração ao longo do seu eixo, começando com uma carga inicial nula que aumenta gradualmente de forma contínua a uma taxa de deformação constante.
4. Registo de dados: durante o ensaio, os instrumentos de medição registam a carga aplicada (força) e a deformação (deslocamento) da amostra. Esses dados são utilizados para traçar a curva de tensão-deformação, que fornece informações importantes sobre o comportamento do material durante o ensaio.
5. Determinação de propriedades: a partir dos dados do ensaio de tração, várias propriedades mecânicas dos polímeros podem ser determinadas. As principais propriedades incluem:
 - Tensão de rutura, que representa a tensão máxima suportada pela amostra antes da rutura.

- Deformação na rutura, que corresponde ao deslocamento máximo da amostra aquando a rutura.
- Módulo de Elasticidade, ou Módulo de Young, que é uma medida de rigidez do material na região elástica do gráfico de tensão-deformação.
- Tensão de cedência, valor de tensão no qual a amostra começa a apresentar deformação permanente.
- Alongamento na rutura, que corresponde ao aumento percentual no comprimento da amostra no momento da rutura.

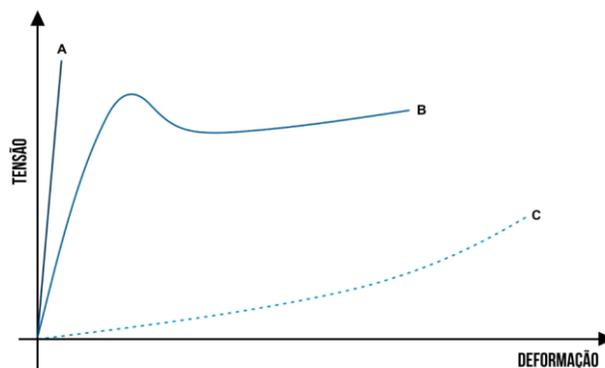


Figura 19: Gráfico típico de tensão-deformação para polímeros (a) frágeis, (b) plásticos, (c) elastómeros. Obtido de [25].

O ensaio de tração é essencial na caracterização de polímeros, uma vez que fornece dados quantitativos sobre as propriedades mecânicas do material, que são cruciais na seleção de materiais para aplicações específicas. Além disso, estes ensaios permitem avaliar a qualidade e o desempenho de materiais poliméricos, auxiliando no desenvolvimento e controlo de processos de produção [25].

Neste projeto foram injetados 10 provetes para cada ciclo, utilizando os grânulos das amostras dos seis ciclos, recorrendo à máquina de moldação por Injeção BOY 22A, ilustrada na figura 20.



Figura 20: Máquina de moldação por Injeção BOY 22A.

O perfil de temperaturas no parafuso foi definido como 184°C na zona 1, 203°C na zona 2, 210°C na zona 3, 215°C na zona 4 e 220°C na zona 5.

Os provetes injetados possuíam uma secção transversal retangular, como ilustrado na figura 21, de comprimento inicial (L_0) de 20,00 mm, largura (b) de 3,89 mm e espessura (a) de 1,85 mm.

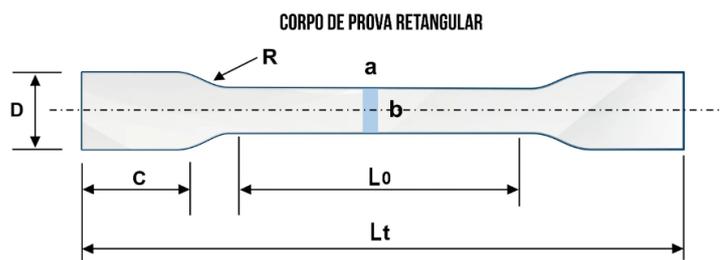


Figura 21: Corpo de prova, de secção transversal retangular, para ensaio de tração. Obtido de [24].

Todos os ensaios decorreram a uma velocidade de 50 mm/min. A distância entre as amarras foi de 20,00 mm.

A tensão e deformação de cedência, a tensão e deformação de rotura e o Módulo de Young foram obtidos através das curvas de tensão-deformação obtidas em cada ensaio.

É de notar que o facto de o material ter sido injetado implica ter sofrido mais um ciclo de processamento, neste caso, por injeção.

3.4.3. Estiramento

Por forma a determinar o comportamento das misturas quando lhes é exercida várias razões de estiramento aquando o processamento, utilizou-se a máquina de extrusão de monofilamento. O perfil de temperaturas utilizado no parafuso foi de 170°C na zona 1, 200°C na zona 2 e 220°C nas zonas 3 e 4. Definiu-se uma velocidade de parafuso de 6,5 rpm. Seguidamente, as velocidades nos rolos foram aumentadas gradualmente, sendo que a velocidade do parafuso se manteve constante.

Pretendendo-se que o estiramento ocorra entre a fieira e o primeiro conjunto de rolos, a velocidade inicial do primeiro conjunto de rolos começou em 3,2 metros/minuto, valor que também fora definido nos restantes conjuntos de rolos. Posteriormente, este valor foi aumentado para 4,1 metros/minuto, 5,0 metros/minuto, 5,8 metros/minuto, 6,7 metros/minuto, 7,6 metros/minuto, 8,4 metros/minuto e, finalmente, 9,3 metros/minuto, que corresponde à velocidade máxima atingida pela máquina. Para cada valor de velocidade foi retirada uma amostra de filamento durante 2 minutos de modo a analisar as variações de peso e de espessura ao longo do comprimento do filamento. Este procedimento repetiu-se para cada amostra de cada ciclo.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Reometria Capilar

Os ensaios de reometria capilar servem para estudar o comportamento do fluxo dos materiais poliméricos no estado fundido, sob condições de elevada temperatura e taxa de corte. Permitem caracterizar as propriedades reológicas como a viscosidade, tensão e taxas de corte e a presença de fenômenos como o inchamento do extrudido, fratura, deslizamento nas paredes, entre outros.

Na figura 22 estão representados os gráficos obtidos no ensaio de reometria capilar que relacionam a variação da viscosidade com a taxa de corte, numa escala logarítmica.

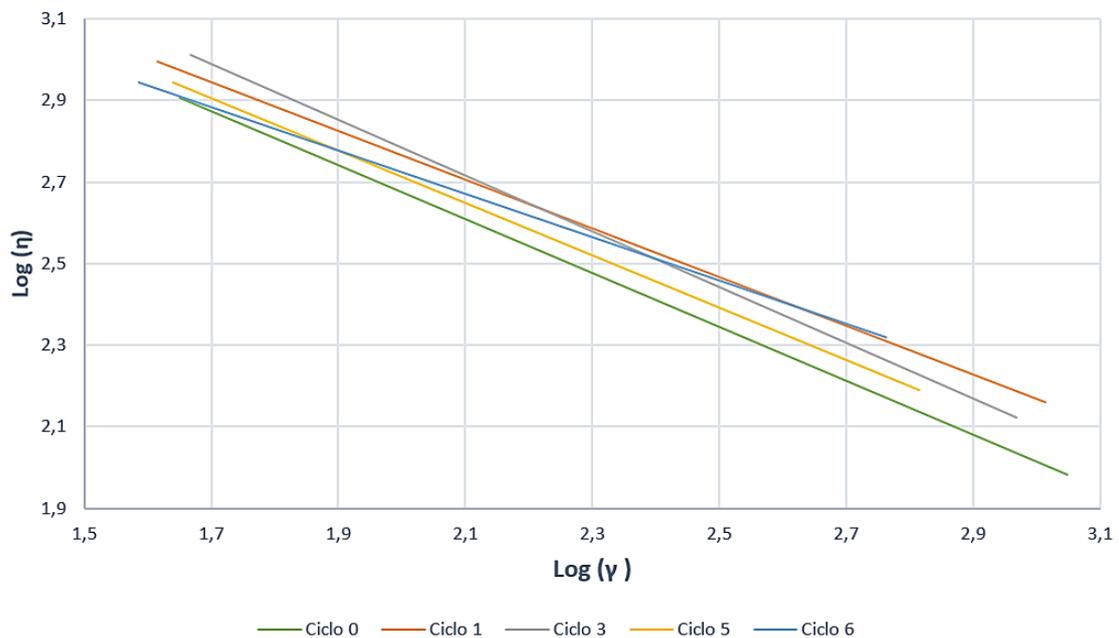


Figura 22: Viscosidade em função da taxa de corte para as misturas dos ciclos 0, 1, 3, 5 e 6.

A partir dos gráficos que relacionam a viscosidade com a taxa de corte é possível obter informações sobre o tipo de comportamento reológico do material, que pode ser newtoniano, pseudoplástico ou dilatante. Os newtonianos são materiais cuja viscosidade não é influenciada pela taxa de corte. Já os

pseudoplásticos apresentam uma redução da viscosidade com o aumento da taxa de corte e os dilatantes exibem um aumento da viscosidade com o aumento da taxa de corte.

Tal como seria esperado, as misturas de LDPE e LLDPE apresentam características de um material pseudoplástico, visto que a viscosidade diminui com o aumento da taxa de corte.

Também se pode constatar que, de um modo geral, a diferença de variação da viscosidade com a taxa de corte não é muito acentuada de ciclo para ciclo, sendo que apresentam valores de viscosidade para valores de taxas de corte semelhantes.

No entanto, é de constatar que, para os ciclos 3, 5 e 6, aquando a realização do ensaio, se observou o fenómeno de fratura de fundido à saída da feira, para valores percentuais de velocidades acima dos 40%, no caso do ciclo 3, e acima dos 30%, no caso dos ciclos 5 e 6. Assim, os valores de taxas de corte superiores a $928,61 \text{ s}^{-1}$ ($\log \dot{\gamma} = 2,97$) para o ciclo 3, superiores a $653,12 \text{ s}^{-1}$ ($\log \dot{\gamma} = 2,81$) para o ciclo 5, e superiores a $578,67 \text{ s}^{-1}$ ($\log \dot{\gamma} = 2,76$) para o ciclo 6 não foram consideradas. Este fenómeno pode estar associado a perdas de propriedades das misturas que, naturalmente, estão relacionadas com o aumento do número de ciclos de processamento. Aquando a extrusão, a mistura de LDPE e de LLDPE é sujeita a degradação mecânica, por ação da rotação do parafuso, e degradação térmica devido às elevadas temperaturas geradas pelo atrito que se verifica durante o arraste do material pelo parafuso e pelo calor gerado pelas resistências.

No caso dos ciclos 0 e 1, não se observaram quaisquer fenómenos macroscópicos, pelo que os ensaios decorreram normalmente até à velocidade percentual de 50%, ou seja, uma velocidade de pistão de $2,08 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ e taxas de corte de $1118,90 \text{ s}^{-1}$ ($\log \dot{\gamma} = 3,05$) no ciclo 0 e de $1031,31 \text{ s}^{-1}$ ($\log \dot{\gamma} = 3,01$) no ciclo 1.

Os valores obtidos relacionados com os cálculos de débitos, pressões, tensões, taxas de corte e viscosidades, assim como os dados relacionados com a máquina constam no Anexo II.

Por conseguinte, pode-se concluir que os valores de viscosidade não apresentam variações significativas com os ciclos de processamento. No entanto, verificam-se alterações da estrutura do extrudido na forma de fratura de fundido a partir do ciclo 3, inclusive.

4.2. Ensaio de Tração

Na figura 23 e tabela 7 expõem-se os gráficos de tensão-deformação obtidos pelos ensaios de tração dos seis ciclos, assim como os resultados dos Módulos de Young, tensões e deformações de rutura e respetivos desvios padrões (DP).

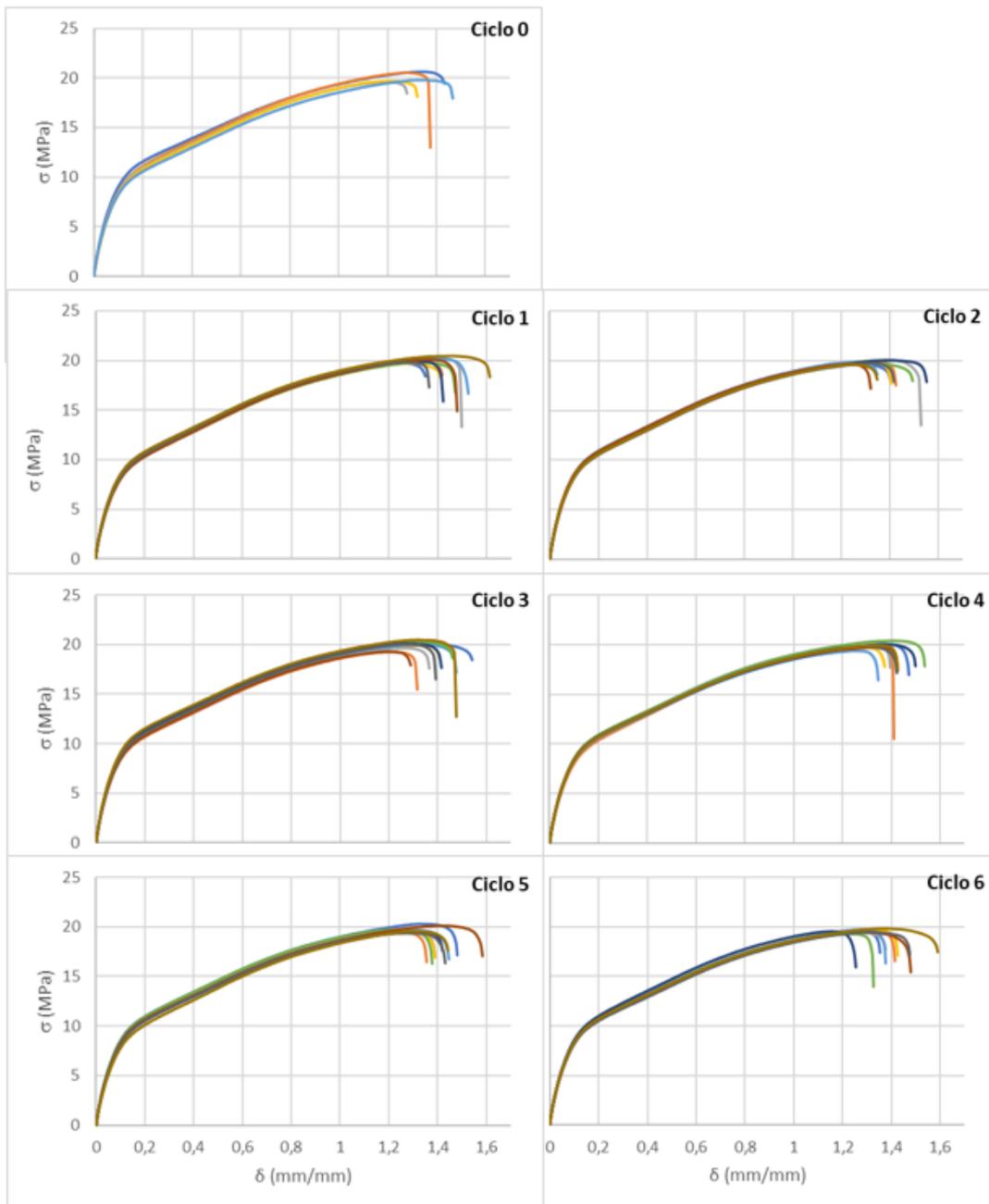


Figura 23: Gráficos tensão-deformação obtidos dos ensaios de tração.

Tabela 6: Valores obtidos relativos ao Módulo de Young, tensões e deformações de rutura.

Ciclos	Módulo Young E (GPa)	DP_E	Tensão Rutura σ_r (MPa)	DP_{σ_r}	Deformação rutura δ_r (mm/mm)	DP_{δ_r}
0	48,04032	2,87158	17,38665	2,536706	1,374998	0,077593
1	43,77223	2,21322	16,84819	1,735848	1,454399	0,078476
2	45,71841	2,08560	17,43952	1,443896	1,423483	0,078693
3	46,94583	2,11943	17,07055	1,832167	1,41479	0,077341
4	44,10678	1,44299	17,3936	0,456185	1,430331	0,05738
5	44,81664	2,09128	16,90664	0,474002	1,432067	0,065845
6	46,00251	2,44203	16,50965	1,152523	1,40763	0,093235

Através da análise dos gráficos da Figura 23 e da Tabela 6, pode-se observar que, de um modo geral, não se verificam alterações significativas nas zonas elástica e plástica da curva tensão-deformação.

A zona elástica representa a parte do gráfico em que o material se deforma elasticamente, ou seja, a deformação é reversível. Isso significa que, quando a tensão é removida, o material tem a capacidade de regressar totalmente à sua forma original sem sofrer deformações permanentes. O declive associado a esta zona elástica corresponde ao Módulo de Young, parâmetro que mede a rigidez do material e, portanto, fornece uma medida de capacidade de o mesmo retornar à sua forma original. Quanto maior for este valor, maior a rigidez do material. Posto isto, observando mais detalhadamente os dados da Tabela 6, o Módulo de Young mantém-se relativamente constante ao longo dos seis ciclos. O ciclo 0 detém o maior valor, mas também apresenta um desvio padrão bastante elevado.

Relativamente às tensões e deformações de rutura, que representam a tensão e deformação máximas que o material suporta por unidade de área antes que ocorra a quebra. Assim, verifica-se que os valores de tensão e deformação de rutura sofrem oscilações muito reduzidas, sendo então consideradas não significativas.

4.3. Estiramento

Com a realização deste processo experimental pretendeu-se averiguar as razões de estiramento máximas que a mistura de material consegue suportar, aquando a extrusão.

Como mencionado no estudo experimental descrito no subcapítulo 3.4.3., foram retiradas 8 amostras de filamento em cada um dos 6 ciclos, correspondentes às 8 crescentes velocidades dos rolos.

Com as amostras dos filamentos mediram-se as espessuras de cada um utilizando um micrómetro em 15 pontos distintos, ao longo do comprimento total de cada filamento.

No anexo III estão discriminados todos os valores das medições de espessura efetuadas, bem como as médias e os desvios padrão. Assim, na tabela 7, evidencia-se os valores médios das espessuras e seus desvios padrão. Como seria de esperar, o aumento de velocidade dos rolos causa uma diminuição acentuada na espessura dos filamentos. No entanto, pretendia-se averiguar se amostras retiradas à mesma velocidade, mas de ciclos diferentes, apresentavam alguma diferença notória de espessura.

Tabela 7: Valores médios de espessura e desvios padrão, em mm, associados às amostras dos seis ciclos e oito velocidades, em m/s.

		Espessuras (mm)						
		Ciclos						
		0	1	2	3	4	5	6
Velocidades (m/s)	v_1	1,70 (0,12)	1,78 (0,07)	1,73 (0,09)	1,71 (0,08)	1,76 (0,07)	1,74 (0,06)	1,69 (0,09)
	v_2	1,49 (0,20)	1,53 (0,18)	1,43 (0,08)	1,48 (0,08)	1,51 (0,10)	1,48 (0,06)	1,18 (0,13)
	v_3	1,37 (0,17)	1,28 (0,04)	1,27 (0,07)	1,42 (0,07)	1,29 (0,08)	1,33 (0,07)	1,19 (0,13)
	v_4	1,31 (0,14)	1,28 (0,06)	1,17 (0,06)	1,23 (0,07)	1,19 (0,05)	1,23 (0,06)	1,20 (0,08)
	v_5	0,98 (0,09)	0,91 (0,14)	1,08 (0,05)	1,15 (0,08)	1,08 (0,06)	1,13 (0,07)	1,08 (0,05)
	v_6	0,87 (0,10)	1,05 (0,07)	0,88 (0,09)	1,08 (0,07)	1,07 (0,04)	1,05 (0,05)	0,97 (0,06)
	v_7	0,82 (0,08)	1,01 (0,06)	0,91 (0,06)	0,92 (0,07)	0,93 (0,06)	0,98 (0,06)	0,89 (0,07)
	v_8	0,78 (0,08)	0,93 (0,08)	0,82 (0,05)	0,66 (0,19)	0,89 (0,06)	0,84 (0,08)	0,72 (0,15)

Para as três primeiras velocidades verificaram-se valores de espessura mais reduzidos para o ciclo 6 enquanto que, a partir de v_4 , inclusive, os valores mais baixos de espessura pertencem aos ciclos 0, 1, 2 e 3. A oscilação destes valores de espessura pode ser devida a erros durante o ensaio, nomeadamente, o escorregamento dos filamentos nos rolos que pode ter resultado em espessuras não uniformes.

Seguidamente, após a obtenção dos valores de espessuras, procedeu-se ao peso das amostras. Para efeitos de obtenção de melhores resultados por parte da balança, as amostras dos filamentos mais finos foram retiradas durante mais tempo do que as amostras mais espessas, tal como está indicado na tabela 8.

Tabela 8: Pesos das 8 amostras dos 6 ciclos.

	PESO (Kg)							
	1 (2min)	2 (2min)	3 (2min)	4 (4min)	5 (4min)	6 (4min)	7 (6min)	8 (6min)
C0	0,020	0,010	0,015	0,030	0,030	0,030	0,040	0,040
C1	0,015	0,020	0,015	0,030	0,020	0,030	0,040	0,040
C2	0,010	0,010	0,010	0,030	0,030	0,020	0,040	0,040
C3	0,010	0,010	0,010	0,030	0,030	0,030	0,040	0,030
C4	0,010	0,010	0,010	0,030	0,030	0,030	0,040	0,040
C5	0,010	0,010	0,010	0,030	0,030	0,030	0,040	0,030
C6	0,010	0,010	0,010	0,030	0,030	0,020	0,035	0,030
Média	0,012	0,011	0,011	0,030	0,029	0,027	0,039	0,036
DP	0,003934	0,00378	0,00244	0	0,00378	0,00488	0,00189	0,005345

Como esperado, o peso também diminui com o aumento da velocidade imposta nos rolos. Como a velocidade dos rolos e da feira foram as mesmas em cada ciclo, os pesos deveriam ser todos iguais, no entanto, apresentam algumas diferenças que podem estar relacionadas ao equipamento da linha de extrusão de monofilamentos, ou seja, pequenas variações na velocidade dos rolos e escorregamento do filamento nos mesmos.

Portanto, para o cálculo das velocidades à saída da feira foi necessário calcular o débito mássico dividindo o peso médio verificado para cada velocidade pelo tempo em que a amostra foi retirada, tendo-se obtido os resultados da Tabela 9.

Tabela 9: Débito mássico das amostras.

DÉBITO MÁSSICO (Kg/h)									
1	2	3	4	5	6	7	8	Média	DP
0,364	0,343	0,343	0,450	0,429	0,407	0,393	0,357	0,386	0,040

Sendo assim, para efeitos de cálculo da razão de estiramento, é necessário saber as velocidades exatas nos rolos e na feira da extrusora.

Para o cálculo das velocidades à saída da feira foi necessário calcular o débito mássico dividindo o peso médio verificado para cada velocidade pelo tempo em que a amostra foi retirada.

Uma vez obtido o débito mássico, calculou-se o débito volúmico, através da expressão:

$$Q_v = \frac{Q}{\rho \cdot 3600} \quad (10)$$

Sendo

Q – Débito mássico

ρ – Densidade da mistura

Assim, foi possível determinar a velocidade na feira, v_f , aplicado a expressão:

$$v_f = \frac{Q_v}{\pi \cdot r_f^2} \quad (11)$$

Sendo

Q_v – Débito volúmico

r_f – Raio da feira (secção transversal circular)

Portanto, a velocidade na feira foi de, aproximadamente, $1,643 \times 10^{-2}$ m/s.

Para o cálculo da velocidade nos rolos foi necessária a medição do comprimento de cada amostra de filamento, cujos valores se encontram na Tabela 10. Sendo que os comprimentos de ciclo para ciclo são iguais, apresenta-se os retirados do ciclo 6.

Tabela 10: Comprimento dos filamentos do ciclo 6.

COMPRIMENTO (m)								
	1 (2min)	2 (2min)	3 (2min)	4 (4min)	5 (4min)	6 (4min)	7 (6min)	8 (6min)
C6	6,587	8,663	10,544	24,091	28,346	31,177	52,457	57,215

Sabidos os comprimentos, foi possível determinar as velocidades do extrudido nos rolos através da expressão:

$$v_r = \frac{l}{t} \quad (12)$$

Tendo-se obtido as seguintes velocidades reais nos rolos, representadas na Tabela 10, mencionadas anteriormente, na Tabela 11.

Tabela 11: Valores das oito velocidades reais nos rolos.

Velocidades (m/s)							
v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
0,055	0,072	0,088	0,100	0,118	0,130	0,146	0,159

Finalmente, conhecidos os valores das velocidades nos rolos e a velocidade à saída da feira, foi possível determinar as razões de estiramento para cada uma das oito velocidades impostas, através da expressão:

$$RE = \frac{v_r}{v_f} \quad (13)$$

Tabela 12: Razões de estiramento para as oito velocidades estabelecidas nos seis ciclos.

CICLOS			
AMOSTRA	VELOCIDADE ROLOS	VELOCIDADE FIEIRA	RE
1	0,055	0,016425676	3,342
2	0,072	0,016425676	4,395
3	0,088	0,016425676	5,349
4	0,100	0,016425676	6,111
5	0,118	0,016425676	7,190
6	0,130	0,016425676	7,908
7	0,146	0,016425676	8,871
8	0,159	0,016425676	9,676

A partir da Tabela 12, verifica-se que a razão de estiramento aumenta com o aumento da velocidade dos rolos, uma vez que a velocidade na fiação se manteve constante.

Pode-se então apurar que misturas constituídas por 80% LDPE e 20% LLDPE são capazes de sustentar razões de estiramento elevadas sem que ocorra a quebra do filamento aquando a extrusão do mesmo, às condições de processamento estipuladas neste projeto. Para além disso, também se verifica que, mesmo após seis ciclos de processamento, não são evidenciadas alterações que põem em causa a viabilidade da extrusão dos filamentos.

5. CONCLUSÃO

Neste projeto, foi produzida e caracterizada uma mistura de LDPE com LLDPE, de composição de 80% e 20%, respectivamente. Esta mistura foi sujeita a um total de sete ciclos de processamento, de modo a aferir a influência que a reciclagem tem nas propriedades: seis por via de uma linha de extrusão de monofilamentos, cujas amostras foram utilizadas para a caracterização reológica e estiramento, e um ciclo adicional, por via da moldação por injeção, no qual foram injetados provetes para a caracterização mecânica através de ensaios de tração.

Relativamente à caracterização reológica, foi possível obter informações sobre o tipo de comportamento reológico do material, das propriedades reológicas como a viscosidade, taxas de corte e a presença de fenómenos macroscópicos de origem reológica. Pode-se concluir que as misturas de LDPE e LLDPE apresentam características de um material pseudoplástico para todos os ciclos, visto que a viscosidade diminui com o aumento da taxa de corte. Os gráficos da variação de viscosidade com a taxa de corte sugerem que, de um modo geral, a diferença de variação da viscosidade com a taxa de corte não é muito acentuada de ciclo para ciclo, sendo que apresentam valores de viscosidade para valores de taxas de corte semelhantes. Quanto aos fenómenos macroscópicos, observou-se fratura de fundido para os ciclos 3, 5 e 6 para valores de taxas de corte superiores a $928,61 \text{ s}^{-1}$, no caso do ciclo 3, acima de $653,12 \text{ s}^{-1}$, no caso do ciclo 5, e acima de $578,67 \text{ s}^{-1}$ para o ciclo 6. Quanto à caracterização mecânica, os ensaios de tração evidenciam que a mistura não sofre alterações consideradas significativas para os valores de Módulo de Young, tensões e deformações de rutura. Os ensaios de estiramento, mostram que a mistura é capaz de suportar elevadas razões de estiramento, e que os valores de espessura variam pouco, podendo estar associados a erros ocorridos aquando a extrusão do monofilamento, como variações mínimas de velocidade nos rolos de puxo ou o escorregamento do filamento aquando o estiramento.

6. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

De modo a complementar todo o trabalho realizado neste projeto, são sugeridas algumas recomendações para trabalhos de investigação futuros.

Durante o processo de estiramento, com a utilização de uma linha de extrusão de monofilamentos, verificou-se que o filamento não quebrou. Assim sendo, recomenda-se que se aumente a razão de estiramento, dado que o equipamento utilizado não tinha capacidade para maiores velocidades de puxo. Para além disto, o estiramento poderá ser realizado utilizando um método de arrefecimento diferente ao utilizado, através de ventilação de ar, por exemplo, para aferir se ocorrem diferenças na estrutura do filamento que o levam até à quebra. Este método de arrefecimento assemelha-se ao utilizado na extrusão de filme tubular.

Tendo em consideração que este projeto visa estudar a viabilidade desta mistura na sua forma reciclada para a produção de filmes, sugere-se também que estas sejam testadas no processo de extrusão de filme tubular, nas mesmas condições aplicáveis impostas neste projeto, utilizando materiais reciclados primários e os resultantes da recolha de resíduos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Plastic Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (PE, PP, PU, PVC, PET, Polystyrene, ABS, PBT, PPO, Epoxy Polymers, LCP, PC, Polyamide), By Application, By End Use, And Segment Forecasts, 2022 – 2030. (31 de janeiro de 2023). Retirado de <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-plastics-market>.
- [2] Plano de Recuperação e Resiliência. (2021, outubro 15). Recuperar Portugal. <https://recuperarportugal.gov.pt/plano-de-recuperacao-e-resiliencia/>.
- [3] O. Delgadillo-Velázquez, S.G. Hatzikiriakos, Polymer Engineering and Science. Processability of LLDPE/LDPE blends: Capillary extrusion studies (2007) 1317-1326, doi: 10.1002/pen.20811.
- [4] Plastics Europe, “Plastics - The Facts 2019,” 2019. (accessed Oct. 29, 2023). <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2019-Plastics-the-facts.pdf>.
- [5] O que é a economia linear? (sem data). Ellenmacarthurfoundation.org. (accessed Oct 29 2023). <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/o-que-e-economia-linear>.
- [6] Basílio, L. (2020, outubro 28). Economia circular: uma alternativa possível para um futuro mais sustentável. A Economia B. <https://www.aeconomiab.com/economia-circular/>.
- [7] K. Syberg et al., “Regulation of plastic from a circular economy perspective,” Curr. Opin. Green Sustain. Chem., vol. 29, p. 100462, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cogsc.2021.100462.
- [8] Economia circular, DGAES. (sem data). (accessed Oct 29 2023). <https://www.dgae.gov.pt/servicos/sustentabilidade-empresarial/economia-circular.aspx>.
- [9] “O plástico é realmente um vilão? Economia circular pode provar que não,” 2020. (accessed Oct 29 2023). <https://gauchazh.clicrbs.com.br/economia/conteudo-publicitario/2020/04/o-plastico-e-realmente-um-vilao-economia-circular-pode-provar-que-nao-ck9n6fnn900bv015nq7dmhmdx.html>.
- [10] Economia circular. (2021). APA. (accessed Oct 29 2023). <https://apambiente.pt/apa/economia-circular>.

- [11] Quevedo, R. T. (2016). *Polímeros*. InfoEscola. (accessed Oct 29 2023) <https://www.infoescola.com/quimica/polimeros/>
- [12] S. C. O. Ugbolue, *Polyolefin fibres: Structure, properties and industrial applications: Second edition*, Second Edi. Elsevier, 2017. ISBN 9780081012512.
- [13] Steven M. Kurtz PhD, *UHMWPE Biomaterials Handbook*, Third Edi, Elsevier, 2016. ISBN 9780323354011.
- [14] C. Vasile and M. Pascu, *Practical Guide to Polyethylene*, First Edit. Rapra Technology Limited, 2005. ISBN 1859574939.
- [15] Mark A. Spalding and Ananda M. Chatterjee, *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology*, First. USA: Wiley, 2018. ISBN 9781119159773.
- [16] ZEUS. (2005). *Thermal Degradation of Plastics*.
- [17] Micic, P., Bhattacharya, S. N., & Field, G. (1998). Transient elongational viscosity of LLDPE/LDPE blends and its relevance to bubble stability in the film blowing process. *Polymer Engineering & Science*, 38(10), 1685–1693. <https://doi.org/10.1002/pen.10339>.
- [18] Aji, A., Sammut, P., & Huneault, M. A. (2003). Elongational rheology of LLDPE / LDPE blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 88(14), 3070–3077. <https://doi.org/10.1002/app.11931>.
- [19] Covas, J. A. (2019). *Processamento de Polímeros I*.
- [20] A. Gaspar-Cunha, *Polymer Processing: Plasticizing in Single Screw Extruders*, Lublin University of Technology Publisher: Lublin, Poland (2021). <http://bc.pollub.pl/dlibra/publication/13932>.
- [21] Kolgjini, Blerina & Schoukens, Gustaaf & Kola, Ilda & Rambour, Stijn & Shehi, Ermira & Kiekens, P. (2014). Influence of Heat Treatment on the Bending Behaviour of LLDPE Monofilaments. *Autex Research Journal*. Volume 14. Pp. 187–199, ISSN 2300-0929, 10.2478/aut-2014-0021.

[22] Martinez, Pedro & Amorim Jr, Wanderley. (2019). DESIGN OF AN LABORATORY Polymer processing EXTRUDER. 10.13140/RG.2.2.27311.48802.

[23] J.A. Covas e J.M. Maia, Reologia e suas Aplicações Industriais (2019) pp. 89-129.

[24] C. Macosko and R. Larson, Rheology: principles, measurements, and applications. 1994, p. 578.

[25] Biopdi, Ensaio de Tração (2023). (accessed Oct 29 2023) <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>.

ANEXOS

Anexo I – Fichas técnicas dos materiais

Technical Information



DOWLEX™ 2045.01 G Linear Low Density Polyethylene Resin

Overview DOWLEX 2045.01G Polyethylene Resin is designed for the production of a wide variety of industrial and consumer films. Films made from this resin exhibit a combination of excellent toughness and tear resistance. The product also delivers very good processability on conventional LLDPE machinery. DOWLEX 2045.01G Polyethylene Resin contains slip and antiblock additives.

Applications:

- Thin gauge industrial & consumer films
- Heavy duty films

Complies with:

- EU, No 10/2011
- U.S. FDA 21 CFR 177.1520(c)3.2a
- Consult the regulations for complete details.

Additive • Antiblock: 2000 ppm • Slip: 800 ppm • Processing Aid: No

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	0.922 g/cm ³	0.922 g/cm ³	ASTM D792
Melt Index (190°C/2.16 kg)	1.0 g/10 min	1.0 g/10 min	ASTM D1238
Films	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Film Thickness - Tested	2 mil	51 µm	
Film Puncture Resistance (2.0 mil (51 µm))	230 ft-lb/in ³	19.0 J/cm ³	Dow Method
Film Toughness			ASTM D882
MD : 2.0 mil (51 µm)	4180 ft-lb/in ³	346 J/cm ³	
TD : 2.0 mil (51 µm)	4240 ft-lb/in ³	351 J/cm ³	
Secant Modulus			ASTM D882
2% Secant, MD : 2.0 mil (51 µm)	28100 psi	194 MPa	
2% Secant, TD : 2.0 mil (51 µm)	33800 psi	233 MPa	
Tensile Strength			ASTM D882
MD : Yield, 2.0 mil (51 µm)	1600 psi	11.0 MPa	
TD : Yield, 2.0 mil (51 µm)	1740 psi	12.0 MPa	
MD : Break, 2.0 mil (51 µm)	7980 psi	55.0 MPa	
TD : Break, 2.0 mil (51 µm)	7250 psi	50.0 MPa	
Tensile Elongation			ASTM D882
MD : Break, 2.0 mil (51 µm)	830 %	830 %	
TD : Break, 2.0 mil (51 µm)	890 %	890 %	
Dart Drop Impact (2.0 mil (51 µm))	290 g	290 g	ASTM D1709A
Elmendorf Tear Strength			ASTM D1922
MD : 2.0 mil (51 µm)	900 g	900 g	
TD : 2.0 mil (51 µm)	1200 g	1200 g	
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Vicat Softening Temperature	226 °F	108 °C	ASTM D1525
Melting Temperature	252 °F	122 °C	DSC
Optical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Gloss (45°, 2.01 mil (51.0 µm))	54	54	ASTM D2457
Haze (2.01 mil (51.0 µm))	13.0 %	13.0 %	ASTM D1003

Additional Information

Film & Optical Properties: Blown film, BUR 2.5.

Extrusion	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)
Melt Temperature	374 to 464 °F	190 to 240 °C

Extrusion Notes

Fabrication Conditions For Tubular Film Extrusion:

- Die Gap: 1.6 to 2.5 mm
- Melt Temperature: 190 to 240°C
- Blow-Up Ratio Range: 1.50 to 3:1.
- Recommended Gauge Range: 10 to 150 µm

Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

Product Stewardship

The Dow Chemical Company and its subsidiaries ("Dow") has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our Product Stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our Product Stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products – from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

Customer Notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

Medical Applications Policy

NOTICE REGARDING MEDICAL APPLICATION RESTRICTIONS: Dow will not knowingly sell or sample any product or service ("Product") into any commercial or developmental application that is intended for:

- long-term or permanent contact with internal bodily fluids or tissues. "Long-term" is contact which exceeds 72 continuous hours;
- use in cardiac prosthetic devices regardless of the length of time involved ("cardiac prosthetic devices" include, but are not limited to, pacemaker leads and devices, artificial hearts, heart valves, intra-aortic balloons and control systems, and ventricular bypass-assisted devices);
- use as a critical component in medical devices that support or sustain human life; or
- use specifically by pregnant women or in applications designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

Dow requests that customers considering use of Dow products in medical applications notify Dow so that appropriate assessments may be conducted. Dow does not endorse or claim suitability of its products for specific medical applications. It is the responsibility of the medical device or pharmaceutical manufacturer to determine that the Dow product is safe, lawful, and technically suitable for the intended use. **DOW MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE SUITABILITY OF ANY DOW PRODUCT FOR USE IN MEDICAL APPLICATIONS.**

Disclaimer

NOTICE: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, the Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for the Customer's use and for ensuring that the Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

NOTICE: If products are described as "experimental" or "developmental": (1) product specifications may not be fully determined; (2) analysis of hazards and caution in handling and use are required; (3) there is greater potential for Dow to change specifications and/or discontinue production; and (4) although Dow may from time to time provide samples of such products, Dow is not obligated to supply or otherwise commercialize such products for any use or application whatsoever.

NOTICE: This data is based on information Dow believes to be reliable, as demonstrated in controlled laboratory testing. They are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and method of use of Dow products are beyond Dow's control. Dow recommends that the prospective user determine the suitability of these materials and suggestions before adopting them on a commercial scale.

To the best of our knowledge, the information contained herein is accurate and reliable as of the date of publication, however we do not assume any liability for the accuracy and completeness of such information.

Additional Information

North America		Europe/Middle East	+800-3694-6367
U.S. & Canada:	1-800-441-4369		+31-11567-2626
	1-989-832-1426	Italy:	+800-783-825
Mexico:	+1-800-441-4369		
Latin America		South Africa	+800-99-5078
Argentina:	+54-11-4319-0100		
Brazil:	+55-11-5188-9000		
Colombia:	+57-1-219-6000	Asia Pacific	+800-7776-7776
Mexico:	+52-55-5201-4700		+603-7965-5392

www.dowplastics.com

This document is intended for use within Asia Pacific, Europe

Published: 2005-05-05

© 2019 The Dow Chemical Company



ExxonMobil™ LDPE LD 100 Series Blown

Low Density Polyethylene Resin

Product Description

LD 100 series are LDPE grades, offering a good balance of optical and mechanical properties. Several additive packages are available according to the required surface properties.

General

Availability ¹	• Africa & Middle East	• Asia Pacific	• Europe
Additive	<ul style="list-style-type: none"> • LD 100AC: Antiblock: 450 ppm; Slip: 500 ppm; Thermal Stabilizer: Yes • LD 100BR: Antiblock: 1000 ppm; Slip: 750 ppm; Thermal Stabilizer: Yes • LD 100BW: Antiblock: No; Slip: No; Thermal Stabilizer: Yes 		
Applications	<ul style="list-style-type: none"> • Blend Partner • Cast Film • Compounding • Foams • Food Packaging 	<ul style="list-style-type: none"> • Form Fill And Seal Packaging • Freezer Film • Lamination Film • Light Duty Shrink Film • Liners 	<ul style="list-style-type: none"> • Mail Bag • Produce Bags • Shoppers • Textile Packaging • Tough Medium Sized Molding
Revision Date	• 03/01/2013		

Resin Properties	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Density	0.923 g/cm ³	0.923 g/cm ³	ASTM D1505
Melt Index (190°C/2.16 kg)	2.0 g/10 min	2.0 g/10 min	ASTM D1238
Peak Melting Temperature	230 °F	110 °C	ExxonMobil Method

Film Properties	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Tensile Strength at Yield MD	1600 psi	11 MPa	ASTM D882
Tensile Strength at Yield TD	1600 psi	11 MPa	ASTM D882
Tensile Strength at Break MD	3600 psi	25 MPa	ASTM D882
Tensile Strength at Break TD	3200 psi	22 MPa	ASTM D882
Elongation at Break MD	330 %	330 %	ASTM D882
Elongation at Break TD	550 %	550 %	ASTM D882
Secant Modulus MD - 1% Secant	30000 psi	210 MPa	ASTM D882
Secant Modulus TD - 1% Secant	33000 psi	230 MPa	ASTM D882
Dart Drop Impact	80 g	80 g	ASTM D1709A
Elmendorf Tear Strength MD	150 g	150 g	ASTM D1922
Elmendorf Tear Strength TD	120 g	120 g	ASTM D1922

Optical Properties	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Gloss (45°)	63	63	ASTM D2457
Haze	6.1 %	6.1 %	ASTM D1003

Legal Statement

This product is not intended for use in medical applications and should not be used in any such applications.

Contact your ExxonMobil Chemical Customer Service Representative for potential food contact application compliance (e.g. FDA, EU, HPFB).

Processing Statement

Film (1.5 mil/38.1 micron) made from LD 100.BW resins on a 2.5 inch (63.5 mm) blown film line with a 2.5:1 blow-up ratio, a melt temperature of 340-360°F (171-182°C), a 30 mil (0.76 mm) die gap at a rate of 8 lbs/hr/in die circumference (1.43 kg/hr/cm).

Notes

Typical properties: these are not to be construed as specifications.

¹ Product may not be available in one or more countries in the identified Availability regions. Please contact your Sales Representative for complete Country Availability.

ExxonMobil™ LDPE LD 100 Series Blown
Low Density Polyethylene Resin

For additional technical, sales and order assistance: www.exxonmobilchemical.com/ContactUs

©2020 ExxonMobil. ExxonMobil, the ExxonMobil logo, the interlocking "X" device and other product or service names used herein are trademarks of ExxonMobil, unless indicated otherwise. This document may not be distributed, displayed, copied or altered without ExxonMobil's prior written authorization. To the extent ExxonMobil authorizes distributing, displaying and/or copying of this document, the user may do so only if the document is unaltered and complete, including all of its headers, footers, disclaimers and other information. You may not copy this document to or reproduce it in whole or in part on a website. ExxonMobil does not guarantee the typical (or other) values. Any data included herein is based upon analysis of representative samples and not the actual product shipped. The information in this document relates only to the named product or materials when not in combination with any other product or materials. We based the information on data believed to be reliable on the date compiled, but we do not represent, warrant, or otherwise guarantee, expressly or impliedly, the merchantability, fitness for a particular purpose, freedom from patent infringement, suitability, accuracy, reliability, or completeness of this information or the products, materials or processes described. The user is solely responsible for all determinations regarding any use of material or product and any process in its territories of interest. We expressly disclaim liability for any loss, damage or injury directly or indirectly suffered or incurred as a result of or related to anyone using or relying on any of the information in this document. This document is not an endorsement of any non-ExxonMobil product or process, and we expressly disclaim any contrary implication. The terms "we," "our," "ExxonMobil Chemical" and "ExxonMobil" are each used for convenience, and may include any one or more of ExxonMobil Chemical Company, Exxon Mobil Corporation, or any affiliate either directly or indirectly stewarded.

exxonmobilchemical.com

Anexo II – Exemplo de cálculos efetuados e valores obtidos na Reometria Capilar - ciclo 0.

Fieira curta - 10 mm			Fieira comprida - 20 mm		
Pcurto(Pa)	V(%)	V(m/s)	Pcomprida(Pa)	V(%)	V(m/s)
Lento (max 2,5cm/min)			Lento (max 2,5cm/min)		
1530000	20	8,33333E-05	2260000	20	8,33333E-05
1800000	30	1,25000E-04	2650000	30	1,25000E-04
2040000	40	1,66667E-04	2940000	40	1,66667E-04
2210000	50	2,08333E-04	3230000	50	2,08333E-04
2370000	60	2,50000E-04	3500000	60	2,50000E-04
2540000	70	2,91667E-04	3750000	70	2,91667E-04
2710000	80	3,33333E-04	3990000	80	3,33333E-04
2820000	90	3,75000E-04	4100000	90	3,75000E-04
2990000	100	4,16667E-04	4300000	100	4,16667E-04
Rápido(max 25cm/min)			Rápido(max 25cm/min)		
4660000	20	8,33333E-04	6730000	20	8,33333E-04
5560000	30	1,25000E-03	7790000	30	1,25000E-03
6400000	40	1,66667E-03	8700000	40	1,66667E-03
6730000	50	2,08333E-03	9200000	50	2,08333E-03
N	60		N	60	

Q(Kg/s)	Qv(m3/s)	P entrada	P capilar	σ (Pa)	$\dot{\gamma}$ aparente	$\log(\dot{\gamma}$ aparente)	$\log(\dot{\sigma})$	$\dot{\gamma}$	η	$\log \dot{\gamma}$	$\log \eta$
2,18034E-05	2,36274E-08	800000	1460000	36500	30,08333333	1,478325956	4,562292864	41,25244367	988,3420455	1,61544968	2,994907271
3,27050E-05	3,54411E-08	950000	1700000	42500	45,125	1,654417215	4,62838893	61,87866551	775,6666779	1,791540939	2,889675135
4,36067E-05	4,72548E-08	1140000	1800000	45000	60,16666667	1,779355952	4,653212514	82,50488734	653,1482173	1,916479676	2,815011746
5,45084E-05	5,90685E-08	1190000	2040000	51000	75,20833333	1,876265965	4,707570176	103,1311092	571,6080312	2,013389689	2,757098322
6,54101E-05	7,08822E-08	1240000	2260000	56500	90,25	1,955447211	4,752048448	123,757331	512,6011893	2,092570935	2,709779609
7,63118E-05	8,26959E-08	1330000	2420000	60500	105,2916667	2,022394	4,781755375	144,3835528	467,4898736	2,159517724	2,669772208
8,72134E-05	9,45096E-08	1430000	2560000	64000	120,3333333	2,080385947	4,806179974	165,0097747	431,63457	2,217509671	2,63511622
9,81151E-05	1,06323E-07	1540000	2560000	64000	135,375	2,13153847	4,806179974	185,6359965	402,297629	2,268662194	2,604547473
1,09017E-04	1,18137E-07	1680000	2620000	65500	150,4166667	2,17729596	4,8162413	206,2622184	377,7485419	2,314419684	2,577202797
2,18034E-04	2,36274E-07	2590000	4140000	103500	300,8333333	2,478325956	5,01494035	412,5244367	249,6360323	2,61544968	2,397307271
3,27050E-04	3,54411E-07	3330000	4460000	111500	451,25	2,654417215	5,047274867	618,7866551	195,9183592	2,791540939	2,292075135
4,36067E-04	4,72548E-07	4100000	4600000	115000	601,6666667	2,779355952	5,06069784	825,0488734	164,9725722	2,916479676	2,217411746
5,45084E-04	5,90685E-07	4260000	4940000	123500	752,0833333	2,876265965	5,091666958	1031,311092	144,3771026	3,013389689	2,159498322

