



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

***Influência do Reciclado nas Propriedades Mecânicas
de Peças Injetadas***

Rui Filipe Amaro Carrilho

Leiria, Março de 2024



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

***Influência do PP Reciclado nas Propriedades
Mecânicas em Peças Injetadas***

Rui Filipe Amaro Carrilho

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação dos Doutores Henrique de Amorim Almeida, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação da Doutora Milena Maria Nogueira Vieira, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Março de 2024

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Atualmente vive-se uma política de diminuição de resíduos derivado essencialmente com o aparecimento de substâncias plásticas nos oceanos e em algumas costas marítimas. Para um melhor desenvolvimento ambiental e pela motivação da legislação, as empresas procuram reciclar vários tipos de polímeros de modo a ser mais económico e sustentável.

O objetivo principal presente neste trabalho é entender a influencia do material reciclado, derivado do polipropileno (PP), no processo de moldação por injeção. Neste sentido, foram realizados e analisados dois casos de estudo em concreto, onde no caso 1 o PP virgem é injetado na maquina de injeção por moldação e que resulta num provete, esse será reciclado e novamente inserido na maquina de injeção para novos provetes. Este processo é efetuado cinco vezes consecutivas. Já no caso 2 é acrescentado ao PP virgem diferentes percentagens de PP apenas uma vez reciclado.

O mercado de reciclagem para polímeros termoplásticos encontra-se atualmente em acentuada ascensão. Os materiais reciclados são vistos como materiais de propriedades inferiores em relação ao material virgem. Verificou-se neste estudo que o reaproveitamento do PP (Isplen PB 180 G2M) com múltiplas injeções consecutivas, ou com percentagem de reciclado desse mesmo PP combinadas com o PP virgem, não afetou negativamente as propriedades mecânicas e térmicas desse polímero. Os resultados obtidos nos dois casos de estudo apresentaram um aumento de dureza, um aumento no índice de fluidez e não tiveram nenhuma alteração de densidade em comparação com o PP virgem. Ainda que o segundo caso de estudo apresenta uma maior instabilidade estrutural ao contrario do primeiro caso no ensaio de flexão. Já no ensaio de DSC aconteceu o oposto que no ensaio de flexão, onde existiu uma instabilidade estrutural no grau de cristalização no primeiro caso de estudo.

De um modo geral, estes dois estudos provaram ser uma ótima alternativa para as industrias de injeção de polímeros, com vantagens nos âmbitos económicos e ambientais.

Palavras-chave: Polipropileno, reciclagem, moldação por injeção, polímero, termoplástico

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

Currently, there is a waste reduction policy resulting mainly from the emission of plastic substances into the oceans and on some coasts. For better environmental development and the application of legislation, companies seek to recycle various types of polymers in order to be more economical and sustainable.

The main objective of this work is to understand the influence of recycled material, derived from polypropylene (PP), in the injection molding process. In this sense, two concrete case studies were carried out and detailed, where in the first case virgin PP is injected into the injection molding machine and results in a test piece, which will be recycled and reinserted into the injection machine for new test pieces. This process is performed five consecutive times. In the second case, different percentages of PP are added to the virgin PP only once recycled.

The recycling market for thermoplastic polymers is currently on the rise. Recycled materials are seen as materials with inferior properties compared to virgin material. It was found in this study that the reuse of PP (Isplen PB 180 G2M) with multiple consecutive injections, or with a recycling percentage of this same PP combined with virgin PP, did not affect the mechanical and thermal properties of this polymer. The results obtained in two case studies showed an increase in hardness, an increase in fluidity index and no change in density compared to virgin PP. Although the second case study presents greater structural instability unlike the first case in the bending test. In the DSC test, the opposite happened to the flexion test, where there was a structural instability in the degree of crystallization in the first case study.

In general, these two studies proved to be a great alternative for the polymer injection industries, with advantages in the economic and environmental spheres.

Keywords: Polypropylene, recycling, injection molding, polymer, thermoplastic

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE SIGLAS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DE ARTE	3
2.1. Processo de injeção	3
2.1.1. Evolução do processo de injeção plástica	3
2.1.2. Evolução da Indústria dos moldes em Portugal	4
2.1.3. Ciclo de Injeção	5
2.1.4. Máquina de injeção	6
2.1.5. Molde	7
2.1.5.1. Constituição de um molde	9
2.1.6. Parâmetros no processo de injeção	11
2.1.6.1. Velocidade de injeção	12
2.1.6.2. Temperatura de injeção	13
2.1.6.3. Temperatura do molde	14
2.1.6.4. Tempo e Segunda Pressão	15
2.1.6.5. Contrapressão e rotação do fuso	16
2.1.7. Defeitos visuais	17
2.2. Polímeros	18

2.2.1.	Evolução Histórica dos Polímeros	19
2.2.2.	Propriedades dos Polímeros	21
2.2.3.	Classificação dos Polímeros	22
2.2.4.	Termoplásticos	24
2.2.4.1.	Polipropileno	26
2.2.4.1.1.	Estrutura e Propriedades do Polipropileno	26
2.3.	Reciclagem dos plásticos	29
2.3.1.	Origem e aplicação dos plásticos	29
2.3.2.	Impacto Ambiental do Plástico	31
2.3.3.	Plásticos, Ações e o Desenvolvimento Sustentável	33
2.3.4.	Identificação e separação de resíduos plásticos	36
2.3.4.1.	Reciclagem do Polipropileno	38
2.3.5.	Reciclagem de resíduos plásticos	39
2.3.6.	Reciclagem Mecânica	40
2.3.6.1.	Moagem	41
2.3.6.2.	Lavagem	41
2.3.6.3.	Secagem	42
2.3.6.4.	Extrusão	42
2.3.6.5.	Critérios de qualidade dos plásticos reciclados	43
3.	TRABALHO EXPERIMENTAL	44
3.1.	Material utilizado	44
3.2.	Preparação dos materiais e meios utilizados para a realização dos provetes	45
3.3.	Preparação e obtenção dos provetes de teste	48
3.4.	Definição e Realização dos Ensaios Mecânicos e Térmicos	49
3.4.1.	Dureza SHORE	49
3.4.2.	Ensaio de Tração	51
3.4.3.	Ensaio de Flexão em 3 pontos	52
3.4.4.	Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC)	53
3.4.5.	Análise Mecânica Dinâmica (DMA)	54
3.4.6.	Índice de Fluidez (MFI)	55
3.4.7.	Ensaio de Densidade	56
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58

4.1.	Caso de estudo I – Ensaio de dureza	58
4.2.	Caso de estudo I – Ensaio de Tração	59
4.3.	Caso de estudo I - Ensaio de Flexão	62
4.4.	Caso de estudo I – Ensaio de DSC	64
4.5.	Caso de estudo I – Ensaio de DMA	67
4.6.	Caso de estudo I – Ensaio de MFI	68
4.7.	Caso de estudo I – Ensaio de Densidade	69
4.8.	Caso de estudo II – Ensaio de dureza	70
4.9.	Caso de estudo II – Ensaio de tração	72
4.10.	Caso de estudo II – Ensaio de flexão	74
4.11.	Caso de estudo II – Ensaio de DSC	76
4.12.	Caso de estudo II – Ensaio de DMA	78
4.13.	Caso de estudo II – Ensaio de MFI	80
4.14.	Caso de estudo II – Ensaio de Densidade	80
5.	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	ANEXOS	91

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 - Ciclo de moldação por injeção (A. Cunha 2003)	5
Figura 2 - Ilustração de uma injetora de parafuso sem-fim utilizada atualmente (Rutland 2018).....	7
Figura 3 - Exemplo do Gito e dos canais de alimentação (Dias 2021)	9
Figura 4 - Exemplo de um molde de duas placas e os seus componentes internos e externos (Gava 2020).....	10
Figura 5 - Exemplo de um molde para injeção de plástico (Saraiva 2016)	10
Figura 6 - Variáveis importantes no processo de injeção de plástico (Yang 2016) ...	12
Figura 7 - Relação entre tempo, pressão e temperatura de injeção (Shoemaker 2006)	13
.....	13
Figura 8 - Relação Temperatura, tensão de corte e Peso final (Shoemaker 2006)	14
Figura 9 - Controlo de temperatura dinâmico e controlo de temperatura convencional (Dong e Zhao 2017).....	15
Figura 10 - Variação de Pressão vs tempo de 2ª Pressão (Shoemaker 2006)	16
Figura 11 - Contrapressão e movimento do fuso	17
Figura 12 - Processo de polimerização e a formação de diversos polímeros (Shoemaker 2006).....	19
Figura 13 - Molécula do Etileno (Gooship 2004)	21
Figura 14 - Molécula do Polietileno (Gooship 2004)	21
Figura 15 – Estrutura dos Polímeros (Bower 2002)	23
Figura 16 - Propriedades de tensão para os diferentes tipos de plásticos (Kulkarni 2010).....	23
Figura 17 - Microestrutura dos termoplásticos e o efeito do arrefecimento e arrefecimento (Shoemaker 2006)	24
Figura 18 - Esquema da refinação do petróleo (Carvalho 2008)	27
Figura 19 - Estrutura do Polímero (Maddah 2016).....	27
Figura 20 - Configuração do Polipropileno segundo a sua taticidade (Carvalho 2008)	28
.....	28
Figura 21 - Resíduos de plástico encontrados no GPGP A) Capacete de obras produzido em 1989 B) grade de garrafas produzida em 1977 (Cleanup 2017).....	32
Figura 22 - Alternativas para redução do impacto ambiental de materiais plásticos.	34

Figura 23 - Impacto ambiental de uma embalagem vs material usado no seu fabrico	35
Figura 24 – Identificação dos termoplásticos na reciclagem (Tetra Júnior 2020).....	37
Figura 25 - Símbolo da Reciclagem do Polipropileno (Isso Significa s.d.).....	38
Figura 26 - Processo do primeiro caso de estudo	45
Figura 27 – Processo do segundo caso de estudo	46
Figura 28 - Equipamentos utilizados: a) Moinho industrial; b) Molde de injeção de provetes da ESTG; c) Máquina de injeção de 50 Toneladas.....	47
Figura 29 - Representação esquemática do provete de tipo I, de acordo com a norma ASTM D638-10 (2014); b0 - largura da secção estreita do provete; lc - comprimento da secção estreita do provete; W - largura global; lt - comprimento total; l0 - o comprimento de referência; la - distância entre amarras; r - raio do boleado	48
Figura 30 - Equipamento de dureza Shore D.....	50
Figura 31 - Equipamento utilizado a realizar um ensaio	51
Figura 32 - Equipamento utilizado no Ensaio de Flexão.....	52
Figura 33 - Equipamento DSC utilizado.....	54
Figura 34 - Equipamento DMA utilizado	55
Figura 35 - Esquema representativo dos principais constituintes do plastómetro	56
Figura 36 - Ensaio de Tensão/Deformação para o 1º caso de estudo	60
Figura 37 - Módulo de armazenamento para o 1º caso de estudo	67
Figura 38 - Módulo de perda para o 1º caso de estudo	68
Figura 39 - Tan Delta para o 1º caso de estudo	68
Figura 40 - Ensaio de Tensão/Deformação para o 2º caso de estudo	72
Figura 42 - Módulo de Perda para o 2º caso de estudo.....	79

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 - Defeitos e possíveis soluções da qualidade das peças (Roda 2012).....	18
Tabela 2 – Exemplo de Moléculas de alguns polímeros (Gooship 2004)	22
Tabela 3 - Termoplásticos comuns e as suas aplicações (Gooship 2004)	25
Tabela 4 - Aplicação dos termoplásticos (Adaptado de (Gondal e Siddiqui 2007)...	30
Tabela 5 - Propriedades do PP ISPLEN PB 180 G2M	44
Tabela 6 - Nomenclatura das composições utilizadas	46
Tabela 7 - Valores numéricos associados as dimensões de um provete tipo I, de acordo com a norma ASTM D638-10 (2014)	48
Tabela 8 - Média dos valores de T ₀ no primeiro caso	58
Tabela 9 - Média dos valores de T ₀ no primeiro caso	59
Tabela 10 - Valores médios da tensão de cedência do caso I	60
Tabela 11 - Valores médios da tensão máxima do caso I	61
Tabela 12 - Valores médios do módulo de Young do caso I	61
Tabela 13 - Valores médios do módulo de Young do ensaio da flexão do 1º caso de estudo	63
Tabela 14 - Valores médios da tensão máxima do ensaio da flexão do 1º caso de estudo	63
Tabela 15 – Resultado da temperatura de fusão no ensaio DSC no 1º caso de estudo	64
Tabela 16 - Resultado da temperatura de cristalização no ensaio DSC no 1º caso de estudo	65
Tabela 17 - Resultado da entalpia de fusão no ensaio DSC no 1º caso de estudo....	66
Tabela 18 - Resultado do grau de cristalinidade no ensaio DSC no 1º caso de estudo	66
Tabela 19 - Resultado do ensaio de MFI no 1º caso de estudo.....	69
Tabela 20 - Resultado do ensaio de Densidade no 1º caso de estudo.....	70
Tabela 21 - Média dos valores de T ₀ no 2º caso de estudo	71
Tabela 22 - Média de valores de T ₁₅ no 2º caso de estudo	71
Tabela 23 - Valores médios da tensão de cedência do caso II.....	72
Tabela 24 - Valores médios da tensão máxima do caso II.....	73
Tabela 25 - Valores médios do módulo de Young do caso II.....	73

Tabela 26 - Valores médios do módulo de Young do ensaio da flexão do 2º caso de estudo.....	75
Tabela 27 - Valores médios da tensão máxima do ensaio da flexão do 2º caso de estudo	75
Tabela 28 – Resultado da temperatura de fusão no ensaio DSC no 2º caso de estudo	76
Tabela 29 - Resultado da temperatura de cristalização no ensaio DSC no 2º caso de estudo.....	77
Tabela 30 - Resultado da entalpia de fusão no ensaio DSC no 2º caso de estudo	77
Tabela 31 - Resultado do grau de cristalinidade no ensaio DSC no 2º caso de estudo	78
Tabela 32 - Resultado do ensaio de MFI no 2º caso de estudo	80
Tabela 33 - Resultado do ensaio de Densidade no 2º caso de estudo	81

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
PVC	Policloreto de Vinilo
CA	Acetato de Celulose
PP	Polipropileno
PET	Tereftalato de Polietileno
PC	Policarbonato
PPS	Sulfeto de Polifenileno
LCP	Cristal líquido
LED	Díodos de Emissores de Luz
PA	Poliamida
PS	Poliestireno
PE	Polietileno
TPU	Poliuretano
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
LDPE	Polietileno de baixa densidade
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i>
IUCN	União Internacional para a Conservação da Natureza
GP GP	<i>Great Pacific Garbage Path</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISSO	International Organization for Standardization
DSC	Colometria diferencial de varrimento
DMA	Análise Mecânica Dinâmica

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

Não é necessário um esforço cognitivo exaustivo para perceber que os plásticos estão em todo o lado e como tal, conquistaram um papel importantíssimo no dia a dia da população graças a sua variadíssima gama de propriedades.

Atualmente está sendo dada ênfase à preservação e conservação do meio ambiente de forma a garantir um desenvolvimento sustentável, sendo que os polímeros são considerados os grandes vilões ambientais. Estes podem demorar séculos para se degradar e ocupam grande parte do volume dos aterros sanitários, interferindo assim de forma negativa nos processos de compostagem e de estabilização biológica (Spinacé e Paoli 2004).

Devido ao facto dos polímeros substituírem muitos materiais caros e pesados, faz com que sejam aplicados em diversos setores industriais e que tenha um crescimento contínuo de resíduos plásticos a nível mundial. Não se decompõem facilmente o que traz um sério problema ambiental, além de aumentar a poluição não só no solo, mas também um perigo para os animais marinhos. Com todos estes problemas surgiu a reciclagem de plásticos ou a compra de plástico reciclado, que contribui para o meio ambiente, pois o material deixa de ir para aterros sanitários ou para a natureza e passa a ser reutilizado em novas aplicações na indústria ou novos produtos.

Ao longo do tempo deparamos que o plástico vem crescendo e substituindo materiais tradicionais como o vidro, madeira e metais numa infinidade de aplicações. O plástico é um material versátil vindo assim aumentar a sua utilidade e importância ao longo do tempo. Graças a sua enorme gama de propriedades apresentada pelos diversos tipos de plástico, surge assim um custo atrativo e facilidade de processamento (Maier e Calafut 1998).

O polipropileno (PP) é classificado como um plástico de aplicação geral, do grupo dos termoplásticos. Apresenta como propriedades marcantes: excepcional resistência a ruturas por flexão, alta resistência química e a solventes, propriedades elétricas excelentes, boa estabilidade térmica, baixo peso e custo. A maioria dos produtos ou componentes de polipropileno são produzidos por moldação por injeção, por sopro ou por extrusão (A. Cunha 2003).

Esta dissertação apresenta a seguinte estrutura: o capítulo 2 que apresenta a revisão bibliográfica, o capítulo 3 apresenta o trabalho experimental, o capítulo 4 apresenta os resultados e discussões, e o capítulo 5 a conclusão.

O objetivo deste trabalho foi analisar os resultados obtidos dos ensaios mecânicos e térmicos do polipropileno virgem e reciclado, tais como as suas influências no resultado final. Foram

utilizados corpos de prova virgem reciclado várias vezes consecutivas no primeiro caso, e com diferentes proporções de reciclado do polipropileno no segundo caso.

2. Estado de arte

Neste capítulo serão abordados conteúdos de natureza científica e tecnológica enquadrados no processo de injeção de plásticos e posteriormente o processo de reciclagem polimérica.

Será abordado a sua relevância na produção de peças plásticas e que é atualmente um dos meios mais utilizados na indústria para a criação de produtos poliméricos. O processo de injeção plástica permite uma vasta gama de produtos plásticos, devido à sua capacidade de produção de peças com formas e geometrias complexas, elevada precisão dimensional, bom acabamento superficial, boas características mecânicas, aplicação para fins estruturais, estéticos ou com o propósito de substituir produtos de outro tipo de materiais, aliando todas estas vantagens a curtos ciclos de produção.

Quando ao processo de reciclagem polimérica é um meio onde os resíduos são convertidos novamente em criação de peças e ajuda a minimizar diversas formas de agressão ao meio ambiente.

2.1. Processo de injeção

2.1.1. Evolução do processo de injeção plástica

Um dos métodos mais utilizados na conformação de materiais plásticos, é a transformação sob pressão, ou seja, injeção em moldes. No nosso quotidiano é bem visível essa utilização de plástico, nomeadamente: componentes automóveis, material de escritórios, brinquedos, etc., sendo que o surgimento do processo por injeção remonta ao final do século XIX. (R. Crawford 1998)

Em 1868, em resposta a um pedido do fabricante de bolas de bilhar Phelan e Collander, John Wesley Hyatt inventou uma forma de criar bolas de bilhar injetando celulóide em um molde. John e o seu irmão Isaiah Hyatt patentearam uma máquina de moldagem por injeção. Esta máquina continha um êmbolo para injetar o plástico em um molde através de um cilindro aquecido. Alguns dos primeiros produtos criados com celuloide foram colares, botões e pentes de cabelos. (Dev 2010)

Durante a Segunda Guerra Mundial, a capacidade de produzir rápido e barato, tornou-se uma necessidade para toda a indústria. Em 1946, James Hendry construiu a primeira máquina de

moldagem por injeção de parafuso para substituir o êmbolo de Hyatt e revolucionou a indústria de plásticos.

A introdução do parafuso sem-fim possibilitou a vantagem de promover melhor mistura e homogeneização do material plástico. Outra vantagem é também na redução de energia requerida no processo, pois com a indução de movimentos de fricção entre o material e as paredes do cilindro é criado um aquecimento adicional que reduz a componente energética.

Atualmente cerca de 95% das máquinas de injeção usam parafuso para aquecer, misturar e injetar plástico em moldes. Desde então que este processo de injeção de plástico por moldação se tornou parte das nossas vidas cotidianas. É difícil de ver uma indústria intocada pela indústria de plásticos. (Kaso Plastics 2011).

2.1.2. Evolução da Indústria dos moldes em Portugal

A indústria do vidro foi crucial para evolução da indústria dos moldes para a injeção de plástico em Portugal.

A indústria de moldes para injeção de plásticos teve início em 1943, na Marinha Grande, numa pequena empresa de moldes por iniciativa de Aníbal H. Abrantes. Dois anos mais tarde surge o primeiro molde de injeção para plástico. Nos seguintes anos começaram a aparecer outras empresas produtoras de moldes para plásticos, nas cidades da Marinha Grande e Oliveira de Azeméis, onde é simultaneamente uma cidade tradicional na produção do vidro.

Em 1980 a indústria já exportava para mais de 50 países e só na Marinha grande existiam 64 empresas em laboração, empregando assim cerca de 2000 pessoas. Com a evolução tecnológica a indústria portuguesa tem vindo a apostar na qualificação e especialização de técnicos profissionais.

Existem institutos especializados concentrados na Marinha Grande e em Oliveira de Azeméis, evidenciando o desejo das empresas portuguesas de moldes reunirem os seus esforços num objetivo comum. Exemplo destes esforços é a promoção de imagem do setor a nível externo, desenvolvida através da CEFAMOL – Associação Nacional de Indústria de Moldes. (Neto 2014)

Atualmente com o crescimento de empresas de moldes, em número e tecnologia, obriga a uma constante atualização e inovação das empresas para se manterem competitivas em termos de tempo, prazos e qualidade do serviço. A Indústria do molde teve e tem um papel muito importante no desenvolvimento da região e do país, desde que Aníbal Abrantes fundou a sua empresa, e ajudou a ultrapassar as situações de crises cíclicas que se viviam até então.

2.1.3. Ciclo de Injeção

A moldação por injeção é um processo descontínuo, relativamente simples, frequentemente descrito por ciclo de injeção. Esta atividade tem como objetivo produzir peças dentro das especificações com o menor tempo de ciclo possível. Consoante a geometria da moldação e as especificações do produto final temos de ter em conta as condições de processamento, tais como, a pressão de injeção, temperatura do material fundido e do molde, velocidade de injeção e contrapressão.

As fases do ciclo de moldação são praticamente independentes do tipo de máquina ou de molde, contudo, a sua duração pode ser diversa, variando os tempos inferiores a 1 segundo para peças muito finas, a várias dezenas de minutos para moldações de peças mais espessas. (Silva 2015)

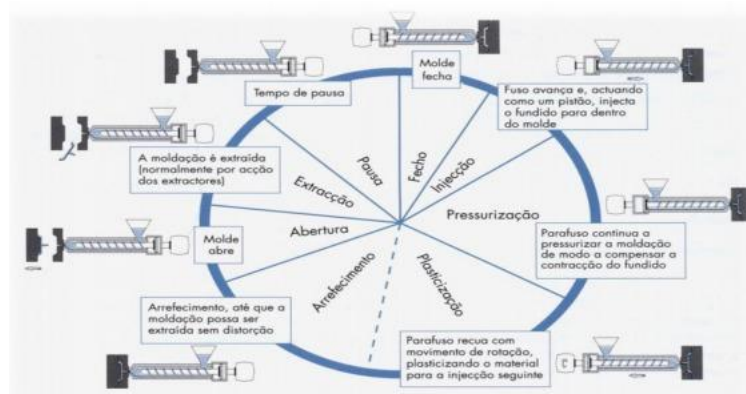


Figura 1 - Ciclo de moldação por injeção (A. Cunha 2003)

A máquina injetora tem 3 modos de funcionamento:

Manual: A sequência de operações é efetuada pelo operador;

Automático: Neste regime em que a maximização da produtividade e da fiabilidade é conseguida. Existe uma sequência pré-definida que não necessita da intervenção do operador;

Semiautomático: Em que é um misto dos anteriores caso, por algum motivo a produção necessita de ser interrompida. E é necessária a intervenção do operador para dar início a um novo ciclo;

Para o processo de moldação iniciar tem de haver uma preparação da matéria-prima, devendo o material polimérico ser previamente seco e desumidificado de acordo com as temperaturas e tempos estipulados pela ficha técnica. Tendo o material estufado e pronto para a iniciar marcha o ciclo de injeção apresenta 6 fases sequenciais: (Pinto 2012)

2.1.4. Máquina de injeção

A moldagem por injeção é um dos processos mais comuns para a produção de peças plásticas. O processo tem grande variedade de produtos que variam de tamanho, complexidade e aplicação. Apresenta grande variedade de materiais plásticos e não-plásticos, no entanto a máquina deve ser configurada dependente do tipo de material utilizado.

O material, geralmente disponível em grãos ou em pó, é plastificado em uma unidade de injeção e de seguida injetado no molde fixado por alta pressão.

A principal vantagem deste processo é ser muito económico para a produção em massa.

Uma injetora, tal como representa a figura 2, pode ser dividida em quatro unidades, a unidade de potência, a unidade de injeção, unidade de fecho e a unidade de comando.

A unidade de potência é a responsável por fornecer energia aos atuadores, lineares e rotativos da máquina. Geralmente é composto por um sistema de pressão hidráulica que é comandado por um motor elétrico. (Rutland 2018)

A unidade de injeção é responsável pela transformação da matéria-prima por ação mecânica e térmica, adequando-a para a subsequente injeção no molde. Esta unidade é constituída por um motor e engrenagens, que associadas a um cilindro, sustentam e originam o movimento giratório e de punção de um parafuso sem-fim colocado no cilindro da máquina.

Este parafuso tem uma válvula de retenção que se fecha para a realização do movimento de punção, prevenindo o recuo do material fundido e aumentando a sua eficiência da pressão aplicada. A unidade de injeção tem ainda uma tremonha, que alimenta a máquina com matéria-prima, bandas de aquecimento no exterior do cilindro e um bico de injeção.

Na unidade de fecho é onde fica situado o molde que vai proporcionar ao material injetado a forma final pretendida. Existe dois tipos de fixação, ou seja, o tipo basculante com barras de fixação que é visível na figura seguinte e o tipo hidráulico, em que o molde é aberto e fechado diretamente com um cilindro hidráulico. Para além do molde esta unidade é ainda composta por uma placa estacionária e uma placa móvel que sustentam o molde. (R. J. Crawford 1998)

Por último tem a unidade de comando que faz a ligação entre máquina e o operador, o que permite ao operador controlar e monitorizar os parâmetros do processo através da interface.

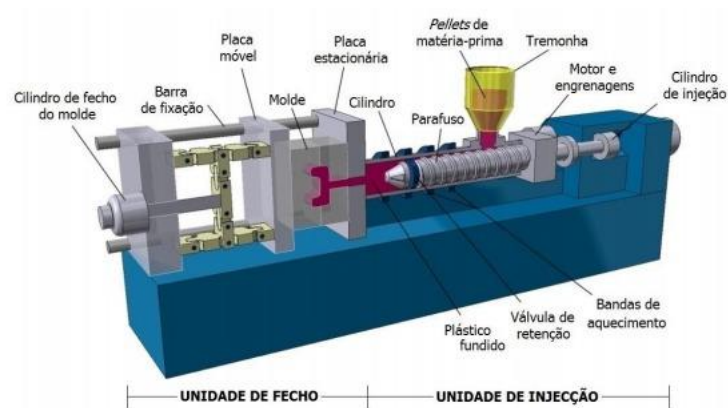


Figura 2 - Ilustração de uma injetora de parafuso sem-fim utilizada atualmente (Rutland 2018)

2.1.5. Molde

As vidas das peças de plástico começam dentro do molde. O molde produz o aspeto final das peças para desempenhar a função pretendida. Este é projetado e construído para criar um produto totalmente acabado, no entanto, quanto mais recursos e funções que o molde apresenta mais custos e tempo é necessário para a sua construção. Deve-se pensar exatamente no que é exigido antes do primeiro projeto do molde ser considerado.

O próprio molde é composto por vários componentes que são submetidos a muitos ciclos de produção. Neste é utilizado uma variedade de componentes dependente da sua funcionalidade.

O molde deve produzir peças de qualidade aceitável com um custo mínimo de ciclo de vida, o que reduz o gasto de dinheiro, tempo e o risco de o desenvolver. (Bryce 1996)

Um molde de injeção é um sistema complexo que deve de atender as demandas impostas pelo processo de injeção. A função principal do molde de injeção é conter o polímetro fundido dentro da cavidade do molde para que possa ser completamente preenchida e reproduzir um componente plástico com a forma da sua cavidade. Outra função é conter um circuito de águas para que possa arrefecer o fluido que circula no interior do molde de modo, aos produtos moldados sejam produzidos de uma maneira mais uniforme e com pouco tempo de arrefecimento. Para o processo ser concluído o molde tem também a função de extrair a peça de maneira eficiente e consistente. (Kazmer 2016)

2.1.5.1. Constituição de um molde

Um molde é constituído por vários sistemas, sendo eles:

- Gito e canais de alimentação;
- Ataque;
- Guiamento;
- Sistema de escape de gases;
- Cavidade;
- Bucha;
- Sistema de arrefecimento;
- Sistema de ejetor;
- Extração;

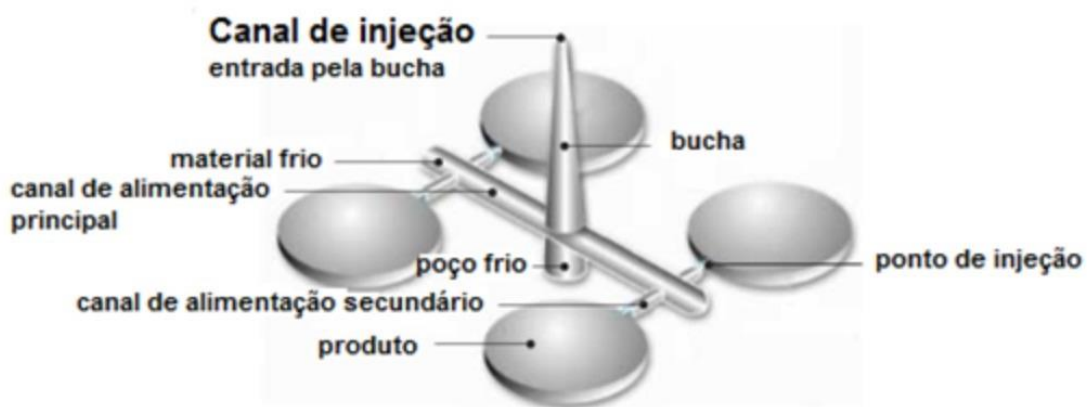


Figura 3 - Exemplo do Gito e dos canais de alimentação (Dias 2021)

O sistema de centragem é onde permite a colocação do molde na máquina e ao mesmo tempo ajustar as partes do molde, onde assegura a reprodutibilidade dimensional das peças.

O sistema de gases é um sistema onde liberta o ar das zonas moldantes existentes criado pelas moldações.

O sistema funcional de um molde inclui a zona moldante, ou seja, é o espaço definido pela conjugação da cavidade e da bucha, onde é responsável pela forma final da peça a produzir.

O sistema de controlo de arrefecimento é o que contribui para o arrefecimento das peças.

O sistema de alimentação é o circuito da passagem do polímero desde o bico da máquina de injeção até a zona moldante onde assegura o seu enchimento.

O sistema de extração é o que permite a extração das peças.

A estrutura de um molde é constituída pelo conjunto de placas e calços dependente do tipo de molde e da sua complexidade.

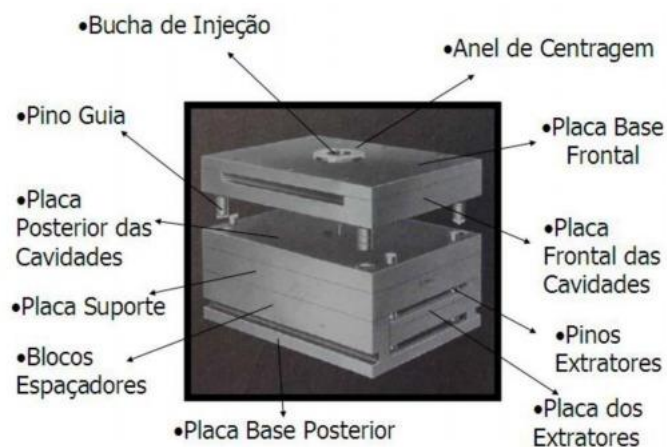


Figura 5 - Exemplo de um molde para injeção de plástico (Saraiva 2016)

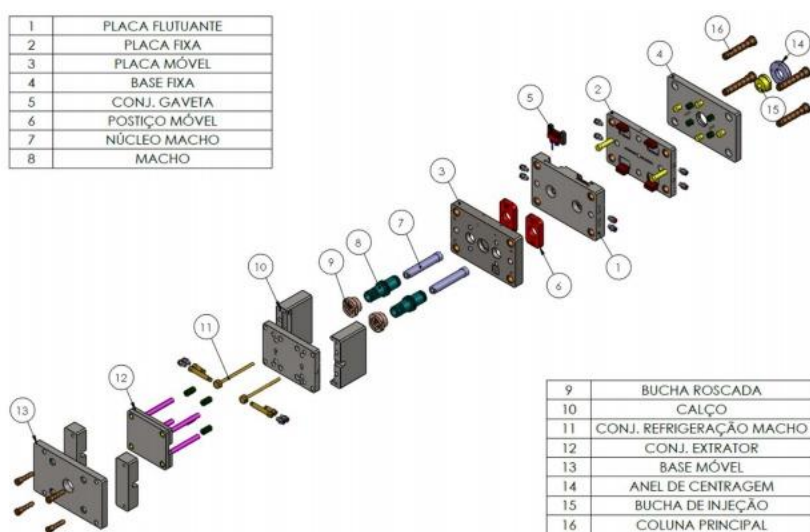


Figura 4 - Exemplo de um molde de duas placas e os seus componentes internos e externos (Gava 2020)

Um molde de duas placas é do tipo mais simples a ser confeccionado, é constituído por uma parte fixa ou lado da injeção e por uma parte móvel ou lado da extração. (A. M. Cunha 2004)

2.1.6. Parâmetros no processo de injeção

O processo de injeção plástica é um processo de fácil compreensão, mas bastante complexo e dinâmico que necessita de um conhecimento das variáveis existentes. Para determinar uma qualidade da peça desejada, é importante selecionar parâmetros de processo corretos ou próximos do ideal.

Os parâmetros podem variar dependente do material, do molde, em função da máquina de injeção bem como as suas configurações e limitações e com o design da peça. (Manrich 2013)

Existem 3 tipos de parâmetros no processo de injeção:

- Parâmetros Operatórios
- Parâmetros do Processo
- Parâmetros do Material

Os parâmetros de material são normalmente exigidos pelo cliente em função da peça e material pretendidos.

Quanto aos parâmetros de processo estão relacionadas com os aspetos geométrico construtivos do equipamento e do molde/peça o que inclui: bico de injeção, espessura da peça, comprimento do fuso, localização e geometria do ataque, distribuição de temperaturas entre outros. Estes parâmetros são selecionados durante a fase de projeto do molde e raramente são alterados mais tarde de modo a não voltar novamente para a fase de produção para sofrer alterações estruturais.

Os parâmetros operatórios são controlados pelos operadores e podem ser ajustados na unidade de controlo. Estas permitem variar temperaturas, velocidades, pressões e tempos sendo estas maioritariamente responsáveis pela ocorrência de defeitos. Estes são alterados numa fase inicial de teste do molde, de modo a conseguir encontrar a solução ideal para produzir (Caetano 2018).

Estes parâmetros determinam a qualidade da peça final, nomeadamente as suas propriedades mecânicas, como a tensão de cedência, resistência ao impacto ou a estabilidade dimensional. Para além do ciclo de injeção existem variáveis que necessitam de ser controladas, uma vez que influenciam nas condições de escoamento do material e posteriormente no seu arrefecimento. Na figura 6 podemos observar de forma resumida as variáveis que mais afetam o processo do produto final numa injeção de plástico (Yang 2016).

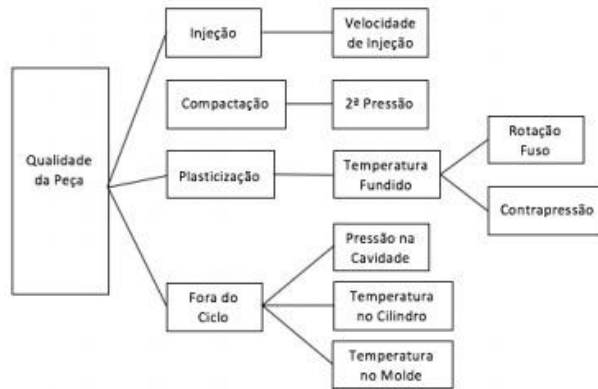


Figura 6 - Variáveis importantes no processo de injeção de plástico (Yang 2016)

2.1.6.1. Velocidade de injeção

O material fundido durante a fase de injeção é forçado a entrar na cavidade do molde, ao que se encontra a uma temperatura inferior, perdendo calor de uma forma constante. A camada mais afastada do molde é a primeira a solidificar, sendo esta a depender do equilíbrio da perda de calor por condução e pelo ganho de fricção.

Tem de existir um equilíbrio, pois se a velocidade de injeção for bastante reduzida, a camada inicial irá solidificar totalmente e impedindo que o resto do fluxo se propague, impossibilitando o enchimento da cavidade. Com taxas elevadas, o calor ganho por fricção supera o calor perdido, possibilitando assim o total enchimento da cavidade.

Peças com complexas geometrias e espessuras, não é possível ter um enchimento constante, obrigando assim uma criação de perfil de velocidades de injeção (Beaumont 2004).

Na figura 7 podemos observar o efeito a variação do tempo de injeção na pressão e temperatura da frente de fluxo. Ao baixar os valores de velocidade de injeção as tensões de corte serão mais baixas, no entanto a perda de calor será maior, o que nos leva a um arrefecimento de fluxo e aumentando a sua viscosidade.

Podemos considerar que a velocidade de injeção ideal se enquadra algures entre os extremos, visto que os tempos de injeção reduzidos aumentam a tensão de corte, e os tempos demasiados longos aumentam a sua viscosidade o que necessita de uma maior pressão (Shoemaker 2006).

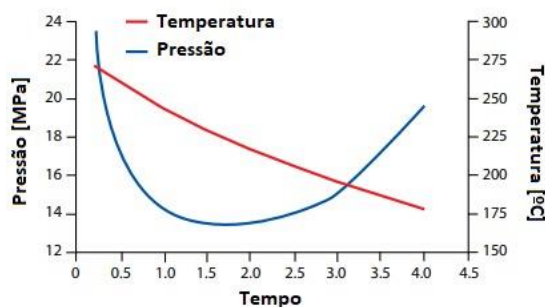


Figura 7 - Relação entre tempo, pressão e temperatura de injeção (Shoemaker 2006)

2.1.6.2. Temperatura de injeção

Existe um grande percurso de fontes de calor a que o material está sujeito, desde a matéria-prima na tremonha até à chegada de material dentro do molde. Estas temperaturas têm que ser controladas, permitindo a conformação e a redução do nível de viscosidade no escoamento, onde o excesso de temperatura leva a uma degradação de material.

A degradação do polímero é função do tempo e da temperatura. A temperatura no pré-aquecimento na tremonha não é elevada, mas ao permanecer vários dias, o material pode acabar por degradar o que irá afetar as suas propriedades mecânicas e de processamento. Na unidade de injeção as dimensões ou tempos de ciclos elevados poderá causar deterioração, devido á residência dentro do fuso de injeção. O sistema de alimentação poderá ser causador da degradação caso esteja mal dimensionado e o material fique retido ou tenha dificuldade em escoar. (Beaumont 2004)

Na figura 8 podemos observar o efeito da temperatura no peso final da peça e na tensão de corte. Para temperaturas baixas a pressão necessita de ser elevada assim como as tensões de corte. Não sendo proporcional, à medida que a temperatura do fluido aumenta, a tensão de corte apresenta uma redução de pressão.

Ao aumentar a temperatura permite utilizar pressões mais elevadas na fase de compactação, reduzindo o peso final da peça, uma vez que haverá um aumento da contração volumétrica que não será compensado. O aparecimento de rechupes nas peças é manifestada por norma quando a peça apresenta falta de peso. (Shoemaker 2006)

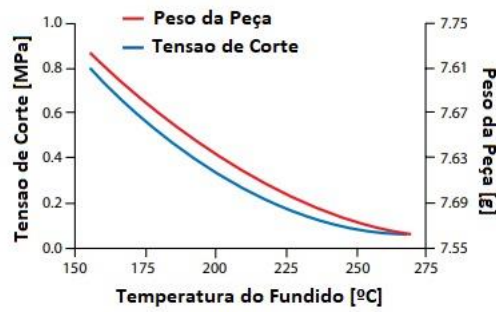


Figura 8 - Relação Temperatura, tensão de corte e Peso final (Shoemaker 2006)

2.1.6.3. Temperatura do molde

A consequência de aumento de temperaturas é similar ao aumento de temperatura do fundido variando apenas um impacto menor na pressão e na tensão de corte (Shoemaker 2006).

As temperaturas mais altas no molde geram superfícies mais brilhantes, com redução das linhas de fluxo e tensões internas, porém exigem um tempo de ciclo mais elevado para poderem arrefecer a peça. Os moldes que utilizam temperaturas mais baixas, utilizam tempos de ciclo mais baixos, gerando assim peças com tensões internas e com risco de quebra durante a extração das mesmas. Pode ocorrer ainda falta de brilho e marcas de fluxo devido às baixas temperaturas (Harada 2008).

A figura 9 representa uma comparação entre um molde com controlo dinâmico de temperatura e um molde convencional. Num molde com controlo de temperatura dinâmico, durante o fecho do molde, aquece rapidamente mantendo-se acima do limite superior para evitar que o material solidifique. Quando o processo de enchimento é finalizado, o molde arrefece muito rapidamente até uma temperatura mínima (temperatura de injeção) e então extraída a peça moldada. Este método consegue obter melhores resultados, deixando a peça com melhor acabamento em tempos de ciclos mais baixos. No caso do controlo de temperatura do molde por injeção convencional a temperatura do molde apresenta valores entre o limite superior e inferior (Dong e Zhao 2017).

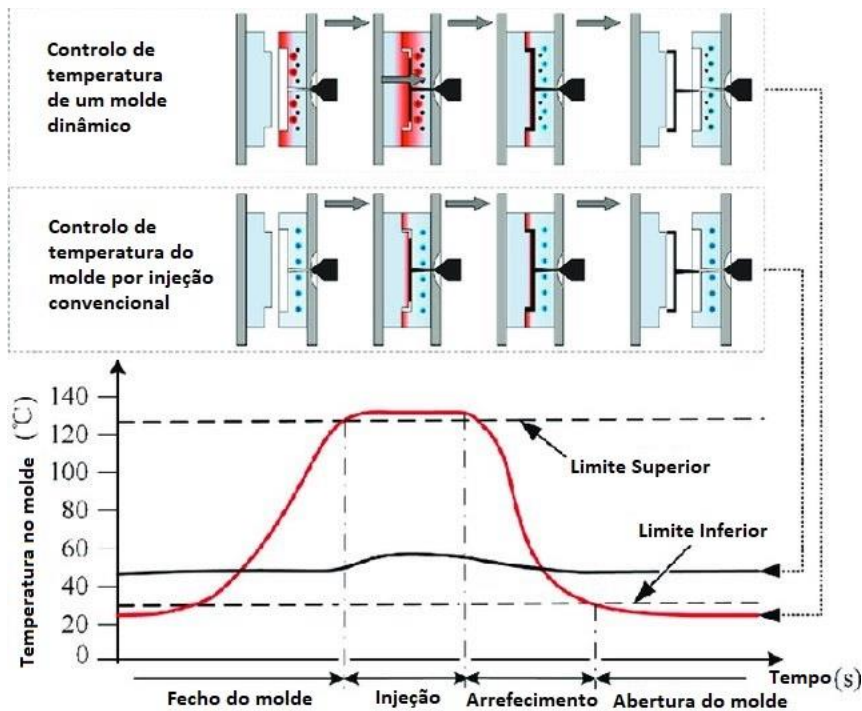


Figura 9 - Controlo de temperatura dinâmico e controlo de temperatura convencional (Dong e Zhao 2017)

2.1.6.4. Tempo e Segunda Pressão

A segunda pressão ou pressão de compactação tem uma influência direta nas características da peça. Após o enchimento da cavidade na fase de injeção, o material arrefece e contrai de 2 a 3% podendo originar vários defeitos, tais como: tensões residuais, empenos e distorções dimensionais.

A contração da peça leva a uma perda de contato com a cavidade, levando a necessidade de aumentar o tempo de arrefecimento, para a peça não cair na abertura do molde. No seu oposto com uma carga excessiva, as tensões nas faces da cavidade aumentam, que irá provocar arrastados nas peças.

Os valores de compactação são escolhidos de modo a peça não perder o contacto com a cavidade, que permaneça solidaria com o macho, e que não tenha muito esforço de pressão o que será desnecessário (Beaumont 2004).

Baseado na figura 10, podemos observar a qualidade final da peça, apenas com a influência do tempo e da segunda pressão. Ao utilizar várias pressões de compactação, verificou-se que mecanicamente a peça produzida com a maior pressão de compactação obteve melhores resultados (Shoemaker 2006).

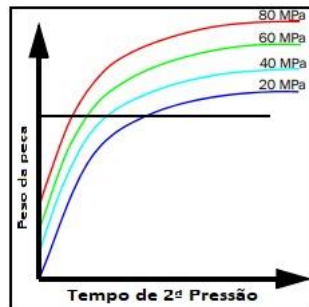


Figura 10 - Variação de Pressão vs tempo de 2ª Pressão (Shoemaker 2006)

2.1.6.5. Contrapressão e rotação do fuso

Durante a dosagem de material é aplicada uma pressão que se opõe ao movimento do fuso enquanto o material é misturado e compactado, a que se chama contrapressão. Esta é gerada pelas seções que o fuso apresenta.

Quanto maior a contrapressão maior é a dificuldade do retorno da rosca, aumentando o cisalhamento do material. Este parâmetro é normalmente utilizado quando necessitamos de homogeneizar o material antes da injeção, para que este seja consistente durante cada ciclo, ajudando a misturar quaisquer aditivos ou corantes proporcionando uma temperatura de fusão mais uniforme. Utiliza-se uma contrapressão baixa o suficiente para minimizar o aparecimento de bolhas ou raiados.

Ao aumentar a rotação do fuso, maior é a homogeneidade do material e mais rápido é realizado a dosagem, o que se refletirá nos tempos de ciclos. Em contrapartida se existir um grande atrito poderá causar a degradação do material termoplástico (Weddell 2018).

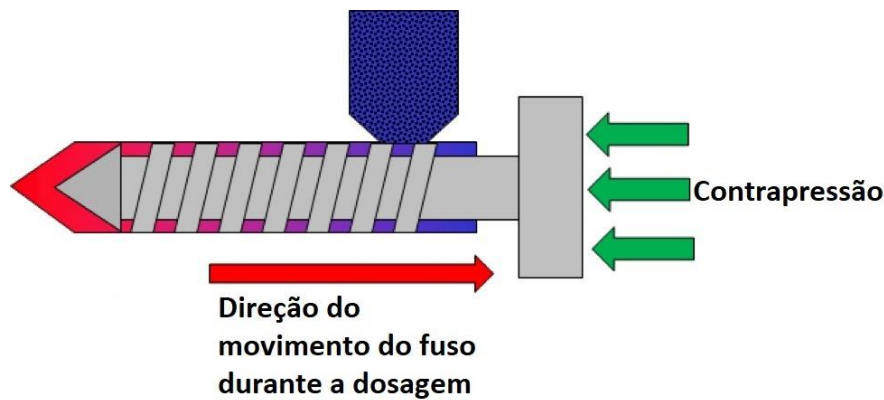


Figura 11 - Contrapressão e movimento do fuso

2.1.7. Defeitos visuais

Em contexto industrial muitas das vezes quando surge problemas de moldação, os técnicos de plástico, operadores ou até mesmo engenheiros, alteram parâmetros sem saber qual vai ser o seu efeito e resultados na peça. Estas ações são comuns porque são uma solução rápida embora nem sempre possível. Em prática normal seria analisar uma moldação e encontrar uma potencial solução (Randelovic, et al. 2015).

Existe dois fatores técnicos que influenciam diretamente a qualidade das peças, o projeto/construção do molde e o processo de injeção.

No projeto e construção do molde os cálculos são relativos ao comportamento do plástico durante o processo de transformação. O uso de software de simulação permite um maior acompanhamento das fases de injeção ajudando na eliminação de problemas típicos nas peças plásticas.

No processo de injeção a obtenção dos parâmetros sofrem várias alterações, devido as características do material injetado quanto às condições de temperaturas, pressões, velocidades, tempos e outros parâmetros de controlo.

Durante os testes de injeção do material termoplástico no molde, são normalmente apresentados defeitos nas peças injetadas, o que leva a possíveis correções que devem ser tomadas para minimizar ou eliminar tais defeitos, sendo estas criadas no projeto, no processo ou em ambos (Cardoso 2021).

A tabela 1 apresenta os principais defeitos e como solucioná-los no processo de injeção sendo estes relacionados com os parâmetros da máquina, a matéria-prima e com o molde.

Tabela 1 - Defeitos e possíveis soluções da qualidade das peças (Roda 2012)

Possíveis soluções		Tabela de Defeitos e Soluções																													
		Temperatura do canhão	Pressão de injeção	Velocidade de injeção	Diâmetro do bico	Volume de injeção	Pressão de recalque	Contrapressão	Resistências elétricas	Tempo de ciclo	Velocidade de ejeção	Limpeza do canhão	Temperatura na zona de alimentação	Valvula de retenção	Descompressão	Quantidade de lubrificante	Índice de fluidez	Umidade	Contaminação	Granulometria	Homogeneização do masterbatch	Ângulo de saída do canal de injeção	Polimento dos canais de injeção ou distribuição	Quantidade de desmoldante	Tempo de resfriamento do molde	Temperatura do molde	Dimensões das entradas e canais	Saídas de ar	Posicionamento da(s) entrada(s)		
Defeitos																															
		Aderência no bico ou cavidade	9	6	13	10	8	7									11	12						4	5	3	2	1			
		Bolhas de ar	2			9	10		3			5					1		8	4								7	11	6	
		Contração muito alta	1	5				6		2								7								3	4	8			
		Deformação (empenamento)	1	4	5			6									7								2	3					
		Delaminação	2		3															1											
		Efeito arco-íris	1		2	3																						4			
		Efeito memória	1		3	4											5											2	6		
		Escorimento pelo bico	1			4						2				3		5	6												
		Formação do rabicho			1												2													3	
		Injeções incompletas	3	2	5	7	1			8	9						6										4	10		11	
		Má homogeneidade de cor								4	1	3											2								
		Manchas claras	1		3				2	6	4	5								9	8		7								
		Manchas escuras (queima)	1	8	9					7			4	5	6					11	10					2			3		
		Manchas onduladas (concêntricas)	3	4	5												6										2	1	7		
		Marca do castelo e/ou estria no outro lado da peça	1		2																										
		Marcas de junção	1	2	4	6											6											3			
		Marcas no sentido do fluxo	1	2	9							10	8					12		3	4	5			11			6	7	13	
		Quebrando durante a ejeção		2	7		3	4											1									6	5		
		Rebarbas	3	2			1				5																	4			
Rechupes	2	1	3	5	6	7			4																		9	10			
Sem brilho	2	1	4																							2					

Legenda:
■ Aumentar
■ Diminuir
■ Verificar
■ Fazer testes aumentando ou diminuindo
1 Quanto menor o número, maior a prioridade

2.2. Polímeros

Os polímeros atualmente são vistos como produtos que substituem muitos dos materiais tradicionais, tais como, a madeira e o metal. Graças a uma grande versatilidade e alta capacidade de adaptação às suas próprias propriedades, os polímeros vão ficando cada vez mais insubstituíveis, o que permite solucionar problemas que outros materiais não conseguem resolver (Gooship 2004).

A palavra polímero deriva da palavra grega “Poli” que significa muitos e da palavra “meros” que significa partes. Os polímeros são constituídos por monómeros que se ligam, formando uma molécula maior (macromolécula), por uma reação química a que se dá o nome de polimerização (figura 12), podendo definir o monómero como uma unidade repetente de um polímero. Os polímeros podem ser criados a partir de vários tipos de monómeros, como por exemplo o ABS, que é formado por três monómeros diferentes, acrilonitrila, butadieno e estireno (Kulkarni, Robust Process Development and Scientific Molding 2010).

A maior parte dos plásticos atualmente são fabricados artificialmente, ou seja, as macromoléculas são construídas de moléculas mais pequenas (predominantemente de carbono e hidrogénio). Por razões económicas os plásticos são exclusivamente originados a partir de produtos criados pela destilação fracionada de petróleo bruto (Gooship 2004).

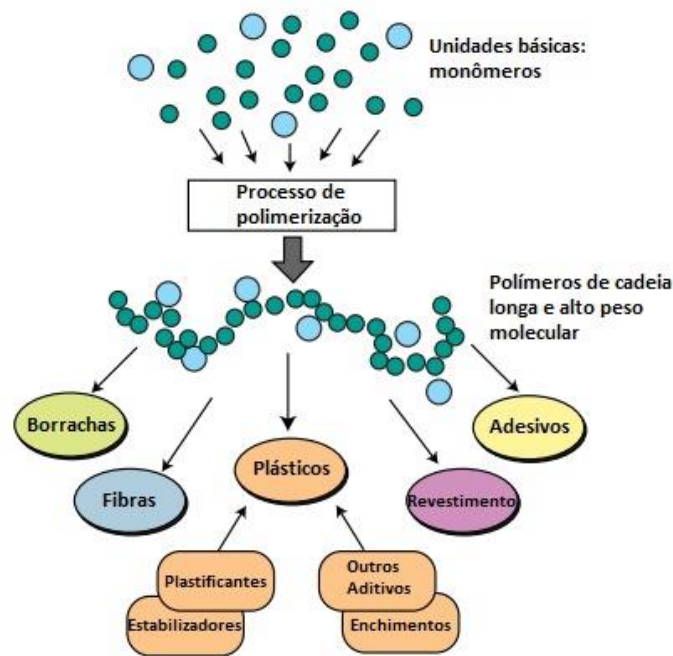


Figura 12 - Processo de polimerização e a formação de diversos polímeros (Shoemaker 2006)

2.2.1. Evolução Histórica dos Polímeros

Em 1870 John Wesley Hyatt ficou conhecido como o primeiro fabricante de material plástico simplificando o processo de produção de celuloide. Não só revolucionou a indústria de plástico como também o jogo de bilhar onde teve bastante sucesso ao usar a celuloide para a fabricação das bolas de bilhar (Gregersen 2022).

O primeiro polímero sintético foi chamado de baquelite em homenagem ao seu inventor, Leo Hendrik Baekeland em 1907. Até 1924, Herman Staudinger propôs á comunidade científica o conceito de cadeias lineares e macromoléculas o que permitiu mais tarde o desenvolvimento de outros materiais poliméricos. As compreensões dessa nova estrutura permitiram a criação de novos plásticos como o policloreto de vinilo (PVC) e acetato de celulose (CA) na década de 1920. Na década de 1930 houve a introdução de poliamidas, poliestireno e acrílicos, bem como a introdução das extrusoras de rosca simples e dupla para o processo dos polímeros.

Durante a segunda guerra mundial, na década de 1940, surge a os epóxis, polietileno e acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS). Por volta de 1954 aparece o Polipropileno (PP) utilizando a tecnologia dos catalisadores. Nesta década surge também Polietileno tereftalato (PET) e Policarbonato (PC). Empresas americanas a partir de 1970 desenvolveram uma vasta gama de materiais, tais como, sulfeto de polifenileno (PPS) e vários fluoro polímeros. Mais tarde em 1973 Dynamit Nobel na Alemanha introduziu o fluoreto de polivinilideno (PVDF) no mercado e chegando á década de 1980 é desenvolvido o polímero de cristal líquido (LCP) (Gooship 2004).

Desde os primeiros materiais até a sua atualidade, milhares de polímeros foram produzidos e apresentando imensas aplicações. Estes são utilizados em larga escala como adesivos, lubrificantes, componentes estruturantes de vários produtos, e presente na elaboração de simples brinquedos até aos mais sofisticados componentes para a indústria da aviação. Abrange cada vez mais indústrias como a medicina, como por exemplo, utilizados em implantes médicos e em dispositivos médicos. Chegando mesmo á área de optoelectrónica ao serem aplicados como substratos flexíveis no desenvolvimento de díodos emissores de luz (LED) (Fernandes 2014).

2.2.2. Propriedades dos Polímeros

Os polímeros são substâncias que apresentam ligações em cadeia entre átomos de carbono com outros elementos químicos. Estas ligações são predominantemente covalentes. A formação dos polímeros dá-se através de reações químicas usualmente em grandes recipientes e com auxílio de calor (temperatura) e pressão. Outros reativos químicos são utilizados para controlar como o polímero é formado de modo a produzir um comprimento molecular apropriado e assim obter as propriedades desejadas.

Um dos monómeros mais simples e mais comum é o etileno. Quimicamente é composto por dois átomos de Carbono (C) e quatro átomos de Hidrogénio (H). Ele pode apresentar duas formas diferentes como podemos ver na figura 13.



Figura 13 - Molécula do Etileno (Gooship 2004)

A figura representa as ligações que existe entre os átomos constituintes de uma molécula do etileno. Quando vários monómeros de etileno são combinados pelo processo de polimerização forma-se uma cadeia unida pelos átomos de carbono que permite a criação do polímero polietileno (figura 14). Muitos dos polímeros apresentam longas cadeias de átomos de carbono como o polietileno. (Gooship 2004)

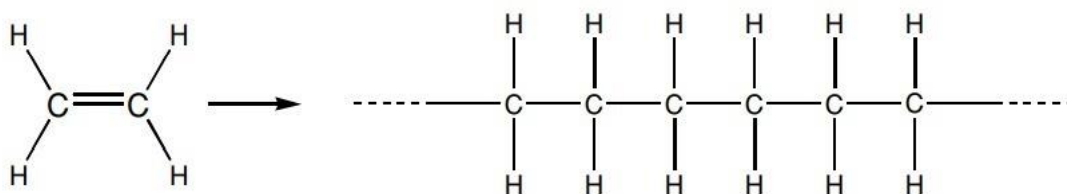


Figura 14 - Molécula do Polietileno (Gooship 2004)

Na polimerização os polímeros se fundem em linhas e formam macromoléculas sem que nenhum subproduto seja produzido como ilustrado anteriormente na figura 34. O número de monómeros contidos em uma macromolécula é referido como grau de polimerização. Se as macromoléculas são compostas apenas por um tipo de monómeros, são chamados de homopolímeros, sendo o poliestireno um exemplo padrão. Se na estrutura de uma

macromolécula apresentar dois ou mais monómeros são chamados de copolímeros como por exemplo o ABS que é constituído por 3 tipos de monómeros: acrilonitrila, butadieno e estireno. (Kulkarni 2010)

A tabela 2 apresenta vários exemplos de moléculas dos polímeros.

Tabela 2 – Exemplo de Moléculas de alguns polímeros (Gooship 2004)

Polímeros	Repetição de Unidades (n)
Polietileno (PE)	$\left(\text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right)_n$
Polipropileno (PP)	$\left(\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right)_n$
Poliestireno (PS)	$\left(\text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} \right)_n$
Poliamida 6 (PA 6)	$\left(\text{C}(=\text{O}) - (\text{CH}_2)_5 - \text{NH} \right)_n$
Poliamida 66 (PA 66)	$\left(\text{C}(=\text{O}) - (\text{CH}_2)_4 - \text{C}(=\text{O}) - \text{NH} - (\text{CH}_2)_6 - \text{NH} \right)_n$
Polietileno Tereftalato (PET)	$\left(\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O} - \text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C}(=\text{O}) - \text{O} \right)_n$
Polidoreto de Vinila (PVC)	$\left(\text{CH}_2 - \underset{\text{Cl}}{\text{CH}} \right)_n$
Resina Epoxy (EP)	$\left(\text{O} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C}(\text{CH}_3)_2 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{O} - \text{CH}_2 - \underset{\text{OH}}{\text{CH}} - \text{CH}_2 \right)_n$
Resina de melamina formaldeído	$\text{H}_2\text{C}=\text{O}$ e $\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3$

2.2.3. Classificação dos Polímeros

Existem muitas classificações possíveis para os polímeros. O termo geral mais utilizado para classificar é quanto ao processo de polimerização, mas existe mais duas classificações úteis que estão intimamente relacionadas, são elas:

- Classificação baseada na estrutura: polímeros lineares, ramificados ou em rede (figura 15).
- Classificações quanto as propriedades: termoplásticos, elastómeros ou termofixos (figura 16).

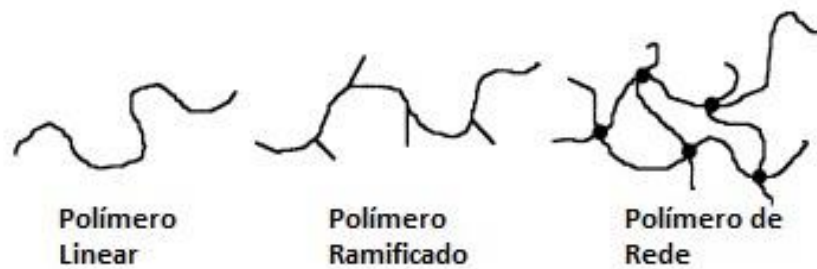


Figura 15 – Estrutura dos Polímeros (Bower 2002)

Um polímero linear é uma cadeia contínua de ligações onde não existe ligações primárias entre cadeias vizinhas e a interação se dá somente através de ligações secundárias.

No caso do polímero ramificado, estes são compostos por cadeias unidas por uma serie de ligações covalentes.

Os polímeros em rede são polímeros que possuem muitas ligações cruzadas formando redes tridimensionais (Gooship 2004).



Figura 16 - Propriedades de tensão para os diferentes tipos de plásticos (Kulkarni 2010)

De seguida apresento uma breve descrição dos tipos de polímeros de acordo com as suas propriedades:

Termoplásticos: são plásticos que podem ser repetidamente aquecidos, derretidos e injetados, como por exemplo, o ABS.

Termofixos: uma vez que estes plásticos são injetados eles formam uma rede química que não permitem uma nova fundição, como por exemplo as resinas.

Elastômeros: são semelhantes aos termoplásticos, embora mais macios e emborrachados em temperatura ambiente, como por exemplo o TPU (Poliuretanos). (Kulkarni 2010)

2.2.4. Termoplásticos

Os termoplásticos representam mais de 70% de todos os polímeros produzidos. Estes têm aspecto de grão ou *pellets*. Os materiais termoplásticos são fundidos por calor sob pressão em um fluido relativamente viscoso e moldados num produto ou uma forma desejável por arrefecimento. Em modo geral oferecem maior resistência ao impacto, fácil processamento e adaptam-se melhor a designs complexos comparando com os termofixos.

Apesar da grande variedade de termoplásticos, estes ainda são categorizados em polímeros amorfos, semi-cristalinos e cristal líquido (LCP), dependendo da conformação ou morfologia da cadeia polimérica. A microestrutura dos termoplásticos altera consoante o aquecimento ou o arrefecimento (figura 17). (Shoemaker 2006)

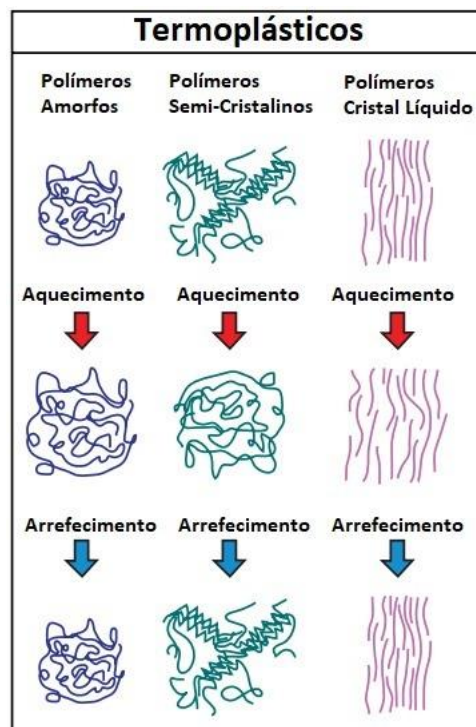


Figura 17 - Microestrutura dos termoplásticos e o efeito do arrefecimento e aquecimento (Shoemaker 2006)

Num polímero amorfo as moléculas são orientadas aleatoriamente e entrelaçadas com outras moléculas, independentemente do estado em que se encontra.

Já nos materiais cristalinos são constituídos por cadeias de polímeros que não possuem grupos moleculares volumosos, ramificações em cadeia ou ligações cruzadas. Tecnicamente não existe

um polímero totalmente cristalino, porque contêm quantidades consideráveis de material amorfo, por isso são classificados como semicristalinos. A orientação molecular é aleatória quando aquecida, mas densamente compactos no seu arrefecimento.

Os polímeros de cristal líquido (LCP) apresentam arranjos moleculares ordenados tanto no estado de fusão como em estado sólido. Estes são caracterizados pelas moléculas rígidas com aspeto laminar que formam as matrizes ou domínios paralelos. (Shoemaker 2006)

Os termoplásticos derretem quando aquecidos e solidificam quando arrefecem, podendo fazer estes processos ciclicamente, o que permite a sua reciclagem. Nos dias de hoje, os termoplásticos são usados em grande parte do nosso quotidiano, onde podemos observar alguns dos exemplos mais comuns usados e as suas aplicações na tabela seguinte (tabela 3). (Gooship 2004)

Tabela 3 - Termoplásticos comuns e as suas aplicações (Gooship 2004)

Termoplásticos	Aplicações
Polietileno de Alta densidade (HDPE)	Embalagens, tubos, tanques, garrafas, caixotes
Polietileno de Baixa densidade (LDPE)	Embalagens, sacolas de supermercado, brinquedos, tampas
Polipropileno (PP)	Tampas, potes de iogurte, malas, tubos, baldes, tapetes, baterias
Poliestireno (PS)	Artigos transparentes, potes de iogurte, embalagens de espuma
Poliamida (PA)	Rolamentos, engrenagens, parafusos, rodas de skate, linhas de pesca
Tereftalato de Polietileno (PET)	Garrafas de bebidas transparentes
Policloreto de Vinilo (PVC)	Embalagem de alimentos, sapatos, pavimento

2.2.4.1. Polipropileno

O polipropileno foi descoberto em 1954 onde adquiriu muito rapidamente uma forte popularidade devido deste polímero apresentar a menor densidade entre os plásticos.

O polipropileno (PP) representa um dos plásticos mais utilizados no mundo com uma grande variedade de produtos e aplicações. Para os polímeros semicristalinos, as propriedades dos produtos de PP dependem estritamente do processo (extrusão, injeção, etc.), onde os fenómenos de orientação e cristalização estão envolvidos (Fambri e Lutterotti 2020).

Considerando o volume de mercado do plástico, o polipropileno ocupa a segunda posição depois da categoria dos polietilenos e deve de aumentar 3% até ao ano 2024, de acordo com o relatório da Ceresana. O sucesso do polipropileno na Europa deriva das propriedades físicas e químicas balanceadas adequadas a diversos fatores, como baixa densidade, excelente estabilidade térmica, boa resistência química, alta cristalinidade e alta rigidez ou dureza com ampla flexibilidade e simplicidade de reciclagem, tornando o PP um material atraente na indústria (Ceresana 2021).

Devido á reologia de fusão plausível e propriedades térmicas, os materiais á base de PP são compatíveis com muita tecnologia de fabricação, e podem ser utilizados na indústria no processo de injeção, sopro, fundição, extrusão, fiação e calandragem (Fambri e Lutterotti 2020).

O polipropileno (PP), é um polímero termoplástico classificado como *commodity* e derivado do propileno ou propeno. A sua fórmula química é (C₃H₆) e o seu processo de produção é realizado através de um catalisador específico que forma cadeias longas e controla a posição do grupo metilo na cadeia polimérica de forma ordenada (Gedel Plásticos 2021).

2.2.4.1.1. Estrutura e Propriedades do Polipropileno

Como foi referido anteriormente o polipropileno é um dos plásticos mais utilizados à escala mundial. Este polímero é obtido através da polimerização do propileno (propeno), um subproduto gasoso da refinação do petróleo. A figura 18 mostra um esquema da refinação do petróleo e a forma de obtenção do propeno (Carvalho 2008).

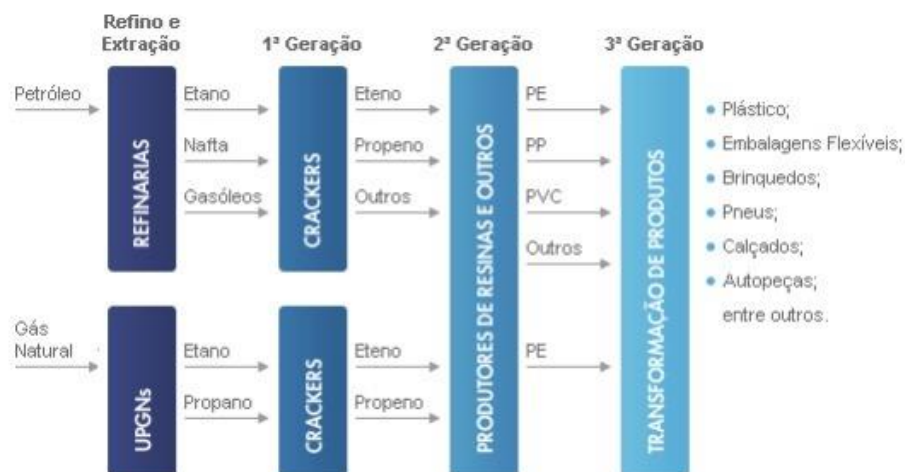


Figura 18 - Esquema da refinação do petróleo (Carvalho 2008)

O polipropileno é um material termoplástico da família das poliolefinas que é produzido por polimerização das moléculas de propileno, que são monómeros de hidrocarbonetos alifáticos insaturados, ou seja, contem dupla ligação do carbono, como podemos visualizar na figura 19.

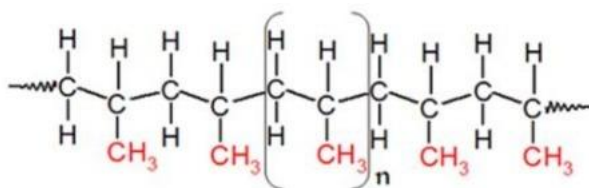


Figura 19 - Estrutura do Polímero (Maddah 2016)

A resistência química do polipropileno apresenta grandes qualidades, como por exemplo: excelente resistência a ácidos diluídos e concentrados, álcool, e a agentes oxidantes. Este polímero possui uma estrutura cristalina com alto nível de rigidez e alto ponto de fusão comparado a outros termoplásticos industriais. Apresentando um alto ponto de fusão, baixa densidade e relativamente uma boa resistência a impactos o PP torna-se ideal para uma vasta gama de aplicações. É possível produzir PP com estruturas morfológicas diferentes usando cargas ou agentes de reforço. (Maddah 2016)

O Polipropileno apresenta três orientações específicas da posição do grupo metilo:

- Polipropileno isostático – os grupos de metilo estão ordenados do mesmo lado da cadeia
- Polipropileno atáctico – não apresentam uma ordem definida (ordem aleatória)

- Polipropileno sindiotático – apresenta uma ordem regular de alternância de sentidos opostos

A figura 20 apresenta os tipos de polipropileno de acordo com a sua taticidade, onde os átomos de carbono são mostrados em vermelho e os de hidrogénio em azul.

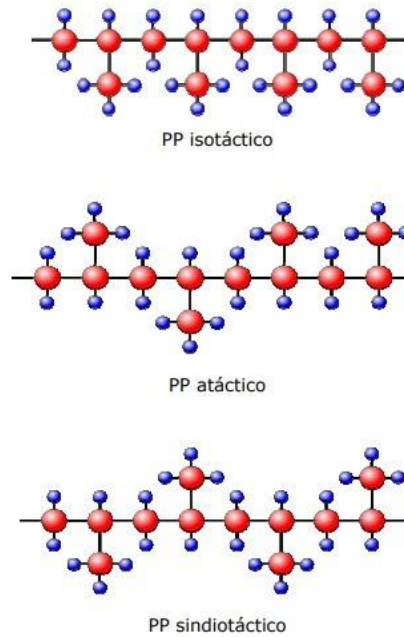


Figura 20 - Configuração do Polipropileno segundo a sua taticidade (Carvalho 2008)

O polipropileno é bastante usado pelas empresas devido às suas propriedades, sendo ele, semirrígido, translúcido, boa resistência ao calor e química, tenaz, e boa resistência à fadiga (Maddah 2016).

2.3. Reciclagem dos plásticos

2.3.1. Origem e aplicação dos plásticos

Nos meios industriais, o termo “plástico” é definido como uma classe de polímeros orgânicos sintéticos que passam pelo estado plástico, ou seja, um estado moldável entre o líquido e sólido, a uma temperatura superior à temperatura ambiente (Calapes 1998). A maioria dos polímeros sintéticos são derivados de combustíveis fósseis, isto é, nafta ou gás natural (Azapagic 2003).

Todo o sec. XX, mas sobretudo a sua segunda metade, pode ser considerado a *Idade do Plástico*. Neste período houve um grande avanço da humanidade contribuindo radicalmente a qualidade de vida das sociedades mais avançadas. A relação entre o custo dos plásticos e as suas propriedades, sobretudo as específicas, a facilidade de processamento e a sua versatilidade, fez com que a incorporação destes materiais em múltiplas aplicações de uso comum e de engenharia fosse determinante, quer substituindo materiais tradicionais, quer induzindo novas instalações até aí impossíveis. Estes materiais apareceram na nossa sociedade consumidora, sendo difícil imaginar nos dias de hoje a sua ausência, visto que, ocupam uma vasta gama de usos em campos tão diversos. Um bom exemplo foi o impacto das embalagens de plástico na saúde pública, permitindo a todos os cidadãos o acesso a alimentos em condições, organolépticas, físicas, químicas e biológicas até então inexistentes ou só acessíveis a uma escassa minoria (Hamad, Kaseem e Deri 2013).

A maioria dos polímeros utilizados atualmente, tais como plásticos, borrachas e fibras, são sintetizados a partir de monómeros químicos derivados do petróleo, na presença de um catalisador e de uma fonte de energia, tipicamente calor. Os monómeros são processados na forma de um fluido ou de uma solução ou emulsão, através de dois processos: condensação (*step growth*) e adição/polimerização (*chain growth*) (Azapagic 2003).

Nas últimas décadas, o crescimento da população mundial, juntamente com a procura de bem-estar e melhoria das condições de vida conduziu ao aumento do consumo de polímeros, principalmente plásticos. Estes materiais são aplicados em sacos, brinquedos, contentores, canalizações, embalagens industriais, condutas de gás, baterias, peças para automóveis, componentes elétricas, entre outras infinitas possíveis utilizações. Na tabela 4 apresentam-se alguns dos usos comuns das principais famílias de termoplásticos.

Tabela 4 - Aplicação dos termoplásticos (Adaptado de (Gondal e Siddiqui 2007)

Tipo de plástico	Aplicações
PEBD	Produtos lácteos e filmes de embalagens de fruta, filmes de estufas, filme de adubo orgânico, sacos de embalagens industriais, contentores para resíduos, grades de plástico, sacos de compras;
PEAD	Embalagens de leite, embalagens de água e sumos de fruta, embalagens de óleo, embalagens de óleo lubrificante, barris industriais, contentores de recolha de resíduos;
PP	Mobiliário de jardim, sacos não-tecido, sacos industriais não-tecido, filmes de embalagem, barris industriais, roupa de laboratório;
PS	Embalagens de alimentos: carne, peixe, queijo, iogurte, fiambre e marisco limpo, pratos rígidos e de espuma, embalagens de bolos, embalagens de aperitivos, embalagens de espuma, caixas de cassetes áudio e cd's, caixas de arrumação, isolamento de edifícios, baldes de gelo, azulejos de parede, tintas, bandejas, copos descartáveis para bebidas quentes, brinquedos;
PET	Embalagens de água e refrigerantes, fibras de tapetes, pastilha elástica, colheres de café, copos para bebidas, embalagens e embrulhos de comida, embalagens seladas termicamente, trens de cozinha, sacos de plástico, embalagens de apertar, brinquedos;
PVC	Embalagens de comida, embrulhos de plástico, caixas para toalhetes de WC, cosméticos, pára-choques, azulejos para o chão, chupetas, cortinas para o duche, brinquedos, barris de água, mangueiras de jardim, estofos de automóvel, piscinas insufláveis.

Segundo Azapagic *et al.* (2003), o polietileno (PE) é mais simples dos polímeros comerciais e constitui o grupo de alcanos mais comercializado. Basicamente, é formado pela abertura da dupla cadeia de moléculas de etileno e sua união em cadeias lineares ou ramificadas. Os produtos de alta densidade (PEAD) têm maioritariamente cadeias lineares, enquanto os produtos de baixa densidade (PEBD) têm um elevado grau de ramificação.

O polipropileno (PP) é produzido do monómero propileno através de um processo de polimerização semelhante ao realizado na produção de polietileno. É um polímero versátil e de baixo custo, o que torna um dos mais atrativos e importantes termoplásticos.

O poliestireno (PS) é vendido em três formas: cristalina, alto impacto (ABS) e expandida (esferovite). São a combinação de baixo custo, facilidade de produção, transparência/fácil coloração e superfície brilhante que tem conduzido ao sucesso de comercialização deste polímero.

O polietileno tereftalato (PET) é produzido a partir de etileno glicol e ácido tereftálico, produzidos, respetivamente, a partir de etileno e para-xileno. É um polímero incolor, rígido e cristalino normalmente utilizado no fabrico de garrafas e embalagens para alimentos.

O policloreto de vinilo (PVC) é formado da polimerização de monómeros de cloreto de vinilo, de acordo com um processo similar ao da produção de PE, PP e OS. É um polímero quimicamente inerte, mas sensível a radiação ultravioleta.

2.3.2. Impacto Ambiental do Plástico

O oceano exerce uma influência profunda como parte da Terra, interagindo com a sua atmosfera, criosfera, terra e biosfera para produzir condições plenas. Também influencia diretamente o bem-estar humano através do fornecimento e transporte de alimentos e recursos, além de proporcionar benefícios culturais e económicos bem como a regulação do conteúdo de gás atmosférico e da distribuição de calor e água pelo planeta (Trinidad 2009).

Estudos realizados pela comunidade científica *World Wide Fund for Nature* (WWF) constataram que anualmente são lançados nos oceanos cerca de oito milhões de toneladas de lixo plástico e seus derivados (WWF 2019). O lixo marinho é todo o material “não orgânico” e duradouro que é descartado, eliminado ou abandonado na costa ou no mar, uma quantidade que daria para cobrir 34 vezes toda a área da ilha norte americana de *Manhattan*, com uma camada de lixo à altura dos joelhos de uma pessoa. O plástico é usado como um material descartável, sendo 75% de plástico produzido é desperdício. Além do impacto que tem na vida marinha, em que os especialistas explicam que a poluição tem consequências preocupantes para o turismo e a pesca, com o setor a perder mais de 61 milhões de euros todos os anos (WWF 2019).

Parte significativa deste desperdício é mal administrada. Resíduos mal geridos são resultados diretos de infraestruturas de administração de resíduos subdesenvolvidas e referem-se ao plástico descartado abertamente nos aterros não controlados. Desses resíduos 87% encontram-se na natureza e transformam-se em poluição de plástico. Um estudo na universidade de Newcastle, na Austrália, sugere que uma pessoa comum pode ingerir cerca de 5 gramas de plástico por semana, o equivalente a um cartão de crédito (WWF 2019).

A revista *Environmental Science and Technology* evidencia que existe a possibilidade de os humanos consumirem entre 39 mil a 52 mil partículas de microplástico por ano. Se incluirmos

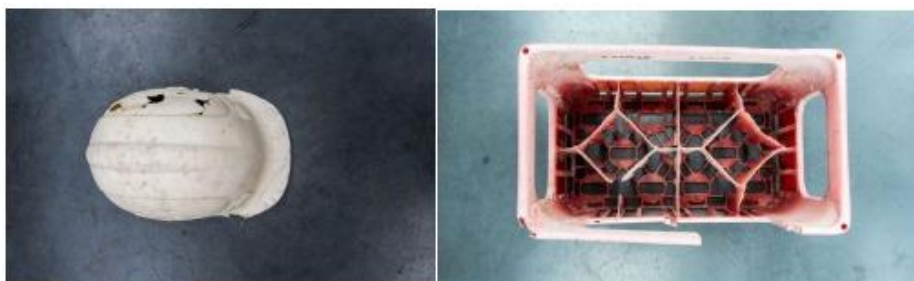
estimativas adicionais relativas a quantidade de microplástico que pode ser inalado, esse número ultrapassa as 74 mil partículas (Gibbens 2019).

Devido aos diferentes formatos e cores, os animais confundem plástico com a comida, causando desnutrição; riscos de emaranhamento e ameaça ao seu comportamento, saúde e existência geral. Estudos demonstram que cerca de 700 espécies encontraram detritos marinhos e 92% dessas interações são com plástico, 17% das espécies afetadas pelo plástico estão em lista vermelha da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN) (Gall 2015).

A acumulação e dispersão de detritos marinhos de plástico é um crescente problema á escala global, que afeta todos os ambientes marinhos. A alta persistência no material plástico, juntamente com uma má gestão do ciclo de vida, alta produção, concentração populacional no litoral e conseqüentemente descarte de grandes volumes de plástico mal gerido pode entrar nas correntes de água e acumular nos oceanos e ao longo da costa, para onde são transportadas pelo vento e pelas correntes (Katsuhiko, et al. 2011).

The Great Pacific Garbage Path (GPGP), ou ainda denominada de grande Deposito de Lixo do Pacífico trata-se da maior acumulação de lixo no oceano no Mundo e esta localizada entre o Havai e a Califórnia. GPGP é a maior de cinco zonas de acumulação de plástico nos oceanos no mundo. Estima-se que 1,15 a 2,41 milhões de toneladas de plástico entrem no oceano a cada ano a partir de rios. Mais de metade desse plástico é menos denso que a água, o que significa que não afundara quando encontrar o mar (Caryl-Sue 2019).

Os plásticos mais resistentes e mais flutuantes mostram resiliência no ambiente marinho, permitindo que sejam transportados por longas distâncias, como podemos observar na imagem 21.



*Figura 21 - Resíduos de plástico encontrados no GPGP A) Capacete de obras produzido em 1989
B) grade de garrafas produzida em 1977 (Cleanup 2017)*

Uma vez que estes plásticos entram na corrente, é improvável que deixem a área até se degradarem em microplásticos devido á exposição solar, das ondas e da vida marinha.

À medida que mais plásticos são descartados no meio ambiente, a concentração de microplásticos no GPGP apenas continuara a aumentar. A maioria dos plásticos recuperados é feito de polietileno (PE), polipropileno (PP) ou nylon proveniente das artes de pesca abandonadas (redes e cordas em particular). Variando o tamanho, de pequeno a maiores objetos, estes detritos encontrados no GPGP são caracterizados em 4 classes de tamanho:

- Microplásticos (entre 0.05 a 0.5 cm)
- Mesoplasticos (entre 0.5 a 5 cm)
- Macroplásticos (entre 5 a 50 cm)
- Megaplasticos (superior a 50 cm)

Divididos em 4 tipos: plásticos rígidos, folha ou película de plástico; linhas de plástico, cordas e redes de pesca; plásticos de pré-produção (cilindros, esferas ou discos); fragmentos feitos de materiais expandidos; sendo que 46% da massa total é composta por redes de pesca (Cleanup 2017).

2.3.3. Plásticos, Ações e o Desenvolvimento Sustentável

Existe uma crescente consciencialização do público sobre a necessidade de produção e consumo sustentáveis. Isso incentivou as comunidades locais a organizar a recolha de materiais recicláveis, incentivou alguns fabricantes a desenvolver produtos com conteúdo reciclado e outras empresas para entender a essa procura pública. As atividades de limpeza das praias são um dos contributos possíveis para combater os detritos marinhos plásticos nas águas costeiras e nos oceanos e contribuem no aumento da participação do público nos processos de responsabilidade ambiental. Esta tornou-se não só uma prática nacional, mas a nível mundial, atualmente são inúmeras as ações de sensibilização, limpeza e recolha de resíduos para reciclagem e reaproveitamento. Várias partes interessadas estão empenhadas em abordar a questão da poluição por plásticos marinhos em diferentes níveis institucionais e a disposição geral de enfrentar o problema que prevalece em todos os setores (Tessnow-von e Le Billon 2019).

Segundo Azapagic *et al.* (2003), o facto de apenas 4% das reservas mundiais de petróleo serem utilizadas na produção de polímeros e utilizado como argumento de que não contribuem para a degradação do ambiente. No entanto 4% representa um recurso valioso.

A utilização dos recursos deve ser realizada de forma sustentável, isto é, de forma a satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações vindouras satisfazerem as suas próprias necessidades (Brundtland 1987). Assim, tendo em conta a consciência que não é possível parar a produção de resíduos e que o consumo de recursos aumenta como consequência do estilo de vida atual, difícil de alterar, é importante a implementação de estratégias de gestão de resíduos e integração de recursos.

O enorme desenvolvimento da indústria e do consumo de plásticos conduziu á geração um elevado volume de resíduos, resultantes das atividades domésticas, urbana e industrial. Dito isto, podemos observar que os antigos métodos de eliminação, têm-se revelado incapazes de lidar com a quantidade e qualidade destes resíduos. O papel dos plásticos como materiais predominantes em produtos não reutilizáveis, nomeadamente embalagens, aumenta-lhes circunstancialmente a visibilidade e a perceção de causarem impactos ambientais negativos. Peças de plástico para serem utilizadas apenas uma vez parece a muita gente um desperdício irrazoável de materiais de qualidade. Os plásticos tornaram-se assim, perante a opinião pública, um dos principais responsáveis pela poluição ambiental. Este tema sensibilizou a classe política, o que tem trazido legislação limitativa da utilização de plástico, nomeadamente em embalagens. Podendo assim concluir que, por um lado, a necessidade de diminuir o volume de resíduos de plásticos gerados e, por outro, o potencial económico que esse volume representa, gerando assim a tentativa de reutilizar peças, de reduzir a quantidade de material empregue na sua produção e de recuperar valor a partir dos resíduos após utilização.

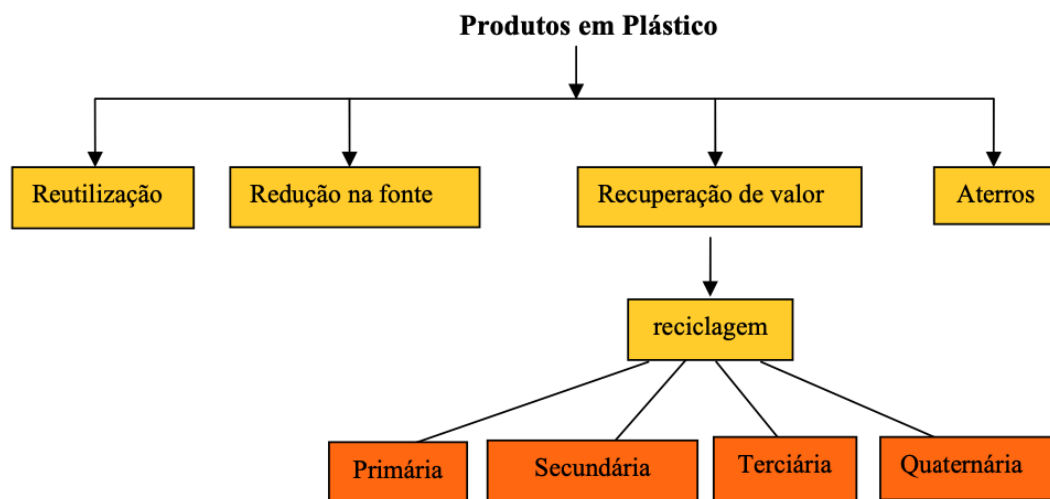


Figura 22 - Alternativas para redução do impacto ambiental de materiais plásticos

A reutilização dos objetos que nos servimos no dia a dia é seguramente uma das formas mais sensatas de diminuir a quantidade de resíduos, sendo que existe um número de vezes que um objeto pode ser reutilizado. No que respeita aos produtos feitos de plástico, há ainda o problema adicional do baixo valor residual que lhes é normalmente atribuído não induzir a sua reutilização.

A redução na fonte já se pratica há bastante tempo, sendo esta a prática corrente em qualquer projeto de engenharia. Como por exemplo a fabricação de novas embalagens de plástico, com menor peso, capazes de conter a mesma quantidade de produto, em resultado de designs e materiais inovadores. (Bledzki 1999)

A Packforsk, uma empresa de consultadoria sueca, publicou um estudo que analisa a energia envolvida na produção e utilização de uma embalagem de plástico em função da quantidade de material utilizado na sua produção (Sorås, Erlov e Lofgren 2000). Este estudo apresenta um modelo que quantifica o impacto ambiental correspondente, representado graficamente, de uma forma simplificada, na figura 23.

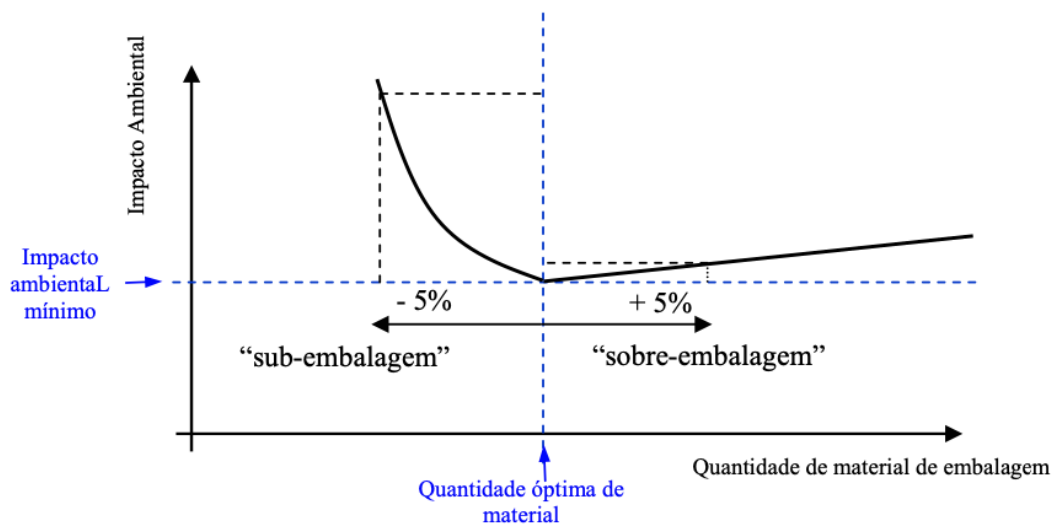


Figura 23 - Impacto ambiental de uma embalagem vs material usado no seu fabrico

O modelo da figura mostra o impacto ambiental adicional devido ao excesso ou défice de material plástico utilizado na embalagem, situação esta que pode causar acidentalmente a perda do conteúdo. A curva que descreve o impacto causado por “sobre-embalagem” é linear, enquanto a da correspondente à “sub-embalagem” é exponencial, dado que a energia envolvida na produção dos conteúdos, designadamente de alimentos, é normalmente muito superior à da produção dos materiais plásticos. Como é evidente a redução na fonte não permite, por si só, resolver o problema dos resíduos sólidos de materiais plásticos.

Uma outra alternativa para diminuir o impacto dos resíduos de materiais plásticos é a deposição em enterros sanitários. Esta prática permite resolver inúmeros problemas de eliminação de resíduos, nomeadamente resíduos sólidos urbanos (RSU). Esta alternativa porem tem limitações, tais como, falta de espaço em concentrações urbanas, onde se produz maior quantidade de resíduos sólidos, e a dificuldade de convencer as populações locais a aceitar a presença de enterros ao pé da porta.

A quarta alternativa como mostrado na figura anterior é a recuperação de calor. Nos conceitos de engenharia atuais, as soluções para aproveitamento de resíduos, deverão conduzir idealmente a materiais de propriedades semelhantes as das matérias-primas que os originaram. Dito isto, será possível a sua utilização em produtos iguais ou semelhantes aqueles que estiveram na sua origem. Esta solução permite o desenvolvimento de um ciclo virtuoso de utilização/recuperação de materiais. Os mecanismos mecânicos associados ao ciclo de vida de um produto contribuem para a degradação e contaminação dos materiais que o constituem, comprometendo a aplicação generalizada do conceito expresso acima. Por isso, é necessário utilizar vários processos alternativos para reciclar/aproveitar o valor dos plásticos, consoante as características do produto e dos respetivos resíduos (Hobbs 2000).

2.3.4. Identificação e separação de resíduos plásticos

Um estudo realizado em 2017 diz que Portugal consome: 721 milhões de garrafas de plástico; 259 milhões de copos de café descartáveis; mil milhões de palhinhas; 40 milhões de embalagens descartáveis (*take away* ou *fast food*) e 10 milhões de beatas de cigarros. É importante entender as características que diferenciam estes plásticos e como caracterizá-los de forma a saber o que é possível criar através deles (Martins e Sobral 2011).

A reciclagem de plásticos exige uma separação dos plásticos por tipo de material, seja por razões técnicas, de saúde ou ambientais.

A identificação de plásticos nos centros de receção de resíduos pode ser facilmente realizada, manualmente, através da identificação dos seis grupos de plásticos, através do sistema de código criado pela decisão nº 97/129/CE, de 28 de janeiro, nos termos do artigo 8º da Diretiva nº 94/62/CE.

De modo a facilitar a identificação dos plásticos, cada um deles se encontra identificado por um símbolo e número capaz de diferenciar o tipo de plástico. Isto facilita a sua reciclagem e

separação dos materiais no momento de recolha por parte do consumidor e entidades de reciclagem. Este sistema, como podemos observar na figura seguinte, foi criado em 1988 pela *American Society of the Plastics Industry* (SPI) (Azapagic 2003).



Figura 24 – Identificação dos termoplásticos na reciclagem (Tetra Júnior 2020)

Esta simbologia é empregada em bastantes países sendo diferente na Alemanha, onde a numeração vai de um a oito, sendo que o número sete corresponde ao ABS. Esta simbologia permite uma melhor separação dos materiais plásticos. A separação é a primeira etapa do processo de reciclagem e então com esta simbologia ajuda a perceber melhor as propriedades físicas dos polímeros, sendo eles numerados por números diferentes. (Química Nova Escola 2003)

Determinados polímeros, como garrafas de PET podem ser facilmente identificadas, no entanto alguns polímeros são semelhantes e difíceis de diferenciar, mesmo para um especialista ou engenheiro de polímeros. Para isso, são necessárias técnicas de identificação mais avançadas.

Em 1991, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), editou um Sistema abrangente, baseado em abreviações recomendadas pela *International Organization for Standardization* (ISO), que inclui mais de 100 polímeros e combinações (Azapagic 2003).

2.3.4.1. Reciclagem do Polipropileno

A natureza e a quantidade dos diferentes tipos de polímeros estão dependentes dos consumidores e do seu uso industrial, que podem ter impacto económico elevado em indústrias de reciclagem. Os plásticos presentes em maior quantidade incluem o PEAD, o PEBD, o PP, o PS e o PET sendo estes o foco principal da reciclagem, seja de forma isolada, aditivados, combinados ou reforçados em compósitos.

Os produtos feitos de materiais reciclados são geralmente baratos e de qualidade moderada, então é necessário um conhecimento aprofundado dos materiais em questão para que se encontre aplicações apropriadas e uteis de modo que os reciclados possam substituir, parcialmente ou integralmente, os polímeros virgens (Strapasson 2004).

Como foi ilustrado anteriormente, o PP é facilmente reconhecido através do símbolo triangular com o número 5 dentro e a sua nomenclatura, como podemos observar na figura 25.



Figura 25 - Símbolo da Reciclagem do Polipropileno (Isso Significa s.d.)

O polipropileno é um material com alguma facilidade para ser reciclado o que permite que cada vez mais seja reciclado. A sua reciclagem é viável e traz grandes benefícios ambientais e económicos para empresas e para a sociedade. O seu processo de reciclagem passa por introduzir o material em contacto com temperaturas altas, tornando-o assim, maleável para ser transformado em outros produtos. Para melhorar essa reciclagem antes de derreter o resíduo, devemos ter em atenção a separação para evitar contaminação de materiais, e a etapa da

moagem, que vai facilitar e uniformizar o material. Com estas etapas o produto pode receber vários tipos de corantes e ser injetado nos moldes que vão dar um novo futuro ao polímero.

Para além da reciclagem de polipropileno permitir a preservação do meio ambiente promove também a redução de custos da matéria-prima (Primeplas 2021).

2.3.5. Reciclagem de resíduos plásticos

Azapagic et al. (2003) consideram como opções disponíveis para a valorização de polímeros a reciclagem mecânica, a reciclagem química e a valorização energética.

A reciclagem mecânica é baseada nos princípios de trituração, aquecimento e extrusão para transformar os plásticos em novos produtos. Por sua vez, a reciclagem química baseia-se em processos químicos para converter resíduos em produtos úteis, como monómeros, utilizados na produção de novos plásticos, combustíveis ou produtos químicos básicos utilizados na produção química.

Uma outra opção de reciclagem é a valorização energética que permite gerar calor e/ou eletricidade por incineração direta dos polímeros, por exemplo, em incineradores municipais dedicados (RSU) ou por substituição de outros combustíveis, como fornos a altas temperaturas em indústrias, em fornos de cimenteiras ou centrais termoelétricas.

Segundo Brognoli (2006), a valorização de polímeros pode ser classificada em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária.

A reciclagem primária, ou reprocessamento, é um processo em que se convertem resíduos termoplásticos, dentro da indústria transformadora, em produtos com características de desempenho muito semelhantes as dos produtos fabricados a partir das resinas virgens correspondentes. Aplica-se aos materiais resultantes do próprio processo de transformação (peças defeituosas, rebarbas, jitos etc.) cujo grau de contaminação e de degradação é normalmente baixo, e justifica-se essencialmente pelas vantagens económicas e benefícios ambientais. (Hamad, Kaseem e Deri 2013)

A reciclagem secundária, ou reciclagem mecânica, é talvez o processo mais falado e conhecido no mundo, onde o plástico é moído e depois reprocessado e composto para produzir um novo componente que pode ou não ser o original utilizado. Este método é aquele que a opinião pública associa na prática o termo reciclagem, exige sempre um passo de separação e de limpeza. O material recuperado tem normalmente um certo grau de contaminação de mistura e

alguma degradação. No caso dos plásticos a sua viabilidade económica é fortemente limitada pelo reduzido custo dos polímeros virgens, resultante do baixo preço do petróleo, a sua principal matéria-prima e fonte de energia para a produção. A reciclagem secundária pode contribuir para o desenvolvimento de espírito cívico das populações através de campanhas de recolha seletiva voluntarista, para além de ser apoiada por via legislativa e por incentivos financeiros (Hamad, Kaseem e Deri 2013).

A reciclagem terciária, reciclagem química, térmica ou biológica, é um método de tratamento dos constituintes orgânicos dos lixos, excepcionalmente RSU, por processos termoquímicos como a pirolise, ou por conversão química ou biológica, obtendo-se novas substâncias químicas, bem como gases e óleos combustíveis. No caso dos plásticos, podem também obter-se monómeros e usá-los na produção de novos polímeros. Nos últimos anos tem sido colocado no mercado embalagens de plástico, nomeadamente sacos de polietileno, que se podem degradar em anidrido carbónico e água em algumas semanas, através de aditivos que catalisam a ação de agentes biológicos naturais (Hamad, Kaseem e Deri 2013).

A Reciclagem quaternária, ou Incineração tem como objetivo queimar o plástico em incineradoras especiais, gerando calor que pode ser transformado em energia térmica ou elétrica, em virtude do elevado valor calorífico dos plásticos. Esta queima gera gases tóxicos que contaminam violenta o meio ambiente, exigindo assim a utilização de filtros especiais de elevado custo (Hrebynyuk 2010).

2.3.6. Reciclagem Mecânica

A separação dos polímeros é particularmente importante na reciclagem mecânica porque o processamento de materiais misturados resulta na produção de um reciclado de baixa qualidade, o que limita o número de aplicações. Como tal, a reciclagem mecânica é mais apropriada para resíduos plásticos pouco contaminados, nomeadamente resíduos de embalagens (Azapagic 2003).

A reciclagem mecânica de mistura de resíduos começa por um processo de triagem manual. Esta etapa inicial implica elevados custos de exploração e nem sempre é atingido o grau de eficiência de separação, necessário para satisfazer os objetivos de qualidade pretendidos.

Este método de reciclagem pode ser realizado por diferentes processos como a extrusão, injeção, termoformagem ou moldagem por compressão. Dependendo da origem do resíduo

plástico pode incluir diferentes etapas como: triagem e separação dos tipos de plástico, moagem, lavagem, aglutinação, secagem, processamento por extrusão e transformação do plástico num produto acabado (Brognoli 2006).

2.3.6.1. Moagem

As embalagens que conhecemos nas diversas formas são produzidas a partir de material granulado, razão pela qual os resíduos plásticos são facilmente convertidos em fragmentos que sejam, tanto quanto possível, semelhantes aos que lhe deram origem (Brandrup 1999).

Depois de separados os plásticos são triturados em moinhos de facas rotativas ou moinhos de martelos, que vai permitir acomodar melhor o material no equipamento de processamento, como a extrusora ou injetora. É importante que o material moído apresente dimensões uniformes para que ocorra também uma fusão uniformemente. O pó proveniente da moagem é inconveniente, pois funde antes e não facilita o escoamento do material nos equipamentos de processo (Spinacé e Paoli 2005).

2.3.6.2. Lavagem

Este processo é entendido como a descolagem e separação de sujidade aderente aos resíduos plásticos reprocessados (Brandrup 1999). É uma operação molhada que pode ser organizada em três estágios: encharcamento/amaciamento, libertação de sujidade do plástico por circulação e separação da sujidade do plástico lavado.

O amaciamento consiste na separação da sujidade resistente, requerendo longos banhos ou circulação intensiva. Este ocorre geralmente em tanques com agitação mecânica, abertos ou fechados, ou em parafusos sem fim a baixa velocidade.

Já no caso da libertação de sujidade das partículas de plástico é conseguida por intensiva circulação do triturado e da solução de lavagem. O equipamento utilizado neste estágio é uma máquina de lavar turbo ou fricção.

No último estágio temos a separação da sujidade do plástico lavado onde os sistemas são projetados para remover a sujidade mineral por sedimentação da água de lavagem. A operação decorre em tanques de sedimentação, hidroclones, clarificadores estratificados ou

concentradores. A separação da sujidade sólida pode também ocorrer por adição de agentes precipitantes ou floculantes.

As eficiências destas operações dependem da quantidade de gordura. Consoante o destino final dos plásticos reciclados, a existência de resíduos de gordura pode causar defeitos de qualidade pela formação de bolhas., como no caso de filmes destinados para a produção de sacos do lixo. Pode ser necessária para a remoção de gordura a utilização de soluções de detergente e aquecimento (Brognoli 2006).

2.3.6.3. Secagem

Este processo tem como objetivo reduzir o teor de humidade do plástico já lavado. A humidade adere prioritariamente à superfície do plástico, razão pela qual, quanto maior a superfície do material maior é o seu teor de humidade (Brandrup 1999).

Brognoli (2006) afirma que a secagem do material é importante para alguns materiais, como por exemplo, polímeros, poliéster ou poliamidas, que podem sofrer hidrólise durante o reprocessamento. O resíduo de detergente pode agir como catalisador de hidrólise e aumentar a degradação do plástico.

Os plásticos podem ser secos por processos mecânicos ou térmicos. No processo mecânico a humidade é removida por força gravítica ou inércia. Na secagem térmica são utilizados três mecanismos: condução térmica, convecção e radiação. Os equipamentos de secagem resumem-se a sistemas de transporte de ar quente, conduzido por centrifugação ou contracorrente (Brandrup 1999).

2.3.6.4. Extrusão

A extrusão é utilizada na composição e processamento de plásticos, o que permite a produção de produtos semiacabados, como o granulado na indústria de reciclagem, ou produtos reciclados, como tubagens e sacos (Brandrup 1999). Na sequência das etapas anteriores referidas na reciclagem mecânica, a extrusão aplica-se na produção de granulado.

O processo consiste na fusão, por fricção, do plástico triturado, depois de seco. O material fundido é introduzido numa forma perfurada, obtendo-se granulado.

2.3.6.5. Critérios de qualidade dos plásticos reciclados

É desejável que o reciclado tenha propriedades e qualidades próximas do plástico virgem. No entanto, a maioria dos plásticos reciclados mecanicamente tem propriedades inferiores as do material virgem. Estes polímeros são, assim, destinados a aplicações menos exigentes ou misturados em menor quantidade com o polímero virgem. Dependendo do material e da sua aplicação, aceita-se a adição de 15% a 30% de material reciclado ao material virgem, sem prejuízo sério das suas propriedades mecânicas (Azapagic 2003).

Uma das barreiras à reciclagem é a presença de aditivos, utilizados para alterar as propriedades dos polímeros, tais como, a cor ou a estabilidade térmica. A existência de uma grande variedade de aditivos, alguns dos quais tóxicos e ambientalmente perigosos, tornam mais difícil a reciclagem dos polímeros. Muitos dos polímeros utilizados na construção civil e na indústria automóvel contem retardantes de chama contendo cloro, bromo, fosforo ou trióxido de antimónio, que constituem ameaças para o ambiente, saúde e segurança (Azapagic 2003).

Outra peculiaridade dos plásticos é o facto de normalmente não serem compatíveis. Por outras palavras, durante o processo de reciclagem separam-se em duas fases fundidas e permanecem separados no estado solido. Esta deterioração pode ser reduzida quando estão em causa pequenas quantidades de um polímero diferente do outro. Este pode ser um problema quando os polímeros são provenientes de RSU, porque o nível de contaminação é maior (Brandrup 1999).

3. Trabalho Experimental

Neste capítulo, será abordado o material utilizado, os meios utilizados para a realização dos provetes de teste, incluindo sua preparação e obtenção, além de uma breve definição e execução dos ensaios mecânicos e térmicos.

3.1. Material utilizado

O polímero utilizado para a realização deste estudo foi o polipropileno (PP), com a referência ISPLEN PB 180 G2M (ficha técnica no anexo I). Sendo este um copolímero heterofásico de alta fluidez, caracterizado por suas excelentes propriedades de fluxo e seu bom equilíbrio de propriedades mecânicas: resistência ao impacto e rigidez. Ele é especialmente adequado para aplicações de moldação por injeção de produtos com parede fina. O material apresenta uma tendência muito baixa de deformação e é utilizado em produtos onde a estabilidade dimensional é importante. Para além das suas boas propriedades mecânicas e térmicas, existe uma diversa aplicação deste material, como por exemplo utensílios domésticos e de lazer, caixas de armazenamento, brinquedos, desportos, automóveis, embalagens, etc. Na tabela 5 podemos observar as suas principais características.

Tabela 5 - Propriedades do PP ISPLEN PB 180 G2M

Propriedades	Valor
Gerais	
Índice de Fluidez (g/10 min) (230 °C; 2,16 kg)	20
Densidade (kg/m ³)	905
Mecânicas	
Módulo de Flexão (MPa)	1250
Força de Impacto Charpy a 23 °C (kJ/m ²)	6
Térmica	
Temperatura de deflexão térmica 0,45 MPa (°C)	88

3.2. Preparação dos materiais e meios utilizados para a realização dos provetes

Neste trabalho experimental, foram estabelecidos dois casos de estudo. O primeiro caso de estudo aborda o reprocessamento consecutivo do polipropileno virgem. O polipropileno virgem é injetado numa máquina de injeção por moldação, resultando num provete (produto final), que é reciclado num moinho convencional e novamente inserido na máquina de injeção para ser reutilizado na produção de novos provetes. Esse processo é repetido em cinco ciclos consecutivos. A figura 26 representa o processo utilizado no primeiro caso de estudo.

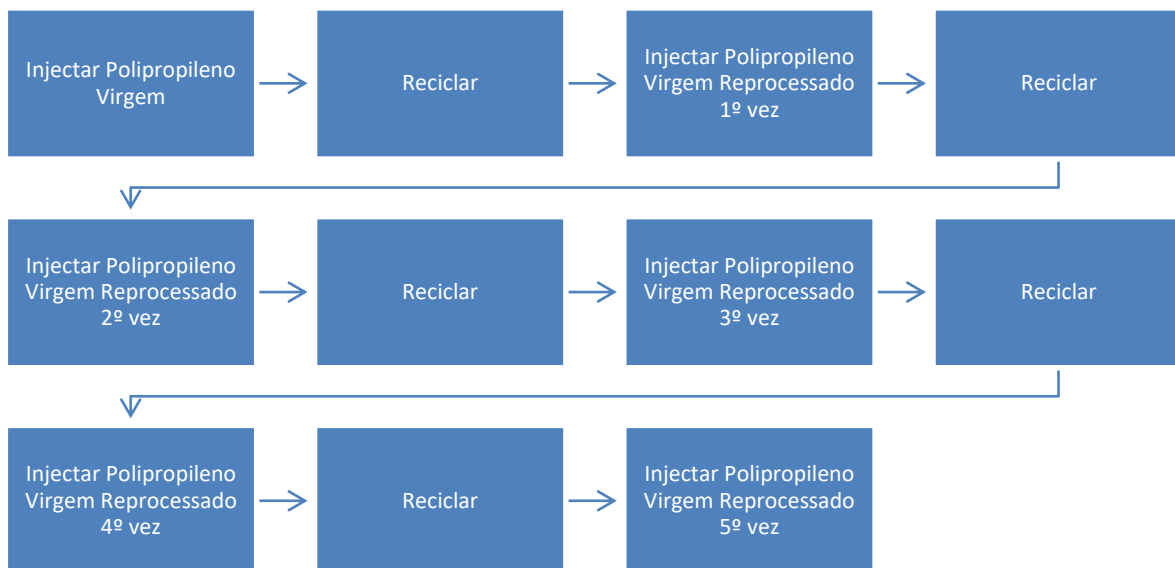


Figura 26 - Processo do primeiro caso de estudo

No segundo caso de estudo foi utilizado o mesmo processo descrito anteriormente, mas reciclado somente uma vez e o mesmo PP virgem, ou seja, desta vez adicionaram-se ao PP virgem diferentes percentagens de material reciclado (5%, 10%, 20% e 30%). Esse material reciclado é proveniente de polipropileno virgem reciclado uma única vez.

A figura 27 retrata a composição utilizada no segundo caso de estudo.

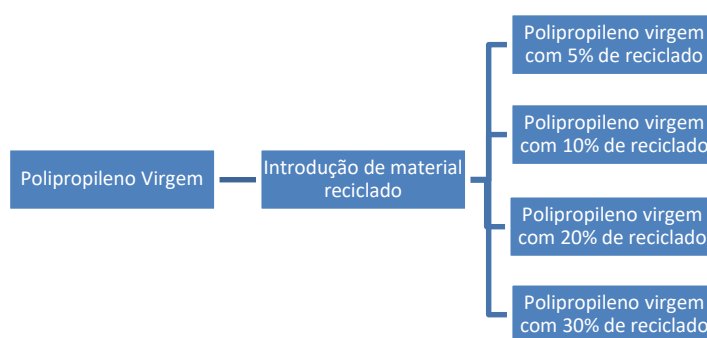


Figura 27 – Processo do segundo caso de estudo

Para uma fácil leitura e interpretação, a tabela 6 apresenta a nomenclatura utilizada para todas as composições estudadas de polipropileno natural e polipropileno reciclado.

Tabela 6 - Nomenclatura das composições utilizadas

Nomenclatura das amostras	Amostras (massa)
Virgem	Polipropileno Natural/Virgem
1X	Material virgem reciclado uma vez
2X	Material virgem reciclado duas vezes
3X	Material virgem reciclado três vezes
4X	Material virgem reciclado quatro vezes
5X	Material virgem reciclado cinco vezes
V5%	Polipropileno virgem + 5% Polipropileno reciclado apenas uma vez
V10%	Polipropileno virgem + 10% Polipropileno reciclado apenas uma vez
V20%	Polipropileno virgem + 20% Polipropileno reciclado apenas uma vez
V30%	Polipropileno virgem + 30% Polipropileno reciclado apenas uma vez

Para a realização dessas configurações, utilizou-se o molde disponível nos laboratórios de Engenharia da ESTG. Com o apoio da MEGATECH Industries, foi possível utilizar a sua máquina de injeção (DEMAG ERGOTECH 50TN), em conjunto com o moinho utilizado para a reciclagem dos materiais, conforme a figura 28.



Figura 28 - Equipamentos utilizados: a) Moinho industrial; b) Molde de injeção de provetes da ESTG; c) Máquina de injeção de 50 Toneladas

Durante a preparação dos materiais foi mantido o moinho sempre limpo e seco para garantir que o material obtivesse resultados mais coesos sem contaminações. O material foi sempre armazenado em caixas identificadas com a sua composição. No segundo caso de estudo, que envolvia uma percentagem de reciclado, utilizou-se uma balança para realizar a mistura de forma precisa.

3.3. Preparação e obtenção dos provetes de teste

Para a execução dos diferentes ensaios mecânicos foi necessário uma preparação previa dos provetes respetivos, seguindo as normas específicas para cada tipo de ensaio. No caso de materiais poliméricos, a norma mais adequada e amplamente utilizada para obter resultados precisos é a norma ASTM D638-10 (2014). A norma recomenda a utilização de um provete do tipo I, cuja representação geométrica pode ser observada na figura 29.

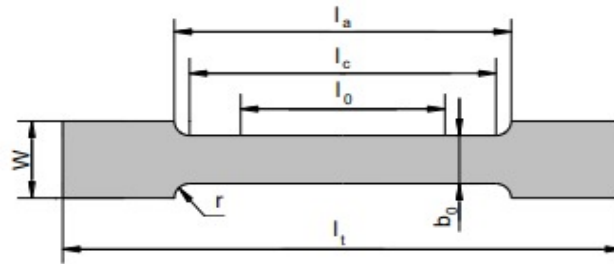


Figura 29 - Representação esquemática do provete de tipo I, de acordo com a norma ASTM D638-10 (2014); b_0 - largura da seção estreita do provete; l_c - comprimento da seção estreita do provete; W - largura global; l_t - comprimento total; l_o - o comprimento de referência; l_a - distância entre amarras; r - raio do boleado

Através da tabela 7 é possível consultar os valores das dimensões representadas da figura anterior.

Tabela 7 - Valores numéricos associados as dimensões de um provete tipo I, de acordo com a norma ASTM D638-10 (2014)

b_0 (mm)	l_c (mm)	W (mm)	l_t (mm)	l_o (mm)	l_a (mm)	r (mm)
13	57	19	165	50	115	76

Estes provetes foram obtidos através de uma máquina de injeção, na qual os parâmetros foram definidos e ajustados. De forma sucinta consistiu em colocar o molde na máquina e fazer as ligações da água, para arrefecer o molde enquanto produz os provetes. Para alcançar um processo estável, foram realizados ajustes adicionais no processo de injeção, como a força de fecho, curso dos extratores e número de extrações, velocidade de abertura e fecho do molde, entre outros.

Em seguida, tanto no início quanto na troca de material, foram realizadas diversas tarefas de limpeza da tremonha, tubagem e máquina, a fim de evitar qualquer contaminação do material. De seguida o material era colocado na tremonha sempre com a sua devida identificação para dar início ao processo de injeção.

Para o ajustar as variáveis do processo, como as temperaturas na zona da alimentação, transição e homogeneização no fuso, foram então ajustadas entre 185°C a 200°C. A matéria-prima foi injetada gradualmente começando com pouca quantidade até atingir uma compactação adequada que resultou de 95,2 mm na dosagem do fuso e uma almofada de 1,8 mm.

A velocidade de injeção foi definida em 15 mm/s e 30 Bar de 2ª pressão durante 4 segundos. Após alguns ciclos de ajuste no processo, foi possível alcançar um ciclo de 41,5 segundos por moldação. Os parâmetros de injeção foram sempre os mesmos para todas as amostras.

Após as primeiras injeções com o material virgem, nas quais a maior quantidade de provetes foi produzida, o material foi introduzido no moinho para reciclar e retornou novamente á máquina, sendo este processo repetido várias vezes. Após uma grande obtenção de provetes virgem, produziu-se amostras com 5%, 10%, 20% e 30% de material reciclado.

O material injetado com o PP virgem não apresentou defeitos ou dificuldades durante a injeção. No entanto, foi observado que, à medida que a quantidade de material reciclado aumentava nas peças, maior o número de defeitos/imperfeições de acabamento e injeção observados. Como resultado, algumas peças apresentaram rebarbas, empenos e até mesmo falta de material.

3.4. Definição e Realização dos Ensaios Mecânicos e Térmicos

Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho foram realizados ensaios mecânicos e térmicos para a caracterização dos provetes obtidos, nomeadamente, ensaios de dureza, tração, flexão, Análise Mecânica Dinâmica (DMA), Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC), Índice de Fluidez (MFI) e Densidade. Neste subcapítulo serão apresentados os ensaios adotados para a caracterização dos provetes produzidos.

3.4.1. Dureza SHORE

A dureza Shore é um ensaio que avalia a dureza superficial de polímeros e elastómeros. Esta avalia a resistência relativa á indentação, a qual varia o tempo, principalmente porque os materiais medidos apresentam grande resiliência, ou seja, têm a capacidade de absorver energia e adaptar-se à deformação.

Neste ensaio, o durómetro mede a resistência à penetração através de um indentedor ao qual é aplicada uma força, perpendicularmente á superfície de um material. Esta máquina apresenta um sistema de leitura que converte o deslocamento vertical do penetrador num valor de dureza Shore numa escala de 0 a 100 Shore (Figueiredo 2022).

Segundo a norma ISO 868, a amostra tem de ter a superfície plana e uma espessura de pelo menos 6mm. Para cada amostra são realizados cinco indentações, as quais devem ser efetuadas a uma distância de pelo menos 12 mm da margem da amostra e com 6 mm entre cada ponto de análise.

O ensaio de dureza Shore D foi realizado no Laboratório de Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria. O equipamento utilizado da BAREISS é apresentado na figura 30.



Figura 30 - Equipamento de dureza Shore D

Neste ensaio foi utilizado uma carga de 5 kg e foram medidos 3 pontos por provete com uma distância entre si de 12 mm. A amostra foi de 5 provetes por material. De acordo com a ficha técnica do material, o valor do ensaio de dureza Shore D do polipropileno virgem é de 62 em T_0 (valor após a queda do indentedor).

3.4.2. Ensaio de Tração

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga progressiva uniaxial de tração nas extremidades da amostra a ensaiar, podendo ser levada á rutura, enquanto em simultâneo é registada a deformação longitudinal do material.

Este processo é utilizado para a caracterização de propriedades mecânicas de materiais metálicos e poliméricos, permite obter a curva tensão/deformação revelando o comportamento do material durante as várias fases do ensaio. Isto permite avaliar múltiplas propriedades mecânicas dos materiais, de onde se destacam as seguintes: tensão de rotura, tensão de cedência, modulo de elasticidade, extensão total (Biopdi 2023).

O ensaio de tração foi realizado na máquina ZWICK Z100 do Laboratório de Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria, sendo este acompanhado pelo técnico responsável do equipamento.

A figura 31 ilustra a máquina utilizada juntamente com um ensaio a decorrer.



Figura 31 - Equipamento utilizado a realizar um ensaio

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma carga de 10KN e uma velocidade de travessão de 50mm/min.

Foram utilizadas uma amostra de cinco provetes para cada composição de material. A geometria dos provetes e os parâmetros de ensaio seguiram o indicado da norma ASTM D638-02.

Após todos os provetes terem sido ensaiados, considerou-se uma curva típica de cada um dos materiais, para proceder á análise de resultados.

3.4.3. Ensaio de Flexão em 3 pontos

A flexão é um tipo de sollicitação bastante comum em aplicações estruturais. São importantes para o controlo de qualidade e para avaliar o desempenho dos materiais plásticos quando submetidos a uma carga de flexão.

Neste ensaio a amostra de prova em formato de barra, tem as suas extremidades apoiadas por dois suportes. Com a amostra posicionada uniformemente no centro da máquina, é submetida a uma aplicação de carga crescente. Em provetes com a mesma secção e dimensão, quanto maior for a distância entre apoios, mais elevado é o modulo de rutura obtido. Quanto maior a velocidade da força, mais elevada será a resistência à flexão (Biopdi 2023).

A máquina utilizada para este ensaio é a mesma utilizada no ensaio de tração apresentado desta vez uma carga de 100 KN a uma velocidade de 5mm/min. Estes ensaios seguiram a norma ASTM D790.

Na figura 32 podemos observar uma imagem do ensaio de flexão realizado.



Figura 32 - Equipamento utilizado no Ensaio de Flexão

Após todos os 50 provetes serem ensaiados, foram obtidas as curvas típicas de cada material a partir da força máxima aplicada e a tensão á flexão do material.

3.4.4. Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC)

A Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC) é uma técnica que na qual se mede as temperaturas e o fluxo de calor associado com as transições dos materiais em função da temperatura e tempo. Essas medidas fornecem informações quantitativas e qualitativas sobre mudanças físicas e químicas que envolvem processos endotérmicos (absorção de calor), exotérmicos (liberação de calor) ou mudanças na capacidade calorífica (Afinko 2018).

A análise de DSC começa pela preparação das amostras, de seguida é realizada a configuração do equipamento com dois recipientes, um contendo uma amostra de referencia e outro a amostra a ser analisada. Dentro do equipamento ambas as amostras são aquecidas ou arrefecidas a uma taxa controlada. A diferença de temperaturas entre as amostras é medida em um gráfico, com o nome de termograma. A partir do termograma podemos avaliar as transações térmicas do material, como a fusão, cristalização, reações químicas ou mudanças de fase (Vieira 2023).

A DSC é uma análise de suma importância para a avaliação das temperaturas de trabalho de um polímero, tais como sua Temperatura de Cristalização (T_c), Temperatura de Fusão (T_m) e o Grau de Cristalinidade (X_c).

Neste ensaio utilizou-se 25 mg de material com uma temperatura inicial de 20°C até alcançar os 240°C, sendo a taxa de aquecimento de 10°C/min fornecendo assim, dados referentes á entalpia de fusão e temperaturas de cristalização e fusão.

Através desses dados foi possível calcular o grau de cristalinidade das amostras, de acordo com a equação 1. Para o cálculo do grau de cristalinidade foi utilizado o valor de 207,1 J/g para a entalpia de fusão do PP.

$$X_c = 100 \times \frac{(\Delta H_m)}{(\Delta H^\circ)} \quad (1)$$

X_c = grau de cristalinidade

ΔH_m = entalpia de fusão das amostras

ΔH° = entalpia de fusão do PP

Tal como todos os outros equipamentos, os ensaios da máquina DSC foram realizados no Laboratório de Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria. A amostra para este ensaio foi apenas de 1 provete por material seguindo a norma ASTM D3418-2105.

A figura 33 apresenta o equipamento utilizado nos ensaios.



Figura 33 - Equipamento DSC utilizado

3.4.5. Análise Mecânica Dinâmica (DMA)

O ensaio de DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*) é uma técnica utilizada para medir as propriedades mecânicas de materiais em função da temperatura, frequência e amplitude de deformação. Durante o ensaio a amostra do material é submetida a uma força de deformação mecânica sinusoidal aplicada de forma alternada. A deformação é aplicada em uma faixa de frequências específica e a temperatura é controlada ao longo do ensaio. Os instrumentos de DMA medem a resposta do material à deformação em termos de tensão fase a força aplicada.

Este método é utilizado para caracterizar polímeros devido à sua característica viscoelástica. Os dados obtidos através deste ensaio são o Módulo de Armazenamento (E'), o Módulo de perda (E'') e o Fator de Perda ($\tan \delta$), e a Temperatura de Transição Vítrea (T_g) (Lorandi, Cioffi e Ornaghi 2016).

Para este ensaio foi necessário retificar provetes de modo a obter um formato retangular com secção de 45mm por 10mm e máximo de 3,9 de espessura, conforme indicado na norma ASTM D4065-12. Os provetes foram estudados numa faixa de temperatura de 25°C a 100°C.

A máquina utilizada neste ensaio apresenta-se também no Laboratório de Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria apresentada na figura 34.



Figura 34 - Equipamento DMA utilizado

3.4.6. Índice de Fluidez (MFI)

O Índice de Fluidez também conhecido por MFI (*Melt Flow Index*), é um ensaio para medir a fluidez de um polímero fundido, sendo considerado um parâmetro muito importante na indústria de plásticos.

A norma ASTM D1238 é muito utilizada para realizar o ensaio de MFI em polímeros. Durante o ensaio, a amostra é derretida e extrudida através de um orifício padronizado sob uma carga específica. A taxa de fluxo do polímero fundido é medida em termos de massa que flui através do orifício durante um determinado período. Esses dados fornecem a indicação da viscosidade do polímero e de sua capacidade de fluidez.

Este ensaio é realizado frequentemente como um parâmetro de qualidade para polímeros, especialmente em aplicação de moldes por injeção e extrusão. Este método é importante para o processo de fabricação de polímeros, pois afeta a sua capacidade de preenchimento e a qualidade das peças produzidas (Bruck 2022).

A carga utilizada no ensaio foi de 2,16kg com a uma temperatura de 230°C no plastómetro. Após sair pela fieira a uma velocidade constante, o material é cortado em segmentos a cada 20 segundos para ser pesado na balança.

A figura 35 apresenta um esquema representativo do ensaio de MFI.

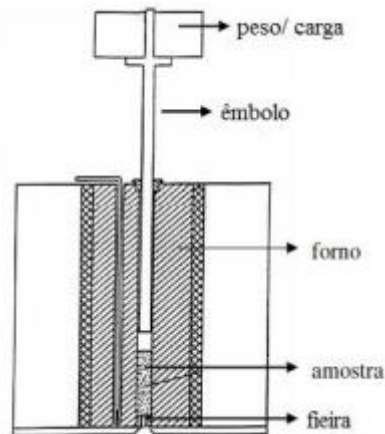


Figura 35 - Esquema representativo dos principais constituintes do plastómetro

3.4.7. Ensaio de Densidade

Massa volumétrica ou densidade é a razão entre a massa de um corpo e o seu volume. Enquanto a densidade relativa é a razão entre duas densidades, sendo uma geralmente, a água.

O ensaio de densidade é geralmente utilizado para o controlo de qualidade de matérias-primas e materiais plásticos para verificar a uniformidade de lotes e avaliar as mudanças físicas de uma amostra. Para a realização deste ensaio é utilizado uma balança de Arquimedes que consiste em utilizar uma balança de precisão para pesar a amostra a seco e com humidade controlada, e pesar a mesma amostra imersa na água destilada ou em um líquido específico (Montanheiro 1990).

Neste ensaio foi utilizado água destilada que se encontrava a cerca de 24,5 °C, que consultada a tabela da norma D792, indica que a sua massa volumétrica é de 0,9972 (g/ml). O ensaio de densidade foi realizado no Laboratório de Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria.

Os materiais utilizados foram: balança analítica - modelo AG204, com a adaptação de uma plataforma, para ensaio de densidade, água destilada, e as amostras dos materiais. Neste ensaio foi retirado o peso a cinco provetes para cada amostra.

Para a realização deste ensaio foi retirado o peso das amostras a seco e o peso das amostras imersas em água destilada.

Para obter a densidade das amostras foi utilizada a fórmula da equação 2 (Lourenço 2020).

$$d^t = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times d_{H_2O}^t \quad (2)$$

m1 – peso do corpo a seco;

m2 – peso do corpo dentro de água;

d^t – densidade das amostras;

d^t_{H2O} – densidade da água (0,9972 g/ml);

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios mecânicos e termomecânicos realizados, com a intenção de alcançar uma conclusão lógica e comparativa. Os resultados dos ensaios estão categorizados e agrupados pelos dois casos de estudo previamente mencionados.

4.1. Caso de estudo I – Ensaio de dureza

Na tabela 8 são apresentados os valores obtidos em T_0 (valor após a queda do endentador) no ensaio de dureza *Shore D* para o primeiro caso de estudo, onde apresenta a comparação entre o PP virgem e o PP reciclado até cinco vezes consecutivas. Observa-se que os valores instantâneos em T_0 , apresentam uma distância percentual muito baixa em comparação com o PP virgem. Podemos verificar que apesar de o valor do PP virgem ser próximo aos restantes, com apenas 0,90% do X5 para o material virgem. Verifica-se que existe um aumento de dureza cada vez que o material é reutilizado.

Tabela 8 - Média dos valores de T_0 no primeiro caso

Amostra	T_0	Comparação PP Virgem
PP Virgem	55,16	*****
X1	55,91	0,45%
X2	56,01	0,63%
X3	56,08	0,75%
X4	56,16	0,90%
X5	56,16	0,90%

Tal como nos valores de T_0 , após quinze segundos (T_{15}), apresentam também valores muito próximos ao PP Virgem. Apesar de os valores sejam um pouco mais baixos, comparando com o exemplo anterior (T_0), apresentam também um aumento de dureza pelo número de processos.

Tabela 9 - Média dos valores de T_0 no primeiro caso

Amostra	T₁₅	Comparação PP Virgem
PP Virgem	49,58	0,50%
X1	49,83	0,50%
X2	49,75	0,34%
X3	49,91	0,67%
X4	49,91	0,67%
X5	50,00	0,84%

Os resultados apresentados nas tabelas 8 e 9 estão de acordo com um estudo publicado por Mählmann et al. onde também não foram observadas diferenças significativas nos valores de dureza em PP processado até quatro vezes consecutivas.

4.2. Caso de estudo I – Ensaio de Tração

Através do ensaio de tração foi possível analisar o comportamento dos materiais ensaiados em relação à tensão de cedência, à tensão máxima e o módulo de Young. Os resultados obtidos das amostras de diferentes composições são sempre comparados com o resultado do polipropileno virgem em todas as tabelas apresentadas.

Na figura 36 apresentam-se as curvas tensão-deformação obtidas para os provetes ensaiados.

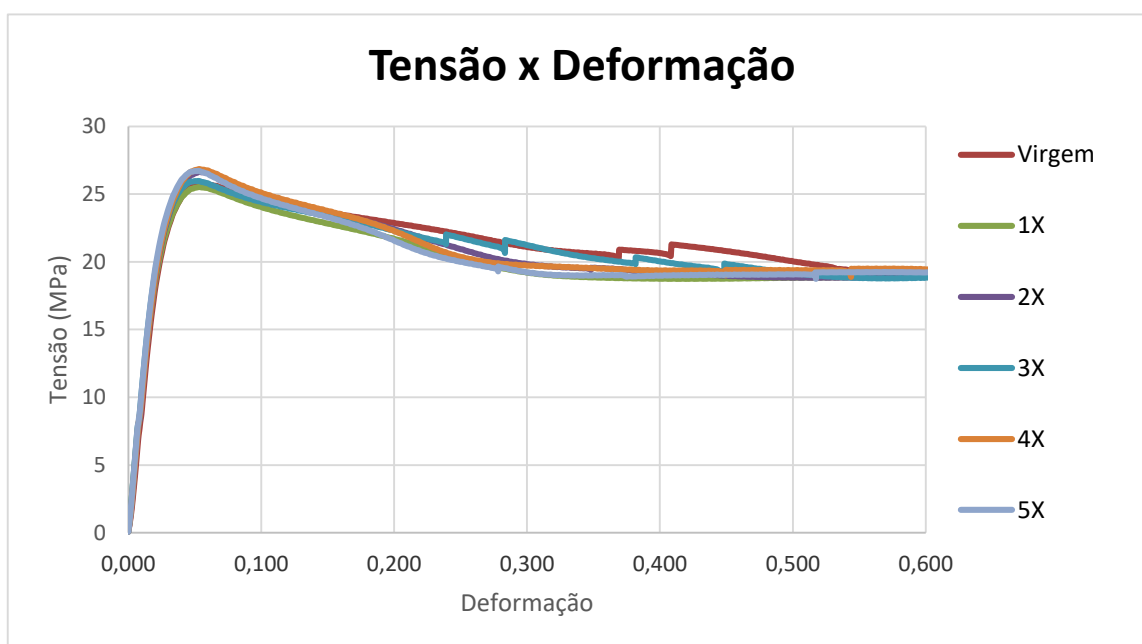


Figura 36 - Ensaio de Tensão/Deformação para o 1º caso de estudo

Os resultados encontrados relativos á tensão de cedência estão apresentados na tabela 9.

Os dados da tabela 10 mostram uma diferença máxima de -7,93% relativamente ao PP Virgem e uma leve diferença nos valores de tensão de cedência (σ_c) nas diferentes composições. Observa-se que o material 3X apresenta um valor semelhante ao polipropileno virgem e destaca-se um decréscimo significativo em todas as outras amostras, o que representa uma tendência negativa comparado ao polipropileno virgem.

Tabela 10 - Valores médios da tensão de cedência do caso I

Amostra	σ_c (MPa)	Comparação PP Virgem
Virgem	22,44	*****
1X	20,66	-7,93%
2X	20,72	-7,67%
3X	22,44	0,00%
4X	21,85	-2,63%
5X	21,66	-3,48%

Os resultados encontrados relativos á tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) á tração estão apresentados na tabela 11.

Os dados da tabela 11 apresenta uma diferença máxima de 4,34% e uma tendência positiva quando comparado à tensão máximo do polipropileno virgem. Observa-se também um aumento em grande parte das composições o que demonstra uma ferramenta benéfica para melhorar esta propriedade.

Tabela 11 - Valores médios da tensão máxima do caso I

Amostra	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Comparação PP Virgem
Virgem	25,72	*****
1X	25,52	-0,80%
2X	26,63	3,53%
3X	25,96	0,93%
4X	26,84	4,34%
5X	26,711	3,83%

Os resultados encontrados relativos ao módulo de Young estão apresentados na tabela 12.

Os dados da tabela 12 apresenta uma diferença máxima de 4,88% quando comparado ao módulo de Young do polipropileno virgem. Observa-se um aumento do módulo de Young (E) em todas as composições comparado com o polipropileno virgem, á exceção da amostra 1X que apresentou uma queda de aproximadamente 2% em relação ao polipropileno virgem.

Tabela 12 - Valores médios do módulo de Young do caso I

Amostra	E (MPa)	Comparação PP Virgem
Virgem	952,07	*****
1X	933,10	-1,99%
2X	965,19	1,38%

3X	998,51	4,88%
4X	963,62	1,21%
5X	993,46	4,35%

Segundo os resultados apresentados no ensaio de tração, de uma forma geral verificou-se um aumento em todas as propriedades analisadas, à exceção da tensão de cedência, que sofreu um decréscimo de 7,93% em relação ao PP virgem, conforme visto na tabela 10. De um modo geral podemos acrescentar que as composições analisadas não afetaram negativamente as propriedades mecânicas. Podemos concluir que apesar do material ser submetido a múltiplos processos, e neste caso múltiplas injeções, onde fica exposto a altas temperaturas, pudesse afetar negativamente o produto final o que não aconteceu.

Os resultados do presente estudo estão semelhantes, em termos de comportamento do material, ao estudo de A. Oliveira em 2016. Na sua dissertação, ele destaca que ocorre a uma queda na tensão de cedência em todas as composições de amostras reprocessadas de polipropileno, mas mesmo assim os valores são muito próximos ao valor de tensão de cedência do polipropileno virgem. Mencionou também que os valores de tensão máxima são superiores ao polipropileno virgem e que o reprocesso do material pode ser uma ferramenta benéfica para aumentar a rigidez do material.

4.3. Caso de estudo I - Ensaio de Flexão

A tabela 13 apresenta os valores médios relativos ao módulo de Young (E) nos ensaios de flexão realizados.

Os resultados apresentam uma diferença máxima de 5,80% em comparação com o polipropileno virgem. Observa-se que o maior aumento do módulo de Young foi mais expressivo na amostra 5X e houve um decréscimo percentual no 1X em comparação com a amostra virgem. As restantes amostras apresentam um valor acrescido apresentando um aumento do módulo de Young.

Tabela 13 - Valores médios do módulo de Young do ensaio da flexão do 1º caso de estudo

Amostras	E (MPa)	Comparação PP Virgem
Virgem	526,39	*****
1X	511,93	-2,74%
2X	542,44	3,05%
3X	532,67	1,19%
4X	536,08	1,84%
5X	556,96	5,80%

Os resultados relativos á tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) em regime de flexão estão apresentados na tabela 14.

Na tabela 14 podemos verificar que existe uma diferença máxima de 1,50% quando comparado com a tensão máxima do polipropileno virgem. Estes resultados apresentam o mesmo comportamento como aconteceu com o módulo de Young, ou seja, houve uma tendência positiva em comparação com o polipropileno virgem.

Tabela 14 - Valores médios da tensão máxima do ensaio da flexão do 1º caso de estudo

Amostras	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Comparação PP Virgem
Virgem	37,06	*****
1X	36,73	-0,89%
2X	37,61	1,50%
3X	37,37	0,85%
4X	37,06	0,00%
5X	37,21	0,41%

Segundo La Mantia, Valenza e Acierno avaliaram a influencia da injeção sobre as propriedades de alguns polimeros incluindo o polipropileno e verificaram que para este polimero, ate 4 ciclos, ocorre um aumento do módulo de Young atribuido a um aumento de cristalinidade. Os autores acrescentam ainda que a presença de impurezas na estrutura do material é uma possivel explicação para um aumento do modulo de Young, ou seja, ao longo de diversos processos as impurezas conectam-se e atuam como um reforço.

O aumento da tensão maxima deve-se á diminuicao do grau de cristalinidade das amostras em virtude das multiplas injeções na qual foram submetidas.

Assim como no ensaio de tração, os mecanismos de degradação do polipropileno não afetaram negativamente as propriedades das amostras em regime de flexão.

4.4. Caso de estudo I – Ensaio de DSC

A tabela 15 apresenta os dados médios referentes à temperatura de fusão (T_m) das diferentes amostras no ensaio de DSC. A diferença máxima é de 3,83% quando comparado ao valor da temperatura de fusão do polipropileno virgem. Todos os valores apresentados são muito próximos do polipropileno virgem. Os dados não apresentam nenhuma tendência de redução ou crescimento, ou seja, as múltiplas injeções não provocaram nenhuma alteração significativa nas amostras, não sendo necessário nenhum acréscimo considerável de energia de fusão do material. (A. A. Oliveira 2016)

Tabela 15 – Resultado da temperatura de fusão no ensaio DSC no 1º caso de estudo

Amostras	T_m (°C)	Comparação PP Virgem
Virgem	169,37	*****
1X	172,5	1,84%
2X	175,86	3,83%
3X	171,31	1,14%
4X	172,87	2,06%
5X	167,61	-1,03%

A tabela 16 apresenta os resultados relativos á temperatura de cristalização (T_c).

A tabela 16 apresenta uma diferença máxima de 5,52% na amostra 5X em relação ao polipropileno virgem. Observa-se que os valores das temperaturas de cristalização apresentam um crescimento pelo aumento de múltiplas injeções consecutivas no processo, o que significa provocaram uma mudança estrutural nas amostras ensaiadas.

Tabela 16 - Resultado da temperatura de cristalização no ensaio DSC no 1º caso de estudo

Amostras	T_c (°C)	Comparação PP Virgem
Virgem	112,67	*****
1X	115,92	2,88%
2X	117,06	3,89%
3X	118,01	4,73%
4X	118,69	5,34%
5X	118,9	5,52%

Na tabela 17 e 18 são apresentados os dados referentes à entalpia de fusão (ΔH_m) e ao grau de cristalinidade (X_c) respetivamente. Com os valores da tabela 17 e o valor da entalpia de fusão do PP (207,1 J/g) foi possível calcular o grau de cristalinidade (X_c) das amostras, segundo a equação 1, mencionada anteriormente. Ao observar o grau de cristalinidade percebemos que existe uma variação cada vez que o material é reprocessado. Esta alteração do grau de cristalinidade nas diferentes amostras demonstra que esta mudança pode afetar significativamente as propriedades do material, incluindo a sua resistência, rigidez, transparência, estabilidade térmica entre outros.

Tabela 17 - Resultado da entalpia de fusão no ensaio DSC no 1º caso de estudo

Amostras	ΔH_m (J/g)	Comparação PP Virgem
Virgem	37,04	*****
1X	44,95	21,35%
2X	30,48	-17,71%
3X	48,76	31,64%
4X	33,62	-9,23%
5X	46,38	25,21%

Os resultados do grau de cristalinidade estão representados na tabela 18.

Os resultados apresentados na tabela 18 apresentam valor muito diferentes e dispersos uns dos outros onde a amostra 4X apresenta uma diferença máxima de 55,91% e a amostra 3X uma diferença de -45,69%, em comparação com o polipropileno virgem.

Tabela 18 - Resultado do grau de cristalinidade no ensaio DSC no 1º caso de estudo

Amostras	X_c (%)	Comparação PP Virgem
Virgem	8,71	*****
1X	8,81	1,14%
2X	12,56	44,20%
3X	4,73	-45,69%
4X	13,58	55,91%
5X	6,98	-19,86%

Segundo Bataliotti usando os valores do grau de cristalinidade, podemos fazer uma associação com a degradação do polímero. Ele menciona que a cristalinidade do polímero está diretamente associada a vários fatores incluindo a massa molar e o tamanho das moléculas, ou seja, quanto

menor o tamanho da cadeia e menor massa molecular, há um aumento da cristalinidade do polímero. No ensaio conduzido pelo autor, ele também observa que ao comparar o polipropileno (PP) processado uma vez, com um grau de cristalinidade de 35,84%, com o PP processado dez vezes, que apresenta um grau de cristalinidade de 47,91%. O aumento do grau de cristalinidade do polímero também deu indício da degradação do material, pois o aumento da cristalinidade é relacionado com a diminuição da massa molar e diminuição da cadeia principal, fenômenos associados a degradação do polímero.

Nestes ensaios não foi possível determinar a temperatura de transição vítrea, sendo que no PP situa-se nos -18°C . O cálculo da temperatura de transição vítrea poderia acrescentar mais valor e descrição neste processo.

4.5. Caso de estudo I – Ensaio de DMA

As figuras 37, 38 e 39 mostram respetivamente, o módulo de armazenamento, o módulo de perda e a tan delta obtidos. O PP 5X apresenta um aumento no módulo de armazenamento onde já foi comprovado em ensaios anteriores e que comprova novamente que o material ganha mais rigidez. O PP virgem apresenta um maior módulo de perda, ou seja, é o material que dissipa mais energia durante a deformação, sendo que o PP 3x e o PP 5x apresentam valores muito próximos a partir dos 70°C .

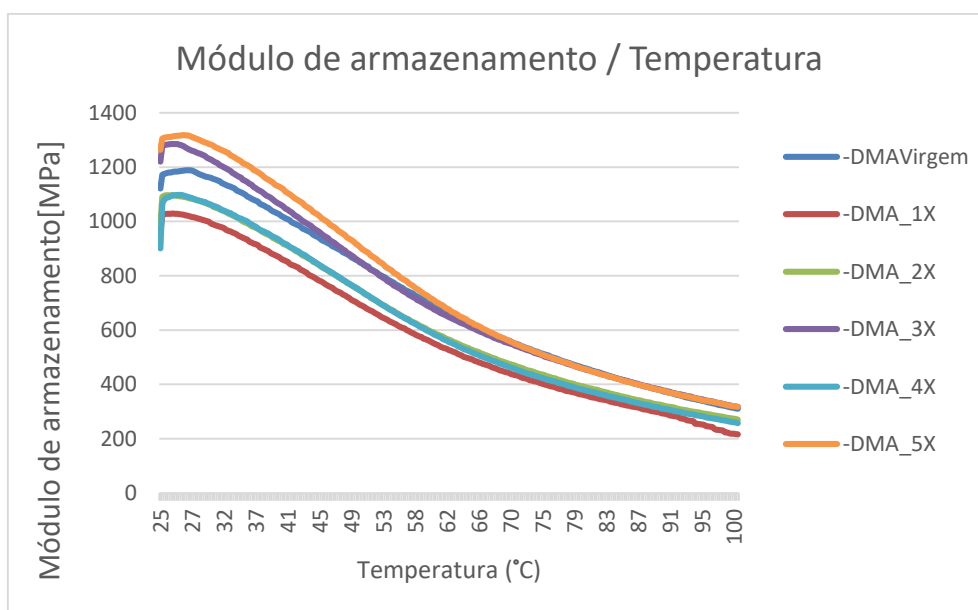


Figura 37 - Módulo de armazenamento para o 1º caso de estudo

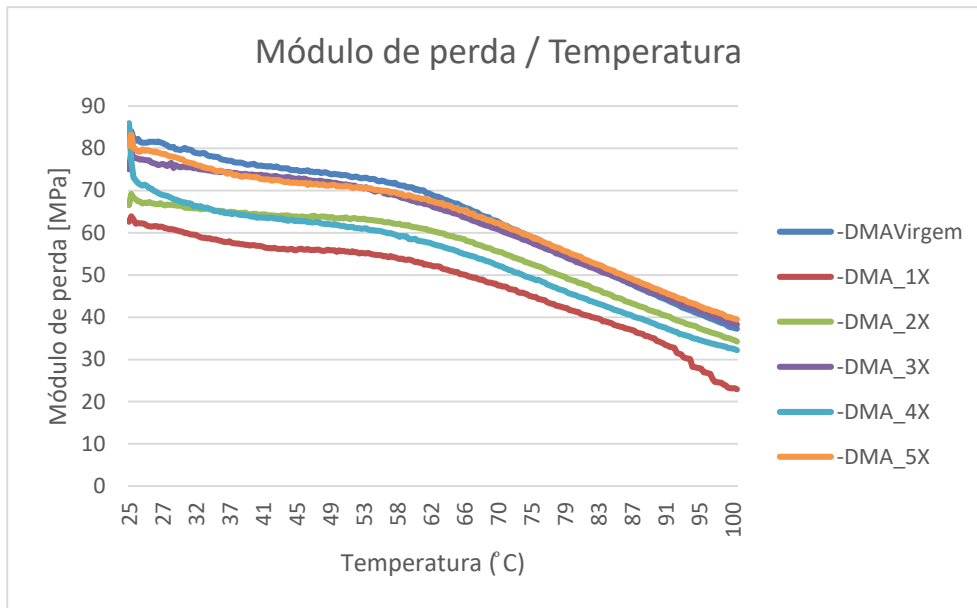


Figura 38 - Módulo de perda para o 1º caso de estudo

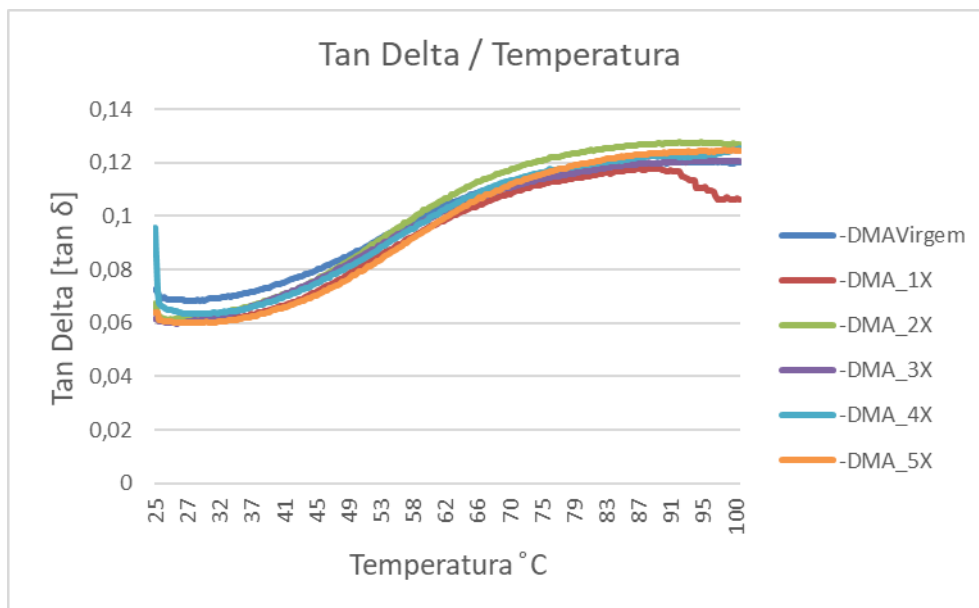


Figura 39 - Tan Delta para o 1º caso de estudo

4.6. Caso de estudo I – Ensaio de MFI

A partir da tabela 19, podemos observar que ocorreu um crescimento no índice de fluidez ao longo dos ensaios realizados, podendo afirmar que existe um crescimento, ou seja, quanto mais injeções fossem realizadas no material maior era o índice de fluidez. O PP 5X teve um aumento de 10,95% comparando com o polipropileno virgem.

Tabela 19 - Resultado do ensaio de MFI no 1º caso de estudo

Amostras	Índice de Fluidiez (g/mim)	Comparação PP Virgem
Virgem	24,176	*****
1X	24,8946	2,97%
2X	25,383	4,99%
3X	25,557	5,71%
4X	25,9482	7,33%
5X	26,82375	10,95%

O aumento do índice mostra que ao longo do reprocessamento o material sofre degradação o que leva á quebra de cadeias. Além disso, ocorre uma diminuição do peso molecular do polímero e conseqüentemente, a viscosidade, aumentando assim ao índice de fluidez (Bataliotti 2016).

Segundo Martins e De Paoli, o índice de fluidez aumentou com o número de ciclos. Nos 13 ciclos de extrusão trabalhados obtiveram um aumento no MFI em relação ao PP puro. Comparando-se os valores, o aumento obtido por estes autores até o sétimo ciclo foi cerca de 30%, e para os treze ciclos chegou a 95%.

Segundo (Bataliotti 2016), existe um aumento no valor do índice de fluidez à medida que aumenta o número de extrusões que o material sofreu. Menciona ainda que esse comportamento é devido a diminuição da massa molecular do material, ou seja, indicando a separação das macromoléculas diminuindo a massa molar e conseqüentemente aumentando o índice de fluidez do polipropileno.

4.7. Caso de estudo I – Ensaio de Densidade

A tabela 20 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de determinação da densidade das amostras.

A tabela 20 demonstra que os valores são todos muito semelhantes, podemos concluir que não existiu qualquer alteração de densidade.

Tabela 20 - Resultado do ensaio de Densidade no 1º caso de estudo

Amostras	Densidade	Comparação PP Virgem
Virgem	0,8956	*****
1X	0,8934	-0,24%
2X	0,8933	-0,24%
3X	0,8978	0,25%
4X	0,8961	0,05%
5X	0,8961	0,05%

Segundo a bibliografia, os valores encontram-se dentro do limite esperado, não apresentando variações significativas entre os tipos de amostras (Albuquerque 1990). Mählmann et al, confirmam os resultados obtidos até ao 4X.

4.8. Caso de estudo II – Ensaio de dureza

Na tabela 21 são apresentados os valores obtidos em T₀ no ensaio de dureza Shore D para o segundo caso de estudo, onde apresenta a comparação entre o PP virgem e o PP Virgem com percentagens de reciclado. Verifica-se na tabela 21 que o material que apresentou maior dureza foi o V20%, apresentando um valor de 0,60% comparado ao PP virgem.

Tabela 21 - Média dos valores de T₀ no 2º caso de estudo

Amostra	T₀	Comparação PP Virgem
PP Virgem	55,16	*****
V5%	55	-1,20%
V10%	55,5	-0,30%
V20%	56,16	0,90%
V30%	56	0,60%

Na tabela 22 os resultados apresentados em T₁₅, observa-se que o V30% foi o material que apresentou maior dureza e existe um aumento progressivo dado pela quantidade percentagem de reciclado no produto final.

Tabela 22 - Média de valores de T₁₅ no 2º caso de estudo

Amostra	T₁₅	Comparação PP Virgem
PP Virgem	49,58	*****
V5%	49,66	0,17%
V10%	50,75	2,35%
V20%	50,91	2,69%
V30%	51	2,86%

Os resultados estão de acordo com os obtidos por Mählmann, et al. em 2004, onde mostram que apesar de uma subida de dureza com a implementação de material reciclado os resultados apresentam uma pequena variação entre V10% e V30%.

Assim sendo podemos observar que o PP virgem com determinadas percentagens de reciclado, podem ser utilizados em produtos finais onde tenha uma dureza significativa.

4.9. Caso de estudo II – Ensaio de tração

Através do ensaio de tração no segundo caso, foi possível analisar o comportamento dos materiais ensaiados em relação à tensão máxima e o módulo de Young. Os resultados obtidos das amostras de diferentes composições são sempre comparados com o resultado do polipropileno virgem em todas as tabelas seguintes apresentadas.

Na figura 40 apresentam-se as curvas tensão-deformação obtidas para os provetes ensaiados.

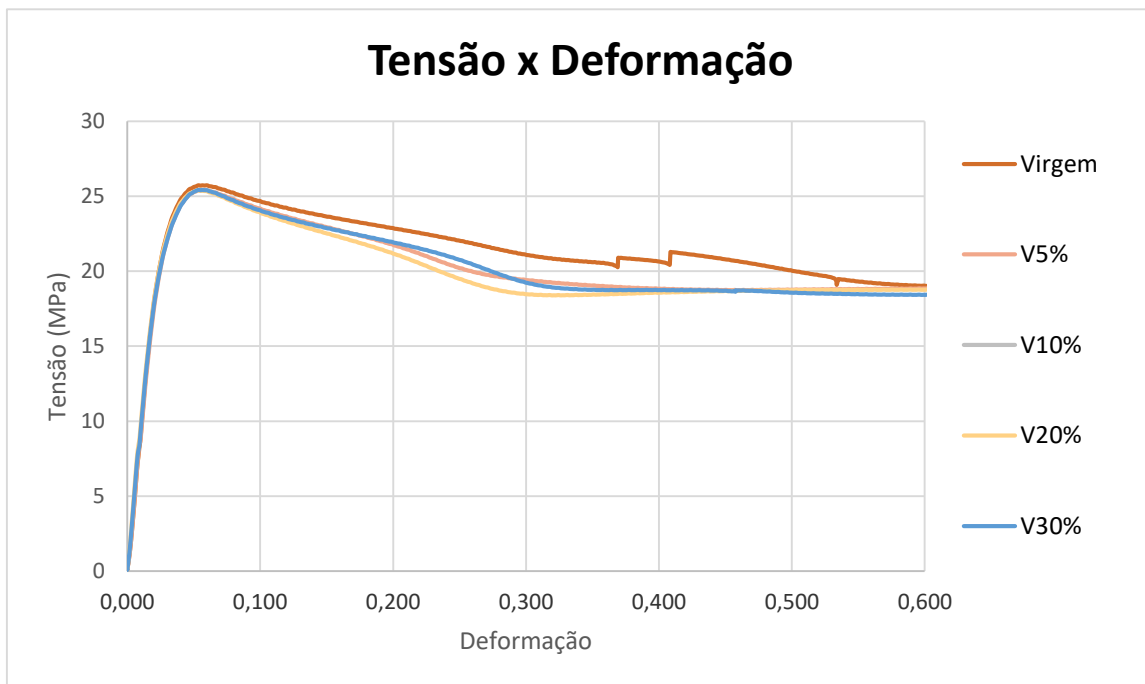


Figura 40 - Ensaio de Tensão/Deformação para o 2º caso de estudo

Os resultados encontrados relativos à tensão de cedência (σ_c) estão apresentados na tabela 9. Os dados da tabela 23 mostram uma diferença máxima de -8,78% entre o V10% e o PP Virgem. Observa-se em geral que houve uma influência negativa na tensão de cedência, apresentando sempre valores negativos em relação ao PP virgem.

Tabela 23 - Valores médios da tensão de cedência do caso II

Amostra	σ_c (MPa)	Comparação PP Virgem
Virgem	22,44	*****

V5%	21,30	-5,07%
V10%	20,47	-8,78%
V20%	20,51	-8,58%
V30%	20,67	-7,87%

Os resultados encontrados relativos á tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) á tração estão apresentados na tabela 24.

Os dados da tabela 24 apresenta uma diferença máxima de -1,32% e uma tendência negativa quando comparado á tensão máximo do polipropileno virgem. Apesar desta tendência ser negativa os valores são muito próximos não interferindo muito no produto final.

Tabela 24 - Valores médios da tensão máxima do caso II

Amostra	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Comparação PP Virgem
Virgem	25,72	*****
V5%	25,39	-1,29%
V10%	25,65	-0,28%
V20%	25,38	-1,32%
V30%	25,41	-1,20%

Os resultados encontrados relativos ao módulo de Young (E) estão apresentados na tabela 25.

Os dados da tabela 25 apresentam uma diferença máxima de -5,89% quando comparado ao módulo de Young do polipropileno virgem. Observa-se uma redução em todas as amostras em torno de -5%.

Tabela 25 - Valores médios do módulo de Young do caso II

Amostra	E (MPa)	Comparação PP Virgem
----------------	--------------------	---------------------------------

Virgem	952,07	*****
V5%	895,99	-5,89%
V10%	899,09	-5,56%
V20%	907,44	-4,69%
V30%	902,86	-5,17%

Segundo os resultados apresentados no ensaio de tração no segundo caso, de uma forma geral verificou-se um decréscimo em todas as propriedades analisadas, ou seja, um oposto ao caso I anteriormente mencionado. De um modo geral podemos acrescentar que as todas as composições analisadas neste ensaio afetaram negativamente as propriedades mecânicas. Podemos concluir que o material reciclado afetou negativamente o processo no que diz respeito ao ensaio de tração. Os resultados apresentados neste caso em específico contrapõem aos encontrados por A. Oliveira em 2006. Em sua dissertação, a adição de polipropileno reciclado aumentou o seu módulo de Young, tornando o material mais fragil, principalmente, em percentagens superiores a 30%.

O Wee J., et al. em 2018, abordam que as percentagem de 10, 20 e 30% de PP reciclado apresentam valores inferiores ao material virgem, admitindo o mesmo acontecimento descrito anteriormente.

4.10. Caso de estudo II – Ensaio de flexão

A tabela 26 apresenta os valores médios relativos ao módulo de Young (E) nos ensaios de flexão realizados. Verifica-se uma instabilidade entre as amostras, em que o módulo de Young apresenta uma diminuição de -4,46% entre as amostras virgem e V5%, e um aumento de 3,40% entre as amostras virgem e o V20%.

Tabela 26 - Valores médios do módulo de Young do ensaio da flexão do 2º caso de estudo

Amostras	E (MPa)	Comparação PP Virgem
Virgem	526,39	*****
V5%	502,8691653	-4,46%
V10%	534,9276674	1,62%
V20%	544,3081758	3,40%
V30%	520,1568807	-1,18%

Os resultados relativos á tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) em regime de flexão estão apresentados na tabela 27.

Na tabela 27 podemos verificar que o V5% apresenta uma queda máxima de -6,53% em relação ao material virgem, sendo que restantes amostras existe uma tendência ascendente. O PP virgem destaca-se neste ensaio pela positiva devido ás restantes amostras serem negativas no que diz respeito á tensão máxima.

Tabela 27 - Valores médios da tensão máxima do ensaio da flexão do 2º caso de estudo

Amostras	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Comparação PP Virgem
Virgem	37,06	*****
V5%	34,64	-6,53%
V10%	36,14	-2,47%
V20%	35,95	-3,00%
V30%	36,11	-2,55%

Tal como no ensaio de tração, os mecanismos de degradação do polipropileno afetaram negativamente as propriedades das amostras em regime de flexão.

Os resultados encontrados aqui contrapõem aos encontrados por Silva et al (2018). No seu estudo de adição de PP reciclado ao PP copolímero heterofásico com teores de 0%, 20%, 40% e 60%, verificou que o aumento da adição de material reciclado causou um aumento do módulo de Young e da tensão de flexão, que indica um aumento de rigidez.

Para Gafforelli 2019 com o aumento de percentagem de material reciclado na composição, o módulo de Young apresenta um decréscimo de valor, atingindo uma diminuição de 15% entre as amostras de 0% e 30%.

4.11. Caso de estudo II – Ensaio de DSC

A tabela 28 apresenta os resultados médios relativos á temperatura de fusão (T_m) das diferentes amostras no ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). Os dados da tabela 28 apresentam uma diferença máxima de 2,25%, na amostra V5%, quando comparado ao valor da temperatura de fusão do polipropileno virgem. Os dados não apresentam nenhuma tendência de redução ou crescimento não sendo necessário nenhum acréscimo considerável de energia para a fusão do material.

Tabela 28 – Resultado da temperatura de fusão no ensaio DSC no 2º caso de estudo

Amostras	T_m (°C)	Comparação PP Virgem
Virgem	169,37	*****
V5%	173,19	2,25%
V10%	172,79	2,01%
V20%	168,63	-0,43%
V30%	168,43	-0,55%

A tabela 29 apresenta os resultados relativos á temperatura de cristalização (T_c).

A tabela 29 apresenta uma diferença máxima de 1,97% na amostra V20% em relação ao polipropileno virgem. Observa-se que os valores das temperaturas de cristalização apresentam todos um valor positivo em relação á amostra Virgem.

Tabela 29 - Resultado da temperatura de cristalização no ensaio DSC no 2º caso de estudo

Amostras	T_c (°C)	Comparação PP Virgem
Virgem	112,67	*****
V5%	114,38	1,51%
V10%	114,42	1,55%
V20%	114,9	1,97%
V30%	114,67	1,77%

Na tabela 30 e 31 são apresentados os dados referentes á entalpia de fusão (ΔH_m) e ao grau de cristalinidade (X_c) respetivamente. Com os valores da tabela 30 e o valor da entalpia de fusão do PP (207,1 J/g) foi possível calcular o grau de cristalinidade das amostras, segundo a equação 1, mencionada anteriormente.

Tabela 30 - Resultado da entalpia de fusão no ensaio DSC no 2º caso de estudo

Amostras	ΔH_m (J/g)	Comparação PP Virgem
Virgem	37,04	*****
V5%	41,91	13,14%
V10%	40,52	9,39%
V20%	40,16	8,42%
V30%	39,32	6,15%

Os resultados do grau de cristalinidade estão representados na tabela 31.

Ao observar o grau de cristalinidade percebemos que o material tem um grande aumento com 5% de reciclado, mas com o aumento da percentagem de reciclado o material vai perdendo a diferença no grau de cristalinidade para a amostra virgem. É de realçar que todas as amostras apresentam um valor ascendente e bastante elevado, entre 13,89% e 26,63%, em relação ao PP Virgem.

Tabela 31 - Resultado do grau de cristalinidade no ensaio DSC no 2º caso de estudo

Amostras	X_c	Comparação
	(%)	PP Virgem
Virgem	8,71	*****
V5%	11,03	26,63%
V10%	10,33	18,59%
V20%	10,41	19,51%
V30%	9,92	13,89%

Segundo os estudos de Silva (2018) também apresentaram valores de entalpia de fusão maiores com a adição de PP reciclado ao PP copolímero heterofásico, mostrando a influência da cristalinidade do polipropileno reciclado na mistura com o material virgem. Ele atribuiu o aumento da cristalinidade à possível massa molar menor do PP reciclado quando aplicado no PP virgem, que causou a redução da viscosidade, favorecendo o aumento do grau de cristalinidade da mistura.

4.12. Caso de estudo II – Ensaio de DMA

Os ensaios de DMA foram estudados em uma faixa de temperatura de 25°C a 100°C. As figuras 41, 42 e 43 mostram respectivamente, o Módulo de Armazenamento, o Módulo de Perda e a Tan Delta obtidos. Ao observarmos o Módulo de Armazenamento e o Módulo de Perda (figura 41 e 42) constatamos que o material virgem entre estas temperaturas, apresenta valores superiores ao longo do gráfico sendo este mais estável no processo. Por consequência o PP virgem é o material que apresenta maior dureza e dissipação de calor a partir dos 25°C. Na figura 43 podemos observar um pico de temperaturas, em torno dos 25°C, que corresponde á temperatura da região amorfa (T_g) do polipropileno.

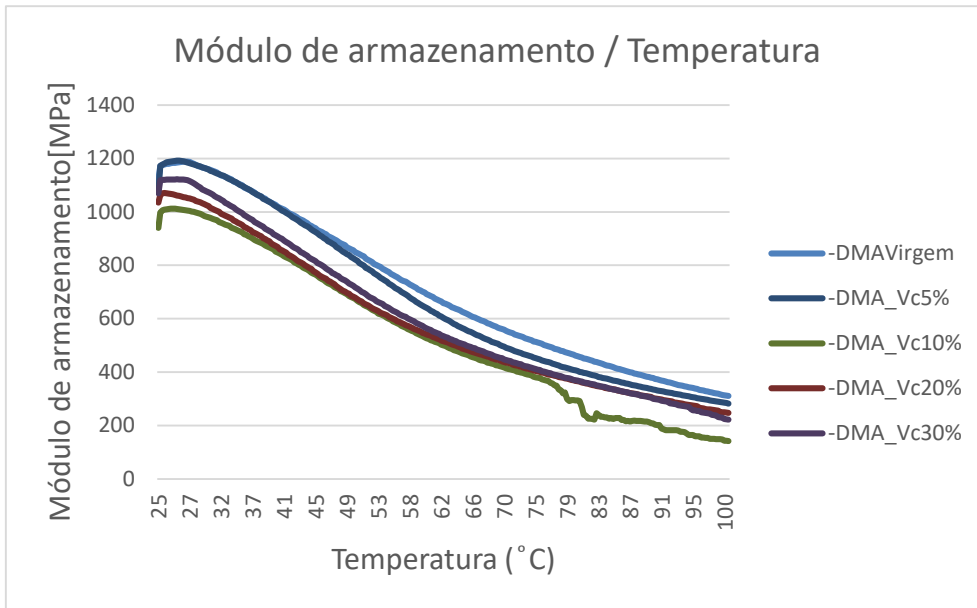


Figura 41 - Módulo de armazenamento para o 2º caso de estudo

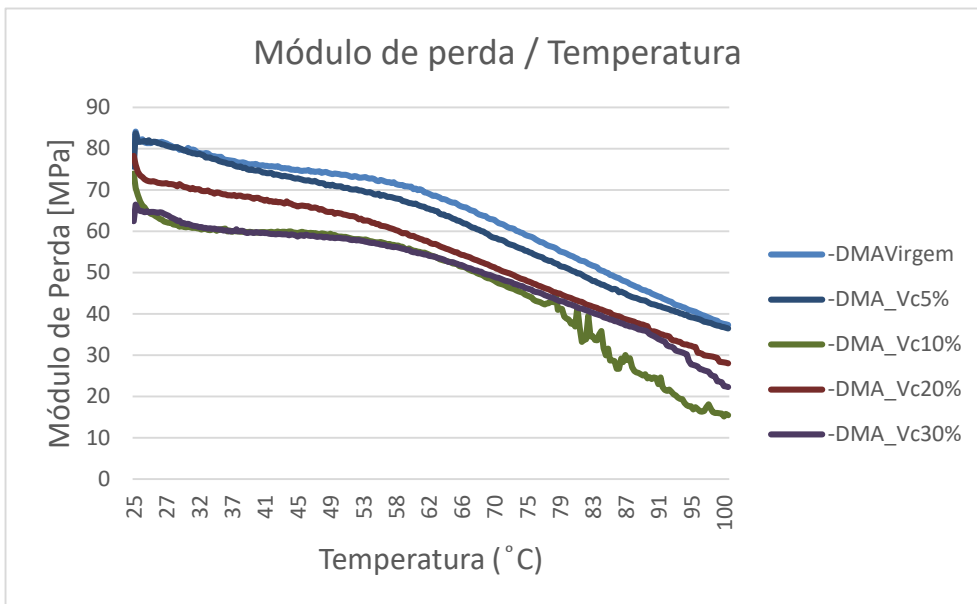


Figura 41 - Módulo de Perda para o 2º caso de estudo

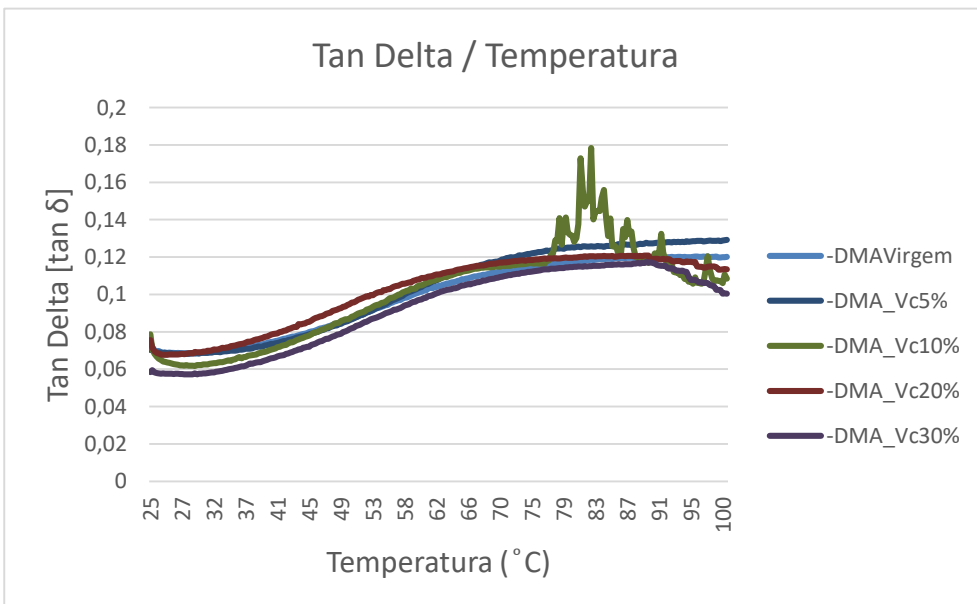


Figura 43 - Tan Delta para o 2º caso de estudo

4.13. Caso de estudo II – Ensaio de MFI

Na tabela 32 são apresentados os resultados médios obtidos nas medições de MFI.

Ao observar-se atentamente os valores da ultima coluna, verifica-se que existe um aumento no índice de fluidez no PP com 30% de PP reciclado, sendo de 4,86% superior ao PP virgem, o que comprova que o índice de fluidez aumenta com a adição de material reciclado.

Tabela 32 - Resultado do ensaio de MFI no 2º caso de estudo

Amostras	Índice de Fluidez (g/mim)	Comparação PP Virgem
Virgem	24,176	*****
V5%	24,353	0,73%
V10%	24,787	2,53%
V20%	25,137	3,98%
V30%	25,351	4,86%

Este comportamento está conforme os dados da literatura Venâncio e Souza 2017, pois quanto maior for a percentagem de material reciclado adicionada maior será a fluidez do material, efeito que é promovido pela existência de uma maior quantidade de ligações entre as cadeias que são quebradas.

4.14. Caso de estudo II – Ensaio de Densidade

A tabela 33 apresenta o valor médio dos cinco ensaios realizados para cada uma das amostras.

Os valores de densidade apesar de serem negativos são muito próximos do valor de densidade do PP virgem. A diferença máxima é de -0,28% entre o V20% e o PP Virgem. Podemos admitir que as densidades nestes ensaios não influenciam o processo de injeção e o seu produto final. Devido as diferenças percentuais serem quase nulas.

Tabela 33 - Resultado do ensaio de Densidade no 2º caso de estudo

Amostras	Densidade	Comparação PP Virgem
Virgem	0,8956	*****
V5%	0,8950	-0,05%
V10%	0,8935	-0,23%
V20%	0,8930	-0,28%
V30%	0,8945	-0,11%

Segundo a bibliografia, os valores encontram-se dentro do limite esperado, não apresentando variações significativas entre os tipos de amostras (Albuquerque 1990)

5. Conclusão

A reciclagem mecânica de plásticos faz com que o material sofra variações térmicas e mecânicas durante o seu reprocessamento indicando uma maior probabilidade de ocorrência de degradação do material que pode ser verificado pelos resultados obtidos.

Neste projeto foram produzidos dois tipos de composição, o PP virgem que sofreu cinco vezes o processo de reciclagem e o processo de injeção por moldação, e o PP virgem com cargas percentuais de PP reciclado (5%,10%, 20% e 30%). As diferentes composições apresentadas demonstraram que se obtém propriedades um pouco distintas.

No ensaio de dureza no primeiro caso de estudo existiu um aumento de dureza por cada vez que o material era reutilizado apesar de ser uma diferença mínima tanto em T_0 como em T_1 . Já no segundo caso de estudo apesar de apresentar uma diferença mínima em relação ao PP virgem o material V20% destacou-se em T_0 e o material V30% destacou-se em T_1 de forma positiva.

No ensaio de tração deparou-se que no caso de estudo I houve um aumento no módulo de young e um aumento na tensão máxima acompanhado de uma decadência na tensão de cedência. Já no segundo caso de estudo todos os resultados foram negativos, o que demonstra que o material tem um aumento de rigidez no primeiro caso de estudo e uma diminuição no segundo caso.

No que diz respeito ao ensaio de flexão os resultados foram comprovar um pouco no que foi dito anteriormente no ensaio de tração. Tanto no módulo de Young como na tensão máxima a amostra X5 foi superior no primeiro caso. Como esperado esta composição mostra que é possível um aumento de risco de instabilidade estrutural, uma redução de vida útil e uma maior deformação quantas mais vezes o material for reprocessado. Já no segundo caso de estudo verificou-se uma instabilidade estrutural sendo apresentado valores positivos e negativos nos ensaios.

Através dos ensaios de DSC visualizou-se que as temperaturas de fusão são muito próximas do PP virgem e não apresentou nenhuma tendência. Na temperatura de cristalização apresentou um crescimento pelo aumento das múltiplas injeções. Já no grau de cristalinidade os valores apresentaram grande variação em comparação com o PP virgem. Já no segundo caso todos valores apresentaram um aumento destacando-se o V5% com valores superiores.

Relativamente ao ensaio de DMA percebemos que no módulo de elasticidade o material de 5X apresenta um valor superior ao polipropileno virgem. Existe uma tendência ascendente o que

comprova novamente o aumento de rigidez. Já na segunda composição o PP virgem apresenta valores superior aos restantes materiais o que pode significar uma degradação ou deformação na região elástica. No módulo de perda o material virgem é superior ate aos 70°C, o que demonstra que o material possui propriedades viscoelásticas. Já na sua segunda composição o material PP virgem mostra valores de modulo de perda sempre superiores as outras composições.

No ensaio de MFI vemos um aumento do índice de fluidez em ambos os casos que esta associado a uma redução de massa molar no material e um aumento da capacidade de fluxo e processamento. Nos dois casos confirma-se um aumento de fluidez dado pelo número de injeções de material e/ou pela quantidade de material reciclado, sendo os dois métodos responsáveis pelo aumento do índice de fluidez.

O ensaio de densidade não mostrou quaisquer variações nos dois casos sendo estas muito próximas do PP virgem.

Apesar de pequenas diferenças podemos admitir que de um modo geral verificou-se que os múltiplos processos e as diferentes quantidades de material processada adicionado ao polipropileno virgem não provocaram variações negativas nas propriedades mecânicas e térmicas das amostras analisadas. Esperava-se um maior desvio devido aos múltiplos processos e pela degradação inerente a eles uma redução nas propriedades mecânicas das amostras, porem isso não foi evidenciado.

Num aspeto geral concluímos que nos dois casos, estes podem ser aplicadas em situações particulares, levando em consideração os requisitos de desempenho mecânico e térmico necessários. É importante considerar tanto a qualidade e desempenho desejados quanto os impactos ambientais ao tomar decisões relacionadas ao uso desses materiais plásticos.

Referências bibliográficas

- Mählmann, Cláudia Mendes, Adriane Lawisch, e Liane Mählmann Kipper. *ESTUDO DA RECICLAGEM POR TERMO-PRENSAGEM DE POLIPROPILENO (PP)*. Santa Catarina: ICTR 2004, 2004.
- Afinko. “DSC: o que é essa análise e para que ela serve?” *DSC: o que é essa análise e para que ela serve?* 11 de junho de 2018.
- Albuquerque, Jorge A. “O plástico na prática.” 1ª edição, Porto Alegre, 1990.
- Anon, M. C. *Curso básico intensivo de plasticos (C.B.I.P.)*. Niteroi: Jornal de Plasticos, 1997.
- Azapagic, A. *Polymers, the environment and sustainable development*. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd., 2003.
- Bataliotti, Murilo Dobri. “Avaliação de degradação do polipropileno sob multiplas extrusoes com e sem antioxidante.” 2016.
- Beaumont, John P. *Runner and Gating Design Handbook*. Munich: Hanser, 2004.
- Biopdi. “Ensaio de tração.” *Ensaio de tração*. São Carlos, 2023.
- Bledzki, A. K. *Design of Plastics Products with a view to Recycling Part II*. 1999.
- Bower, David I. *An Introduction to Polymer Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- Brandrup, J. *Recycling and recovery of Plastics*. Alemanha: Hanser Publishers, 1999.
- Broglioli, R. “Desenvolvimento da Qualidade na Reciclagem de Plasticos.” Brazil, 2006.
- Bruck, Alexandre. *Índice de Fluidez: conheça este Ensaio de Materiais*. 11 de Abril de 2022. <https://c2lab.com.br/blog-indice-de-fluidez-conheca-este-ensaio-de-materiais/> (acedido em 17 de Setembro de 2023).
- Brundtland, G. H. “Our Common Future.” *Comissao Mundial das Nações Unidas para o Desenvolvimento e o Ambiente*. 1987.
- Bryce, Douglas M. *Plastic Injection Molding*. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1996.

- Caetano, Francisco. “A Engenharia Inversa no Processo de Injeção de Termoplásticos.” *Preto no Branco*, 2018.
- Calapes, Maria Eduarda. *A origem da industria Transformadora de Plasticos em Portugal*. Lisboa, 1998.
- Cardoso, Gilmar. *Tecplatico*. 16 de 10 de 2021. tecplastico.no.comunidades.net/problemas-de-injecao.
- Carvalho, Lúdia. *Produção de Polipropileno Bi-orientado (BOOP)*. Bragança: Instituto Politecnico de Bragança, 2008.
- Caryl-Sue. “National geographic.” 9 de Abril de 2019. www.dezeen.com.
- Ceresana. *Ceresana*. December de 2021. www.ceresana.com/en/marketstudies/plastics/polypropylene/.
- Cleanup, The Ocean. “The Great Pacific Garbage Patch.” 2017. theoceancleanup.com/great-pacific-garbage-patch/.
- Crawford, R.J. *Plastic Engineering, 3rd edition*. Oxford, Inglaterra: Edições BH, 1998.
- Crawford, Roy J. *Plastics Engineering*. Oxford: third edition, 1998.
- Cunha, A. M. *Manual do Projetista para Moldes de Injeção de Plásticos Vol2*. Marinha Grande: Centimfe, 2004.
- . *Processo de Moldação por injeção*. Guimarães: Universidade do Minho, 1997.
- Cunha, A. *Moldação por injeção e Materiais Plasticos*. Marinha Grande: Centimfe, 2003.
- Dev. 11 de April de 2010. avplastics.co.uk/a-short-history-of-injection-moulding.
- Dias, Kelly Patricia. *Moldes Injeção Plásticos*. 07 de 11 de 2021. moldesinjecaoplasticos.com.br/sistema-de-alimentacao-em-moldes/ (acedido em 04 de 2022).
- Dong, Guiwei, e Guoqun Zhao. “Morphology Evolution and Elimination Mechanism of Bubble Marks on Surface of Microcellular Injection-Molded Parts with Dynamic Mold Temperature Control.” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017: 13.
- EirMed. *Medical device design for injection molding*. Menomonie, 2018.
- Engel, Rafael Luis, Claudia Mendes Mählmann, Adriane de Assis Lawisch, Liane Mählmann Kipper, e Jorge Moraes. “CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E

TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E.” *STUDO DA QUALIDADE DE POLIPROPILENO (PP) RECICLADO*. 2004.

Fambri, Luca, e Luca Lutterotti. “Polypropylene.” Em *Polymerization and Characterization of Mechanical and Thermal Properties*, de Weiyu Wang, 122. London: IntechOpen, 2020.

Fernandes, Ricardo Ferreira. “Polímero.” *Revista de Ciência Elementar*, 2014.

Figueiredo, Marcus. *Manufatura digital*. 27 de maio de 2022. <https://www.manufaturadigital.com/o-que-e-durometro/> (acedido em 16 de 09 de 2023).

Gafforelli, Cecília Pelisoli. *REINTEGRAÇÃO DE RESÍDUO DE POLIPROPILENO GERADO PELA*. Tese , UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2019.

Gall, S. “The impact of derbis on marine life.” *Marine Pollution Bulletin*. 2015. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041.

Gallo, Vincent. *Plastics Technology*. 29 de 04 de 2012. <https://www.ptonline.com/articles/achieve-process-transparency-with-in-mold-cavity-sensors>.

Gava, Daniel Pazetto. “Projeto de molde para injeção aplicado a fabricação de tampas de garrafa do tipo Squeeze.” *Construção do molde*. 2020.

Gedel Plásticos. *Gedel Plásticos*. 29 de Março de 2021. gedelplasticos.com.br/artigos/pp-polipropileno/.

Gibbens, S. “nngroup.com.” *Nielsen Norman Group*. 2 de Março de 2019. nngroup.com/articles/services-design-101/.

Gondal, M. A., e M. N. Siddiqui. “Identification of different kinds of Plastics using laser-induced breakdown spectroscopy for waste management.” *Journal of environmental Science and Health Part A*, 2007: 42.

GONZÁLEZ, V. A., Neira VELÁZQUEZ, e Gangulo SÁNCHEZ. “Polypropylene Chain scissions and molecular weight changes in multiple extrusions.” *Polymer Degradation and Stability*,. 1998.

Gooship, Vanessa. *Practical Guide to Injection Moulding*. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire: Rapre Technology Limited, 2004.

- Gregersen, Erik. *Britannica*. 06 de 05 de 2022. <https://www.britannica.com/biography/John-Wesley-Hyatt/additional-info#history>.
- Hamad, Kotiba, Mosab Kaseem, e Fawaz Deri. “Recycling of Waste from polymer materials.” *Polymer Degradation and Stability*, 4 de October de 2013: 12.
- Harada, Julio. *Moldes para Injeção de Termoplásticos*. São Paulo: ArtLiber, 2008.
- Hobbs, G. *Recycling of plastics and polymer composites*. 2000.
- Hrebnyuk, Natalya. *Reciclagem e Reutilização de Materias Plasticas em portugal*. Évora: Universidade de Évora, 2010.
- “Isso Significa.” s.d. <https://www.issosignifica.com/plastico-5-pp>.
- Kaso Plastics. 10 de November de 2011. kaso.com/did-you-know-a-brief-history-of-injection-molding/.
- Katsuhiko, S., S. Lee, J. Samseth, e D. Woodring. “Plastic Debris in the Ocean.” 2011.
- Kazmer, David O. *Injection Mold Design Engineering*. Munique: Hanser Publications, 2016.
- Kulkarni, Suhas. *Robust Process Development and Scientific Molding*. Munique: Hanser Publishers, 2017.
- . *Robust Process Development and Scientific Molding*. Munique: Hanser, 2010.
- La Mantia, P. F., A Valenza, e D. Acierno. “Thermomechanical degradation of blends of iPP-HDPE.” *Polymer degradation and stability*. 1985.
- Lorandi, Natália P., Maria Odila Cioffi, e Heitor Ornaghi. “Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais.” *SCIENTIA CUM INDUSTRIA*, 20 de 03 de 2016.
- Lourenço, Tiago. *Estudo da injeção experimental e numérica de*. Tese, Leiria: IPL, 2020.
- Maddah, Hisham A. “Polypropylene as a promising Plastic: A Review.” *American Journal of Polymer Science*, 2016: 11.
- Maier, C., e T. Calafut. *Polypropylene: The Definitive User’s Guide and Databook*. Norwich: 1st Edition, 1998.
- Manrich, Silvio. *Processamento de Termoplásticos: rosca unica, extrusão e matrizes, injeção e moldes*. São Paulo: Artliber, 2013.
- Martins, J., e P. Sobral. “Plastic Marine.” *Plastic Marine debris on the Portuguese coastline: A matter of size?* *Marine Pollution Bulletin*, 2011.

- Martins, M. H., e M. A. De Paoli. "Polypropylene compounding with post-consumer material: II.Reprocessing." *Polymer Degradation and Stability*. 2002.
- Montanheiro, Maria Nazareth Stolf. *DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE SÓLIDOS E*. Ensaio de densidade, Piracicaba – SP: Departamento de Física – UNIMEP, 1990.
- Neto, Henrique. *Um Olhar Sobre a Industria de Moldes*. Gradiva, 2014.
- Neuplast. *Polipropileno*. 10 de Agosto de 2020. neuplast.com.br/blog/polipropileno-conheca-as-caracteristicas-e-vantagens-desse-material/.
- Oliveira, A.J.D. "Caracterização Mecânica e Reológica de Polipropileno." *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*. 2006.
- Oliveira, Anselmo Antonio. "Comportamento mecanico e termico de misturas de polipropileno virgem e reprocessado por multiplas extrusoes." Ponta grossa: universidade estadual de ponta grossa, 31 de agosto de 2016.
- Pinto, R. *Injeção e Caracterização do Comportamento Mecânico de Polímeros Termoplásticos*. Coimbra: Instituto Superior de Engenharia, 2012.
- Post, Jason. *Aireplastics*. 2017. <https://www.aireplastics.com/basic-injection-molding-process/>.
- Primeplas. "Saiba como funciona a reciclagem do polipropileno." *Primeplas*. 04 de 01 de 2021. primeplas.com.br.
- Quimica Nova Escola. "Reciclagem." *Experimentação no Ensino de Química*, 2003: 4.
- Randelovic, Sasa, Milutinovic Mladimir, Sasa Nikolic, e Igor Kacmarcik. "Risk Assessment in injection molding process." *Journal for Technology of Plasticity*, Vol.40 , 2015.
- Roda, Daniel Tietz. *Tudo sobre Plasticos*. 15 de 01 de 2012. https://www.tudosobreplasticos.com/processo/solucoes_injecao.asp.
- Rutland, P. L. *Plastic Injection Moulding Machine*. 2018.
- Saraiva, Paula Alexandra. "Projeto de um molde de Injeção." Leiria, 2016.
- Shoemaker, Jay. *Moldflow Design Guide*. Massachusetts: Moldflow Corporation, 2006.
- Silva, Sebastião. "Sistematização de Metodologias de Projeto e Fabrico de Moldes de injeção de peças para a industria Aeronautica." Lisboa, Setembro de 2015.

- Soras, A., L. Erlov, e C. Lofgren. *Packaging and the prevention of environmental impact*. Suécia: Packforsk Foundation Report, 2000.
- Spinacé, M., e M. Paoli. *A tecnologia de reciclagem de polímeros*. química nova, 2005.
- Spinacé, Márcia, e Marco Paoli. “A TECNOLOGIA DA RECICLAGEM DE POLÍMEROS.” Campinas: Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, 12 de 11 de 2004.
- Strapasson, Reinaldo. *Valorização do Polipropileno através de sua mistura e reciclagem*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004.
- Tessnow-von, Wysocki, e P. Le Billon. “Plastics ate sea.” *Treaty design for a global solution to marine plastic pollution*. Environmental Science and Policy, July de 2019.
- Tetra Júnior. *Tetra Junior*. 19 de Setembro de 2020. <https://www.tetrajr.com/post/materiais-termoplasticos-identificacao-reciclagem>.
- Trinidad, J. A. “The ocean.” *Small islands and pandemic influenza: potential benefits and limitations of travel volume reduction as a border control measure*. New Zealand, 29 de Setembro de 2009.
- Venâncio, A. M., e A. M. Souza. *Estudo do comportamento do pp reprocessado através de múltiplas injeções*. São bernardo do campo: Centro universitario FEI, 2017.
- Vieira, Guilherme. “c2Lab.” *Análise DSC: como é feita e sua importância na indústria*. 21 de Março de 2023.
- Weddell, Jerry. *AsaClean*. 01 de Maio de 2018. <https://blog.asaclean.com/backpressure-and-decompression>.
- Wee, J., M. Choi, H. Hyun, J. Hwang, e B. Choi. “Effect of weathering-induced degradation on the fracture and fatigue characteristics of injection-molded polypropylene/talc composites.” *International Journal of Fatigue*, 2018: 111-120.
- Worth, Jill. 30 de 10 de 2018. <https://www.rodongroup.com/blog/hydraulic-electric-and-hybrid-plastic-injection-molding-which-process-is-right-for-you>.
- WWF. “No Plastic in Nature.” 2019. www.newcastle.edu.au/.
- Xie, Lei, e Shen & Jiang. *Modelling and Simulation for Micro Injection Molding*. In tech, 2011.
- Yang, Y. *Injection Molding Process Control, Monitoring, and Optimization*. Munique: Hanser, 2016.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

[Anexo 1]

Isplen® Polypropylene

Chemicals

Technical data sheet



ISPLEN® PB 180 G2M

ISPLEN® PB 180 G2M is a high fluidity heterophasic copolymer characterised by its excellent flow properties and by its good balance of mechanical properties: impact strength and stiffness. It is particularly suitable for injection moulding applications of thin walled articles. The material also shows very low tendency to warp and it is used in goods where dimensional stability is important.

TYPICAL APPLICATIONS

The particular characteristics of ISPLEN® PB 180 G2M permit a grade intended for use in applications where good processability is appreciated in addition with good mechanical properties:

- Domestic and leisure furniture.
- Square boxes and round storage containers for consumer appliances.
- Trays and containers for cold storage of foodstuffs: ice creams, fresh vegetables, fruit processed...
- Industrial components: toys, sports, leisure, automotive, storage organizers, packaging...

Recommended melt temperature range from 190 to 250°C. Processing conditions should be optimised for each production line.

PROPERTIES	VALUE	UNIT	TEST METHOD
General			
Melt Flow Rate (230 °C; 2.16 kg)	20	g/10 min	ISO 1133
Density	905	kg/m ³	ISO 1183
Mechanical			
Flexural Modulus	1250	MPa	ISO 178
Charpy Impact Strength Notched 23 °C	6	kJ/m ²	ISO 179
Thermal			
Heat Deflection Temperature 0.45MPa	88	°C	ISO 75
Others			
Shore Hardness	62	D Scale	ISO 868

ISPLEN® PB 180 G2M complies with the European Directives regarding materials intended for contact with foodstuffs. For further information, please contact our Technical Service and Development Laboratory or our Customer Care Service.

STORAGE

ISPLEN® PB 180 G2M should be stored in a dry atmosphere, on a paved, drained and not flooded area, at temperatures under 60°C and protected from UV radiation. Storage under inappropriate conditions could initiate degradation processes which may have a negative influence on the processability and the properties of the transformed product.

November 2013

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

Technical Service and Development:
Repsol Technology Centre
Ctra. de Extremadura AS, Km 10
28932 Móstoles, Madrid
Tel. +34 91 753 86 00
atd_poliolefinas@repsol.com

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

Customer Care:
sac@repsol.com

Esta página foi intencionalmente deixada em branco