



**Universidade de  
Aveiro**  
2018

Departamento de Engenharia Mecânica

**João Pedro Martins  
de Almeida e Silva**

**Redução dos custos em matéria-prima na célula de  
insuflação de uma fábrica de embalagens plásticas**



**Universidade de  
Aveiro**  
2018

Departamento de Engenharia Mecânica

**João Pedro Martins  
de Almeida e Silva**

**Redução dos custos em matéria-prima na célula de  
insuflação de uma fábrica de embalagens plásticas**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Victor Fernando Santos Neto, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Com o apoio dos projetos:  
UID/EMS/00481/2013-FCT e  
CENTRO-01-0145-FEDER-022083

## **o júri**

Presidente

**Professora Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia**  
Professora auxiliar,  
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Vogal - arguente principal

**Idalina José Monteiro Gonçalves**  
Bolseira em Pós-Doutoramento da Fundação para a Ciência e Tecnologia,  
Departamento de Química da Universidade de Aveiro.

Vogal – orientador

**Professor Doutor Victor Fernando Santos Neto**  
Professor auxiliar,  
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

## **Agradecimentos**

À Colep, pela oportunidade, por toda a formação interna e por todas as bases que sustentaram este projeto. Ao Eng. Rui Castro pela confiança depositada, pelas condições que me disponibilizou e pelos sábios conselhos que acompanharão neste percurso que é a vida. A todos os colaboradores do setor dos plásticos, que desde a logística ao embalamento, puderam colaborar e estar envolvidos neste trabalho, no qual dispuseram do seu tempo e demonstraram total empenho.

Ao Prof. Doutor Victor Neto por toda a sabedoria e conhecimentos transmitidos e sobretudo pelo acompanhamento e disponibilidade demonstrada. Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro pelas condições disponibilizadas, e ao seu corpo docente pela formação académica fornecida.

Aos meus pais e à minha irmã, pela paciência e por tornarem possível a minha formação académica. À Priscila por ser o meu pilar e pelo apoio incondicional em todas as minhas decisões.

**palavras-chave**

Plásticos, PEAD, Economia Circular, Insuflação, Ensaio de Tração

**Resumo**

A atual competitividade industrial tem levado a que as empresas criem mecanismos e recursos de forma a destacar-se no mercado face à concorrência, e isto não é exceção na indústria transformadora de plástico. Desta forma, o objetivo deste projeto consiste em avaliar a aplicabilidade de matéria-prima reciclada na célula de sopro/ insuflação de uma fábrica de embalagens plásticas, com o principal intuito de reduzir os custos anuais sobre a matéria-prima virgem, o PEAD.

A viabilidade do mesmo estava dependente de vários fatores, e seguiu-se um procedimento que consiste num conjunto de ensaios a efetuar às matérias-primas granuladas e também após o processo de transformação, sob a sua forma final de embalagem.

Da realização destes ensaios foi possível concluir que o material reciclado estudado confere à embalagem uma menor resistência. No entanto, os requisitos mínimos exigidos em controlo de qualidade foram alcançados, pelo que a produção de uma embalagem na sua íntegra com o material reciclado analisado é viável, possibilitando assim a obtenção de um produto final com características similares ao original e com um custo de matéria-prima associado 32% inferior.

**Keywords**

Plastics, HDPE, Circular Economy, Blow Moulding, Tensile Test

**Abstract**

Current industrial competitiveness has led companies to create mechanisms and resources in order to stand out in the market against competition, and this is no exception in the plastic manufacturing industry. Thus, the objective of this project is to evaluate the applicability of recycled raw material in the blow moulding cell in a plastic packaging factory, with the main aim of reducing the annual costs of the virgin raw material, HDPE.

The feasibility of this project was dependent on several factors, and the procedure followed consisted of a set of tests carried out on granulated raw material and also, after the transformation process, on its final form as a package.

After performing these tests it was possible to conclude that the recycled material studied gives the packaging a lower resistance. However, the minimum requirements defined for quality control have been met. Hence, producing the whole package with the recycled material analysed is feasible, making it possible to obtain a final product with similar characteristics to the original one and with an associated raw material cost of 32% less.

# Índice

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	ÂMBITO.....	1
1.2.	OBJETIVO.....	1
1.3.	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA.....	2
1.3.1.	<i>História .....</i>	<i>3</i>
1.3.2.	<i>Volume de negócios.....</i>	<i>4</i>
1.3.3.	<i>Estrutura da unidade industrial.....</i>	<i>4</i>
1.3.4.	<i>O sector dos plásticos .....</i>	<i>5</i>
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO DESENVOLVIDO .....	6
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DO ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>7</b>
2.1.	POLIETILENO (PE) .....	7
2.1.1.	<i>PEAD vs PEBD.....</i>	<i>9</i>
2.1.2.	<i>PEAD virgem vs PEAD reciclado.....</i>	<i>10</i>
2.1.3.	<i>Propriedades e aplicações .....</i>	<i>11</i>
2.2.	PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR INSUFLAÇÃO / SOPRO .....	12
2.2.1.	<i>Fases do processo .....</i>	<i>13</i>
2.2.2.	<i>Constituição do equipamento.....</i>	<i>14</i>
2.3.	A RECICLAGEM DE PLÁSTICOS .....	17
2.3.1.	<i>Reciclagem primária ou de pré-consumo .....</i>	<i>18</i>
2.3.2.	<i>Reciclagem secundária ou mecânica.....</i>	<i>18</i>
2.3.3.	<i>Reciclagem terciária ou química.....</i>	<i>19</i>
2.3.4.	<i>Reciclagem quaternária ou energética.....</i>	<i>19</i>
2.4.	ECONOMIA CIRCULAR .....	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA ADOTADA.....</b>	<b>23</b>
3.1	ENSAIOS DE AMOSTRAS .....	23
3.1.1	<i>Seleção de amostras.....</i>	<i>24</i>
3.1.2	<i>Ensaio de dureza.....</i>	<i>25</i>
3.1.3	<i>Ensaio de tração .....</i>	<i>26</i>
3.2	ENSAIOS DE EMBALAGENS.....	28
3.2.1	<i>Medição da espessura da parede.....</i>	<i>29</i>
3.2.2	<i>Ensaio de estanquidade.....</i>	<i>29</i>
3.2.3	<i>Ensaio de compressão .....</i>	<i>31</i>
3.2.4	<i>Ensaio de queda.....</i>	<i>32</i>
3.2.5	<i>Ensaio de compatibilidade química .....</i>	<i>33</i>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
4.1	ANÁLISE DOS ENSAIOS DE AMOSTRAS .....	37
4.1.1	<i>Análise do ensaio de dureza .....</i>	<i>37</i>
4.1.2	<i>Análise do ensaio de tração.....</i>	<i>38</i>
4.2	ANÁLISE DE ENSAIOS DE EMBALAGENS .....	40
4.2.1	<i>Análise da medição da espessura da parede.....</i>	<i>40</i>
4.2.2	<i>Análise do ensaio de estanquidade .....</i>	<i>40</i>
4.2.3	<i>Análise do ensaio de compressão.....</i>	<i>41</i>
4.2.4	<i>Análise do ensaio de queda .....</i>	<i>43</i>
4.2.5	<i>Análise do ensaio de compatibilidade química.....</i>	<i>43</i>
4.3	ANÁLISE ECONÓMICA .....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>47</b>

## Índice de Figuras

FIGURA 1: COLEP – PRESENÇA GLOBAL (COLEP S.A., 2018) .....	2
FIGURA 2: ESTRUTURA DA EMPRESA. ....	4
FIGURA 3: O SECTOR DOS PLÁSTICOS. (À ESQUERDA A CÉLULA DE INJEÇÃO, E À DIREITA A DE INSUFLAÇÃO) .....	5
FIGURA 4: CRONOGRAMA .....	6
FIGURA 5: MERCADO EUROPEU DE PLÁSTICOS POR TIPO DE RESINA EM 2015 (PLASTICS - THE FACTS, 2016).....	8
FIGURA 6: PEAD vs PEBD - RAMIFICAÇÕES .....	9
FIGURA 7: SOPRO – BALÃO (LEE, 2007) .....	12
FIGURA 8: FASES DO PROCESSO (CASO LDA, 1994).....	13
FIGURA 9: EXTRUSORA (CASO LDA, 1994) .....	14
FIGURA 10: FUSO (CASO LDA, 1994).....	15
FIGURA 11: CABEÇA DE EXTRUSÃO (CASO LDA, 1994) .....	15
FIGURA 12: UNIDADE DE INSUFLAÇÃO (CASO LDA, 1994).....	16
FIGURA 13: TIPOS DE RECICLAGEM (ADAPTADO DE RAJU, 2017) .....	17
FIGURA 14: TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE PLÁSTICO DE PÓS-CONSUMO (ADAPTADO DE PLASTICS – THE FACTS, 2016).....	20
FIGURA 15: AÇÕES PRIORITÁRIAS (ADAPTADO DE ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017) .....	22
FIGURA 16: AMOSTRAS DE MATÉRIA-PRIMA VIRGEM E RECICLADA .....	24
FIGURA 17: DURÔMETRO ANALÓGICO.....	26
FIGURA 18: PROVETES DO TIPO 5A (ISO 527-2:2012) .....	27
FIGURA 19: SHIMADZU AUTOGRAPH AGS-X .....	27
FIGURA 20: EMBALAGEM EM ESTUDO .....	28
FIGURA 21: MICRÓMETRO DE ULTRASSONS.....	29
FIGURA 22: EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE VEDAÇÃO AO VÁCUO.....	30
FIGURA 23: EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE COMPRESSÃO – HTE 10kN .....	31
FIGURA 24: CABINE DE ENSAIOS DE IMPACTO .....	33
FIGURA 25: ESTUFA.....	35
FIGURA 26: GRÁFICO DE <i>TENSÃO</i> vs. <i>DEFORMAÇÃO</i> PARA AS DIFERENTES PERCENTAGENS DE MP. ....	38
FIGURA 27: TENSÃO DE CEDÊNCIA MÉDIA E RESPECTIVA DEFORMAÇÃO. ....	39
FIGURA 28: EFEITO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE PELA VARIAÇÃO DO PERCENTUAL DE MP RECICLADA INCORPORADA .....	39
FIGURA 29: GRÁFICO <i>FORÇA</i> vs. <i>DESLOCAMENTO</i> - 0% MP RECICLADA .....	41
FIGURA 30: FORÇA DE COMPRESSÃO MÁXIMA MÉDIA E RESPECTIVO DESLOCAMENTO. ....	42
FIGURA 31: ECONOMIA ANUAL GERADA .....	44



## **Lista de acrónimos, siglas e de estrangeirismos**

M – Milhões

MP – Matéria-prima

OEE – *Overall Equipment Effectiveness*

PE – Polietileno

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PET – Polietileno tereftalato

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PVC – Policloreto de vinila

REACH – *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*

TWh – Terawatt hora

$\varepsilon$  - Deformação

$\sigma_c$  – Tensão de cedência

$E$  – Módulo de elasticidade

# 1. Introdução

Este capítulo serve de enquadramento ao presente relatório, onde é exposto o objetivo do trabalho realizado assim como o âmbito em que se insere. O local onde o mesmo foi elaborado e implementado é de igual forma apresentado. Por base num cronograma, são demonstradas as ações que originaram este projeto.

## 1.1. Âmbito

O projeto desenvolvido insere-se no âmbito da dissertação/ projeto/ estágio do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, da Universidade de Aveiro. Foi realizado em ambiente empresarial, através da colaboração com a empresa Colep, nas suas instalações de Vale de Cambra, local onde se encontra sediada. O trabalho decorreu no setor dos Plásticos, pertencente à divisão *Packaging Division*.

## 1.2. Objetivo

A atual competitividade industrial leva a que as empresas criem mecanismos e recursos de forma a destacar-se no mercado face à concorrência, e isto não é exceção na indústria transformadora de plástico. Os índices de produtividade e os gastos associados à produção são os principais fatores que se refletem no custo final de um produto para o produtor, e têm impacto direto na sobrevivência de uma empresa. Quanto mais barata a conceção do produto final, maior o ganho.

No entanto, esta necessidade de satisfazer a procura tem contribuído para o panorama económico e ambiental que envolve os plásticos e os seus resíduos no presente, que ameaça a sustentabilidade das gerações futuras e a escassez dos combustíveis fósseis.

Desta forma, o objetivo deste projeto consiste em avaliar a aplicabilidade de matéria-prima reciclada na célula de sopro/ insuflação do sector, contribuindo assim para uma *Economia Circular*, mas com o principal intuito de reduzir os custos anuais sobre a matéria-prima virgem, o PEAD.

Considerando o seu avultado volume de unidades produzidas anualmente, foi utilizado como objeto de estudo uma embalagem de 1 L atualmente fabricada para uma indústria produtora e vendedora de óleos minerais e sintéticos.

A viabilidade do processo está dependente de vários fatores, sendo necessário garantir que o produto cumpre as mesmas especificações e tem a mesma conformidade que tinha com a matéria-prima virgem.

### 1.3. Apresentação da empresa

A Colep, empresa integrada no grupo RAR, é líder global nas indústrias de embalagens e *contract manufacturing* de produtos de consumo. Entre unidades industriais e escritórios de vendas, está representada em Portugal, Alemanha, Espanha, Polónia, Reino Unido, Brasil, México e Emirados Árabes Unidos (Colep S.A., 2018). Em conjunto com a “One Asia Network” estabeleceu uma aliança estratégica denominada de “ACOA- the Alliance of Colep & One Asia”, da qual resulta uma rede de dezoito unidades industriais, disponibilizando desta forma uma operação à escala global aos seus clientes (Figura 1).

Esta política expansionista e a diversificação de toda a sua atividade resultaram em 52 anos de crescimento contínuo, onde atualmente assume uma posição como líder global em alguns segmentos de mercado.

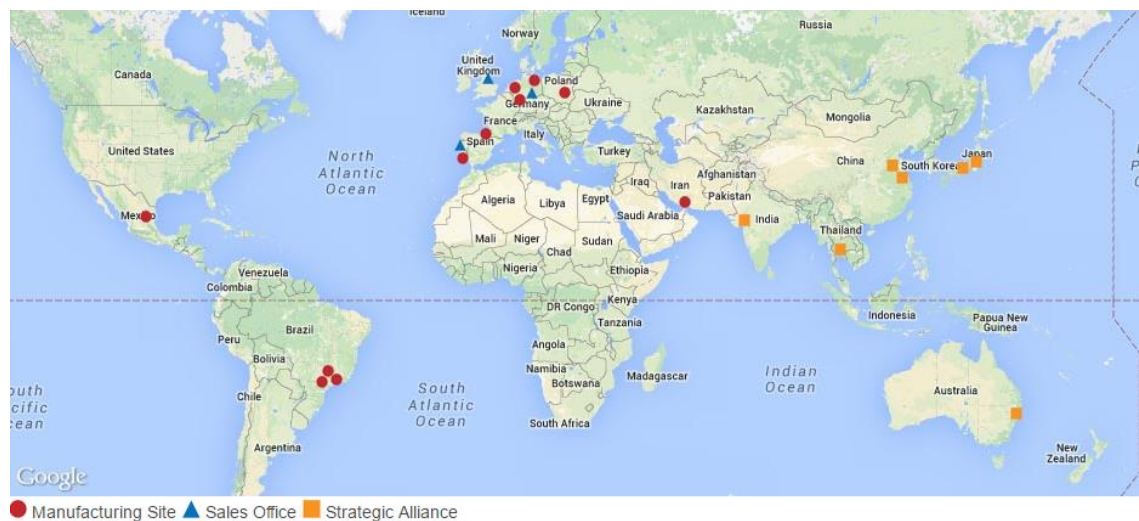


Figura 1: Colep – Presença Global (Colep S.A., 2018)

### 1.3.1. História

Fundada por Ilídio da Costa Leite de Pinho, em 1965, a Colep, iniciou a sua atividade vocacionada para o fabrico de embalagens metálicas, em Vale de Cambra. Esta atividade, depois de um início bem-sucedido, estendeu-se a novos produtos, mais concretamente embalagens industriais para tintas, vernizes solventes e óleos lubrificantes.

No início da década de 70 a empresa volta a expandir com a produção de aerossóis e embalagens plásticas, originando, em 1975, o início do ‘*Contract Manufacturing*’ – formulação, fabrico, enchimento e embalamento deste tipo de produtos.

A Colep torna-se líder no panorama Europeu, através da sua expansão internacional, que surge em força no início dos anos 90, com uma série de movimentações no mercado. Em 1993, dá-se origem à Colep *España*, com aquisição das instalações industriais da *Johnson Wax* em Espanha. Em 1999, segue-se a *Shirley Jones&Associates Limited*, com sede em Londres.

Em 2001, a Colep foi adquirida na totalidade pelo Grupo RAR, e nesse mesmo ano, com uma visão direcionada para o *contract manufacturing*, é construída de raiz a fábrica na Polónia.

Em 2004 a empresa concluiu uma fusão com CCL (*Custom Manufacturing Europe*), dando origem à maior empresa europeia de *contract manufacturing*, a Colep CCL.

Em 2009 a posição de liderança na Europa é reforçada com a aquisição da *Czewo Full Filling Service*.

A expansão para outro continente surge em 2010 com aquisição de 51% da *Provider* por parte da Colep CCL. É criada a CPA (*Colep Provider Aerossols*) e a empresa passa a liderar também o mercado brasileiro de *contract manufacturing* de produtos de higiene pessoal e doméstica.

Em 2011, o nome da empresa volta a alterar para o original, Colep.

Em 2013, a empresa alargou a sua atividade à América do Norte, através da aquisição de uma unidade industrial de enchimento de aerossóis em Querétaro, México, e chega ao Médio Oriente, ao efetuar uma *joint venture*, em Sharjah, Emirados Árabes Unidos, com o grupo local *Scrita*, para a fabricação de produtos de base aerossol.

A “ACOA – the Alliance of Colep and One Asia”, ocorre em 2014, quando a Colep e a One Asia Network criaram uma aliança estratégica a nível global, tendo por finalidade a partilha de melhores práticas e a transferência de conhecimento nas áreas da Inovação, *Manufacturing* e *Supply-Chain*.

Em 2015, em pleno 50º aniversário, a empresa adquire a totalidade das três unidades industriais no Brasil.

### 1.3.2. Volume de negócios

Com um volume de negócios de 464 M € em 2016, na sua totalidade, a Colep conta com 2939 colaboradores (RAR, 2018). Nestas movimentações totais verifica-se um valor superior em mais de 150 M € face a 2004, altura em que se fundiu com a CCL, levando desta forma a crer que o seu crescimento contínuo é sustentável.

### 1.3.3. Estrutura da unidade industrial

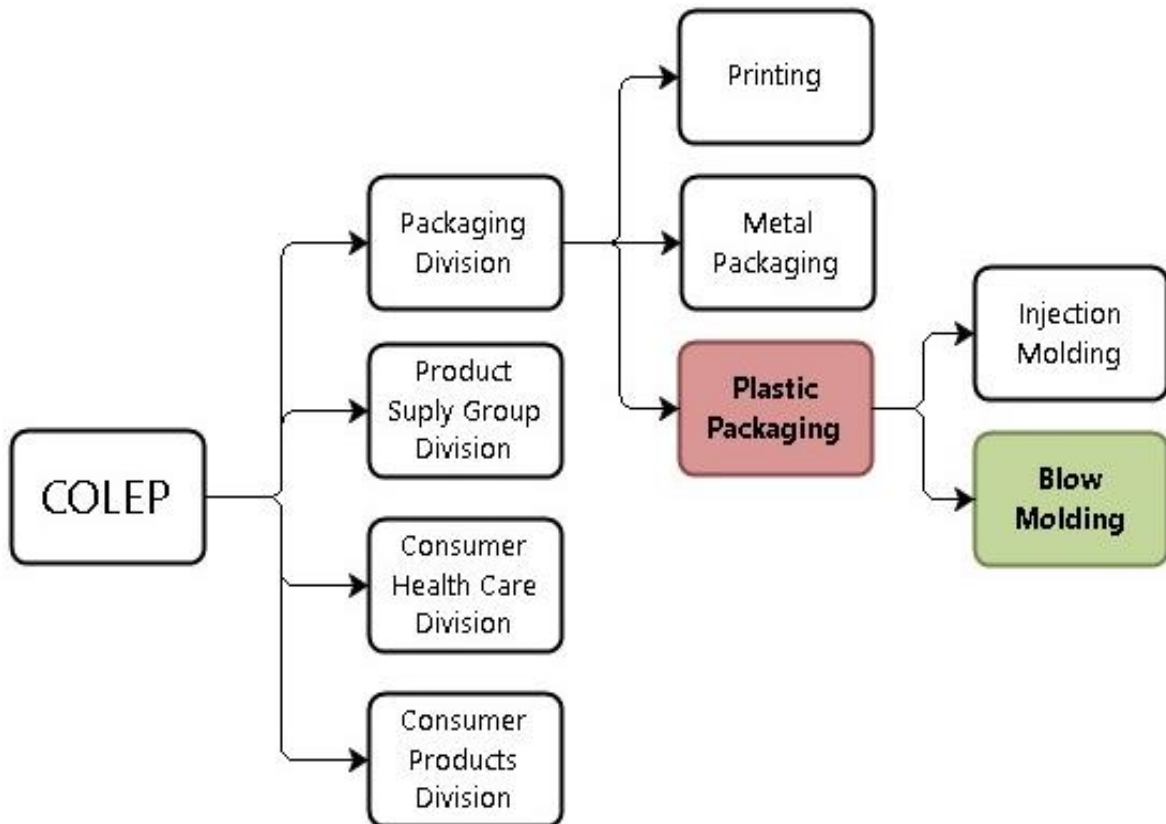


Figura 2: Estrutura da empresa.

A empresa sede, local onde decorreu este projeto, localizada em Vale de Cambra, está estruturada pelas suas diferentes áreas de negócio havendo desta forma quatro divisões: *Packaging Division*, *Product Supply Group Division (PSG)*, *Consumer Health Care Division*, e *Consumer Products Division*. Cada área de negócio tem gestão autónoma e está dividida em diferentes setores (Figura 2).

### 1.3.4. O sector dos plásticos

O sector dos plásticos nasce em 1973, com o objetivo de alargar o segmento de atividades da empresa, e ao mesmo tempo de melhor satisfazer as necessidades dos clientes. Inicialmente, surgiu apenas com o fabrico de peças através da injeção de plásticos, aparecendo poucos anos depois com o fabrico de embalagens plásticas por insuflação.

Desde então que se encontra dividido em duas células, a de injeção e a de insuflação, com a mesma disposição que cumpre atualmente mas com melhorias evidentes face à época (Figura 3).



Figura 3: O sector dos Plásticos. (À esquerda a célula de injeção, e à direita a de insuflação)

Nos dias de hoje, embora não seja uma área de negócios estratégica da empresa, este sector conta com 59 trabalhadores e trabalha em laboração contínua, de forma a possibilitar uma rápida resposta aos pedidos dos clientes.

É o sector com o maior OEE de toda a unidade industrial, e anualmente, satisfaz uma procura média anual de cerca de 90 milhões de unidades.

## 1.4. Estrutura do trabalho desenvolvido

O projeto foi elaborado tendo por base uma sequência de ações realizadas num determinado espaço de tempo. Desta forma, o plano de ações resultante do trabalho desenvolvido está ilustrado de forma sucinta, através do seguinte cronograma (Figura 4).

Descrição	Mês / Semana																				
	Setembro				Outubro				Novembro				Dezembro				Janeiro				
	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	1	2	3	4
Revisão da literatura			■	■	■	■															
Pesquisa de mercado					■	■															
Estudar processos industriais envolvidos						■	■														
Procurar fornecedor fixo								■													
Recolha e escolha de amostras de MP									■												
Ensaio de amostras										■	■	■									
Produção de embalagens													■	■	■						
Ensaio de embalagens														■	■	■					
Análise de produções anteriores																■	■				
Cálculo dos custos em MP																	■	■			
Obtenção do ganho anual																		■			
Atualizar ficha técnica da embalagem																			■	■	

Figura 4: Cronograma

## 2. Revisão do estado da arte

Este capítulo surge com o intuito de obter dados sobre o problema em estudo. É recolhida informação necessária para o desenvolvimento do projeto, através de estudos realizados e literatura já publicada por diferentes entidades e autores.

### 2.1. Polietileno (PE)

Devido aos avanços da ciência e das técnicas, o homem aprendeu não só a produzir uma enorme variedade de polímeros, como a aditivá-los, para obter propriedades adequadas às suas necessidades. Propriedades como a cor, o brilho, a resistência e a processabilidade, são características dos plásticos que, desta forma, devem ser entendidos como polímeros aditivados. O termo plástico deriva do grego “*plastikós*”, que está associado ao conceito de moldabilidade, e surge no século XX, principalmente na época pós-guerra. (CASO Lda, 1994)

Atualmente, o termo está associado a um material polimérico sólido à temperatura ambiente, que possui a capacidade de ser moldável, com relativa facilidade, sobre certas condições de pressão e temperatura, e encontra-se subdividido em 3 categorias: (Canevarolo Jr., 2006)

- Termoplásticos – Sob um aumento substancial da temperatura e marginal da pressão, amolecem e fluem, e podem ser moldados nestas condições. Com um subsequente arrefecimento, o material recupera a sua rigidez. São caracterizados por poderem suportar sucessivos ciclos de aquecimento e arrefecimento sem perda significativa das suas propriedades. Um exemplo bastante usado é o do gelo, que quando aquecido torna-se água, e esta quando arrefecida retorna à forma de gelo; (Roman, 1995)
- Termoendurecíveis – Quando sujeitos a um aumento substancial da temperatura e marginal da pressão, amolecem e fluem, adquirindo a forma do molde. No entanto, não permitem reproprocessamento. Subsequentes aumentos de temperatura e pressão, não têm mais influência, tornando-os materiais não-recicláveis. Um exemplo interessante, é do ovo, que após aquecido e cozido não pode ser amolecido; (Roman, 1995)
- Elastómeros – Polímeros que, com um aumento substancial da pressão e marginal da temperatura, fluem através de rearranjos na sua conformação. Materiais que seu estado físico tende a ser borrachoso. Um exemplo didático, é o do pneu.



Dentro dos termoplásticos existentes no mercado, há que evidenciar o polietileno devido à quantidade de produtos em que é empregue. As suas características levam a que seja a matéria-prima mais utilizada na indústria de transformação de plásticos em todo o mundo. Como é possível constatar na Figura 5, este impacto é de igual forma evidente no mercado europeu, onde o polietileno corresponde a cerca de 30% da utilização anual de plásticos que ronda 50 milhões de toneladas. (Plastics - the Facts, 2016)

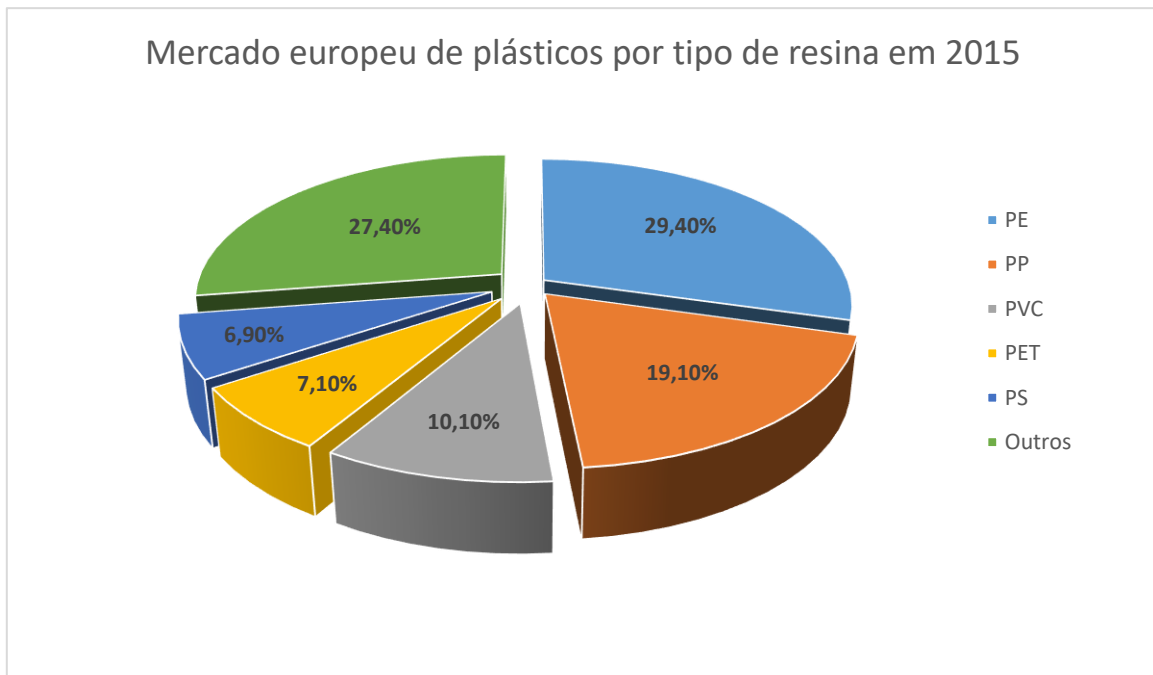


Figura 5: Mercado europeu de plásticos por tipo de resina em 2015 (Plastics - the Facts, 2016)

Quando se faz referência ao PE, fala-se de um grupo de possíveis derivações desta resina, que pode ser organizado em classes conforme a sua densidade: (ASTM D4976-12)

- Classe 1 (0,910 a 0,925): Polietileno de Baixa Densidade (PEBD);
- Classe 2 (> 0,925 a 0,940): Polietileno de Média densidade (PEMD);
- Classe 3 (> 0,940 a 0,960): Polietileno de Alta Densidade (PEAD);
- Classe 4 (> 0,960): Polietileno de Alta densidade (PEAD).

Embora a designação das classes 3 e 4 seja a mesma, a última remete para um polietileno ainda mais denso e cristalino.

### 2.1.1. PEAD vs PEBD

Embora o PEAD e o PEBD tenham várias aplicações em comum, as diferenças na sua densidade permitem tomar propriedades e funcionalidades diferentes a um produto.

A variância na densidade desta matéria-prima surge da configuração da sua cadeia, que através de reações de polimerização, é originada uma estrutura da cadeia mais ou menos ramificada, como é possível visualizar na Figura 6. A presença de ramificações maiores dificulta o processo de cristalização, tornando o polímero menos cristalino, o que consequentemente resulta numa menor densidade. Uma menor cristalinidade confere também uma maior transparência. Desta forma é possível relacionar diretamente a cadeia do polietileno com a densidade. Quanto mais evidentes forem as ramificações da estrutura, menor a densidade. (Canevarolo Jr., 2006)

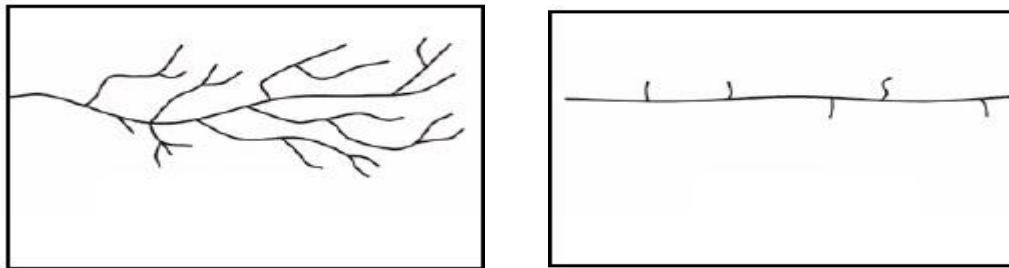


Figura 6: À esquerda – Ramificações longas (Polietileno de Baixa Densidade); À direita – Ramificações curtas (Polietileno de Alta Densidade)

Uma redução na densidade é acompanhada por uma variação significativa das características mecânicas, com uma diminuição da resistência à tração e um aumento no alongamento na ruptura. Logo, um tipo de cadeia mais linear, como no PEAD, confere um artefacto mais duro e resistente, devido à sua maior resistência à tração proveniente de um melhor processo de cristalização. Por sua vez, uma cadeia mais ramificada, como no PEBD, confere um artefacto mais flexível, devido a um maior alongamento na rutura proveniente de uma menor cristalinidade.

Um exemplo desta relação entre flexibilidade e dureza pode ser encontrado nas tampas. O PEAD é empregue em tampas com rosca interior (rígidas) enquanto que o PEBD é empregue em tampas sem rosca (flexíveis). (Coutinho, Mello, & Santa Maria, 2003)

### **2.1.2. PEAD virgem vs PEAD reciclado**

Um processo de transformação de plástico tem como principal objetivo a conversão de uma MP base num produto final com qualidade, capaz de gerar receitas superiores aos gastos na conceção do produto. Na indústria de transformação de plásticos o principal custo recai sobre a matéria-prima base, e contabilizando as toneladas por ano movimentadas, qualquer pequena poupança a esta associada, representa um ganho assinalável. Com as matérias-primas virgens a terem um custo de aquisição oscilante, devido à sua dependência do petróleo, um valor de mercado estável e mais acessível é o principal incentivo ao uso de recuperado de polietileno de alta densidade. (Polymer Comply Europe, 2017)

No mercado europeu, o atual custo médio de uma tonelada de polietileno de alta densidade virgem ronda os 1358 €, enquanto que a mesma quantidade de uma igual matéria-prima reciclada é possível obter com um custo médio de 925 €. Isto satisfaz uma redução de 32 % no custo de matéria-prima de um produto, caso este seja produzido na íntegra por este tipo de resina transformada. (S&P Global Platts, 2018)

No entanto, estudos realizados anteriormente, no mesmo âmbito, por base de ensaios de tração concluíram que o PEAD recuperado apresenta propriedades mecânicas ligeiramente inferiores ao material comercial. Nesses ensaios realizados, a matéria-prima reciclada apresentou uma tensão de cedência à tração e um módulo de elasticidade inferiores à MP virgem comercial, onde foi comprovada a menor resistência desta. Medições de dureza *Shore D*. demonstraram também esta tendência ao concluir que o material reciclado era mais mole. (Caraschi & Leão, 2002)

Embora os resultados indiquem que as propriedades mecânicas sejam relativamente próximas, estes bons níveis de proximidade entre os materiais apenas se mantêm até um segundo ciclo de reciclagem. Após uma terceira extrusão, começa a ser denotada uma degradação do material reciclado, manifestada através de uma diminuição mais acentuada da resistência à tração e do módulo elástico do material recuperado. (Alcântara, Carvalho, & Ramos, 1995)

### **2.1.3. Propriedades e aplicações**

O PEAD, sendo a base de estudo deste trabalho, na indústria de transformação de plástico é amplamente utilizado em diferentes segmentos, envolvendo os processos de extrusão, moldagem por injeção e por insuflação.

Pelo processo de extrusão a sua aplicabilidade é maior ao nível de tubagens para redes de saneamento e de distribuição de gás, onde é exigida alta resistência à compressão, dutos para mineração e dragagem, sacos para lixo e isolamentos de fios telefônicos e elétricos, onde é exigida resistência a altas temperaturas. Na moldagem por injeção é utilizado para a obtenção de tampas para embalagens e garrafas, baldes e bacias, assentos sanitários, entre outros. Através da moldagem por insuflação destaca-se a produção de tanques de 60 a 250 litros, onde é exigida alta resistência ao fissuramento sob tensão, na confeção de frascos onde é necessária elevada resistência à queda, e de embalagens que requeiram resistência à quebra por tensão ambiental, como alguns detergentes e defensivos agrícolas. Mediante este processo, o polietileno de alta densidade é ainda empregue na confeção de peças, como brinquedos, para as quais é exigido um produto atóxico. (Coutinho, Mello, & Santa Maria, 2003)

## 2.2. Processo de moldação por Insuflação / Sopro

A melhor explicação para o princípio de funcionamento do processo de moldagem por insuflação é um balão. Ao soprar ar dentro de um tubo plástico totalmente fechado exceto no ponto de entrada de ar, este irá expandir e tomar a forma do que o envolve. (Lee, 2007)

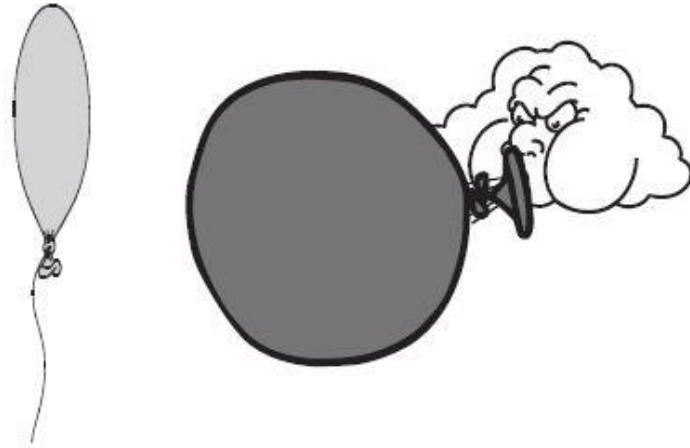


Figura 7: Sopros – Balão (Lee, 2007)

Esta tecnologia surge como uma evolução da antiga arte de sopro de vidro que consiste numa técnica bastante simples. A formação de uma massa moldável através do aquecimento da sílica, é posteriormente colocada numa das extremidades de um tubo de ferro, e com o auxílio da boca ar é soprado na extremidade oposta. A pressão que o ar exerce à saída do tubo sobre a massa quente, leva a que esta se expanda e adquira uma forma oca. (Whelan, 1999)

Com o objetivo de atender às necessidades da sociedade moderna, o processo de sopro foi adotado na indústria dos plásticos. O material plástico cobre uma grande variedade de propriedades e aplicações, deixando diversas razões para o seu emprego nesta tecnologia: (DuPont Performance Polymers, 2009)

- Redução de custo e peso, devido ao baixo custo e densidade destes materiais;
- Possibilidade de reciclar os produtos finais, reutilizar os desperdícios e reduzir os consumos de matéria-prima – Política dos 3 R's;
- Temperaturas de fusão baixas, tendo termo de comparação outros materiais, como os metais e o vidro. Isto contribui para um custo de energia relativa ao processo mais baixa;
- Bom desempenho do produto final.

### 2.2.1. Fases do processo

A moldagem por insuflação além de ser o processo mais popular e eficiente que permite a obtenção de produtos ocos com boa qualidade, é também a forma mais prática e barata de os obter atualmente. Esta tecnologia, embora simples, é composta por 4 fases: (Lee, 2006)

- a) Extrusão de uma pré-forma tubular (designada usualmente de párison) – O material é aquecido até atingir o seu ponto de fusão. A resina é plastificada, até que seja possível moldá-la por sopro (Belcher, 2007);
- b) Fecho do molde e insuflação do párison – O molde fecha-se e captura o párison. É feita a insuflação, por ação de ar comprimido, na mangueira de resina, o que provoca a expansão do material até às paredes internas das cavidades do molde, conferindo-lhe as formas e geometrias finais do produto;
- c) Arrefecimento – O ar insuflado no interior do párison tem impacto no arrefecimento da peça devido às trocas de calor geradas por convexão com a superfície interna da embalagem. No entanto, o arrefecimento causado com esta ação acaba por ser insuficiente para garantir um arrefecimento uniforme, pelo que no interior do molde circulam canais de água gelada com o intuito de garantir esta uniformidade na refrigeração do produto. Em certos casos, esta fase, pode corresponder a 80% do tempo de ciclo de uma peça (Whelan, 1999);
- d) Abertura do molde e extração da peça – Após o arrefecimento, dá-se a abertura do molde e é feita a extração da embalagem. O molde fica liberto para se iniciar um novo ciclo.

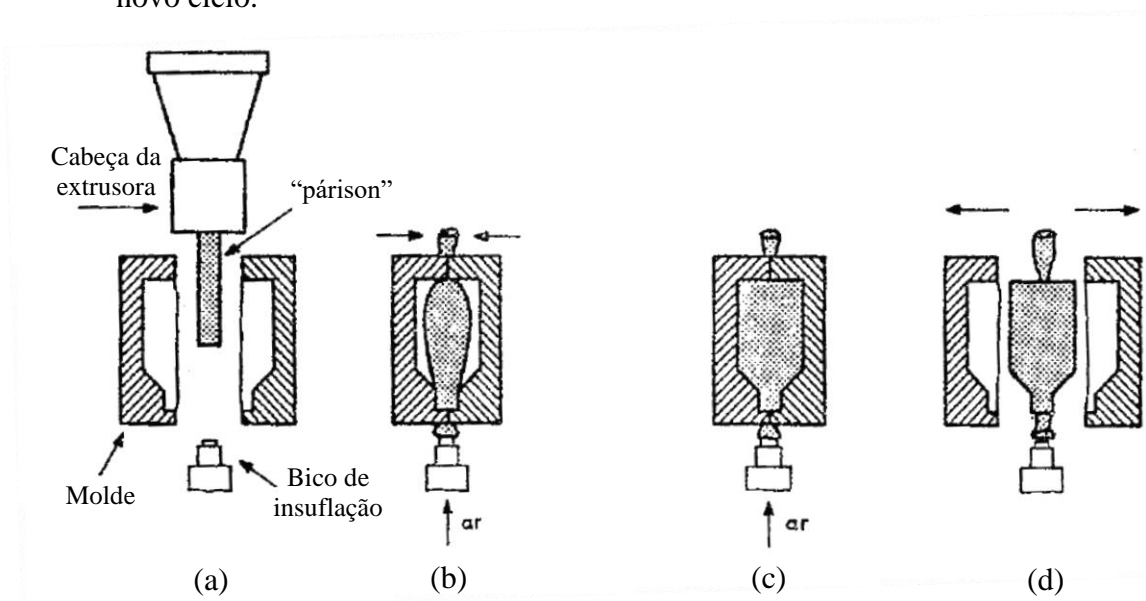


Figura 8: Fases do processo (CASO Lda, 1994)

### 2.2.2. Constituição do equipamento

Industrialmente, o equipamento de insuflação é dividido em três unidades distintas, mas interligadas entre si: a extrusora, cabeça de extrusão, e unidade de insuflação.

A extrusora (Figura 9) é a unidade responsável pela plasticização e transporte da resina termoplástica, e pode ser subdividida em três equipamentos: a tremonha, a câmara e o fuso.

A alimentação de matéria-prima em granulado é feita através da tremonha para um cilindro oco horizontal com tratamento interior resistente ao desgaste, conhecido por câmara. Esta última, apresenta uma zona de alimentação, antes do corpo, onde se dá a entrada do material. Esta zona de alimentação é ainda constituída por um sistema de arrefecimento para evitar a fusão prematura do material. O corpo da câmara é a zona onde está montado o sistema de aquecimento e ocorre a plasticização da resina. (Whelan, 1999)

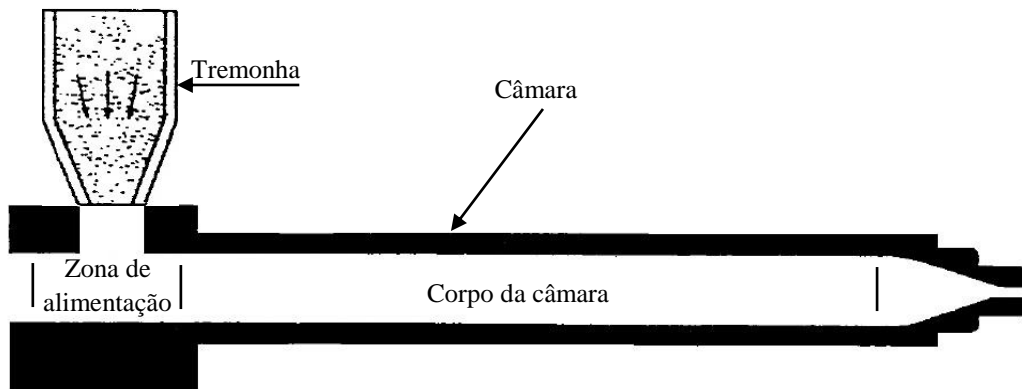


Figura 9: Extrusora (CASO Lda, 1994)

O fuso (Figura 10) é semelhante a um parafuso sem-fim que roda continuamente dentro da câmara. Tem como principais funções receber e transportar o material sólido, plasticizá-lo e homogeneizá-lo assim que fundido, e é também responsável por forçar a resina plasticizada a fluir através da fiação. Esta multifuncionalidade do fuso, deve-se ao facto de ser maquinado em três diferentes zonas: (CASO Lda, 1994)

- Zona de alimentação: Maior profundidade do canal para assegurar o transporte da matéria-prima sólida sob a forma de granulado;
- Zona de compressão: O material sólido é comprimido numa secção gradualmente menor e fundido sob o efeito combinado do calor proveniente do cilindro;

- Zona de medição: É promovida a homogeneização do fundido e é criada uma maior contra-pressão para que o polímero possa atravessar a fieira.

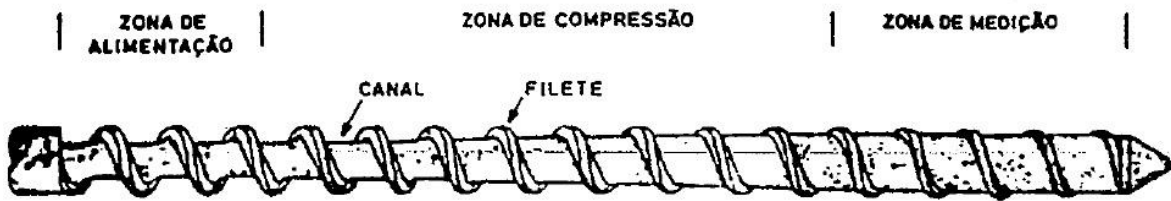


Figura 10: Fuso (CASO Lda, 1994)

A cabeça de extrusão (Figura 11) é a unidade do equipamento responsável por converter o fluxo horizontal do fundido num fluxo vertical e em forma tubular. O desenho da cabeça não deve provocar atraso no fluxo em nenhum ponto para evitar a criação de zonas de estagnação da resina fundida, e conseqüentemente a degradação do mesmo por aquecimento excessivo. Consoante o tipo de construção da cabeça é possível obter dois fluxos de matéria diferentes, axial ou radial. Uma cabeça de extrusão do tipo axial não apresenta transições bruscas no fluxo, o ideal para materiais como o PVC, que se degradam com maior facilidade. Para a elaboração deste trabalho, o equipamento utilizado era constituído por uma cabeça de fluxo radial, ideal para a matéria-prima em estudo, o PEAD. (Belcher, 2007)

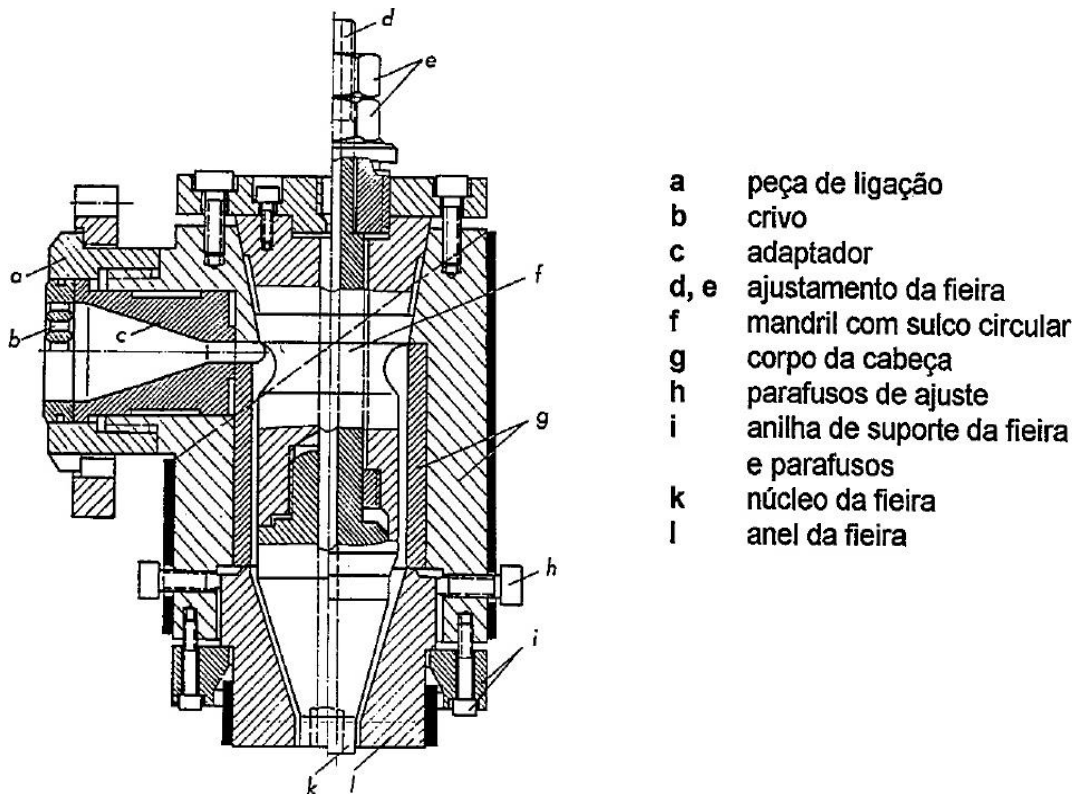


Figura 11: Cabeça de Extrusão (CASO Lda, 1994)



A unidade de insuflação (Figura 12) tem como principais funções suportar e movimentar o molde, cortar o párison e insuflá-lo, feitas pela seguinte sequência de ações: (CASO Lda, 1994)

1. Movimento do molde até ao párison – efetuado pelo porta-moldes, responsável por todas as movimentações, assim como a abertura e fecho do mesmo;
2. Fecho do molde;
3. Corte do párison – movimento efetuado por uma faca que atua perpendicularmente à saída do material extrudido. É importante que a faca não provoque o fecho da manga nem arraste a mesma durante o movimento do corte;
4. Movimento do molde até ao mandril de insuflação;
5. Insuflação – o sopro efetuado por ar comprimido expande o párison com o intuito de produzir os detalhes da superfície que o envolve;
6. Arrefecimento;
7. Abertura do molde e extração da peça;
8. Corte de rebarbas.

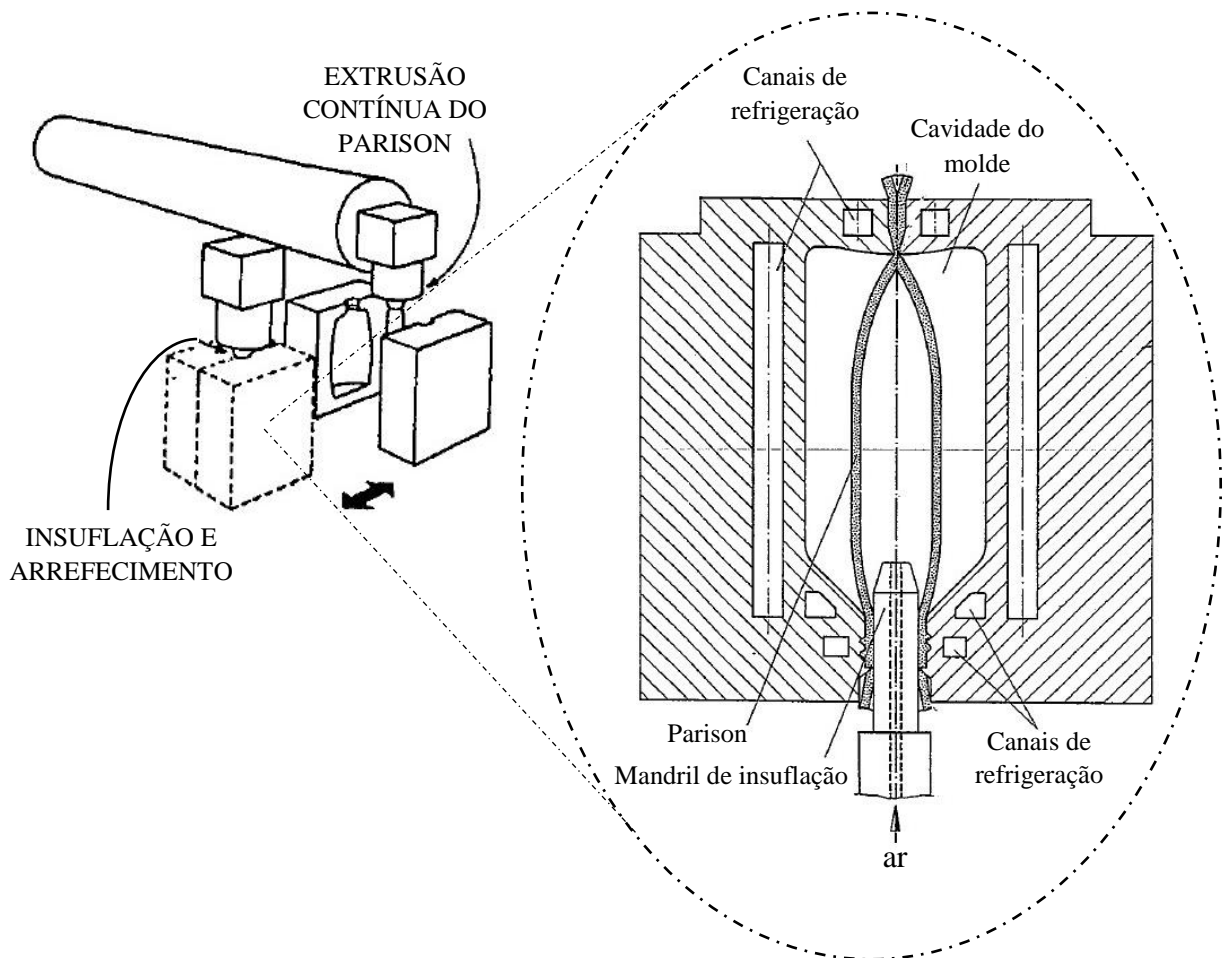


Figura 12: Unidade de Insuflação (CASO Lda, 1994)

### 2.3. A Reciclagem de Plásticos

A degradação do plástico pelo meio ambiente pode acontecer através de 4 mecanismos: fotodegradação por efeito de radiação UV, degradação por termo-oxidação, degradação hidrolítica e degradação por microrganismos. No entanto, um destes processos pode demorar 500 anos, gerando assim o problema de resíduos atual nas grandes áreas urbanas onde vários plásticos são descartados. (Raju, 2017)

Portanto, a solução adotada face a combater esta problemática passa pela reciclagem. Além da redução do volume de resíduos, apresenta um papel preponderante na poupança de recursos naturais. Estudos baseados em análise do ciclo de vida de produtos têm concluído que para a conceção de produtos com matéria-prima virgem são gastas quantidades de energia superiores do que para a conceção do mesmo com resíduos reciclados.

Atualmente, independentemente do método, o lixo é ainda diferenciado em duas diferentes categorias: resíduos industriais (defeitos de produção ou material que nunca chegou a ser usado e contaminado) e em resíduos de pós-consumo (que estão sujeitos a contaminação e degradação durante o seu ciclo de vida). Este último sempre foi um entrave maior ao longo da história pois requer um maior número de recursos empregues como limpezas e métodos de escolha adicionais de forma a separar metais, papeis, adesivos e outras partes desconhecidas do plástico. Distintamente, os resíduos industriais são já tratados há alguns anos pelo mundo fora, inclusive em Portugal.

De forma sucinta, a reciclagem consiste no coletar, tratamento e conversão dos resíduos em produto o mais semelhante possível ao inicial, e atualmente apresenta 4 definições diferentes: Reciclagem primária, reciclagem secundária, reciclagem terciária e reciclagem quaternária. (ASTM D5033-00)

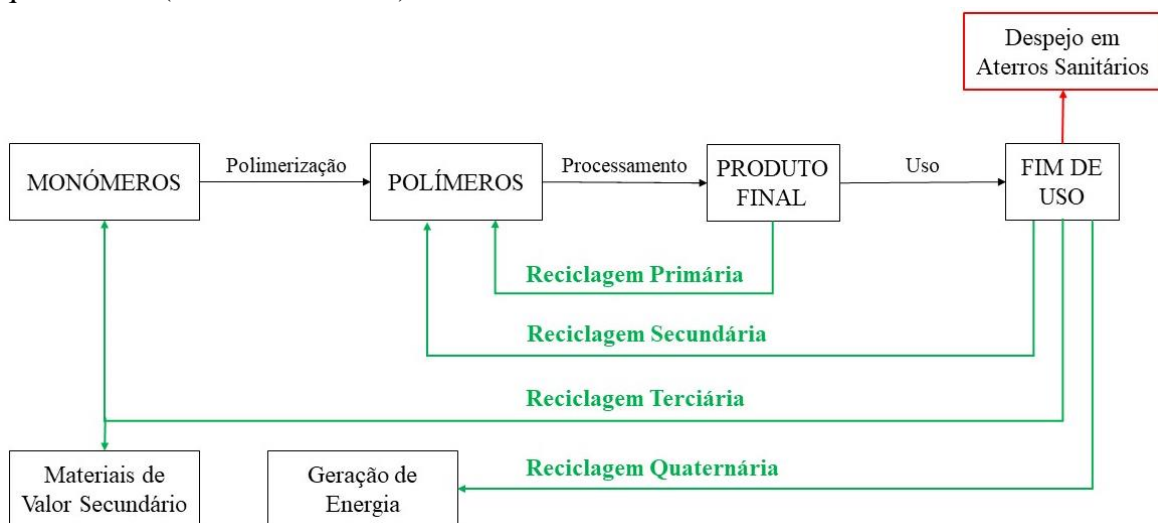


Figura 13: Tipos de reciclagem (Adaptado de Raju, 2017)

### **2.3.1. Reciclagem primária ou de pré-consumo**

Este método é o mais popular devido à sua simplicidade e baixo custo. Como o nome pré-consumo indica, esta reciclagem é feita a partir de resíduos ainda limpos e não-contaminados. Usualmente é efetuada na própria indústria transformadora, com o reaproveitamento de peças defeituosas, aparas e rebarbas provenientes das produções, que irão dar origem a um produto com características semelhantes às do original. A sua principal desvantagem é a existência de um número limite de ciclos para cada material. (Raju, 2017)

### **2.3.2 Reciclagem secundária ou mecânica**

A reciclagem secundária, é a conversão de resíduos plásticos descartados no lixo em grânulos, por um conjunto de meios físicos. A separação é o passo primordial de todo o processo. Inicialmente separam-se os diferentes tipos de plástico, de acordo com o aspeto visual. São também separados os rótulos de diferentes materiais, tampas de garrafas, entre outros. Segue-se uma seleção mais rigorosa por tipos de matéria-prima com técnicas de dissolução e precipitação consoante a densidade, e de seguida por diferentes cores através de leitura por infravermelhos. Por ser uma etapa maioritariamente manual, a eficiência de todo o processo está diretamente relacionada com a prática de quem a executa. Assim que separado, o plástico é moído em pequenos fragmentos que avançam para uma etapa de lavagem para a remoção dos contaminantes. Prossegue-se uma etapa de secagem e de compactação a fim de reduzir o volume da matéria que será reprocessado numa extrusora, onde será fundido numa massa homogênea e reprocessado num granulador, tomando a sua forma inicial. É nesta etapa que este método apresenta o maior entrave, não sendo possível a utilização de polímeros termoendurecíveis, pois estes não possuem a capacidade de ser re-fundidos e re-processados, conforme visto anteriormente. (Lontra, 2011)

Tratando-se de material polimérico de pós-consumo, na reciclagem mecânica a pureza dos resíduos é de elevada importância. A qualidade da fonte do material a ser separado é um fator determinante, pois o proveniente de reciclagens domésticas é muito mais limpo que o derivado de aterros e lixeiras. (Lontra, 2011) Para resíduos domésticos, a inexistência de impurezas permite a transformação de 1kg de plástico usado em cerca de 0.7 kg de material reciclado em forma de grânulo. (Petinga, 1994)

É de salientar que este método além de ser relativamente barato não representa qualquer risco de poluição ambiental, no entanto, é necessário um investimento inicial considerável. (Grigore, 2017)

### **2.3.3 Reciclagem terciária ou química**

Dadas as limitações apresentadas nos métodos de reciclagem anteriores, surgem alternativas denominadas de tecnologias avançadas de reciclagem, que permitem reciclar materiais sujos e contaminados, com aditivos e corantes, sem que haja a necessidade de uma seleção árdua ou lavagens dos resíduos. (Petinga, 1994)

A reciclagem química, sendo uma dessas tecnologias, é um conjunto de vários processos químicos avançados que consiste na despolimerização da matriz dos resíduos. Para este tipo de reciclagem, tanto as fibras, como polímeros, monómeros, combustíveis e ainda os produtos químicos podem ser recuperados. Os monómeros e produtos químicos provenientes da degradação da matriz, podem ser diretamente usados como matérias-primas usadas em novas polimerizações para reproduzir o polímero original ou em combustíveis. (Grigore, 2017) (Benoit, 2017)

Apenas algumas empresas trabalham com este processo, pois sendo um método complexo é necessário um investimento inicial avultado e mão-de-obra especializada. Ainda assim, é adequado para materiais contaminados ou para produtos com misturas de matérias. No entanto, este tipo de reciclagem é um bocado controverso ao criar uma quantidade grande de resíduos químicos, algo contraditório com os benefícios da reciclagem. (Benoit, 2017)

### **2.3.4 Reciclagem quaternária ou energética**

Assim como a reciclagem química, este método é uma tecnologia de reciclagem avançada, e é definido pela recuperação do conteúdo energético contido no plástico. (Raju, 2017) Consiste também na separação da matriz e das fibras através da decomposição do polímero, mas a altas temperaturas. A despolimerização do produto ocorre através de processos sob aquecimento externo, transformando este em energia ou combustíveis líquidos. Esta geração de energia, calor ou vapor durante o processo são recuperados e convertidos, por exemplo, em eletricidade. (Benoit, 2017)

A reciclagem energética é a solução que permite a uma geração de energia considerável e simultaneamente uma redução do volume de resíduos orgânicos. Contudo, também não é um método ecologicamente aceitável devido à emissão de toxinas poluentes para a atmosfera. (Grigore, 2017)

## 2.4. Economia Circular

O lixo é um indicador curioso que nos permite avaliar o desenvolvimento de um país. Quanto mais lixo a nação produz, mais desenvolvida ela é. No entanto, quando os resíduos plásticos não são descartados adequadamente, podem acabar como lixo no meio ambiente e oceanos, prejudicando a vida dos seres que nestes habitam. Com a continuidade deste panorama, estima-se que em 2050 exista mais plásticos que peixes nos oceanos. (Plastics – the Facts, 2016)

Em Dezembro de 2015, a Comissão Europeia publicou um artigo sobre Economia Circular de embalagens, incluindo propostas de revisão da legislação e um plano de ações. O desenvolvimento de embalagens que apenas possam ser recicladas com as tecnologias mecânicas existentes foi uma das soluções discutidas que pode resultar num produto com um ciclo de vida mais amplo, e quando este não puder ser eco-eficientemente reciclado, os seus resíduos devem ser vistos como um recurso valioso ao ser usados para produção de energia. As medidas tomadas para alcançar o pretendido passam pela restrição de aterro, até 2025, a plásticos que possam ser recuperados, para que até 2020 a reciclagem de plásticos ronde os 45%. (Plastics Europe, 2016)

Entre 2006 e 2014 o montante de plástico despejado em aterros na Europa foi reduzido em 38%. Países europeus onde aterros já tinham sido banidos têm mostrado que o objetivo é realístico e possível, tendo sete estados membros, assim como a Noruega e a Suíça, despejado menos de 10% dos seus resíduos plásticos. Estes países são a prova de que a reciclagem aliada à recuperação energética são duas opções que se complementam uma à outra a fim de explorar todo o potencial existente nos resíduos. Mesmo assim, onze estados membros continuam a despejar mais de 50%. Este era o resultado do pobre cumprimento da anterior legislação. (Plastics – the Facts, 2016)

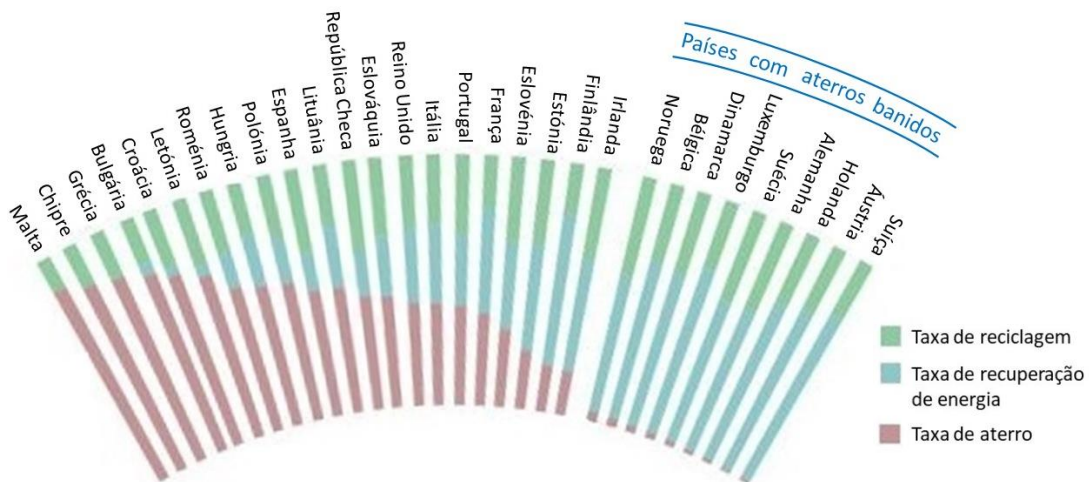


Figura 14: Tratamento de resíduos de plástico de pós-consumo (Adaptado de Plastics – the Facts, 2016)

A proibição de aterros de resíduos pós-consumo recicláveis ou recuperáveis até 2025 evitará assim que cerca de 8 milhões de toneladas por ano de plástico acabem em aterros. De acordo com um estudo recente, esta medida irá conduzir a um montante adicional de 5 milhões de toneladas de plástico reciclado. O restante, que não poderá ser sustentavelmente recuperado, pode gerar anualmente 330 TWh de energia, equivalente a providenciar eletricidade, aquecimento e arrefecimento para 30 milhões de pessoas, o que economizaria 70 milhões de barris de petróleo e criaria 300 mil postos de trabalho adicionais. (Plastics Europe, 2016)

Recentemente, como parte da missão de acelerar a transição para uma economia circular, a *Ellen MacArthur Foundation* providência um conjunto de ações baseados nesse intuito (Figura 15), prevenindo as sociedades desta gradual rejeição dos resíduos que contribuem para estes efeitos negativos. O foco de estudo recai sobre as embalagens plásticas, visto que a maioria destas é usada uma única vez e 95% do seu valor, estimado entre 67 a 100 bilhões de euros anuais, é perdido após o seu uso inicial. Com isto, a fundação ambiciona a criação de uma economia pós-uso eficaz, reduzir drasticamente o plástico dispersado para os sistemas naturais e adotar matérias-primas renováveis. As suas 3 principais estratégias para esta transição e áreas de ação prioritárias pretendem atingir a totalidade do plástico destinado ao fabrico de embalagens, e são: (Ellen MacArthur Foundation, 2017)

- 1- Redesign e inovação: Sem este ponto fundamental cerca de 30% das embalagens plásticas nunca serão reúsadas ou recicladas. Pequenos formatos tendem a escapar para o meio ambiente devido à sua dimensão pelo que a intervenção deverá ocorrer a nível de redesign das mesmas, com uma transição para formatos maiores. Produtos multi-material necessitam de atenção a nível de inovação, pois estas combinações de diferentes materiais muitas vezes inviabilizam a sua separação e conseqüentemente a sua reciclagem mecânica;
- 2- Reutilização: 20% das embalagens plásticas são descartadas com um potencial valor associado ao serem reúsadas. A substituição dos sacos de plásticos descartáveis por reutilizáveis, representam uma economia de materiais a rondar os 850 milhões de euros anuais. Produtos destinados a beleza e higiene pessoal e para cuidados do lar representam também um valor acrescentado. A sua maioria são diluídos, pelo que a venda do concentrado cabendo ao consumidor final fazer a sua diluição gerará uma poupança bastante significativa em matéria-prima e em custos associados a transporte.

- 3- Reciclagem com economia e qualidade radicalmente melhoradas: Com esforços combinados entre sistemas de conceção e pós-utilização, a reciclagem poderá ser economicamente atraente para os restantes 50%.

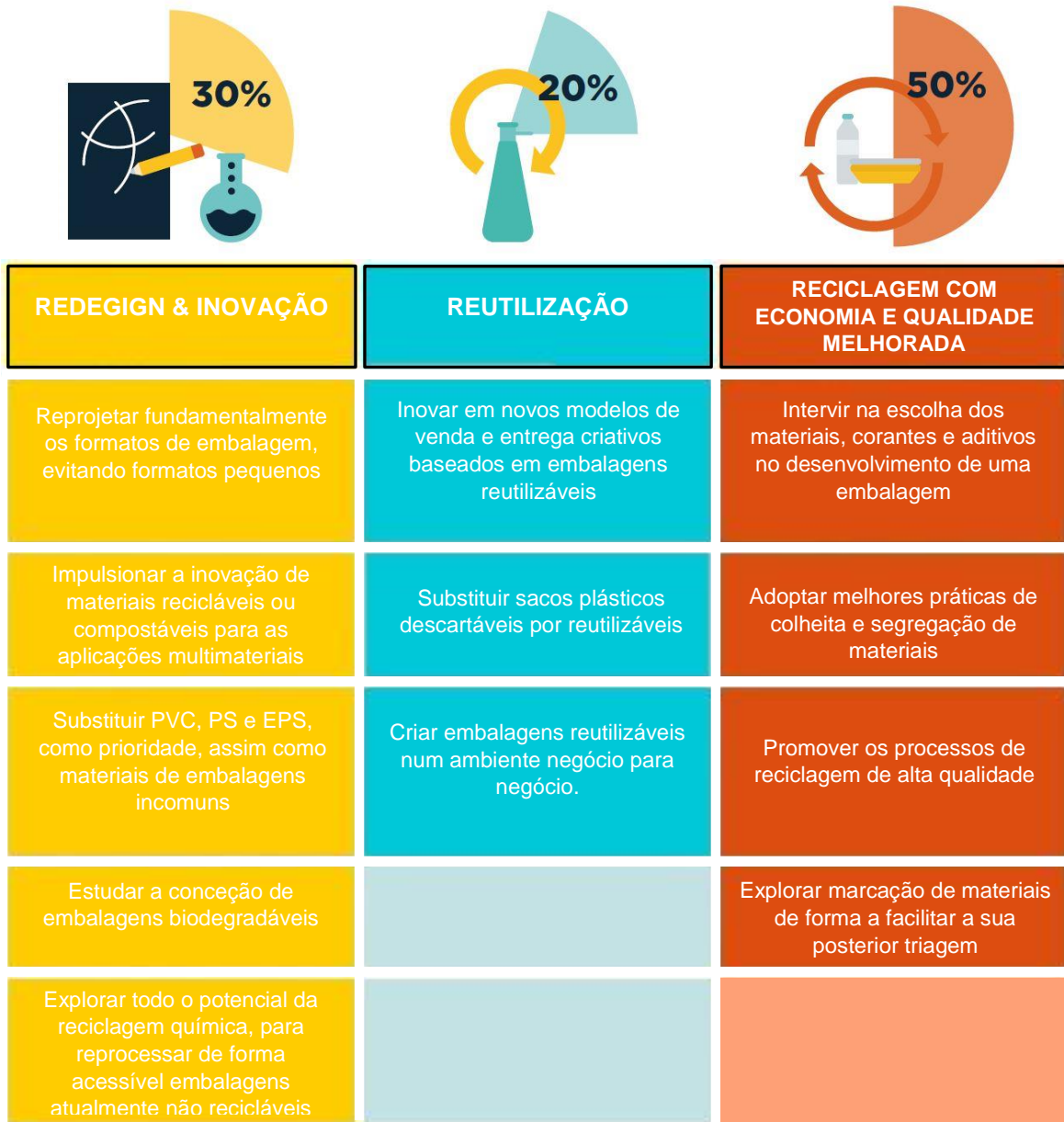


Figura 15: Ações prioritárias (Adaptado de Ellen MacArthur Foundation, 2017)

Nesta fase de investigação literária foi feito um levantamento dos dados que se achou pertinente estudar, assim como das ideologias temáticas, processos industriais abrangentes e materiais envolvidos nesta problemática atual que se pretende abordar.

### **3 Metodologia adotada**

Embora não haja nenhuma legislação nem metodologia a cumprir obrigatoriamente, compete ao produtor que a embalagem chegue ao cliente com a qualidade e requisitos exigidos pelo mesmo. Desta forma, seguiu-se um conjunto de procedimentos com o objetivo de avaliar a incorporação de material reciclado no processo.

O procedimento consiste num conjunto de ensaios a efetuar às matérias-primas sob a forma de granulado e também após o processo de transformação, sob a sua forma final de embalagem.

A viabilidade do projeto está em muito dependente da qualidade do material reciclado a testar. Um estudo recente, tendo por base um inquérito feito a cerca de quinhentas empresas de transformação de plástico, concluiu que a qualidade do produto assim como a estabilidade do processo são os fatores encarados como as maiores barreiras à sua incorporação. O resultado do estudo demonstra uma imagem negativa, com cerca de 60% dos inquiridos, afirmarem ser difícil ou muito difícil encontrar um fornecedor de MP reciclada satisfatório. Dos respondentes 58% declarou ainda ter dificuldades em encontrar um fornecedor firme em quantidades suficientes, e 46% confessou não receber a informação técnica necessária da parte do produtor, como o regulamento REACH e declaração de conformidade. (Polymer Comply Europe, 2017)

Na conceção da embalagem escolhida para o estudo, emprega-se como matéria-prima o polietileno de alta densidade e para efeitos de comparação, optou-se por levar a ensaio o Alcludia 5803 fabricado pela *Repsol*, um PEAD virgem vastamente utilizado no ramo. Pretende-se que o material reciclado a incorporar cumpra as especificações obtidas com esta matéria-prima virgem escolhida, e desta forma, serão ensaiadas amostras e embalagens com 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, em massa, de MP reciclada.

#### **3.1 Ensaios de amostras**

Através de alguma pesquisa no mercado, foi possível encontrar vários recuperadores de plástico ao longo do país. No entanto, após o primeiro contacto com as entidades recicladoras, verificavam-se quase todos os problemas enunciados no estudo referido anteriormente.



Contudo, no distrito de Leiria foi possível encontrar um fornecedor que garantia à *Colep* as necessidades anuais de consumo do sector dos plásticos. A empresa, de seu nome *Sirplaste*, apresentou de imediato uma vasta gama de recuperados de PEAD, através de processos de reciclagem secundária, dos quais cedeu amostras para a realização dos primeiros ensaios.

### 3.1.1 Seleção de amostras

Das amostras apresentadas, sob a forma de granulado, descartou-se de imediato os materiais recuperados coloridos, selecionando-se para o estudo amostras o mais incolor possíveis, para as quais o fornecedor prontificou a informação técnica necessária, desde a ficha de especificações do material aos regulamentos e declarações de conformidade.



Figura 16: Amostras de granulado: À esquerda MP virgem, no centro e à direita MP recicladas.

Na figura acima, é possível observar a discrepância existente na cor da MP reciclada quando comparada com a virgem, e ao mesmo tempo a notória evolução da reciclagem de plásticos. À esquerda, apresenta-se matéria-prima virgem escolhida como padrão de comparação, o Alcudia 5803. No meio, as amostras de reciclado com um tom mais incolor, com a designação de Sirpad Oxi Packs, e à direita já com um tom acinzentado, o Sirpad Oxi Big Bag, ambas provenientes da empresa de recuperação de plásticos *Sirplaste*. Estes últimos evidenciam o exponencial crescimento que envolve as indústrias recicladoras, sendo que a obtenção de um transformado de plástico translúcido através de processos de reciclagem secundária é cada vez mais uma realidade e não uma ilusão. O Sirpad Oxi Big Bag, num passado recente, era o polietileno de alta densidade mais incolor que o fornecedor conseguia apresentar aos seus clientes. Presentemente, surgiu o Sirpad Oxi Packs, transformado proveniente de garrafas de leite oriundas de Inglaterra, o qual se selecionou para a realização dos ensaios devido há polivalência que poderá tomar. O seu tom claro, mais próximo do incolor, poderá permitir a sua aplicabilidade em diferentes embalagens e de outras cores produzidas no sector, num futuro próximo.

No entanto, existem propriedades mecânicas e químicas de elevada importância a ter em conta na escolha de um material para que o mesmo não perturbe o bom funcionamento do processo, e que são um fator crucial para a seleção da matéria-prima reciclada a incorporar. Como referido anteriormente, no processo de insuflação, o plástico fundido cai verticalmente sobre o efeito da gravidade até que este seja envolvido pelo molde, pelo que parâmetros como o índice de fluidez e a densidade têm influência direta na estabilidade do processo atual e no peso da embalagem final. De maneira a que os parâmetros da máquina não se alterem, também a temperatura a que ocorre a fusão e a temperatura de decomposição da MP reciclada deve ser tida em conta. A primeira não deve exceder a da MP virgem, e a segunda para que não ocorra degradação do material deve ser superior a 190 °C, temperatura de trabalho da máquina.

Posto isto, o Sirpad Oxi Packs, além de ser o recuperado de PEAD mais incolor encontrado, é também o que detinha as propriedades acima mencionadas mais próximas do Alcludia 5803. A tabela abaixo, ilustra o descrito em cima, e as propriedades de ambos os materiais foram retiradas das fichas de especificações facultadas pelos seus produtores.

Tabela 1: Propriedades das amostras.

	Alcludia 5803	Sirpad Oxi Packs
Índice de Fluidez (g/10')	1,1	1,2
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,958	0,940 – 0.960
Ponto de fusão (°C)	180	125 – 140
Ponto de decomposição (°C)	–	300

### 3.1.2 Ensaio de dureza

O primeiro ensaio realizado consistiu na medição de dureza *Shore D*. do material reciclado selecionado anteriormente. Esta é uma propriedade fornecida na ficha de especificações do PEAD virgem, contrariamente à do reciclado, a qual se pretende avaliar e comparar com as mesmas condições de medição. Para esta análise, foi utilizado um durômetro analógico que segue a norma ASTM D2240 e ISO 868, presente no laboratório de qualidade do sector, e foi adaptada uma placa de aço como base de suporte que possibilitasse que as amostras de granulado se mantivessem estáticas durante o procedimento (Figura 17).

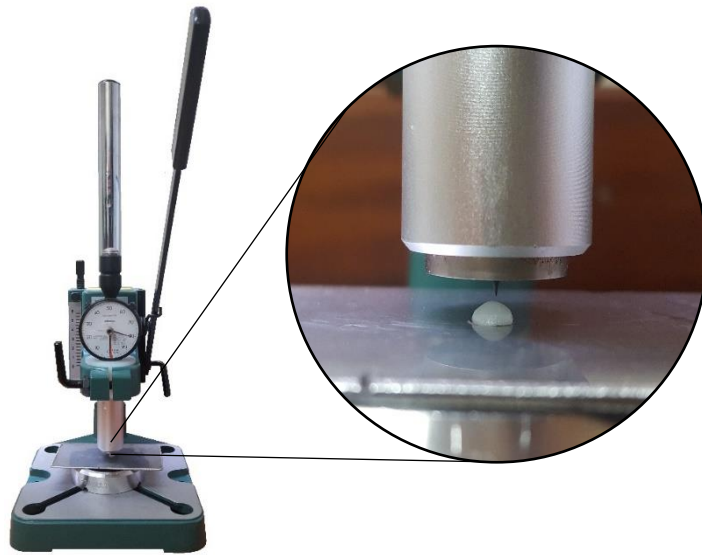


Figura 17: Durômetro analógico.

Este método de teste é um teste empírico destinado principalmente para fins de controle, que permite medições de dureza com base no recuo inicial, após um determinado período de tempo ou ambos. O ensaio é baseado na penetração de um tipo específico de indentador de aço, também conhecido correntemente por calcador ou penetrador, quando forçado para o material sob condições específicas. A dureza é inversamente relacionada à penetração e depende do módulo elástico e do comportamento viscoelástico do material.

O indentador que constitui o equipamento a utilizar tem a sua geometria e medidas representadas em anexo, e a leitura indicada por este deve ser registada dentro de 1 segundo após o contacto com a amostra, pois a dureza assinalada pode mudar num curto espaço de tempo. O procedimento consiste em fazer pelo menos 5 determinações de dureza em diferentes posições na amostra, e calcular a média aritmética dos valores obtidos. (ASTM D2240-03)

### 3.1.3 Ensaio de tração

Existem várias formas de se estudar as propriedades mecânicas de materiais. Para os polímeros, os ensaios a realizar podem ser estáticos ou dinâmicos, destrutivos ou não, de curta ou longa duração, entre muitas outras variâncias que se lhes podem aplicar. Estaticamente, a solicitação de um polímero pode ocorrer sob vários modos: tração, compressão, flexão, etc. Entre todos, os ensaios de tração são os mais populares.

Com o seu registo de dados sob a forma de gráficos com curvas de *tensão vs. deformação*, é possível obter e avaliar os principais parâmetros que quantificam a resistência mecânica do polímero, como o módulo de elasticidade, tenacidade, e tensões e deformações máximas, no escoamento e na rutura. (Canevarolo Jr., 2006)

A aplicação deste ensaio ao presente estudo, surge com o objetivo de averiguar como varia o comportamento mecânico do PEAD reciclado mencionado anteriormente, quando sujeito a uma força de tração. Para tal, e de acordo com a norma ISO 527:2012 “*Plastics – Determination of tensile properties*”, foram submetidos a teste provetes com os materiais e respetivas relações percentuais em massa referidos previamente. Os provetes, do tipo 5A (Figura 18), foram obtidos por moldação por injeção no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



Figura 18: Provetes do tipo 5A (ISO 527-2:2012)

A atividade experimental decorreu no mesmo lugar, e para o efeito utilizou-se a máquina universal Shimadzu Autograph AGS-X (Figura 19), onde foram ensaiados 5 provetes de cada diferente percentual, a uma velocidade de 5 mm/s, e a uma temperatura ambiente constante. Para a determinação de um valor de deslocamento mais rigoroso, utilizou-se um vídeo-extensómetro. (ISO 527-1:2012)



Figura 19: Shimadzu Autograph AGS-X

### 3.2 Ensaios de embalagens

Entende-se por embalagem um recipiente ou invólucro capaz de armazenar e proteger um conteúdo do ambiente envolvente durante um determinado espaço de tempo. No mercado há vários tipos disponíveis, sendo que qualquer que seja a sua geometria, dimensões, capacidade ou material constituinte, uma embalagem desde sua concepção à sua utilização encontra pelo menos três intervenientes: produtor, cliente e consumidor final. Compete ao primeiro, produzir com as especificações exigidas pelo segundo, para que esta chegue com as condições que satisfaçam as necessidades que levaram o terceiro a optar pela sua aquisição. (Theobald & Winder, 2006)

A *Colep* enquanto produtor, visa o compromisso para a satisfação do cliente. Para tal segue uma rotina com um conjunto de procedimentos para fins de controlo de qualidade baseados em instruções de trabalho internas.

Os ensaios de embalagens surge da necessidade de averiguar se com a integração parcial ou total de matéria-prima reciclada as características e propriedades permanecem dentro dos padrões requeridos pelo cliente. Conforme já enunciado previamente, pretende-se apurar se a embalagem sofre diferenças com a alteração da MP, e se o caso anterior se verificar, desde que percentagem essas dissimilaridades são mais relevantes. Para tal, serão feitos os ensaios de estanquidade, compressão, queda e compatibilidade química para as diferentes percentagens de incorporação de matéria-prima referidas na introdução do presente capítulo, seguindo as instruções de trabalho internas da empresa e respetivas normas em que estas se baseiam.

A embalagem em estudo (Figura 20), atualmente produzida num molde de duas cavidades, tem a capacidade de 1 L e um peso de  $67 \pm 1$  g.



Figura 20: Embalagem em estudo

### 3.2.1 Medição da espessura da parede

Este procedimento é executado em controlos de qualidade no sector, e consiste na medição da espessura da parede de uma embalagem em alguns pontos críticos de referência. Embora não seja aplicado ao recipiente em estudo, a decisão de o executar parte da necessidade de avaliar espessuras em zonas de potencial falha do produto, como o corpo e fundos, no ensaio de compressão e soldaduras no ensaio de queda. A sua realização é orientada através das normas de instruções de trabalho internas, com o objetivo de averiguar se os valores de espessura com a incorporação de PEAD recuperado se encontram dentro dos limites médios obtidos com a matéria-prima virgem.



Figura 21: Micrómetro de ultrassons

Para tal, é utilizado um micrómetro de ultrassons (Figura 21), onde um transdutor é excitado por um impulso elétrico de curta duração capaz de converter essa energia em ondas sonoras. Através de um meio, neste caso um óleo lubrificante, as ondas são transmitidas até ao material em análise, o polietileno de alta densidade.

### 3.2.2 Ensaio de estanquidade

Qualquer recipiente destinado a conter e transportar líquidos tem obrigatoriamente de ser estanque, isto é, de tal forma isolado que não permita a entrada e/ou saída de matérias.

O ensaio de estanquidade, ou estanquicidade, consiste em colocar uma embalagem cheia e tampada num reservatório com água e aplicar uma pressão interna de ar a pelo menos 0,2 bar durante 5 minutos, através de orifícios criados de antemão nas mesmas. Um deve ser usado para ligar a embalagem a um fornecimento contínuo e adequado de ar, e outro na ligação de um manómetro para a leitura da pressão exercida na parede do frasco. A força gerada permite sob observação durante esse espaço de tempo, identificar qualquer fuga na zona do gargalo. O procedimento deverá ser aplicado a 3 embalagens por cavidade. (ISO 16104: 2008)

Embora seja um procedimento obrigatório para o transporte de matéria perigosas, a empresa faz a sua aplicação no controlo de todos os seus produtos. Na norma é mencionado a possibilidade de execução de uma metodologia distinta para a realização do ensaio, desde que esta detenha uma eficácia igual ou superior. Como estamos perante um método destrutivo, a Colep desenvolveu uma câmara de vácuo de utilização simples de forma a diminuir o desperdício causado nos controlos de qualidade. Com um princípio de funcionamento de igual ideologia, é gerada uma pressão de -0,2 bar no interior da câmara através de uma bomba. O vácuo gerado sobre o conjunto cheio tem um efeito igual à aplicação de uma força simétrica sobre o mesmo. O procedimento é realizado para um número de amostras igual ao referido acima, e para efeitos de aprovação não se poderá verificar qualquer mínima fuga no conjunto. Entende-se por fuga qualquer pingo de água constatado.

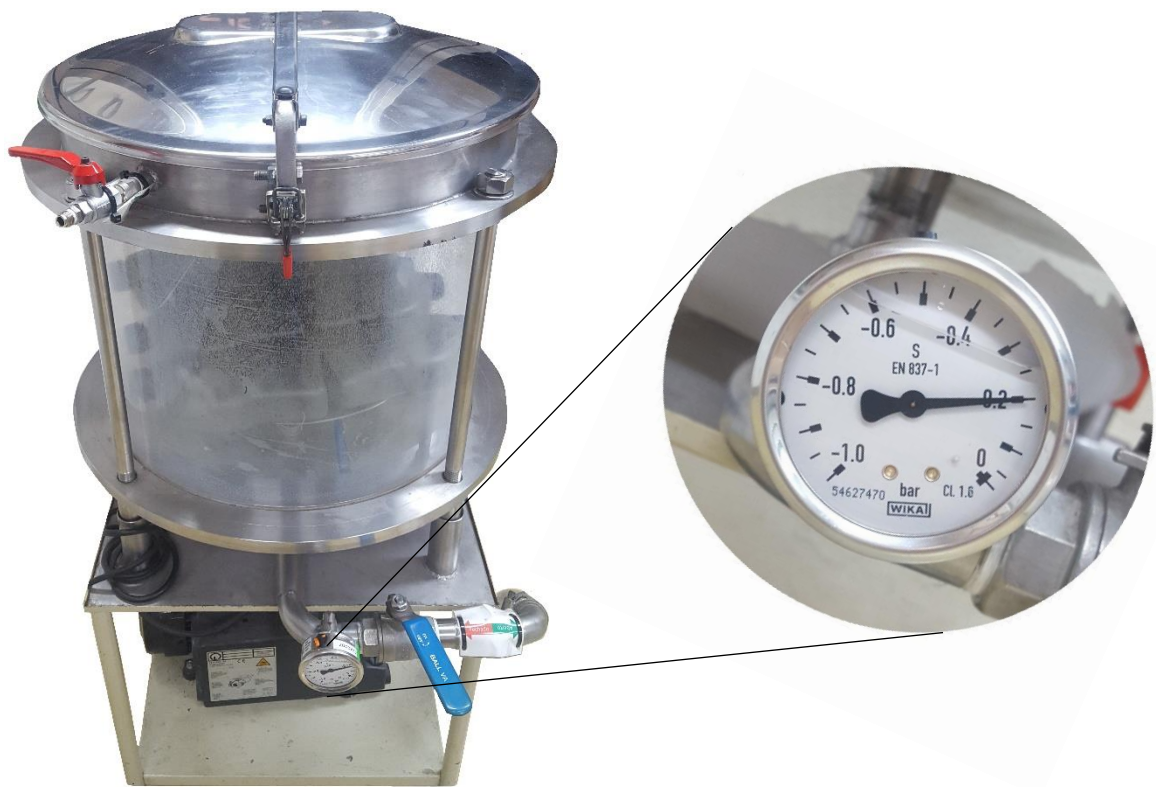


Figura 22: Equipamento para ensaio de vedação ao vácuo

A Figura 22 ilustra o equipamento utilizado na realização deste ensaio, para o qual foram examinadas as 3 amostras por cavidade, satisfazendo um total de 6 para cada percentagem de matéria-prima reciclada.

### 3.2.3 Ensaio de compressão

Quando um material é sujeito a uma tensão que, quando aplicada, conduz ao encurtamento ou diminuição de uma das suas dimensões, tecnicamente esse material está sob compressão. Além de avaliar a resistência de um objeto sobre determinadas condições, a objetividade de um ensaio de compressão consiste na rápida simulação do empilhamento das embalagens.

A aplicação de uma força progressiva inicialmente estipulada permite uma imediata análise do comportamento e deformação gerados no produto durante um espaço de tempo. O equipamento a realizar os ensaios deverá ser capaz de concentrar uma carga através de um movimento uniforme de uma ou de ambas as placas, sobre as quais a embalagem assenta, a uma velocidade relativa de  $10 \pm 3$  mm/min. A amostragem deverá ser de 5 unidades para produções em moldes de cavidade única, e para moldes múltiplos, 4 unidades por cavidade. Durante a atividade experimental, as embalagens deverão ser examinadas com o conteúdo a que se destinam armazenar. (ISO 12048:2000)

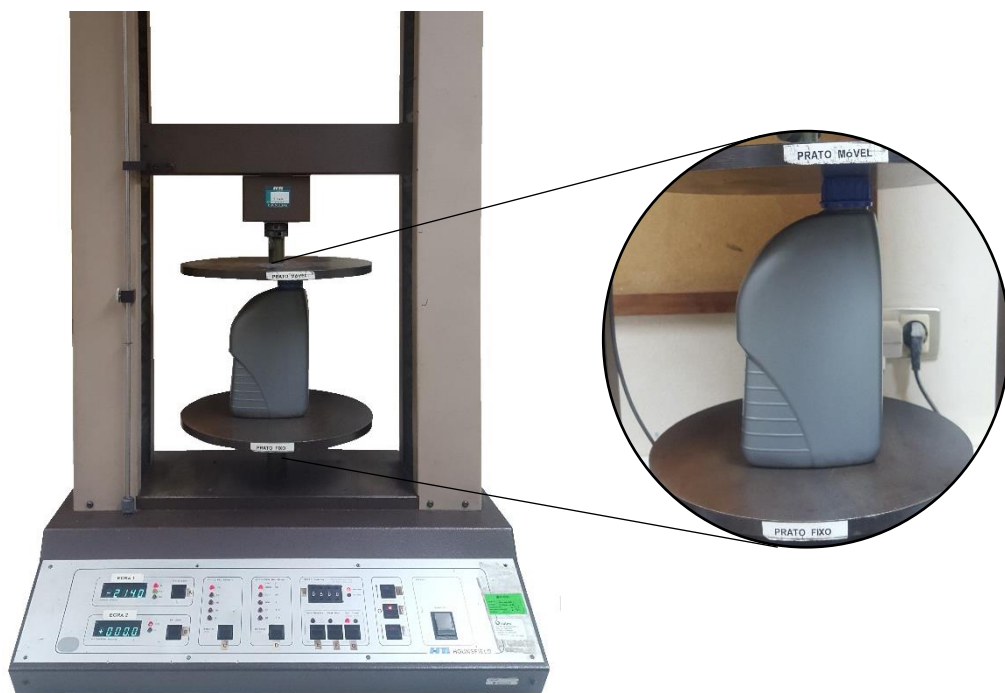


Figura 23: Equipamento para ensaios de compressão – HTE 10kN

Para levar a cabo o ensaio pretendido, utilizou-se a máquina de compressão HTE 10 kN (Figura 23), equipamento do laboratório de qualidade do sector, sobre a qual se aplicaram as condições acima descritas. Contudo, ao invés da utilização de um dos óleos lubrificantes para os quais a embalagem se destina armazenar, procedeu-se ao ensaio destas cheias com água.



Estudos realizados anteriormente no sector, revelam que quanto maior a densidade do líquido contido no interior de uma embalagem, maior a compressão obtida para um igual valor de deslocamento dos pratos. Devido às condições de empilhamento e armazenamento, o cliente solicita que para um deslocamento de 4 milímetros na componente vertical do frasco, este apresente uma resistência à compressão de pelo menos 400N. Logo, o alcance ou superação deste valor com água, remete para o conseguimento de um dígito superior com um líquido de maior densidade. No entanto, o objetivo primordial deste ensaio baseia-se no estudo dos valores de compressão máxima alcançados com diferentes misturas de matérias-primas empregues.

### 3.2.4 Ensaio de queda

Uma embalagem durante o seu ciclo de vida está sujeita a quedas, das quais é pretendido que não resultem derrames ou perdas da matéria que esta contenha. O ensaio de queda, ou impacto, pretende avaliar a resistência das amostras após uma colisão e analisar se as mesmas estão aptas para algumas adversidades que possam existir desde a sua conceção até ao fim de uso, sem que o seu conteúdo seja exposto.

A realização deste ensaio teve lugar no mesmo sítio onde se procedeu à realização dos ensaios descritos anteriormente. No entanto, este é executado numa cabine, criada de raiz no seguimento das condições da respetiva norma, vedada no seu redor devido à possível projeção de líquidos aquando o impacto (Figura 24). No seu interior, uma plataforma, na qual a embalagem é posicionada consoante a zona que se pretende atingir com a colisão, segue uma régua vertical marcada milimetricamente, para assegurar a altura de queda pretendida. Este é um procedimento particularmente útil em controlos de qualidade devido à rapidez de execução do mesmo. Pretende-se averiguar a resistência ao impacto para uma altura previamente definida, com registo das roturas observadas, num procedimento que consiste em levar a teste, individualmente, uma seleção mínima de 20 recipientes do mesmo lote de produção, plenamente cheios com água. Por rotura, entende-se qualquer sinal de fissura visível, ou algum sinal de líquido na parte exterior da embalagem através de alguma fenda, e a sua percentagem de ocorrência pode ser obtida através da seguinte equação:

$$\% \text{ Rotura} = \frac{X}{N} * 100$$

onde,  $X$  é o número de roturas, e  $N$  o número da amostragem. (ASTM D2563-15)



Figura 24: Cabine de ensaios de impacto

Para efeitos de aprovação de um lote, ao invés de uma queda simples, é exigido pelo cliente que este seu produto em análise resista a 3 quedas consecutivas, mais concretamente queda livre, sobre o gargalo e sobre o corpo, a uma altura de 1,5 metros. O número de amostras a testar solicitado pelo mesmo também difere. O total de 20, passa a 7 embalagens por cavidade, e abordagem levada a cabo neste ensaio é a mesma que nos anteriores. Pretende-se avaliar se a embalagem tem a mesma resistência ao impacto para diferentes percentagens de recuperado de PEAD incorporado.

### 3.2.5 Ensaio de compatibilidade química

Os recipientes de PE moldado por sopro quando sujeitos a certas condições de *stress*, e na presença de ambientes mais rigorosos como detergentes ou óleos, podem exibir falha mecânica por rachaduras e fendas. Este método de teste consiste em medir a resistência ao fendilhamento por tensão ambiental, que é afetada pelo *design* do produto, matéria-prima, condições de processamento entre outros fatores que podem afetar de forma considerável. Com a alteração da composição do material constituinte do frasco, existe a necessidade de avaliar se o mesmo é quimicamente compatível com o líquido que irá conter.

A metodologia consiste em colocar as embalagens cheias e fechadas, sob a ação de um potencial agente tensioativo a uma temperatura elevada controlada, observando-se o tempo de rotura, caso esta ocorra. Os resultados obtidos podem também ser usados na estimativa da validade. Para embalagens destinadas a conteúdos líquidos o procedimento baseia-se no enchimento da capacidade nominal de, no mínimo, 15 embalagens tampadas com o líquido potencial tensioativo escolhido. Estas são inseridas dentro de sacos plásticos, com espessura mínima de 0,5 milímetros, os quais têm de ser selados a quente com um dispositivo adequado. Assim que selados, os frascos deverão ser invertidos de forma a molhar toda a sua superfície interior. Posteriormente, procede-se há colocação destes dentro de uma estufa a uma temperatura de  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  na posição vertical. Durante as primeiras 8 horas, as amostras devem ser controladas horariamente, e após esse período, pelo menos diariamente ao fim de cada 24 horas de forma a examinar as zonas de rotura evidentes. O teste deverá ser levado a cabo até um máximo de 360 horas (15 dias), ou até que toda a gama da amostragem apresente falha. Entende-se por falha a formação de qualquer imperfeição, como uma fenda, que possa resultar na perda de gás pressurizado ou líquido, e a qualquer momento do ensaio é possível calcular a percentagem desta através da seguinte equação: (ASTM D2561-17)

$$\% \text{ Falha} = \frac{n}{N + 1} * 100$$

onde,  $n$  corresponde ao número cumulativo de recipientes com falha, e  $N$  ao número da amostragem. Para uma análise de dados mais completa, é imprescindível a obtenção das seguintes variantes: (ASTM D2561-17)

$F_1$  – tempo da primeira falha observada;

$F_{50}$  – tempo estimado para o qual 50% das mostras apresentaram falha;

$F_{100}$  – tempo observado, em horas, para o qual 100% das amostras apresentaram falha.

O sector dos Plásticos reúne todas as condições para a realização deste ensaio. Com a existência de uma estufa com regulação de temperatura digital (Figura 25) e de um dispositivo de selagem a quente viabilizou-se este e os anteriores procedimentos sem necessidade de recorrer a entidades externas. A resistência ao fendilhamento por tensão ambiental irá ser avaliada para as diferentes percentagens de combinação entre matéria-prima virgem e reciclada, tendo a escolha do recaído sobre o *white spirit*, o único líquido existente nos recursos da unidade industrial com efeitos de entumecimento sobre o Polietileno. (CNE, 2003)



Figura 25: Estufa

Simultaneamente, realizou-se um ensaio de permeabilidade química com o intuito de analisar se ocorre absorção de líquido por parte do material. Desta forma, todas as amostras foram de igual forma pesadas, numa balança analítica com uma precisão de  $\pm 0,1$  mg, no início e no fim da atividade experimental, sendo que para efeitos de aprovação a quantidade de líquido absorvida não pode exceder 7,5 % da massa inicial da embalagem. (CNE, 2003)



## 4 Análise e discussão dos resultados

Após a realização de todos os ensaios, e respetivo tratamento dos dados destes obtidos, segue-se a sua análise e comparação em relação às temáticas abordadas. Os dados disponibilizam-se da forma mais visual possível, com o intuito de facilitar a sua interpretação.

### 4.1 Análise dos ensaios de amostras

#### 4.1.1 Análise do ensaio de dureza

Na tabela 2, estão representados os valores obtidos para o ensaio de dureza realizado.

Tabela 2: Dureza *Shore D.* para as diferentes matérias-primas.

Dureza <i>Shore D.</i> (°)		
Zona	Material Virgem	Material Reciclado
1	64,5	57,0
2	62,0	54,0
3	67,5	56,0
4	67,5	54,5
5	68,0	53,0
<b>Média</b>	<b>65,9 ± 2</b>	<b>54,9 ± 1</b>

Na ficha de especificações do material virgem, o valor de dureza referenciado pelo produtor é de 66 °, o mesmo que o aqui obtido. Desta forma é possível verificar que os ensaios foram realizados sobre as mesmas condições e que a matéria-prima virgem apresenta uma dureza superior à reciclada em 17%.

Deste ensaio, é possível concluir que o recuperado de PEAD é significativamente mais mole, pelo que desta forma, é de se prever a obtenção de um módulo de elasticidade também inferior, aquando a sua determinação através do ensaio de tração.

#### 4.1.2 Análise do ensaio de tração

O ensaio de tração permitiu a análise e avaliação de algumas das propriedades mecânicas dos materiais em estudo. Para o projeto em questão, achou-se relevante obter o módulo de elasticidade ( $E$ ), a tensão de cedência ( $\sigma_c$ ) e correspondente deformação ( $\epsilon$ ), para comparação da resistência mecânica dos provetes.

Todas as medidas dos provetes foram conferidas com as da norma, de forma a excluir que qualquer registo anómalo no ensaio fosse derivado de pequenas variações nas proporções destes. A Figura 26 mostra o gráfico com as curvas de *tensão vs. deformação* médias das 5 trações realizadas para as diferentes percentagens de composição do provete.

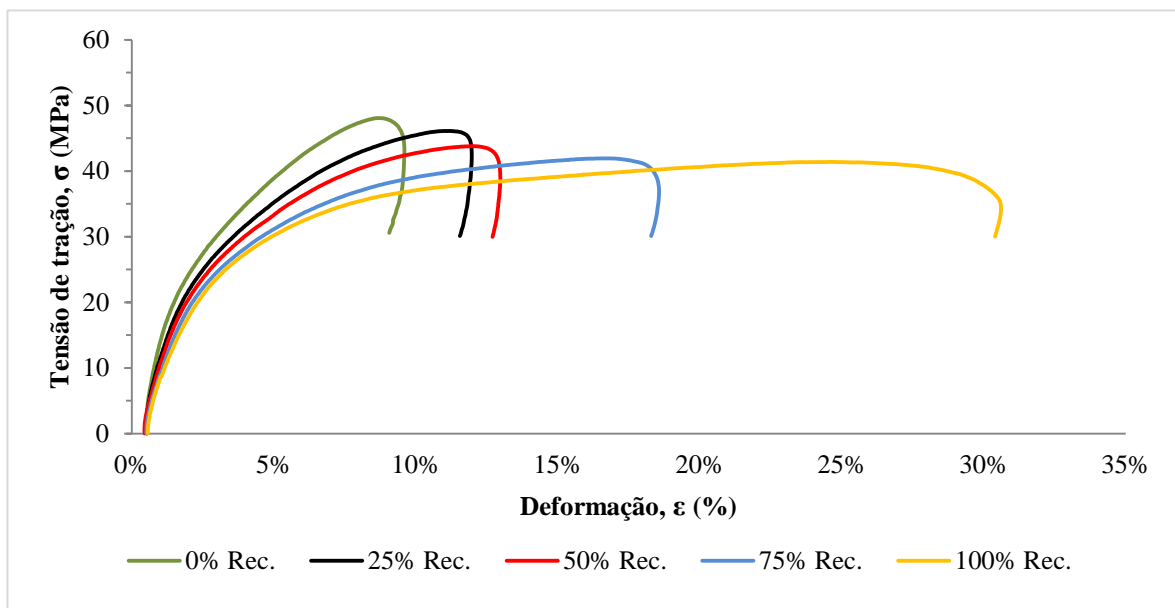


Figura 26: Gráfico de *tensão vs. deformação* para as diferentes percentagens de MP reciclada incorporada.

Pela observação do mesmo, é evidente que a tensão máxima por este suportada dá-se no ponto de cedência. É de igual forma notório, por análise da Figura 27, que à medida que se aumenta a quantidade de PEAD reciclado na composição do provete, a tensão de cedência vai decrescendo e a correspondente deformação nesse ponto vai aumentando. Esta abordagem permite concluir que a matéria-prima reciclada face à virgem, ao ser tracionada, suporta uma tensão máxima inferior, ou seja, é menos resistente.

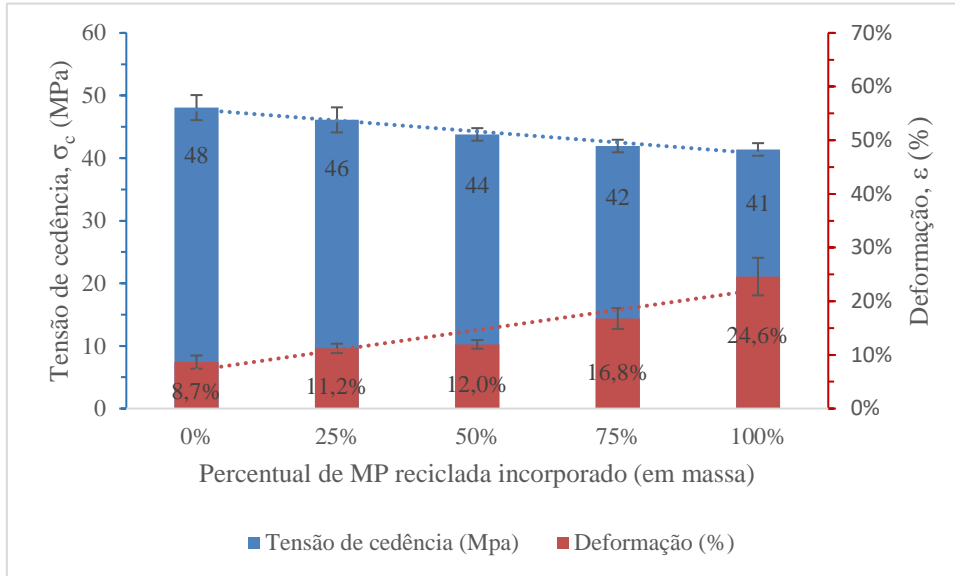


Figura 27: Valores de tensão de cedência média e respetiva deformação, em função do percentual de MP reciclada incorporada.

A rigidez, sendo a capacidade de suportar uma tensão sem alteração da dimensão, pode ser representada pelo módulo de elasticidade do material, e por observação do gráfico de barras da Figura 28, é perceptível que este módulo vai diminuindo à medida que é incrementado o reciclado na mistura de materiais. Isto, permite concluir que o recuperado de PEAD além de uma menor resistência, apresenta também uma menor rigidez, quando comparado com a matéria-prima virgem usada em produção. Consoante o verificado em estudos anteriores publicados na literatura, assim como o concluído no ensaio de medição de dureza, este era um resultado já expectável.

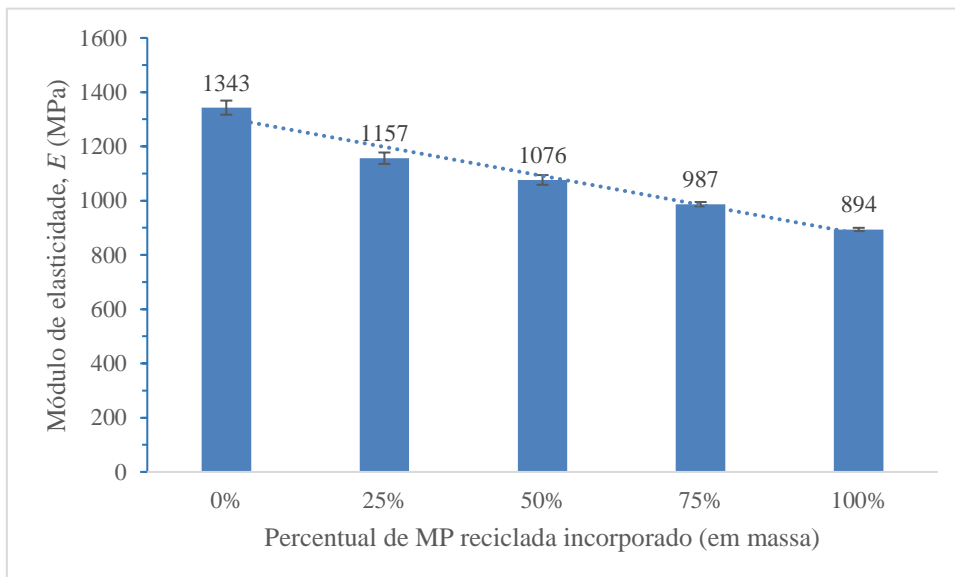


Figura 28: Efeito no módulo de elasticidade pela variação do percentual de MP reciclada incorporada



## 4.2 Análise de ensaios de embalagens

### 4.2.1 Análise da medição da espessura da parede

Na medição de espessura não se obtiveram grandes discrepâncias de valores a considerar, à exceção das embalagens compostas em 50 e 75 % do seu peso pelo recuperado de PEAD em análise, sendo que estas apresentaram uma espessura de parede na zona do fundo, de respetivamente, 7 % superior e 10% inferior, aos valores medidos na mesma zona dos restantes frascos.

Tabela 3: Valores de espessura da parede das embalagens em zonas mais débeis.

Zona	0% Rec.	25% Rec.	50% Rec.	75% Rec.	100% Rec.
Corpo	1,05 mm	1,03 mm	1,05 mm	1,04 mm	1,04 mm
Fundo	0,98 mm	0,99 mm	1,05 mm	0,89 mm	0,98 mm
Soldaduras	0,93 mm	0,94 mm	0,92 mm	0,92 mm	0,93 mm

Ao contrário do processo de injeção, no processo de moldação por sopro, a espessura é uma característica que é possível controlar e esta distribuição não uniforme de material em nada se relaciona com as matérias-primas utilizadas, mas sim com parâmetros de afinação do “párisson” na máquina. No entanto, esta maior densidade de material em zonas mais suscetíveis à falha poderá originar resultados anómalos nos seguintes ensaios.

### 4.2.2 Análise do ensaio de estanquidade

Das embalagens testadas, 3 por cavidade, num total de 6 para cada diferente percentagem de incorporação, não se observou qualquer fuga durante os 5 minutos em que estas foram sujeitas a uma sucção de 0,2 bar.

Daqui, conclui-se, que a utilização de polietileno de alta densidade reciclado, em nada afeta a estanquidade e vedação da embalagem para qualquer que seja o seu percentual.

### 4.2.3 Análise do ensaio de compressão

A realização deste ensaio permitiu a análise do comportamento das embalagens quando sujeitas à aplicação de uma carga, através da obtenção de dados, num programa computacional capaz de os converter num gráfico de *força vs. deslocamento*. Obtiveram-se 5 gráficos, um para cada uma das diferentes percentagens de mistura a analisar, com 8 curvas cada, correspondentes ao número de embalagens testadas.

Na figura seguinte, apresenta-se o gráfico obtido no ensaio de compressão das embalagens com 0% de PEAD reciclado, ou seja, totalmente constituídas pela matéria-prima virgem Alcudia 5803.

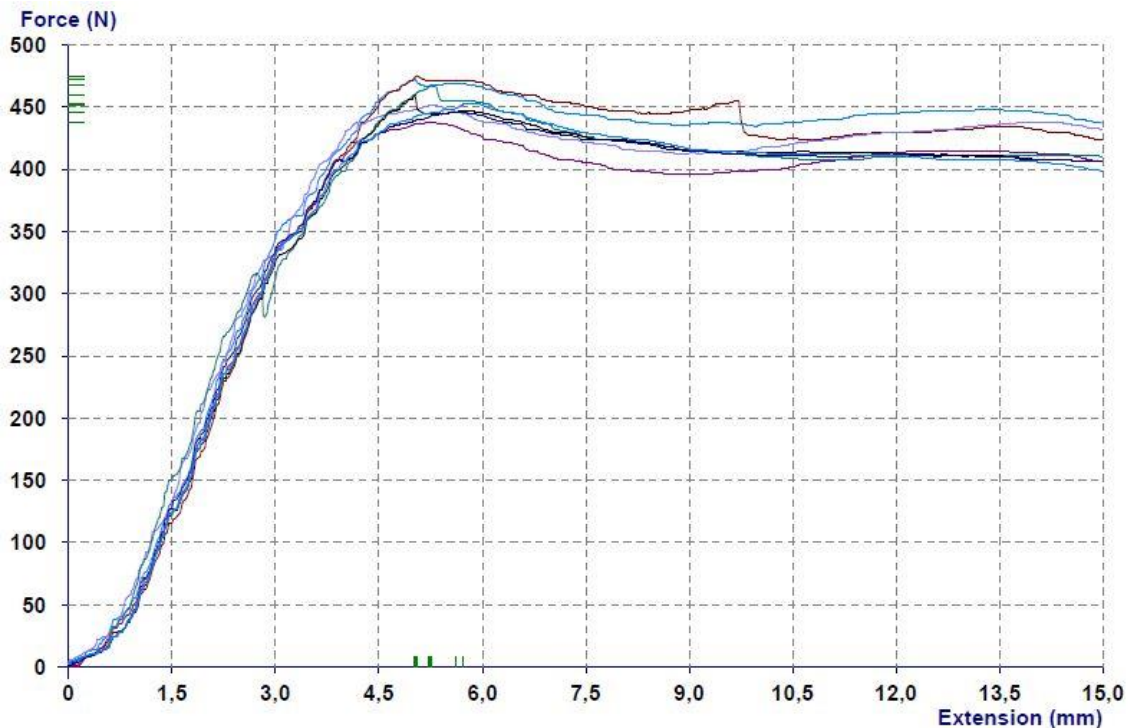


Figura 29: Gráfico *força vs. deslocamento* - 0% MP reciclada

A força que a embalagem consegue suportar até atingir o seu limite de resistência mecânica, corresponde ao pico máximo notório ao longo de uma curva, altura em que se dá nas zonas críticas do produto, uma deformação mais acentuada, designada de deformação plástica, onde o corpo não consegue retomar ao seu estado inicial. Essas zonas, mais suscetíveis a acumular tensões, são precisamente os fundos, soldaduras e esquinas para as quais se procedeu à medição da espessura da parede. As pequenas diferenças entre as curvas do mesmo gráfico, devem-se precisamente às mínimas variações na distribuição do material registadas anteriormente.

Os restantes gráficos apresentam curvas similares. Contudo, de forma a facilitar a análise tendo por base uma comparação entre os resultados, os mesmos disponibilizam-se nos gráficos de barras da Figura 30, com a média aritmética dos 8 valores de força máxima suportada e deslocamento para o qual esta ocorre.

Com os dados em baixo demonstrados, é imediatamente evidente que a força máxima suportada pelas embalagens ao serem comprimidas vai decrescendo à medida que a quantidade de material reciclado nestas incorporado vai aumentando. Assim, os resultados obtidos aquando o ensaio de tração podem ser reforçados e sustentados pelos obtidos aqui, verificando-se novamente que face à resina virgem, este recuperado de PEAD é menos resistente.

Relativamente ao deslocamento sofrido para a respetiva tensão máxima suportada, nada se pode concluir em concreto. Esta discrepância anómala entre os valores de deslocamento, pode ser justificada pelo verificado na medição de espessura da parede das amostras. A distribuição não uniforme do material em zonas mais débeis e suscetíveis a ceder, é a principal causa encontrada para este fenómeno, tendo sido verificado, precisamente, que os maiores desvios ocorreram nas embalagens constituídas em 50 e 75 % da sua massa por matéria-prima reciclada.

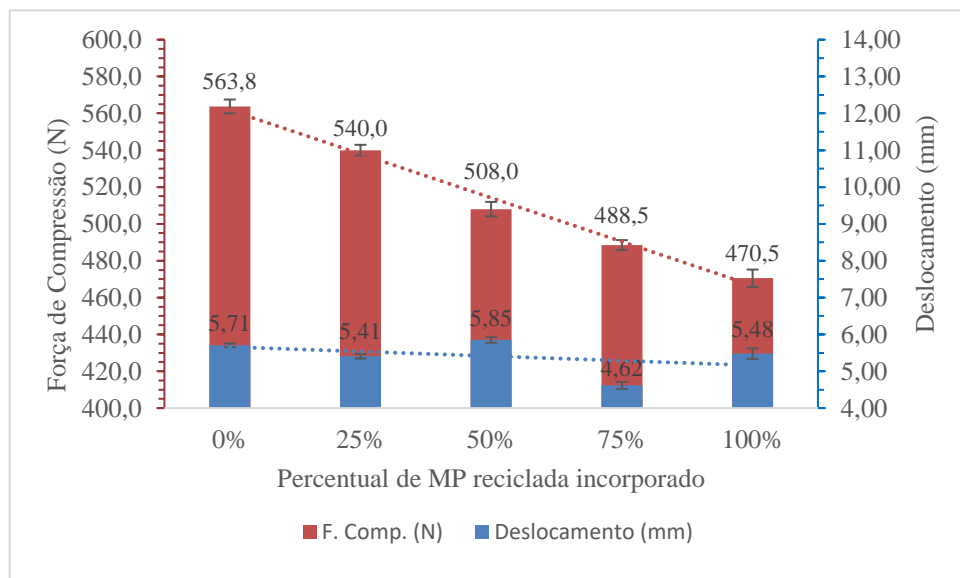


Figura 30: Valores de força de compressão máxima média e respetivo deslocamento, em função do percentual de MP reciclada incorporado.

Contudo, para um igual deslocamento sofrido, e tomando os 4 milímetros requeridos pelo cliente como referência, todas as amostras superaram os 400 N de força por este também indicados. Ainda assim, à medida que a percentagem de incorporação de Sirpad Oxi aumentava, para se gerar o deslocamento acima mencionado, era necessário ir aplicando uma carga inferior. Isto significa que o material reciclado confere uma menor resistência à embalagem quando comprimida. No entanto, a sua incorporação não interfere nas propriedades exigidas ao recipiente, visto que esta satisfaz os valores requeridos pelo cliente para este ensaio.

#### 4.2.4 Análise do ensaio de queda

Toda a gama da amostragem resistiu ao impacto do ensaio de queda. Das embalagens em teste, em nenhuma se visionou qualquer sinal de fissura ou fenda após as 3 quedas consecutivas a uma altura de 1,5 m, pelo que, para estas condições a percentagem de rotura é de 0 %.

#### 4.2.5 Análise do ensaio de compatibilidade química

Este ensaio foi levado a cabo durante o tempo de exposição máximo de 15 dias, devido a não se ter observado qualquer tipo de falha ao longo do tempo. Não se visionou alguma imperfeição ou pequena fenda no corpo da embalagem e não ocorreram fugas de conteúdo, o que permite concluir que  $F_1$ ,  $F_{50}$  e  $F_{100}$  são superiores às 360 horas de atividade.

Do ensaio de permeabilidade realizado paralelamente, constatou-se que para diferentes percentagens de incorporação de recuperado de PEAD, a quantidade de líquido absorvido não varia. Determinadas as pesagens finais, apurou-se que houve uma absorção média de conteúdo em  $4,49 \pm 0,04$  % da massa inicial das amostras, valor inferior aos 7,50 % estabelecidos como critério para efeitos de validação.

Tabela 4: Valores de absorção do ensaio de permeabilidade

	0% Rec.	25% Rec.	50% Rec.	75% Rec.	100% Rec.
Massa inicial (g)	66,9668	67,1905	67,3570	67,7657	67,1224
Massa final (g)	70,1092	70,3510	70,5168	70,9525	70,2882
Absorção (%)	$4,48 \pm 0,05$	$4,49 \pm 0,03$	$4,48 \pm 0,04$	$4,49 \pm 0,04$	$4,50 \pm 0,03$

### 4.3 Análise económica

Com os resultados obtidos de forma satisfatória para uma produção da embalagem constituída somente por polietileno de alta densidade recuperado, pretende-se estimar o impacto que esta mudança poderá causar na economia do sector. Sendo este o principal objetivo do projeto em questão, a análise estendeu-se a outras potenciais embalagens nas quais se pretende adotar esta ideologia para atingir o mesmo fim, uma redução nos custos associados à matéria-prima. Destes recipientes nenhum apresenta colorações intensas, e nenhum se destina a conter qualquer produto alimentar ou detergentes perfumados. O tom ligeiramente mais baço do material reciclado, assim que misturado com o respetivo corante do produto, poderia interferir na tonalidade final. Também o odor característico destes materiais, causado pelas diversas lavagens e descontaminações ao longo do ciclo de reciclagem, poderia adulterar o perfume característico dos detergentes a que estas se destinam conter.

Para satisfazer a procura média anual da embalagem submetida ao estudo, são gastos cerca de 82 000 kg de PEAD anualmente, o que representa 111 356 € no caso de uma matéria-prima virgem, e 75 850 € adquirindo material reciclado. Na produção das restantes embalagens com capacidade de se incorporar o material analisado, em média são transformados anualmente 675 000 kg de PEAD, o que equivale a uma quantia de 916 650 € para uma matéria-prima virgem, e 624 375 € optando pelo material reciclado.

Para o recipiente ensaiado, estes dados projetam anualmente uma poupança de 35 506 €, e para os restantes que num futuro recente serão abrangidos com o mesmo intuito, a economia anual criada rondará os 292 275 €.

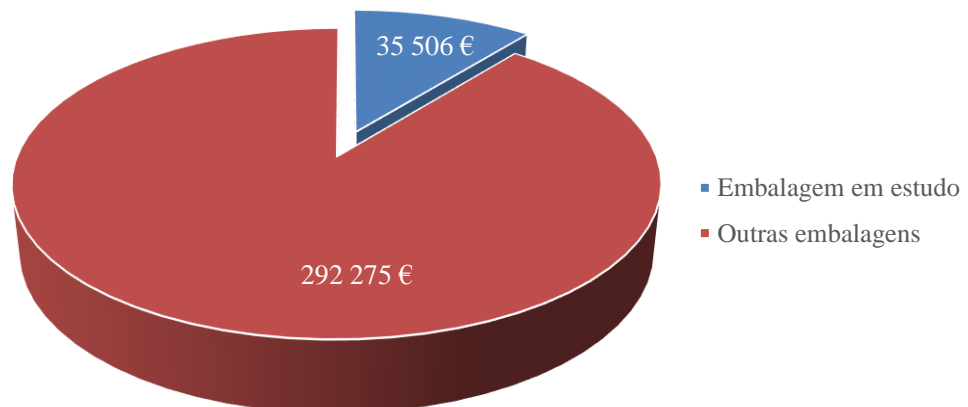


Figura 31: Economia anual gerada

## 5 Conclusão e Trabalhos futuros

O presente trabalho teve como principal objetivo a redução dos custos em matéria-prima na célula de insuflação de uma fábrica de embalagens plásticas. Com este intuito, estudou-se a possibilidade de incorporação de matéria-prima reciclada, devido ao seu valor de mercado mais acessível. O estudo recaiu sobre a análise de algumas propriedades do material, as quais foram comparadas às de uma das resinas virgens atualmente utilizadas por várias entidades do ramo na conceção de embalagens por sopro.

Nos ensaios realizados aos materiais virgem e reciclado selecionados para o estudo, verificou-se que o segundo, ao ser tracionado, suporta uma tensão máxima inferior e apresenta também uma menor capacidade de suportar essa tensão sem alteração da sua dimensão, ou seja, é menos resistente e menos rígido. Este último foi também verificado no ensaio de medição de dureza *Shore D.*, do qual se concluiu que esta menor rigidez era de 17%. No ensaio de compressão, realizado já em embalagens, foi evidente que a força máxima suportada por estas sob o efeito de uma carga compressiva vai decrescendo à medida que a quantidade de material reciclado nestas incorporado vai aumentando. Relativamente a deslocamento sofrido para a esta tensão máxima suportada, nada se pôde concluir em concreto, pois obteve-se uma discrepância anómala entre estes valores. A principal causa encontrada para este fenómeno foi justificada pelo analisado na medição de espessura da parede das amostras, onde se verificou uma distribuição não uniforme do material em zonas mais débeis e suscetíveis a ceder. Assim, os resultados obtidos aquando o ensaio de tração foram reforçados e sustentados com os analisado aqui, verificando-se que de facto a matéria-prima reciclada face à virgem confere à embalagem uma menor resistência.

Constatou-se que não existe diferenças entre ambas quando sujeitas a fendilhamento por tensão ambiental. Com a realização dos ensaios de compatibilidade química apurou-se que  $F_1$ ,  $F_{50}$  e  $F_{100}$  foram superiores às 360 horas de atividade. De igual forma, não se verificou qualquer diferença na permeabilidade dos materiais. Por base deste ensaio realizado em simultâneo ao anterior, apurou-se que houve uma absorção média de conteúdo em  $4,5 \pm 0,06$  % da massa inicial das amostras, valor inferior aos 7,5 % estabelecidos como critério para efeitos de validação. Também nos ensaios de queda e estanquidade, realizados em controlos de qualidade, não se verificou qualquer rutura ou fuga de conteúdo.

Em suma, conclui-se, que a incorporação deste material, embora menos resistente e menos rígido, em nada interfere nas funcionalidades exigidas ao recipiente, visto que estas satisfazem todos os valores requeridos pelo cliente em cada ensaio, cumprindo as normas e instruções de trabalho internas da empresa.

Com esta mudança de paradigma, e contabilizando a quantidade de matéria-prima transformada anualmente para satisfazer a procura média do recipiente ensaiado, é possível gerar uma economia de 35 506 € anuais. Sugere-se que desta forma, num futuro próximo, a metodologia usada nos ensaios de embalagens se alargue a outras embalagens produzidas no sector. Com a extensão desta incorporação de transformado de PEAD a outros potenciais produtos obtidos por insuflação, é possível criar, também anualmente, uma poupança média de 292 275 €. Assim a redução dos custos anuais em matéria-prima será de outra dimensão.

Dentro do mesmo âmbito, seria também interessante avaliar no futuro com quantos ciclos de reciclagem é possível reproduzir um mesmo produto sucessivamente sem que ocorra uma diminuição acentuada das características e propriedades mecânicas, assim como verificar o impacto gerado no meio ambiente e a poupança de combustível fóssil associada. De igual forma, seria pertinente estudar com qual dos primeiros três métodos de reciclagem abordados se consegue obter um polímero recuperado com propriedades mecânicas mais próximas do material virgem, e destes, averiguar qual apresenta uma melhor relação entre custo e benefício.

## 6 Bibliografia

- Alcântara, R. L., Carvalho, L. H., & Ramos, S. M. (1995). *Propriedades Mecânicas de Resíduos Plásticos Urbanos da Região Nordeste. 1- Influência das Condições de Processamento*. Paraíba, Brasil: Universidade Federal da Paraíba.
- American Society for Testing and Materials. (2000). ASTM D5033-00: Standard Guide for Development of ASTM Standards Relating to Recycling and Use of Recycled Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2003). ASTM D2240-03: Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM D4976-12: Standard Specification for Polyethylene Plastics Molding and Extrusion Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM D2463-15: Standard Test Method for Drop Impact Resistance of Blow-Molded Thermoplastic Containers. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D2561-17: Standard Test Method for Environmental Stress-Crack Resistance of Blow-Molded Polyethylene Containers. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Belcher, S. L. (2007). *Practical Guide to Injection Blow Molding*. CRC Press.
- Benoit, N. (2017). *Mechanical recycling of high density polyethylene/flax fiber composites*. Quebec, Canadá: Université Laval.
- Canevarolo Jr., S. V. (2006). *Ciência dos Polímeros - Um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. Artliber.
- Caraschi, J. C., & Leão, A. L. (2002). *Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos*. Panamá, Brasil: Universidade Estadual de Maringá.
- CASO Lda. (1994). *Moldação de Termoplásticos: Introdução aos plásticos*. Braga.
- CASO Lda. (1994). *Moldação de Termoplásticos: Moldação sopro*. Braga.
- CNE. (2003). *ADR/RPE Acordo Europeu Relativo ao Transporte Internacional de Mercadorias Perigosas por Estrada*. Centro Nacional de Embalagens.
- Colep S.A. (2 de Julho de 2018). *Our Global Presence*. Obtido de Colep: <http://www.colep.com/about-us/our-global-presence>
- Coutinho, F. M., Mello, I. L., & Santa Maria, L. C. (2003). *Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações*.
- DuPont Performance Polymers. (2009). *Manual de processamento de moldagem por sopro*.



- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *The New Plastics Economy - Catalysing action*.
- Grigore, M. E. (2017). *Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers*. Basel: MDPI.
- International Organization for Standardization. (2003). ISO 1604:2003 Packaging - Transport packaging for dangerous goods: Test methods.
- International Organization for Standardization. (2012). ISO 527-1:1996 Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles.
- International Organization for Standardization. (2012). ISO 527-2:2012 Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics.
- International Organization for Standardization. (2000). ISO 12048:2000 Packaging - Complete, filled transport packages - Compression and stacking tests using a compression tester.
- Lee, N. C. (2006). *Practical Guide to Blow Molding*. Rapra Technology Limited.
- Lee, N. C. (2007). *Understanding Blow Molding*. Hanser Publishers.
- Lontra, B. (2011). *Reciclagem Mecânica de Polietileno de Alta Densidade obtido a partir de sacolas plásticas*. Rio de Janeiro.
- Petinga, T. (1994). *Reciclagem de Plástico*. Novas Técnicas.
- Plastics Annual Report. (2016). *Plastics - The Facts 2016: An analysis of European plastics production, demand and waste data*.
- Plastics Europe. (2016). *Towards a life-cycle driven circular economy*.
- Plastics Europe. (2016). *Zero plastics to landfill by 2025*.
- Polymer Comply Europe. (2017). *The Usage of Recycled Plastics Materials by Plastics Converters in Europe*.
- Raju, F. (2017). *Recycling of Polymers - Methods, Characterization and Applications*. Wiley-VCH.
- RAR. (2 de Julho de 2018). *A empresa Colep: Informação financeira*. Obtido de [http://rar.com/pt/informacao\\_financeira\\_colep/](http://rar.com/pt/informacao_financeira_colep/)
- Roman, A. (1995). *Transformação do Polietileno*. Erica.
- S&P Global Platts. (Junho de 2018). *Polymerscan: Euro polymer spot price assessments*.
- Theobald, N., & Winder, B. (2006). *Packaging Closures and Sealing Systems*. United Kingdom: Blackwell Publishing Ltd.
- Whelan, T. (1999). *Manual de Moldagem por Sopros da Bekum*.

## Anexo 1

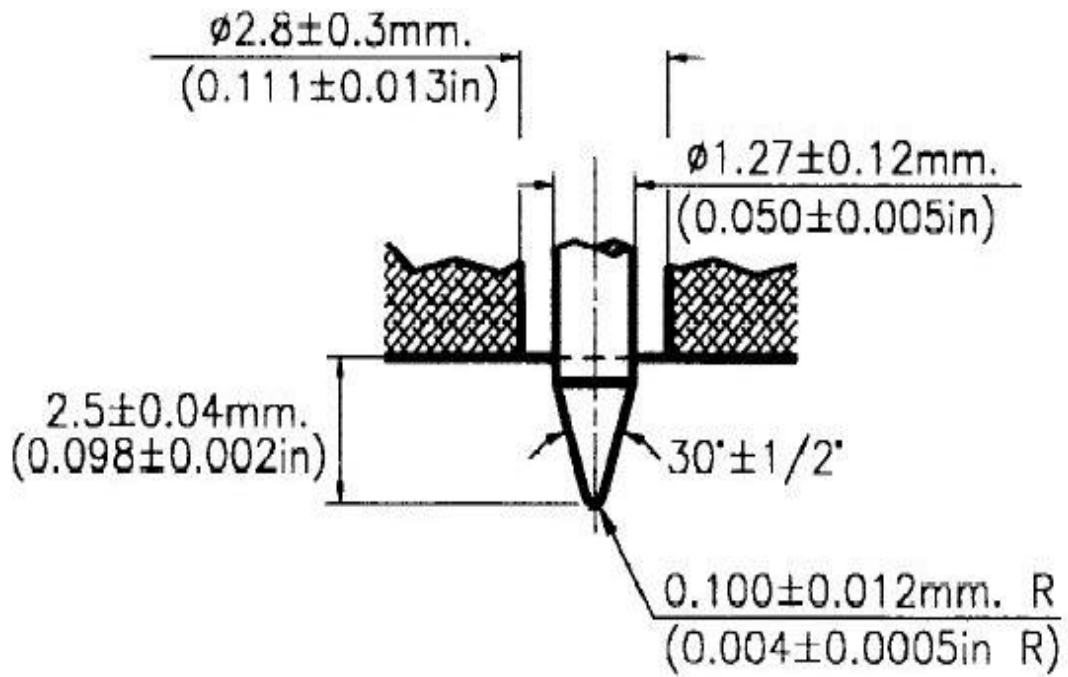


Figura 32: Tipo de indentador utilizado na medição de dureza (ASTM D2240-03).

## Anexo 2

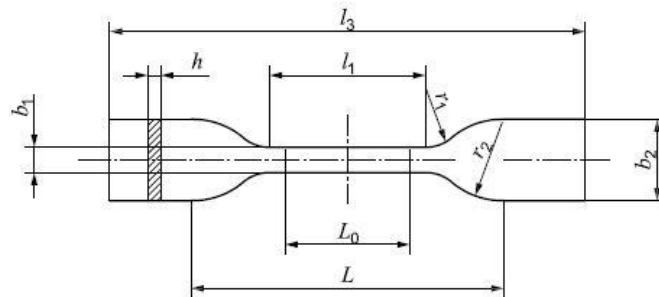


Figure A.2 — Type 5A and 5B test specimens

Table A.2 — Dimensions of type 5A and 5B test specimens

Dimensions in millimetres

	Specimen type	5A	5B
$l_3$	Overall length	$\geq 75$	$\geq 35$
$b_2$	Width at ends	$12,5 \pm 1$	$6 \pm 0,5$
$l_1$	Length of narrow parallel-sided portion	$25 \pm 1$	$12 \pm 0,5$
$b_1$	Width at narrow portion	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$
$r_1$	Small radius	$8 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$
$r_2$	Large radius	$12,5 \pm 1$	$3 \pm 0,1$
$L$	Initial distance between grips	$50 \pm 2$	$20 \pm 2$
$L_0$	Gauge length	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
$h$	Thickness	$2 \pm 0,2$	$1 \pm 0,1$

NOTE The specimen types 5A and 5B are similar to type 5 of ISO 527-3 and represent types 2 and 4, respectively, of ISO 37.

Figura 33: Desenho técnico dos provetes do tipo 5A utilizados (ISO 527-2:2012).