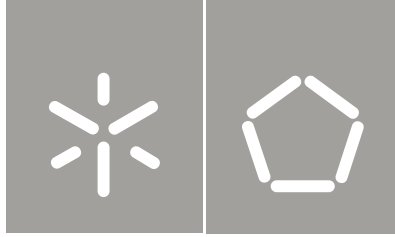


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Diogo Amadeu Arantes Monteiro

Sistema de reciclagem de garrafas de plástico
para o Centro Ciência Viva de Guimarães
(CCVG)



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Diogo Amadeu Arantes Monteiro

Sistema de reciclagem de garrafas de plástico
para o Centro Ciência Viva de Guimarães
(CCVG)

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Materiais

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor João Miguel Nóbrega

DECLARAÇÃO

Nome: Diogo Amadeu Arantes Monteiro

Correio eletrónico: a52617@alunos.uminho.pt

Tel./Tlm.: 917384060

Número do Bilhete de Identidade: 13595681 1ZZ2

Título da dissertação: Sistema de reciclagem de garrafas de plástico para o Centro Ciência Viva de Guimarães (CCVG)

Ano de conclusão: 2012

Orientador(es): Professor Doutor João Miguel Nóbrega

Designação do Mestrado:

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

Escola: Engenharia

Departamento: Engenharia de Polímeros

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, ____/____/____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Consciente de que a elaboração de um trabalho de dissertação jamais é um trabalho de uma pessoa singular, deixo aqui os meus sinceros agradecimentos a todos quanto direta ou indiretamente colaboram na sua concretização. Este trabalho nasce de uma vontade pessoal que rapidamente se tornou num projeto coletivo. Sem os quais não chegaria decerto a este resultado. Pessoas que despenderam o seu tempo no apoio, em orientação e solidariedade sem os quais tornaria este caminho mais difícil.

Haverá de certo pessoas que nunca terei a oportunidade de agradecer, pessoas incógnitas, que tornam os longos períodos de trabalho mais alegres, interessantes e enriquecedores.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor João Miguel Nóbrega pela orientação, pelos ensinamentos, pelo apoio e encorajamento durante toda a realização da dissertação.

Este trabalho não teria sido possível sem os esclarecimentos e informações disponibilizados por uma série de pessoas e entidades ao qual passo a citar.

Um muito obrigado ao Professor Doutor António Pousada por colocar o seu imenso conhecimento ao dispor do desenvolvimento desta tese

A todos os elementos dos Laboratórios do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho que tanto ajudaram na elaboração da dissertação, nomeadamente ao assistente técnico João Paulo Peixoto pela sua ajuda nos testes do equipamento e ao assistente técnico Serafim Sampaio por ceder o seu tempo e vasta experiência, com intuito de tornar possível o funcionamento o sistema do módulo de reciclagem do Centro Ciência Viva de Guimarães (CCVG).

Um bem-haja especial a todos os funcionários dos bares da Universidade do Minho pela sua disponibilidade e prontidão aquando a obtenção das matérias-primas (garrafas de plástico) para este projeto.

À reitoria da Universidade do Minho por ceder, prontamente, fundos para a conclusão dos trabalhos e à Câmara Municipal de Guimarães por fornecer não só verbas como também o espaço, a sala de reciclagem do Centro de Ciência Viva de Guimarães (CCVG), para a realização da dissertação.

Gostaria de fazer um agradecimento especial a todos os meus amigos, de sempre e aos mais recentes pela companhia, partilha e afeto durante a elaboração da tese. É também graças a eles que consegui atingir este objetivo.

À minha família que tanto me acompanhou e com quem partilhei todas as minhas alegrias e aborrecimentos, à minha mãe e ao meu pai pela orientação, preocupação e construção da pessoa que sou hoje. Um agradecimento muito especial à minha irmã e ao meu irmão que tanta paciência tiveram durante este ano e que sempre se prontificaram para me ajudar. A todos eles, um agradecimento especial pelo apoio, compreensão e orientação em todas as fases e tomada de decisões na minha vida.

RESUMO

O estudo insere-se no novo CCVG, realizado no âmbito do projeto Guimarães 2012 Capital Europeia da Cultura, que ambiciona através de várias experiências mostrar as benesses da ciência. Um dos objetivos do CCVG, e tema central da dissertação, será demonstrar interactivamente como se desenrola as etapas da reciclagem mecânica de garrafas de plástico para produção de um porta-chaves – que se desenvolve nas etapas: operações prévias (separação do rótulo e, possivelmente, dos materiais da garrafa); granulação; lavagem e separação por densidades; secagem e desumidificação; e processamento.

Criou-se uma base teórica da reciclagem dos materiais que constituem uma garrafa, politereftalato de etileno (PET) e polietileno (PE) e do trabalho prévio realizado pela Sara Sampaio na dissertação “Desenvolvimento de um Sistema Didáctico de Reciclagem de Garrafas de Plástico” [1] que permitisse perceber, respetivamente, as etapas e equipamentos necessários para a reciclagem mecânica de garrafas de plástico.

Na componente experimental exerceram-se três tipos de amostras, os materiais da garrafa isolados, PET do corpo da garrafa e PE das tampas, e à mistura.

Na granulação determinou-se que o mais adequado para o PE e para a Mistura é a introdução de grupos de 5 garrafas com tempos de espera entre cada uma de 45 segundos e entre grupos de um minuto. Conclui-se, também, que se se pretender reciclar, apenas, o PE poder-se-á triturar tudo de uma só vez. Quanto ao número de granulações o mais apropriado será passar por duas fases desta etapa.

Na análise da separação entre o PET e PE verificou-se que se consegue a separação dos materiais por possuírem massas volúmicas diferentes, porém a metodologia não assegura a separação total, o que conferiu maior relevância ao estudo da possibilidade de injeção da mistura.

Para a secagem o tempo de 1 hora à temperatura de 85 °C provou ser o mais ajustado, em todos os materiais. Após análise qualitativa das peças finais verificou-se que na desumidificação o PET deverá permanecer no desumidificador, um mínimo, de 2 horas a 170 °C enquanto para a mistura o tempo será de 4 horas à temperatura de 140 °C.

No processamento determinou-se que a injeção da mistura reciclada é possível e encontrou-se um conjunto de valores adequados para cada amostra de forma a automatizar todo o processo.

ABSTRACT

The study integrates itself in the framework of “Guimarães 2012 Capital Europeia da Cultura” project and the subsequent inauguration of the new CCVG; its main objective is through several experiences show what science can offer to society. One of CCVG’s goals, and the main subject of this thesis, is to illustrate interactively how all stages of recycling plastic bottles – namely pre-stages (label separation and, if possible, of materials), grinding, washing and separation by densities and reprocessing –take place in order to develop a keyring.

A theoretical base was sought for the recycling of materials that form a bottle, “polyethylene terephthalate” (PET) and the “polyethylene” (PE), and for the previous work done by Sara Sampaio in the dissertation. “Desenvolvimento de um Sistema Didático de Reciclagem de Garrafas de Plástico” [1] which allowed to understand the necessary stages and equipment for the mechanical recycling of plastic bottles in CCV.

Please note that the experimental part was made for three samples, to the bottle isolated materials, PET (bottle’s body) and PE (lids), and the mixture.

Grinding’s study determined that for both the body and the complete bottle the most adequate conditions will be inserting groups of 5 bottles with waiting times of 45 seconds between bottles and 1 minute between groups. When only PE recycling is intended, every lid can be ground all at once. Concerning the grindings’ number, it was found that the appropriate was to put plastic bottles through two consecutive ones.

The analysis of materials separation confirmed that it’s possible to separate materials because they have different densities, however it doesn’t fully happen, giving a bigger weight to the possibility of injecting the mixture.

Drying for 1 hour at 85 °C in the dryer for all materials has proven to be the most adequate. According to the qualitative analysis of injected pieces, PET shall remain in the desiccant-dryer for, at least, 2 hours at 170 °C whilst for the mixture the time shall be 4 hours at a temperature of 140 °C

In reprocessing it was determined that the mixture’s injection is possible. It was found a set of adequate values for each sample in order to automate the whole process and demonstrate it effectively to the visitors.

LISTA DE ABREVIATURAS

CCVG: Centro Ciência Viva de Guimarães;

LER – Lista Europeia de Resíduos;

MEV: Microscopia eletrónica de varrimento;

PE: Polietileno;

PE-AD: Polietileno de alta densidade;

PE-BD: Polietileno de baixa densidade;

PET: Politereftalato de etileno;

POSC-PET: PET pós-consumo;

PP: Polipropileno;

R-PET: PET reciclado;

RSU: Resíduos Sólidos Urbanos;

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
LISTA DE ABREVIATURAS	VII
ÍNDICE GERAL.....	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
CAPÍTULO I – CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO ESTUDO	
1.1 – Introdução	1
1.2 – Identificação do Problema	2
CAPÍTULO II – ENQUADRAMENTO TEÓRICO	
2.1 – Centro Ciência Viva de Guimarães.....	5
2.2 – Materiais Plásticos	5
2.3 – Impacto e Educação Ambiental	8
2.4 – Tratamento de Resíduos.....	9
2.5 – Reciclagem.....	11
2.6 – Reciclagem de Garrafas de Plástico.....	12
2.6.1 – Politereftalato de Etileno (PET)	13
2.6.1.1 - Contaminação do PET.....	14
2.6.1.2 – Reciclagem Mecânica do PET.....	15
2.6.1.3 – Linha Típica de Reciclagem de PET	19
2.6.2 – Polietileno.....	21
2.6.2.1 – Reciclagem Mecânica do PE	22
2.6.3 – Influência do PE no PET	22
2.7 – Trabalho Prévio Desenvolvido	24
2.8 – Objetivos de Estudo	25
2.9 – Plano Geral da Dissertação	26
CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1 – Materiais	27
3.2 – Granulação	30
3.3 – Lavagem e Separação de Materiais Por Densidades.....	31
3.4 – Secagem e Desumidificação	32
3.5 – Condições de Funcionamento de Injeção	34

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Materiais	37
4.2 – Granulação	39
4.3 – Separação de Materiais	42
4.4 – Secagem e Desumidificação	43
4.5 – Condições de Funcionamento de Injeção	44
4.6 – Percorso do Visitante no CCVG	52

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

5.1 – Principais Conclusões	53
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros	56

CAPÍTULO VI – BIBLIOGRAFIA

6.1 – Referências Bibliográficas	57
--	----

ANEXOS

ANEXO I.....	63
ANEXO II	69
ANEXO III	73
ANEXO IV	77

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO II – ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Tabela 2.1 – Os diferentes níveis de reciclagem.....	12
Tabela 2.2 – Propriedades químicas e físicas do PET	14
Tabela 2.3 – Requisitos mínimos para o processamento dos grânulos POSC-PET.	16
Tabela 2.4 – Propriedades químicas e físicas do PE.....	22
Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas da mistura com diferentes percentagens de PE	24

CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 3.1 – Constituição e forma de obtenção dos diferentes tipos de amostra	28
Tabela 3.2 – Principais requisitos do granulador.....	30
Tabela 3.3 – Experiências realizadas na granulação para A-PET	31
Tabela 3.4 – Propriedades do Secador e Desumidificador	32
Tabela 3.5 – Condições de desumidificação para a A-PET.....	33
Tabela 3.6 – Principais requisitos da injetora utilizada	34

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 4.1 - Percentagem de PE para diferentes volumes	38
Tabela 4.2 - Conclusões das experiências realizadas na granulação para A-PET.	40
Tabela 4.3 – Condições de processamento para o PET	49
Tabela 4.4 - Condições de processamento para o PE	50
Tabela 4.5 - Condições de processamento para a A-M2	51

ANEXO II

Tabela II.1 – Análise da Amostra de Matéria-Prima	71
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II – ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Figura 2.1 – Sala de Reciclagem do CCVG	5
Figura 2.2 – Produção Mundial de Plástico	7
Figura 2.3 – Procura Europeia de Plástico	8
Figura 2.4 – Hierarquia da Gestão de Resíduos em Ordem Decrescente de Preferência ..	11
Figura 2.5 – Fluxograma das etapas da reciclagem mecânica	12
Figura 2.6 – Procura Europeia de PET para os diferentes setores.	13
Figura 2.7 – Variáveis do processo de moldação por injeção.....	19
Figura 2.8 – Etapas de uma linha típica de reciclagem de PET.....	20
Figura 2.9 – Procura Europeia para o PE em cada setor.....	21
Figura 2.10 – Valores de viscosidade para mistura PET-PE a taxas de corte de 5000 e 10000 s ⁻¹	23
Figura 2.11 a) Micrografia da superfície de mistura PET-PE b) Imagem do efeito de laminagem da mistura PET com 15% de PE	24

CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 3.1 – Amostra de garrafas de plástico reunidas	27
Figura 3.2 – Correspondência entre testes e as amostras utilizadas	29

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 4.1 – Distribuição das marcas na amostra	37
Figura 4.2 a) - Uma fase de granulação; b) Duas fases de granulação	41
Figura 4.3 – Distribuição dos volumes na amostra.....	42
Figura 4.4 – Teste de separação por densidades; a) Separação do PE do PET; b) Remoção do PET; c) Remoção do PE.	42
Figura 4.5 – A-PET imersa em água.....	43
Figura 4.6 – Evolução do teor de humidade com o aumento do tempo de secagem no desumidificador.....	44
Figura 4.7 – PET com 1 hora a 85 °C na estufa e 6 horas a 170 °C no desumidificador	45
Figura 4.8 – PET com 1 hora a 85 °C na estufa e 4 horas a 170 °C no desumidificador....	46
Figura 4.9 – PET com 1 hora a 85 °C na estufa e 2 horas a 170 °C no desumidificador....	46
Figura 4.10 – PET com 1 hora a 85 °C na estufa.....	46
Figura 4.11 – PE com 1 hora a 85 °C na estufa	47
Figura 4.12 – PET e PE com 1 hora a 85 °C na estufa e PET com mais 2 horas a 140 °C no desumidificador.....	47
Figura 4.13 – PET com 1 hora a 85 °C na estufa e 6 horas a 170 °C no desumidificador..	48
Figura 4.14 – Defeitos resultantes da inadequação das variáveis operatórias de injeção; a) Rebarba; b) Rechupe.....	48

ANEXO I

Figura I.1 a) Secador CONAIR; b) Desumidificador CONAIR.....	65
Figura I.2 – Tina de aço.	65
Figura I.3 – Moinho da TRIA	65
Figura I.4 – Alimentador CONAIR	65
Figura I.5 – Tapete rolante com proteção	65
Figura I.6 – Refrigerador EQUIFAB	65
Figura I.7 – Robô PIKO.....	67
Figura I.8 a) Termorregulador; b) Injetora BOY 22M.	67

ANEXO III

Figura III.1 a) Uma fase de granulação; b) Duas fases de granulação.	75
---	----

ANEXO III

Figura IV.1 – Layout da sala de reciclagem	79
--	----

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO ESTUDO

1.1 – INTRODUÇÃO

A partir do Sol consegue-se energia gratuita, no entanto tem que se recolher da Terra as matérias-primas. A partir de ambas as fontes conseguem-se produzir os produtos finais necessários para a nossa vida diária, que, após o seu uso, retornam a terra como resíduo. E tal tem vindo a ser feito ao longo de milhares de anos. Civilizações surgiram e desapareceram e a matéria bruta foi sempre vista como ilimitada, a sua disponibilidade ficava, apenas, restrita à capacidade de as obter e transformar e à capacidade da terra absorver os nossos resíduos.

Contudo, à medida que a humanidade cresceu – somos, atualmente, mais de 7,000,000,000 seres humanos – as conceções mudaram, e a consciência dos limites, tanto dos recursos como do espaço destinado ao despejo, tornou-se dominante. Vemo-nos, agora, obrigados a interagir com a Terra, como parte do ciclo de materiais e de energia, e a preocuparmo-nos sobre a forma adequada de o gerir.

A sociedade atual possui um ónus marcado pela evolução tecnológica e industrial, com vista a melhoria da qualidade de vida. Fazendo com que haja um demarcado desenvolvimento em todas as classes de materiais.

Não é necessário um esforço cognitivo exaustivo para verificar que os plásticos estão em todo lado e, como tal, conquistaram um papel importantíssimo no dia-a-dia da população graças à sua variadíssima gama de propriedades como a leveza, razoável resistência mecânica e maleabilidade a baixas temperaturas, tudo isto aliado a um baixo custo.

Porém, os resíduos plásticos, devido às suas características intrínsecas – baixa degradabilidade e densidade – ocupam extensos locais ambientais durante um longo período de tempo. Com o seu crescente uso, principalmente na área das embalagens onde o seu tempo de vida útil é muito reduzido, tem-se vindo a agravar a situação do destino final pós consumo, sendo por isso considerados um dos principais agentes de poluição visual.

Um dos desafios da comunidade atual será, então, conseguir gerir racionalmente estes produtos plásticos pós-consumo. O que se verifica com alguma frequência, é que chegado ao fim do ciclo de vida é-lhes dado um destino impróprio, isto ocorre não por

falta de mecanismos adequados, pois estes estão disponíveis para todos, mas por problemas comportamentais. Logo, são necessárias estratégias que permitam educar os mais jovens e reeducar os adultos, para que estes consigam perceber os resíduos plásticos como algo que possui valor e que, por consequência, pode ser valorizado se lhe for dado o fim correto.

Para além das questões acima referidas, outro fator que motivou a realização deste estudo foi a particularidade de no ano de 2012 a cidade de Guimarães possuir o título de Capital Europeia da Cultura. Este é um projeto catalisador do desenvolvimento da cidade e da região envolvente, que tem na cultura, na sua mais ampla aceção, o motor dessa transformação [2].

O conceito de Capital Europeia da Cultura encontra-se assente em três “pilares” – “Cidade”, “Cidadania e Participação” e “Dimensão Europeia” [2]. Foi no âmbito de “Cidadania e Participação” que durante a vigência da Capital Europeia da Cultura 2012, estava prevista a introdução do novo Centro Ciência Viva de Guimarães (CCVG), o qual disponibilizará ao público um conjunto de atividades que pretendem divulgar a ciência e a forma como esta pode ser aplicada para o bem da humanidade.

1.2 – IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Da exposição anterior sobressaem duas vertentes: uma será o facto da disposição não-racional dos plásticos pós-consumo ser um problema real, sobretudo na situação das embalagens plásticas (p. ex. as garrafas de plástico) por representarem a principal aplicação dos plásticos na Europa e apresentarem obsolescência rápida – neste plano a consciencialização para o tratamento dos resíduos, nomeadamente para reciclagem, é fundamental; um outro aspeto será a inauguração de um novo Centro de Ciência Viva que visa aplicar a Ciência em prol do Homem.

É nesta linha de pensamento que o CCVG está a desenvolver um módulo de reciclagem, onde se pretende que os visitantes do centro se envolvam no processo de reciclagem de garrafas de plástico, efetuando as operações necessárias na produção de uma nova peça – um porta-chaves personalizado. Assim, deseja-se que o visitante participe de forma interativa nas operações habitualmente utilizadas na reciclagem: granulação, lavagem, separação e produção de uma nova peça. Percebendo, desta forma, que ao fim do tempo de vida útil os plásticos possuem valor, sendo que o sucesso dessa valorização dependente das nossas atitudes.

Grande parte dos equipamentos necessários à construção do Módulo de Reciclagem já foram adquiridos, no âmbito da tese de mestrado intitulada “Desenvolvimento de um Sistema Didático de Reciclagem de Garrafas de Plástico” [1] desenvolvida por Sara Raquel da Silva Sampaio na Universidade do Minho que serve de base para a presente dissertação. Porém, o sistema e cada um dos componentes individuais careciam de testes de funcionamento, sendo também necessário uma detalhada avaliação e resolução de problemas associados ao processo concebido. Foi, então, essencial o estabelecimento de diferentes estratégias, de resolução de problemas de funcionamento associados às especificidades dos materiais usados, nomeadamente a questão da desumidificação (para o PET), da granulometria adequada para os materiais, do ciclo de produção adequado/adaptável para ambos os materiais, da eventual contaminação dos materiais e da organização do processo.

CAPÍTULO II

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 – CENTRO CIÊNCIA VIVA DE GUIMARÃES

“Os Centros Ciência Viva são espaços interativos de divulgação científica e tecnológica distribuídos pelo território nacional, funcionando como plataformas de desenvolvimento regional - científico, cultural e económico - através da dinamização dos atores regionais mais ativos nestas áreas.”. [3]

O CCVG resulta de uma iniciativa conjunta da Ciência Viva, da Câmara Municipal de Guimarães e da Universidade do Minho e encontra-se instalado numa antiga Fábrica de Curtumes, na rua da Ramada em Guimarães. Possui por isso um carácter histórico que se pretende preservar, apresentando, também, uma índole científica, lúdica e didática inerente aos Centros Ciência Viva. É, em suma, um espaço plurifuncional de ciência e tecnologia, vocacionado para a difusão da cultura científica e tecnológica através da observação e experimentação, que disponibiliza, entre outras, exposições interativas relacionadas com a história do curtume, laboratórios, um túnel interativo, diversas experiências relacionadas, maioritariamente, com as áreas de engenharia e vestuário.

A presente dissertação visa desenvolver um módulo de reciclagem para o CCVG e, por consequência, realizaram-se os estudos na sala destinada para o efeito. Na Figura 2.1 está ilustrada esta divisão e os equipamentos no local que lhes foi atribuído, a planta da sala encontra-se no Anexo IV – Figura IV.1.



Figura 2.1 – Sala de Reciclagem do CCVG

2.2 – MATERIAIS PLÁSTICOS

Historiadores frequentemente classificam as idades primordiais do Homem de acordo com os materiais empregues tanto na elaboração das suas ferramentas como noutras necessidades básicas. Desses períodos os mais reconhecidos são a Idade da Pedra, Idade do Ferro e Idade do Bronze. Um sistema de classificação destes não pode

ser aplicado para descrever os períodos subsequentes, pois com a passagem do tempo a Humanidade aprendeu a fazer uso doutros materiais e pela altura das civilizações antigas como a do Egito e de Babilónia, o Homem começou a utilizar diferentes metais, pedras, madeiras, cerâmicos, vidros, cornos, peles e fibras. Até o século XIX as suas posses inanimadas, casas, ferramentas, mobiliários eram feitos a partir destas oito classes de materiais. Durante o último século e meio, foram introduzidas duas classes novas, borrachas e plásticos, que não só desafiaram os materiais já existentes e os seus usos estabelecidos como tornaram possível a fabricação de novos produtos que ajudaram a estender a gama de atividades da Humanidade, tal como telefone, televisão, entre outros [4,5].

Plástico é um termo comum genérico utilizado para uma vasta gama de materiais sintéticos ou semissintéticos utilizados numa variedade enorme e crescente de aplicações [6]. A palavra “plástico” tem epistemologia no grego *plastikus* e *plastos*, que significam, respetivamente, apto para moldação e moldado [1,6,7], refere-se, então, à maleabilidade do material ou à sua plasticidade durante a fabricação, que permite que seja moldado, prensado ou extrudido em várias formas – tais como filmes, fibras, placas, tubos, garrafas, caixas e muito mais [6].

Hoje em dia engenheiros recorrem, frequentemente, ao uso de plásticos porque oferecem combinações de propriedades que não estão disponíveis em qualquer outro material [5]. Entre outras, os plásticos apresentam vantagens como resiliência, resistência à corrosão [8], facilidade de processamento (são fáceis de moldar em formas complexas, permitindo a integração de diferentes materiais e funções) [9], são flexíveis [10], reutilizáveis e recicláveis [10], exibem elevada resistência ao desgaste e ao impacto [8], baixo peso [10,11] (a relativa baixa massa volúmica da maioria dos plásticos leva a que os produtos finais sejam leves), são higiénicos e inertes [10] e na sua forma mais comum têm boas propriedades isolantes, elétricas, térmicas e acústicas [1,7,10], mas mesmo tendo estas propriedades de isolamento térmico e elétrico, alguns podem até tornar-se condutores de eletricidade quando necessário, pois se num determinado caso a propriedade física do material não corresponder completamente aos requisitos especificados, o equilíbrio pode ser alcançado adicionando aditivos como cargas, colorantes, retardadores de chama, plasticizador, entre outros, para ir de encontro com a especificação da aplicação [7]. Basicamente os plásticos são feitos pelo Homem e, em princípio, qualquer combinação de propriedades pode ser desenvolvida para acomodar qualquer aplicação que se possa pensar.

Tendo, então, em conta todas as características supracitadas pode-se concluir que os materiais plásticos são os mais eficientes e versáteis que estão ao nosso dispor atualmente [7]. Por isso estamos rodeados de produtos plásticos, que estão presentes nas nossas vidas, nas suas mais variadas formas, e a maioria das vezes, nem damos conta da sua existência e importância [10].

Em 2011, 280 milhões de toneladas de plástico foram produzidas a nível mundial, 58 milhões dos quais advêm da Europa (Figura 2.2) [12]. É espantoso perceber-se que esta proeminência foi atingida em menos de duas gerações.

Pelas suas propriedades os plásticos estão a ser cada vez mais utilizados no setor da embalagem; na construção civil; na medicina e saúde; nos componentes elétricos e na eletrónica; nos transportes; sendo que o ramo de embalagens representa o setor com maior procura de plástico, como se pode ver na Figura 2.3 [12].

O elevado crescimento e importância dos plásticos no setor da embalagem deve-se às propriedades de barreira que os polímeros possuem, que permitem conservar todas as propriedades dos alimentos sem que ocorra contaminação, como é o caso das bebidas. Em 1977 Du Pont apresentou a garrafa de PET que conquistou e revolucionou o mercado [4].

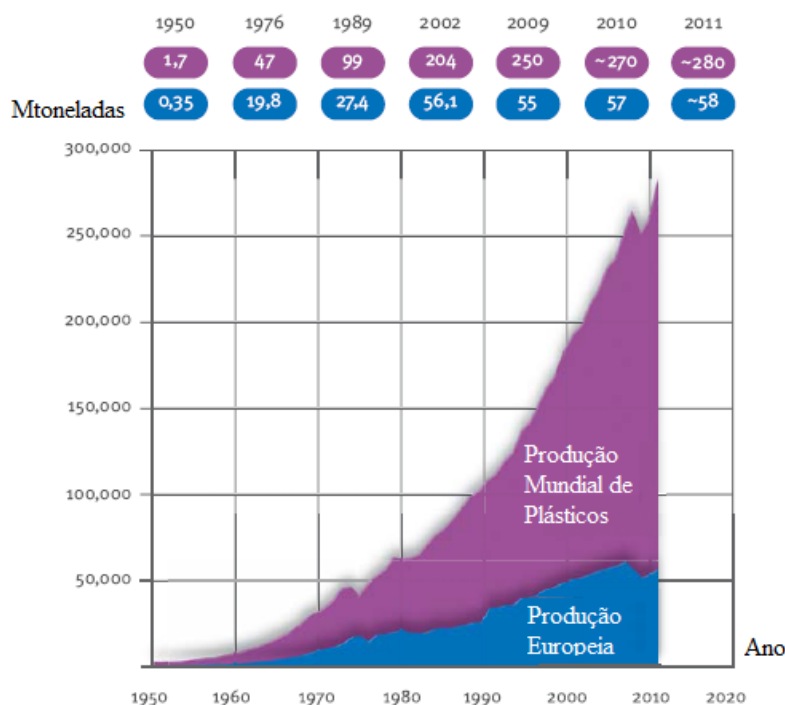


Figura 2.2 - Produção Mundial de Plástico
Adaptado: PlasticEurope (2012) [12]

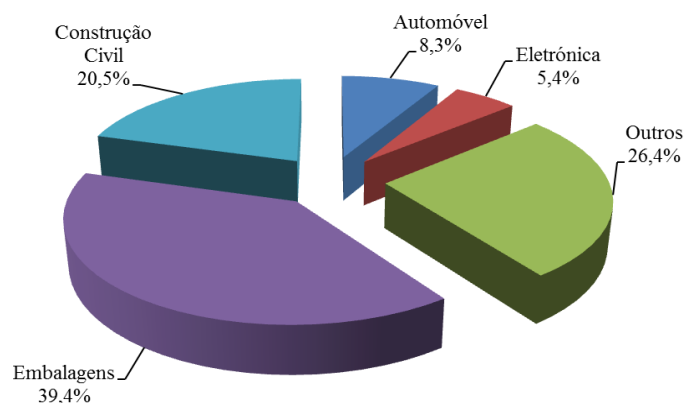


Figura 2.3 - Procura Europeia de Plástico.
Adaptado: PlasticEurope (2012) [12]

2.3 – IMPACTO E EDUCAÇÃO AMBIENTAL

A sociedade, sendo fortemente industrializada, possui valores de consumo de polímeros astronómicos, como se pode verificar na secção anterior, o que implicará dilemas ambientais [13,14], pois daí emerge a necessidade de lidar com os resíduos plásticos, visto que existem restrições, tanto para os recursos como para o espaço. A humanidade está obrigada a interagir com o planeta Terra, como parte do ciclo de materiais e de energia, e a preocupar-se com a forma adequada de os gerir. De fato, o impacto ambiental dos materiais, nomeadamente os resíduos pós-consumo, é hoje em dia, para muitas aplicações, o passo limitador do seu ciclo produtivo.

Apesar de todos as virtudes que os plásticos demonstram, possuem, também, deméritos, senão note-se que eles são feitos a partir de petróleo bruto, de gás natural e carvão e a produção deles corresponde a 8% da produção mundial de petróleo, ou seja, a sua produção intensiva resulta na diminuição dos recursos do planeta [15].

A ubiquidade e visibilidade dos plásticos são reforçados por certas propriedades específicas, que os tornam materiais adequados para aplicações de obsolescência rápida, como é o caso das embalagens (transporte fácil e valor residual baixo), encurtando, assim, o período entre a produção e o uso final curto. A formulação de materiais plásticos também melhorou significativamente, tornando-os menos suscetíveis à degradação por processos naturais. Os plásticos são considerados substratos inertes, com índices de decomposição variáveis (quase desprezáveis) por elementos ambientais, como luz, humidade, calor e microrganismos. Quando degradados podem originar substâncias não inócuas, de prolongada persistência e de restrito controlo ambiental [16].

Com a conjugação dos referidos fatores o plástico, sobretudo o usado nas embalagens, é, geralmente, tido como uma material altamente poluente [11,14] (mas ao contrário do que é assumido a poluição é sobretudo visual resultado da sua reduzida massa volúmica) porque é bastante procurado, é descartável e pode-lhe ser dado um destino incorreto no fim ciclo de vida onde demorará centenas de anos a decompor-se [13,14,17]. Os plásticos tornaram-se, aos olhos do público, a causa principal para a poluição visual, como resíduos sólidos abandonados irresponsavelmente no ambiente.

No entanto, não é o agente poluidor que aparenta, mas sim, um material que no seu fim de vida não é devidamente reencaminhado para os locais e destinos adequados ao seu tratamento, para que possa ser valorizado e, assim, respeitar a restrições do planeta de recurso e de espaço [1].

Portanto, para a conservação do meio ambiente o tratamento de resíduos deve ser tido como uma questão de toda sociedade. É uma questão de civismo e responsabilidade individual [13,18,19].

É, então, importante a consciencialização das pessoas, quer no que diz respeito aos hábitos de adesão à recolha seletiva, quer através do conhecimento dos destinos que podem ser dados aos materiais plásticos em fim de vida, naquilo que se podem transformar e no que ainda podem contribuir para a sociedade [20].

Neste contexto entra a necessidade de adoção de estratégias, como é o caso da proposta em que se enquadra este projeto e está a ser materializada pela equipa responsável pelo CCVG, que permitam a sensibilização da população, para que os mais novos tenham uma atitude ambientalista e para que os adultos sofram uma mudança de hábitos que há muito tempo se encontram estabelecidos, contribuindo beneficamente para o planeta Terra.

2.4 – TRATAMENTO DE RESÍDUOS

Pode-se definir como resíduos “quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer”, nomeadamente os identificados na Lista Europeia de Resíduos (LER), portaria 209 de 2004. Esta definição de resíduo está de acordo com as alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, ao Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro [21]. Este Decreto-Lei vem no âmbito das operações de gestão de resíduos nomeadamente recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos.

O conceito de resíduo é dinâmico e reversível (na linha em que hoje é considerado desperdício pode, amanhã, ser o material de um novo processo) e está ligado a comportamentos e atitudes individuais que podem mudar com o tempo [22].

As embalagens representam cerca de 20% dos resíduos que produzimos, conforme a Sociedade Ponto Verde¹ [23]. Dados fornecidos pela Lipor² – entidade responsável pela gestão, valorização e tratamento dos Resíduos Urbanos do Grande Porto, mostram que até Outubro receberam pouco mais de 690 Toneladas de Embalagens de Plástico e Metal, acumulando um total de 6.579, 82 Toneladas no ano de 2012 [24].

Em suma, as embalagens plásticas devem ser vistas como resíduos sólidos, que possuem valor económico, social e ambiental, uma vez que podem ser reaproveitadas, desde que colocadas nos devidos locais, de acordo com as suas especificações.

No entanto, a gestão de resíduos plásticos é complexa devido ao vasto número de tipos de plásticos existentes no mercado e ao grande volume que é descartado [25].

Segundo as alterações introduzidas pelo decreto-lei n.º73/2011, de 17 de Junho, ao decreto-lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro a hierarquia de gestão de resíduos expressa que as opções adequadas de destino dos resíduos plásticos incluem prevenção e redução, preparação para a reutilização, reciclagem, outros tipos de valorização e eliminação, como se representa no diagrama da Figura 2.4.

Nesta hierarquia é desejável que a primeira escolha seja a redução do uso de recursos, o que também leva a uma redução na geração de resíduos. Pode-se entender como redução: a do uso/consumo de produtos plásticos pelo consumidor ou na quantidade de plástico utilizado na indústria para a fabricação de seus produtos [25].

A reutilização de materiais plásticos é uma prática que depende do tipo de polímero, da sua durabilidade e resistência. Esta pode ser feita de diversas formas e com diferentes fins [25].

Eventualmente, os materiais plásticos começam-se a degradar após vários ciclos de uso e deixam de ser úteis, implicando a necessidade de processamento. Chega-se então à terceira opção, a reciclagem. Com o crescimento das exigências ambientais, a

¹ É uma entidade privada, sem fins lucrativos, com a missão de promover a recolha seletiva, a retoma e a reciclagem de embalagens em Portugal;

² É a entidade responsável pela gestão, valorização e tratamento dos Resíduos Urbanos produzidos pelos oito municípios que a integram: Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Porto, Póvoa de Varzim, Valongo e Vila do Conde;

reciclagem tem vindo a ser, cada vez mais, apontada como opção de destino final no pós-consumo, bem como a incineração. Apenas em último caso os resíduos deverão ser depositados em aterro [25].

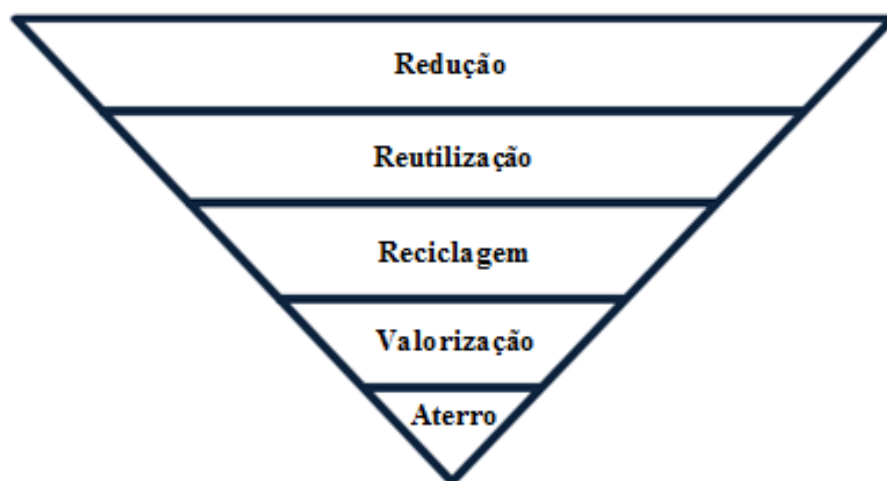


Figura 2.4 - Hierarquia da Gestão de Resíduos em Ordem Decrescente de Preferência. Adaptado: AZAPAGIC, 2003 [26]

2.5 – RECICLAGEM

Considerando as diferentes soluções atualmente disponíveis para o problema dos resíduos plásticos, a reciclagem frequentemente parece ser uma das alternativas mais viáveis, de acordo com a hierarquia da Figura 2.4 este processo é o terceiro na preferência para a gestão de resíduos.

A reciclagem constitui um conjunto de técnicas que tem por objetivo processar materiais utilizados (resíduos) em novos produtos de forma a evitar desperdícios de materiais que são efetivamente úteis [27]. Este conceito tem, contudo, que ser entendido de acordo com a diretiva-quadro revista, que inclui não só a recuperação de material mas também de químicos e de energia a partir dos materiais pós-consumo. Tem, portanto, diferentes níveis, mormente a reciclagem primária, secundária ou mecânica, terciária ou química, quaternária ou energética.

Reciclagem Primária – pode ser também denominada por reciclagem pré consumo, é a reintrodução de resíduos industriais no ciclo para produzir novos produtos com especificações semelhantes aos originais [25,28,29];

Reciclagem Secundária - utiliza RSU (resíduos sólidos urbanos), resíduos da indústria ou de agricultura para produzir, utilizando meios mecânicos, novas peças que, em princípio, têm especificações inferiores às originais. Na Figura 2.5 encontra-se um fluxo onde estão ilustradas as diferentes etapas deste tipo de reciclagem. Primeiro faz-se

a moagem, onde o material é triturado, em seguida é lavado para posteriormente se proceder à separação de materiais, a matéria-prima é reprocessado num produto diferente enquanto os resíduos vão para os locais adequados [25,28,29].



Figura 2.5 - Fluxograma das etapas da reciclagem mecânica
Adaptado: PLASTIVIDA, 2009

Reciclagem Terciária - decomposição de plásticos ou outros materiais orgânicos por aquecimento numa atmosfera controlada, na ausência de oxigénio – pirólise – ou por reações químicas/biológicas [25,28,29];

Reciclagem Quaternária – Redução dos RSU a inertes, diminuindo o seu volume em 90 %, por inceneração a elevadas temperaturas com possível recuperação energética, resultando numa menor deposição em aterros [25,28,29].

Na Tabela 2.1 encontra-se de forma resumida os diferentes tipos de reciclagem.

Tabela 2.1 - Os diferentes níveis de reciclagem.

NÍVEL	PRINCIPAL FONTE	RECUPERA
Primária	Resíduos plásticos (dentro da Indústria)	Polímeros para peças com boas especificações
Secundária	RSU, agricultura, indústria	Polímeros para peças com especificações inferiores às originais
Terciária	RSU	Químicos por Pirólise/decomposição química ou biológica
Quaternária	RSU	Energia por incineração

2.6 – RECICLAGEM DE GARRAFAS DE PLÁSTICO

Conhecer melhor os materiais da garrafa, politereftalato de etileno (corpo) [30] e polietileno (tampas e anilhas) [30], e, conseqüente, as características que podem surgir

como obstáculos à reciclagem, constitui o primeiro passo para encontrar uma linha de reciclagem mais apropriada para o CCVG.

2.6.1 – POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)

Este poliéster é considerado um dos plásticos técnicos mais importantes das duas últimas década [30,31], o que se traduz em valores de consumo elevados. A procura europeia do PET referente a 2011 corresponde a 6,5 % da produção europeia de plásticos, fazendo com que pertença ao top 6 de polímeros mais utilizados, ocupando o último lugar [12].

O PET é basicamente utilizado para produção de filmes, fibras [30,32] e recipientes [30,31,33]. A aplicação de maior “peso” é embalagem [30], Figura 2.6, devido às características superlativas que o material oferece: elevada transparência, boas características mecânicas para paredes de espessura reduzida, estabilidade dimensional durante o manuseamento (mesmo a altas temperaturas), baixo custo relativo (preço por recipiente) e baixos níveis de permeabilidade para gases tais como o CO₂ [30,34].

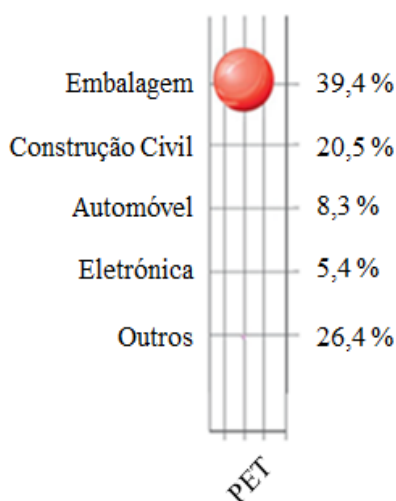


Figura 2.6 - Procura Europeia de PET para os diferentes setores.
Adaptado: PlasticEurope (2012) [12]

Tendo em vista esta utilização extensa, o mercado apresenta elevadas quantidades de resíduos de produtos de PET [30]. Portanto, os processos de reciclagem são a melhor forma de reduzir economicamente os resíduos [31,35–37]. É relevante conhecer algumas propriedades deste material para este tipo de tratamento do resíduo, Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades químicas e físicas do PET.

PROPRIEDADES	VALOR (UNIDADE)	REFERÊNCIA
Massa Volúmica	1.41 (g cm ⁻³)	[31]
Temperatura de Transição vítrea (T _g)	67 – 115 (°C)	[31]
Temperatura de Fusão	265 (°C)	[5,31]
Módulo de Elasticidade	1700 (MPa)	[31]
Absorção de Água (depois de 24 h)	0,5 (%)	[31]
Resistência à tração	27 (MPa)	[30]
Alongamento à rutura	243 (%)	[30]
Viscosidade Intrínseca	0,45 – 1,2 (dl g ⁻¹)	[31]

Quanto às transições térmicas e cristalização, este apresenta uma temperatura de fusão entre 255 °C e 265 °C e para o PET mais cristalino é de 265 °C [5,31], possui, também, uma temperatura de transição vítrea que varia entre 67 e 140 °C, arrefecendo PET rapidamente do fundido até uma temperatura abaixo da T_g pode-se produzir um PET amorfo e transparente. À medida que a temperatura aumenta, atinge-se melhores estruturas cristalinas porque verifica-se a reorganização dos cristais menos perfeitos [31,38]. O PET é conhecido por ter uma taxa de cristalização muito lenta, a 170 °C [5,31] e a 190 °C [31,39] essa taxa apresenta o seu pico de velocidade. Esta taxa depende de outros fatores como a massa molecular, a presença de agentes nucleantes, o grau de orientação da cadeia, a natureza do catalisador utilizado na produção do PET original e história térmica [31,38].

2.6.1.1 - CONTAMINAÇÃO DO PET

O POSC-PET está contaminado por muitas substâncias que vão dificultar o processo de reciclagem, tais como:

CONTAMINANTES PRODUTORES DE ÁCIDOS

Dois dos ácidos mais prejudiciais para obter um R-PET de boa qualidade são o ácido de colofónia e ácido abiético que são produzidos por adesivos. Os ácidos atuam como catalisadores para reações de cisão da cadeia durante o processamento do fundido POSTC-PET [31,40–42].

HUMIDADE

Uma das maiores dificuldades deste material para a reciclagem é a sua natureza higroscópica, isto é, tem por característica absorver água do meio ambiente durante o seu armazenamento [43]. Isto tem consequências diretas no processamento, pois se a fusão ocorrer com níveis de humidade relativamente altos o material sofrerá hidrólise que se traduzirá numa redução da massa molecular, que, por consequência, representará a diminuição de viscosidade intrínseca e a perda das propriedades físicas. A contaminação de água deverá ser inferior a 0,02% para evitar os efeitos nocivos [31,40].

ACETALDEÍDO

Este produto resulta das reações de degradação de PET. A sua migração das embalagens para os produtos alimentares foi uma das maiores preocupações nos estágios iniciais do desenvolvimento do processo de reciclagem para o PET. Uma característica importante para lidar com este componente é a sua grande volatilidade, portanto com secagem é possível o remover [31,40].

CONTAMINANTES DE COLORAÇÃO

Tanto a cor de garrafas como rótulos impressos pode causar cores indesejáveis durante o processamento. A melhoria de processos de triagem e de lavagem pode reduzir este tipo de contaminação [31].

OUTROS CONTAMINANTES

As garrafas PET são utilizadas para o armazenamento de certas substâncias tais como detergentes, combustíveis, pesticidas, etc. A remanescência destas substâncias pode ser prejudicial para a saúde humana se os excedentes das mesmas se encontrarem no R-PET [31,44]. O aumento da consciencialização das pessoas para os perigos do armazenamento de materiais na saúde pública tem diminuído significativamente a quantidade destes contaminantes [31].

2.6.1.2 – RECICLAGEM MECÂNICA DO PET

Devido aos requisitos restritos para o uso direto de resíduos de PET as opções de reciclagem a que se pode recorrer são: Reciclagem química e reciclagem mecânica.

A reciclagem mecânica consiste, normalmente, na eliminação de contaminantes [30,31,45], na secagem do material [30,31,46] e na subsequente elaboração de grânulos

via extrusão [30,47]. As suas grandes vantagens são o facto de ser um processo relativamente simples e de contribuir para a minimização do impacto ambiental[31]. A grande desvantagem será a redução da massa molecular durante o processamento. Assim ao minimizar a quantidade de contaminantes consegue-se obter um R-PET de melhor qualidade [31]. Muitos investigadores afirmam que para atingir uma reciclagem de PET bem-sucedida, os grânulos devem cumprir requisitos mínimos [31,38,40,48], sumariados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Requisitos mínimos para o processamento dos grânulos POSC-PET. REF.: Awaja and Pavel, 2005 [31]

PROPRIEDADES	VALORES
$[\eta]$	$> 0,7 \text{ dl g}^{-1}$
Temperatura de fusão	$> 240 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Teor de Humidade	$< 0,02 \text{ wt.}\%$
Tamanho dos grânulos	$0,4 \text{ mm} < D < 8 \text{ mm}$
Conteúdo metálico	$< 3 \text{ ppm}$
Conteúdo PVC	$< 50 \text{ ppm}$
Conteúdo Poliolefinas	$< 10 \text{ ppm}$

REMOÇÃO DE CONTAMINANTES

É um passo vital para o processo de reciclagem mecânica de PET. Este consiste em vários processo onde as garrafas de PET são separadas, trituradas e lavadas [31]. É, então, constituído por 4 etapas:

1ª Etapa: a triagem, efetua-se uma separação dos materiais de acordo com a cor e tipo de material, ou seja, basicamente aparta-se as garrafas de PET dos outros produtos como poliolefinas, PVC, entre outros. Nesta fase, o PVC pode ser removido manualmente das garrafas de PET antes do processo seguinte; contudo, dificilmente será superior a 90% da sua totalidade, pois são bastantes similares a olho nu. Terá que se utilizar outros processos de separação [31], como por exemplo flotação.

2ª Etapa: granulação, nesta a etapa as garrafas são trituradas em moinhos, para que possuam idealmente granulometria entre 0,4 e 8 mm [31]. Os grânulos obtidos neste estado devem ser o mais uniforme possível de maneira a que se obtenha uma fusão regular. Quando as dimensões variam muito, isto é, quando se apresenta pó e grânulos com tamanhos diferentes o escoamento do material no equipamento de processamento –

etapa discutida posteriormente - será mais complicado, pois os grãos com dimensões inferiores fundem mais cedo bloqueando a passagem. Outro aspeto do PET é a sua elevada resistência mecânica quando comparado com outros plásticos, portanto é necessário o uso de equipamentos especiais de forma que as lâminas de trituração não sejam danificadas [49,50].

3ª Etapa – Lavagem: pretende-se retirar a sujidade apegada ao plástico, para a remoção de resíduos difíceis, nomeadamente os adesivos, utilizam-se soluções de água aquecida com detergentes [49]. Existem duas formas nos quais os grânulos POSC-PET são lavados [40]:

1. Lavagem aquosa que consiste em dois passos; lavagem a quente com uma solução de 2% NaOH e um detergente a 80 °C seguida de uma lavagem frio com água, apenas;
2. Lavagem com solvente, para o qual o tetracloroetileno está referenciado para lavar os grânulos de PET.

4ª Etapa: Separação dos Materiais ocorre caso existam grânulos de materiais distintos. Esta apartação pode ser feita por diferentes métodos, nomeadamente a separação por densidades [49], em que se aproveita o facto de materiais possuírem massas volúmicas distintas e ao serem colocados num líquido específico um sobrenadará e o outro irá submergir no recipiente. Este processo tem particular interesse quando se trata de garrafas de plástico, pois permite separar o material do corpo da garrafa das tampas bem como separar o material de tampas diferentes.

SECAGEM

Esta 5ª etapa é tida como um passo essencial na reciclagem de POSC-PET [31], pois após passar os dois estágios anteriores é, apenas, natural que o plástico possua um teor de humidade não aceitável nos grânulos. Com a secagem ocorre a redução da degradação hidrolítica e o, consequente, aumento da resistência do R-PET [31,49].

A quantidade de humidade deverá ser inferior a 0,02% para evitar a diminuição significativa de massa molecular do material [31]. Para o atingir, a maioria dos produtores comerciais utiliza condições que variam de 140 – 170 °C e de 3 – 7 horas [31]. Na bibliografia são propostas diversas condições conforme o rigor do objetivo de teor de humidade. Por exemplo, para um estudo as operações típicas não devem conter

mais que 50 ppm de humidade, e, assim, é necessário operar os desumidificadores a 170 °C durante 7 horas [40], para outro estudo não deve ser superior a 5 ppm e portanto utiliza-se condições de 160 °C durante 8 horas [30]. Existe a exigência de uma secagem cuidadosa e controlada [14,43,51]. De acordo com a informação publicada para secagem deve-se:

1. Manter a temperatura efetiva dos grânulos entre 160 e 180 °C [43];
2. A temperatura do ar seco não deve exceder os 190 °C para que a degradação termo-oxidativa não seja muito rápida [43];
3. O ponto de orvalho, que designa a temperatura à qual o vapor de água presente no ambiente passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas, deve ser inferior a 30 °C [43];
4. O tempo de residência dos grânulos deve ser superior a quatro horas [43].

PROCESSAMENTO

Este será a 5ª etapa em que se dá a conversão física dos grânulos limpos e secos em grânulos ou em novos produtos [50].

No CCVG utiliza-se o processo de processamento é a moldação por injeção. Este é o processo a partir do qual um material plástico, originalmente no estado sólido e usualmente sob a forma de grãos, é carregado numa máquina onde, sequencialmente, é aquecido a fim de plastificar e forçado, sob pressão, a entrar para um molde. No molde, o material fundido preenche a respetiva impressão e arrefece recuperando a rigidez. O processo conclui-se com a ejeção da moldação [52].

É muito complexo, pois possui um vasto número de variáveis que afetam a qualidade da peça [31]. Um diagrama esquemático que reflete os parâmetros do processo e seu efeito na qualidade de produto está expresso na Figura 2.7. Os parâmetros da máquina serão aqueles que o utilizador possui maior controlo.

PET produzido por moldação por injeção tem fracas propriedades mecânicas devido à limitada cristalização, pela qual é responsável a elevada T_g do PET [31].

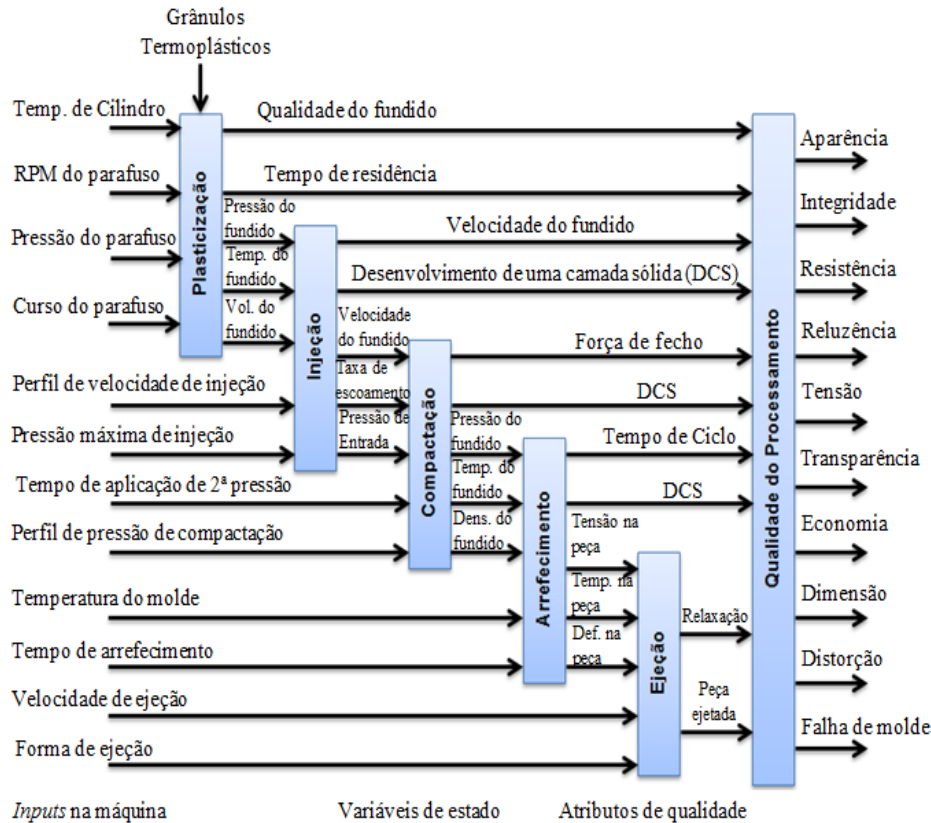


Figura 2.7 - Variáveis do processo de moldação por injeção.
Adaptado de: Hurmuzlu and Nwokah, 2001 [53]

2.6.1.3 – LINHA TÍPICA DE RECICLAGEM DE PET

A reciclagem globalmente assentará nestas 5 fases. Com as especificidades todas [1,27] do material é importante estudar uma linha específica para o PET e que etapas a constituem, Figura 2.8:

- ✓ Remoção de rótulos – É de ter em conta que pode existir uma fase *à priori* da triagem, pois alguns produtores efetuam uma pré-lavagem, onde 70 a 90% dos rótulos são extraídos [1,27];
- ✓ Tapete de seleção visual e/ou placa magnética/detector de metais – Evita que materiais que sejam não-plásticos cheguem aos moinhos e danifiquem as lâminas dos mesmos já que estas se destinam, apenas, a polímeros [1,27]. Sendo que este passo não é, apenas, específico para esta linha.
- ✓ Primeira granulação e lavagem – na primeira granulação feita com crivos de, aproximadamente, 30 mm e com a introdução de água para completar a pré-lavagem [1,27], a granulação é mais grosseira para facilitar recolha de rótulos e tampas;
- ✓ Primeiro tanque de separação – primeira separação por densidades dos grânulos de PET dos restos de rótulos e tampas [1,27];

✓ Segundo tanque de separação – segunda separação mais refinada e definitiva dos materiais, é bastante semelhante ao passo anterior, sendo que no primeiro tanque aparta-se quase a totalidade dos contaminantes no segundo remove-se os que são de dimensão menor.

✓ Lavagem com pás agitadoras – A cola permanece ainda nos grânulos, portanto são novamente lavados com soluções de água e detergente para que fique com um menor nível de contaminação possível [1,27];

✓ Segunda Granulação – obtém-se tamanho final dos grânulos. Utilizam-se crivos de, aproximadamente, 8-12 mm [1,27];

✓ Secagem – a secagem não pode ser simples devido ao carácter higroscópico do PET, tem que ser conjugado com um desumidificador [1,18];

✓ Armazenamento – o material deve ser mantido no secador/desumidificador até a fase de alimentação direta para a máquina injeção para não entrar em contato com a atmosfera para evitar a incorporação de humidade no PET [1].

Em suma, relativamente a uma linha de reciclagem básica para este material tem que se ter em especial atenção a utilização de trituradores com lâminas adequadas à moagem de PET, soluções de lavagem eficazes para remoção de rótulos e adesivos, recorrer a desumidificador e assegurar que o material não entra em contacto com a atmosfera.

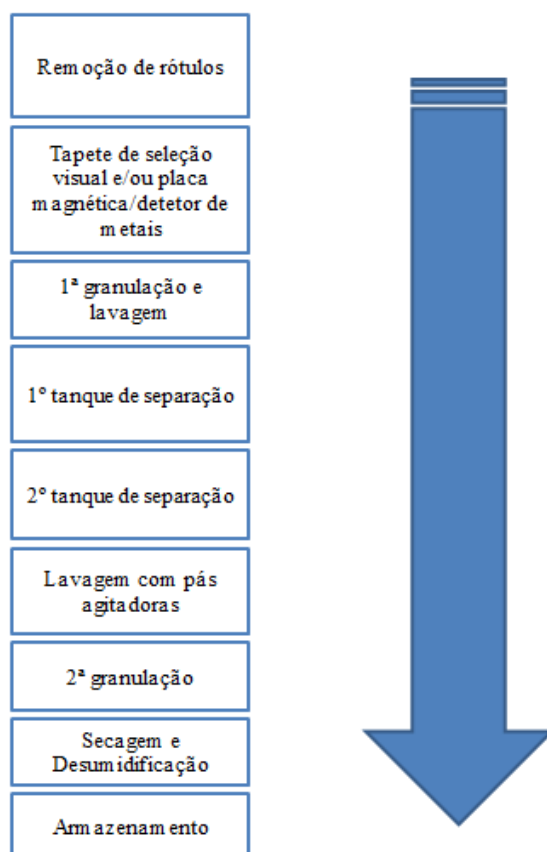


Figura 2.8 - Etapas de uma linha típica de reciclagem de PET

2.6.2 – POLIETILENO

Esta poliolefina representa um dos termoplásticos mais versáteis devido às suas propriedades químicas e físicas, ao seu custo e à sua inércia, para os quais os desenvolvimentos dos produtos e dos mercados continuam a abrir novas aplicações [15]. Por estas razões ocupa o primeiro lugar do top 6 de polímeros consumidos na Europa, com 29 % da procura [12].

É vastamente utilizado em embalagem, sacos do lixo, tubos de escoamento entre outros [15]. A Figura 2.9 demonstra a procura europeia para os diferentes setores e pode-se verificar que, tal como o PET, a sua maior aplicação reside no setor de embalagem.

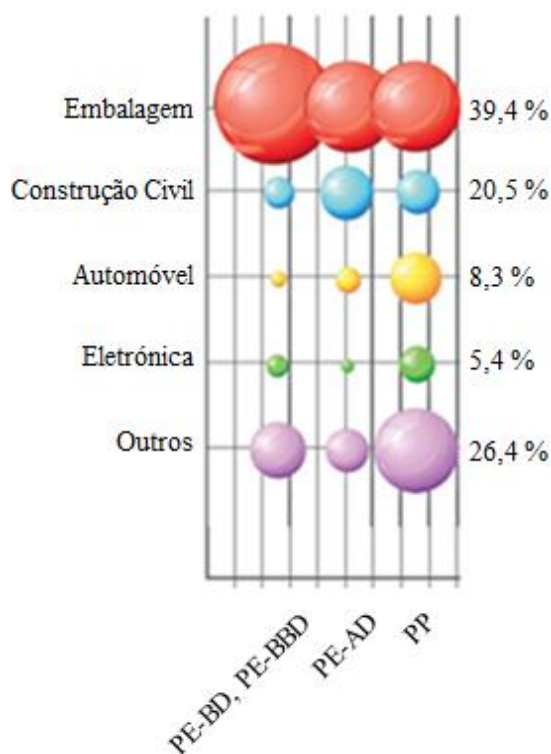


Figura 2.9 - Procura Europeia para o PE em cada setor.
Adaptado: PlasticEurope (2012) [12]

A reciclagem é particularmente aconselhável para reduzir os resíduos deste material, pois é o plástico com maiores valores de consumo e, portanto, acarreta todos os problemas ambientais dos plásticos. Mais uma vez a utilização da reciclagem dos resíduos do PE é aconselhável pelas suas vantagens.

Algumas das propriedades importantes para a reciclagem encontram-se na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Propriedades químicas e físicas do PE.

PROPRIEDADES	PE-AD	REFERÊNCIA
Massa Volúmica (g cm^{-3})	0,941 – 0,965	[15]
Temperatura de Fusão ($^{\circ}\text{C}$)	135	[15]
Estabilidade Química e Térmica	Excelente	[30]

2.6.2.1 – RECICLAGEM MECÂNICA DO PE

Visto que o PE é um material relativamente simples de reciclar, pois não apresenta muitos dos problemas do PET, como por exemplo a questão de higroscopia [1,28]. As operações necessárias para a sua reciclagem de PE resume-se as etapas básicas [1,18], ou seja, têm que se efetuar a separação do polietileno dos restantes produtos – triagem, depois separados devem ser triturados até a forma de grânulos, onde pelas mesmas razões do PET devem ser uniformes – a moagem, os grânulos são, em seguida, são lavados para retirar toda a sujidade – lavagem. Depois de lavados e, por sequência consequência estar molhada, apenas, se necessita de secar uma hora a 85°C numa estufa deve ser suficiente - secagem, por último são reprocessados, no CCVG, tal como o PET, o processamento é feito por moldação por injeção e obedece aos mesmos parâmetros já discutidos. Não necessita de processos adicionais como lavagens e granulações extras, nem necessita de desumidificação como o PET. Segue, apenas, a linha básica de reciclagem.

2.6.3 – INFLUÊNCIA DO PE NO PET

As garrafas de plástico porque advêm de processos de injeção-sopro possuem, normalmente boa qualidade [30]. No entanto, apresentam múltiplas dificuldades, tais como elevadas viscosidades e recristalização durante o processo de injeção [30,54,55]. Uma das particularidades da reciclagem de garrafas de plástico é a presença do PE no PET que deriva das tampas plásticas [30]. Ambos os materiais, PE e o PET, são incompatíveis, portanto quando processados em conjunto pode fazer diminuir as propriedades mecânica, mas por outro lado, o PE, devido à sua estabilidade térmica e química, pode atuar como lubrificante às temperaturas de processamento do PET e,

assim, diminuir os valores de viscosidade para aqueles comumente utilizados em processos de injeção [30,31,33].

Por estas razões, no artigo de R. Navarro et. al [30] estudou-se a influência do PE na viscosidade da mistura e nas propriedades finais do material. Para tal, prepararam-se diferentes misturas de PE-AD e PET (seco a 160 °C durante 8 horas) com percentagens de PE-AD de 0%, 5%, 10% e 15%, este último é o patamar máximo porque raramente se encontra recipientes com percentagens superiores.

Realizou-se uma análise reológica onde se determinou que a presença de PE diminui significativamente a viscosidade do material, como comprova a Figura 2.10.

O comportamento analisado mostra que à medida que o teor de PE aumenta a viscosidade diminui, note-se que o ensaio foi efetuado para taxas de corte de 5000 s⁻¹ e de 10000 s⁻¹ e a temperatura teste de 275 °C, parâmetros típicos do processo de injeção.

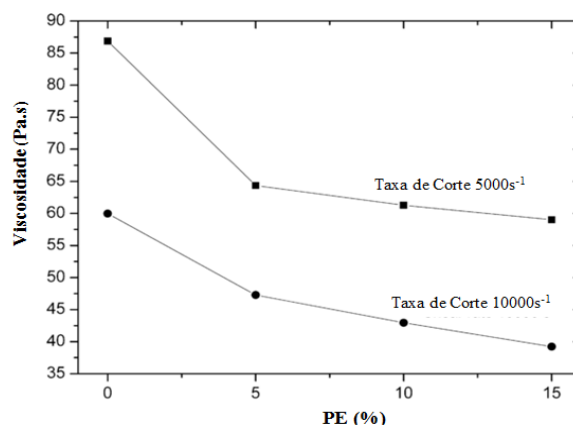


Figura 2.10 - Valores de viscosidade para mistura PET-PE a taxas de corte de 5000 e 10000 s⁻¹. REF.: Navarro et al., 2008 [30]

Esta diminuição resulta da migração do material de menor viscosidade – neste caso o PE – para o exterior do fundido da mistura durante o avanço da mesma, ficando em contato com as paredes do cilindro, facilitando o escoamento da mistura. Esta diminuição de viscosidade resulta em menor cristalinidade do PET e, portanto, maiores temperaturas de molde e menores pressões de injeções podem ser utilizadas. Estes materiais não deixam de ser incompatíveis e a presença PE acima de 5% implica uma perda das propriedades mecânicas, Tabela 2.5, os valores são para amostras que foram injetados com a mesma temperatura do molde. No entanto, conclui-se nesse estudo que o módulo de Young não alterou significativamente com a presença de PE.

Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas da mistura com diferentes percentagens de PE. REF.: Navarro et al., 2008 [30]

AMOSTRA	PE (%)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO À RUTURA (%)
1	5	25 (1)	232 (14)
2	10	6 (2)	5 (1)
3	15	8 (1)	4 (2)

A origem deste comportamento foi estudado através de micrografias de MEV, onde duas fases foram claramente diferenciadas, o PE que se encontrava na secção exterior e o PET, Figura 2.11 a) a permanecer na área central, sempre com coesão entre fases, esta coesão começa a diminuir a elevados teores de PE (cerca de 15%) resultando em laminagem, da amostra, Figura 2.11 b).

De acordo com o estudo efetuado determinou-se que durante a reciclagem mecânica não é necessário separar totalmente o PE porque pequenas percentagens deste material, sem a incorporação de compatibilizadores, pode facilitar o processamento do material nomeadamente por injeção.

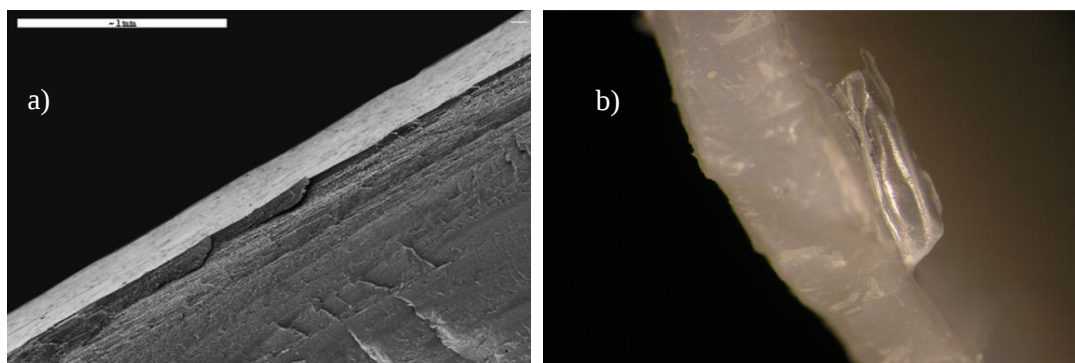


Figura 2.11 a) Micrografia da superfície de mistura PET-PE b) Imagem do efeito de laminagem da mistura PET com 15% de PE. REF.: Navarro et al., 2008 [29]

2.7 – TRABALHO PRÉVIO DESENVOLVIDO

A presente dissertação de mestrado vem na linha de trabalho de uma outra, intitulada “Desenvolvimento de um Sistema Didático de Reciclagem de Garrafas de Plástico” elaborada por Sara Raquel da Silva Sampaio [1], trabalho que tinha por objetivo projetar e conceber um equipamento que permitisse de forma pedagógica reproduzir em pequena escala as etapas constituintes da reciclagem de garrafas de plástico.

Para desenvolver esse projeto foi feito um estudo prévio à reciclagem de materiais plásticos, mais concretamente às garrafas de plástico e aos materiais que as constituem, o PET (corpo da garrafa) e o PE (tampas). Baseado nesse estudo teórico propôs-se o processo de reciclagem para o sistema didático e as diferentes fases que o

constituem: trituração, lavagem e separação por densidades dos materiais, secagem e desumidificação e injeção.

De acordo com os requisitos pretendidos para cada fase de reciclagem pesquisaram-se os componentes existentes no mercado. Identificou-se, de seguida, o equipamento a utilizar e delineou-se o *layout* do equipamento. Procedeu-se, então, ao projeto do molde de injeção.

A nível experimental, efetuaram-se estudos sobre a etapa da granulação, com o objetivo de determinar as condições ideais de trituração, nomeadamente o tempo de operação e a forma de alimentação. Chegou-se à conclusão que a trituração era eficaz, os grânulos tinham boa qualidade, e para se atingir este objetivo, o ideal era triturar 5 garrafas, com um intervalo de 40 segundos entre elas, e de 1 minuto ao fim da colocação das 5 garrafas.

Seguiu-se um breve estudo de lavagem e separação por densidades onde se concluiu que os materiais após agitação provocada pela lavagem separam-se bem, já que têm diferentes densidades.

Com base na bibliografia dos tempos de secagem e desumidificação, verificou-se, através de uma análise visual, que era evidente a melhor qualidade dos grânulos que secaram e desumidificaram à temperatura e durante o tempo aconselhado.

No âmbito deste trabalho de investigação pretende dar-se seguimento ao trabalho anterior, testando o equipamento adquirido, otimizando todas as condições de processamento (nomeadamente as que já foram testadas previamente, pois alguma delas eram falíveis e não foram testadas no novo equipamento) e melhorando o sistema para que possa cumprir todos os objetivos propostos.

2.8 – OBJETIVOS DE ESTUDO

Com o presente trabalho tem-se por objetivo primário, no âmbito do projeto Guimarães 2012 Capital Europeia da Cultura e da consequente abertura do CCVG, implementar sistemas e procedimentos para consciencializar os visitantes para a importância do uso da Ciência na melhoria da sociedade, mais concretamente demonstrar (e resolver todos os problemas ligado aos materiais e equipamentos que advêm da demonstração) de forma interativa no CCVG como se desenrola o processo de reciclagem de garrafas de plástico de forma a alertar, com esta atividade cativante, para as benesses deste destino de fim de vida das garrafas de plástico. Portanto, os principais objetivos deste trabalho são:

- ✓ Testar o equipamento essencial às operações necessárias para transformar por reciclagem garrafas de plástico em porta-chaves;
- ✓ Especificar equipamento adicional necessário ao funcionamento do módulo;
- ✓ Solucionar os problemas associados ao funcionamento do sistema de produção, motivado pelas especificidades dos materiais e equipamento e pelos requisitos inerentes à sua utilização, tais como:
 - Especificação da granulação adequada para os materiais;
 - Definição dos requisitos da lavagem e separação dos diferentes materiais;
 - Estabelecimento das condições mais adequadas para secagem dos materiais usados;
 - Estudo do processamento do PET e o PE isolados e misturados;
 - Definição de um ciclo de produção adequado/adaptável para diferentes materiais de uma garrafa de plástico;
 - Organização de todo o processo.

2.9 – PLANO GERAL DA DISSERTAÇÃO

Qualquer projeto ou estudo tem na sua base linhas de orientação e organização que nos dão a ideia da sua estruturação. Assim, o estudo está organizado da seguinte forma:

No primeiro capítulo - Contextualização e Apresentação do Problema – após uma breve introdução é apresentado o problema e o plano geral da dissertação. O segundo capítulo - Enquadramento Teórico - tem como função contextualizar e analisar teoricamente o tema da presente dissertação e apresentar os objetivos da mesma. No terceiro capítulo – Materiais e Métodos – descreve-se e justifica-se as opções quanto à escolha dos objetos de estudo (garrafas de plástico), os instrumentos utilizados e os procedimentos experimentais que foram efetuados para assegurar o funcionamento do sistema em condições adequadas. No quarto capítulo - Resultados e Discussão - são relatados, analisados e correlacionados os resultados obtidos no capítulo anterior. No quinto e último capítulo - Conclusões e Sugestões para Futuros Estudos - apresentam-se as conclusões principais que o estudo facultou e apontam-se algumas sugestões para futuros estudos. Conclui-se esta dissertação com a apresentação da bibliografia consultada, seguida dos anexos que se considerou serem complementares ao trabalho.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – MATERIAIS

A primeira etapa de toda linha de reciclagem é a obtenção das matérias-primas. Para tal, acordou-se com todos os bares da Universidade do Minho e com diversos cafés e escolas do distrito de Braga a recolha periódica das mesmas. Recorreu-se, também, aos resíduos sólidos urbanos de pessoas que voluntariamente participaram no projeto.

Para determinar se a amostra recolhida, Figura 3.1, simulava corretamente a condições que se vão encontrar no CCVG analisou-se o número de garrafas, as marcas, os volumes e a coloração das mesmas.



Figura 3.1 – Amostra de garrafas de plástico reunidas

PREPARAÇÃO DO MATERIAL

Para efetuar estudos posteriores foi essencial realizar um conjunto de operações prévias a uma porção das garrafas recolhidas:

- ✓ Operação A: remoção manual do rótulo e o corte, com recurso a uma tesoura ou x-ato, da área onde foi aplicado o adesivo na garrafa;
- ✓ Operação B: Separação prévia de materiais pela remoção das tampas e pelo corte das anilhas das garrafas de plástico.

A partir do resultado das etapas anteriores pode-se, de grosso modo, distinguir quanto à constituição 3 tipos de amostras:

- ✓ A-PET: constituída, apenas, pelo corpo da garrafa, resultado da operação A e B;
- ✓ A-PE: composta pelas tampas e anilhas das garrafas, pela aplicação das mesmas operações da A-PET;
- ✓ A-M: formada pelo material do corpo (PET), mais o material proveniente das tampas e anilhas (PE). Note-se que existem duas espécies desta mostra, uma correspondente à não efetivação da operação B (A-M1), isto é, a percentagem de PE no PET é indefinida e uma outra referente à adição de uma percentagem de grânulos de PE nos de PET (A-M2). Na Tabela 3.1 encontra-se a distinção entre os diferentes tipos de amostra e as operações que se efetuaram para as obter.

Tabela 3.1 – Constituição e forma de obtenção dos diferentes tipos de amostra

TIPO	CONSTITUIÇÃO	FORMA DE OBTENÇÃO
A-PET	Corpo da Garrafa	A e B
A-PE	Tampas e Anilhas da Garrafa	A e B
A-M1	Corpo, Tampas e Anilhas das Garrafas.	B Percentagem de PE Indeterminada
A-M2	Corpo, Tampas e Anilhas das Garrafas.	A e B; Percentagem de PE determinada

Relativamente a A-M2 para o cálculo das percentagens a empregar mediu-se, separadamente, a massa do PET e do PE de um determinado recipiente na balança, repetiu-se este passo para todos os volumes disponíveis. No final determinou-se a percentagem de PE a utilizar, após de calculada adicionava-se essa percentagem de grânulos de PE aos PET.

As amostras destinam-se a diferentes testes, na Figura 3.2 encontra-se a respetiva correspondência.

Para a análise da granulação A-PET e A-PE foram utilizadas pois pretendia-se estudar os materiais isoladamente e, portanto, era relevante estudar a forma mais

adequada de efetuar esta etapa na eventualidade de se submeter os materiais em separado ao processo de reciclagem. Utilizou-se A-M1 em detrimento da A-M2, pois era a que simulava a situação real de chegada do visitante ao Centro outra razão é que A-M2, apenas, se obteve quando a A-PE e A-PET já se encontravam granuladas.

A utilização de A-PE e A-PET no estudo da lavagem prende-se com o resultado da etapa posterior, separação de materiais, discutido na secção 4.3.

Como o próprio nome da etapa indica, a separação de materiais implica que esta seja efetuada para a mistura, a opção recaiu sobre A-M1 pois logisticamente era a que mais se coadunava uma vez que após o estudo da granulação esta amostra encontrava-se disponível e mais uma vez era a que representava melhor o caso real, onde a operação B não se verificava.

Após a etapa anterior de lavagem é natural que o nível de humidade seja demasiado elevado para ser reprocessado, portanto para os três tipos de amostras é necessário retirar a humidade em excesso. Doravante foi testado a A-M2 mais uma vez pelo resultado obtido na separação de materiais.

Como o PET é o material que apresenta um comportamento mais suscetível à degradação hidrolítica, a desumidificação destinou-se particularmente a este material. Como a mistura possui PET, necessita, então, de ser analisada.



Figura 3.2 – Correspondência entre testes e as amostras utilizadas

3.2 – GRANULAÇÃO

Para este estudo utilizou-se o moinho TRIA série JM/20-18 (Figura I.3 – Anexo I), na Tabela 3.2 apresentam-se as suas principais características técnicas.

Tabela 3.2 – Principais requisitos do granulador

MARCA	DÉBITO (kg/h)	DIMENSÕES DA CÂMARA (mm)	DIMENSÃO CRIVO (mm)	LÂMINAS FIXAS	LÂMINAS ROTATIVAS
TRIA	20-30	200 X 180	10	✓	✓

Genericamente efetuaram-se dois estudos, um destinado a determinar a alimentação moinho TRIA articulado com a análise dos atolamentos e encravamentos da máquina e um outro para analisar o número de granulações a executar com o estudo de escoamento do material no equipamento de injeção. Saliente-se que para ambos os estudos prensou-se, manualmente, as garrafas que apresentassem volumes superiores a 0,5 L.

ALIMENTAÇÃO DO MOINHO

Submeteu-se a A-PET a oito ensaios distintos, que se encontram descritos na Tabela 3.3. Para o PE realizou-se a granulação indiferenciada de todas as tampas e anilhas de uma só vez. Depois de encontradas as condições adequadas para os materiais isolados, ensaiou-se essa conjectura na A-M1.

NÚMERO DE GRANULAÇÕES

Para concluir a investigação de uma granulação adequada resta examinar o número de granulações que são necessárias efetuar, para tal sujeitou-se amostras de cada tipologia diferente a duas condições distintas.

Num primeiro caso, executou-se uma fase de granulação para cada amostra. Na segunda estância, submeteu-se as garrafas a duas fases consecutivas. A análise da eficiência recai no comportamento dos materiais, triturados de forma distinta, na máquina de injeção.

Tabela 3.3 – Experiências realizadas na granulação para A-PET

EXPERIÊNCIAS	DESCRIÇÃO
A1	Com o moinho desligado, encheu-se a zona de alimentação com um número elevado de garrafas de diversos tamanhos. Em seguida, triturou-se todo o material introduzido.
A2	Colocou-se um número indefinido de garrafas antes de ligar o moinho, depois alimentou-se sem definir o número de garrafas e o tempo de espera.
A3	Com o moinho ligado, colocou-se lotes de 10 garrafas de cada vez, intercalou-se cada conjunto assim que o ruído indicava a disponibilidade para introduzir mais garrafas.
A4	Semelhante à experiência nº3, no entanto em vez de utilizar o ruído como sinal de introdução de material, esperou-se 2 minutos e 30 segundos entre colocações.
A5	Procedeu-se á alimentação de cinco garrafas de cada vez, com 1 minuto de intervalo entre cada turno.
A6	Alimentou-se um conjunto de dez garrafas de forma discreta, uma a uma, com intervalo de 30 segundos entre cada uma delas. No fim das dez garrafas esperou-se 2 minutos e 30 segundos para repetir o passo anterior.
A7	Introduziu-se cinco garrafas, uma a uma, separadas por 30 segundos, esperou-se 1 minuto e repetiu-se o procedimento.
A8	Semelhante à experiência nº7, com a particularidade do tempo de espera entre garrafas ser agora de 45 segundo.

3.3 – LAVAGEM E SEPARAÇÃO DE MATERIAIS POR DENSIDADES

O equipamento utilizado neste capítulo foi uma tina em aço inoxidável com água – desenhada pelo Designer Henrique Cayatte especificamente para o sistema do centro, para a sua visualização deve-se visitar o Figura I.2 – Anexo I.

LAVAGEM

Para a lavagem, procedeu-se à imersão dos grânulos obtidos na fase de granulação em água, agitou-se com o auxílio de um varão metálico. Este processo efetuou-se, separadamente, para A-PET e A-PE.

Na bibliografia faz-se referência à utilização de reagentes para efetuar a lavagem, como estes são empregados para remover colas pressupões uma essência hostil. Portanto como se coloca o bem-estar dos intervenientes em causa com a sua utilização e como não existe uma estação de tratamento de águas e de canalizações especiais, usa-se, apenas, água para a lavagem.

SEPARAÇÃO DE MATERIAIS POR DENSIDADES

A separação de materiais por densidades na tina metálica ocorreu, exclusivamente, para a A-M1, proveniente da granulação.

Após lavagem e movimentação suficiente para ocorrer a separação, removeu-se com um coador o material que flutuava na água, só depois de assegurada a remoção total do material sobrenadante é que se extraiu o material que estava depositado no fundo do recipiente metálico.

3.4 – SECAGEM E DESUMIDIFICAÇÃO

São duas operações diferentes, mas possuem o mesmo objetivo, retirar a humidade dos grânulos. Os equipamentos utilizados para a secagem e desumidificação foram o secador CONAIR modelo HD-2D (Figura I.1 a) – Anexo I) e o desumidificador CONAIR Micro-D (Figura I.1 b) – Anexo I), respetivamente. A Tabela 3.4 apresenta algumas propriedades relevantes de ambos os equipamentos.

Tabela 3.4 – Propriedades do Secador e Desumidificador

EQUIPAMENTO	MARCA	FLUXO DE AR (m ² /h)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	DIMENSÕES (mm)
Secador	CONAIR	25-30	180	780 X 650 X 280
Desumidificador	CONAIR	30	180	587 X 400 X 712

Avaliou-se a qualidade das diferentes condições de secagem e de desumidificação dos materiais, através do exame das peças conseguidas na injeção e pela determinação do teor de humidade que os grânulos de PET e Mistura apresentam.

SECAGEM

O procedimento experimental consistiu em colocar uma determinada mostra no secador durante 1 hora à temperatura de 85 °C, de acordo com o manual do desumidificador, este processo efetuou-se para a A-PET, A-PE e A-M2. Após o término do intervalo do tempo retirou-se o material do equipamento, no caso do PE encontra-se pronto a injetar, enquanto para o PET e A-M2 requerem um teste a uma fase extra de secagem, a desumidificação.

DESUMIDIFICAÇÃO

Introduziu-se a A-PET segundo as condições descritas na Tabela 3.5. Noutro ensaio, colocou-se a A-M2 no desumidificador a 130 °C e define-se o tempo de estadia da amostra de 4 horas. Note-se que para A-M2 tanto se secou em conjunto como se efetuou a secagem em separado do PET e do PE.

Tabela 3.5 – Condições de desumidificação para a A-PET

DESTINO	EXPERIÊNCIA	TEMPO DE Desumidificação (h)	TEMPERATURA DE Desumidificação (°C)
TESTE DE TEOR DE HUMIDADE	1	2	170
	2	4	170
	3	6	170
TESTE NA INJEÇÃO	4	0	170
	5	2	170
	6	4	170
	7	6	170

TESTE DO TEOR HUMIDADE

Dada a natureza do material, esta prova foi feita somente para a A-PET. O material triturado e lavado foi submetida às condições exibidas no ponto anterior, ou seja,

secou-se o PET durante 1 hora a 85 °C no secador e no desumidificador utilizaram-se os parâmetros da Tabela 3.5, ao fim de se verificar cada condição colocou-se o material num exsicador para arrefecer. Ao fim de algum tempo, media-se a humidade na balança de infravermelhos para gases voláteis SCALTEK. Colocou-se no exsicador, pois quando os grânulos saem do desumidificador encontram-se a elevadas temperaturas, o que é inaceitável no processo da balança.

3.5 – CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DE INJEÇÃO

A injetora BOY M22 foi o equipamento utilizado para efetuar a moldação por injeção, Figura I.8 b) – Anexo I. A Tabela 3.6 descreve as principais características da injetora.

Tabela 3.6 – Principais requisitos da injetora utilizada

MARCA	VOLUME DE INJEÇÃO (cm ³)	DIMENSÕES (mm)
BOY	36	2050 X 1040 X 2110

Para encontrar a temperatura do bico, do cilindro e molde, necessita-se de encontrar valores típicos na bibliografia que são regulados experimentalmente.

Para encontrar as condições de funcionamento foi necessário, através de um processo tentativa-e-erro de análise das peças obtidas, encontrar os parâmetros de injeção adequados para as diferentes amostras. Este procedimento é o habitualmente empregue em teste de moldes de injeção. Portanto, determinou-se:

1. O curso do parafuso através da determinação da quantidade de material necessária para encher o molde.
2. A pressão de injeção. Para tal, iniciou-se com pressões e velocidades de injeção baixas, em seguida foi-se elevando até se encher a cavidade. Note-se que a 2ª pressão encontrava-se a zero nesta fase. O ponto de comutação irá corresponder à distância de curso ou tempo de injeção que demorou a encher a peça nesta fase.
3. A pressão de pressurização. Encontrada a pressão de injeção, sabe-se que esta será, normalmente 70% a 80 % desse valor. Mas para a encontrar começa-se com estas

pressões nulas e vai-se aumentando e pesando as peças obtidas, quando a massa das peças deixa de aumentar encontrou-se a pressão de pressurização adequada.

4. O tempo de pressurização. Segue-se o mesmo princípio coloca-se valor baixo (mais ou menos 1 segundo) e aumenta-se até estabilizar esse tempo, ou seja, com o aumento do tempo não se verifica modificações na peça.

5. O Tempo de arrefecimento, mais uma vez o mesmo procedimento experimental do anterior.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – MATERIAIS

Numa situação real de chegada de um grupo de visitantes ao CCVG não existe qualquer controlo sobre o tipo de material recebido, resultado da aleatoriedade inerente a todo o processo. Como a linha de reciclagem tem por objetivo reciclar todo o tipo de material rececionado, as amostras utilizadas nos diversos ensaios devem apresentar um elevado grau de heterogeneidade, pois os testes desenvolvidos têm que reproduzir com fidelidade o processo que ocorre no CCVG, é por isso que se optou pelas fontes de matéria-prima variadas. Para efeito de avaliação da diversidade, estudou-se o número de garrafas, as marcas, o volume e a coloração da maior amostra recolhida, refletido na Tabela II.1 que se encontra no Anexo II. Na amostra existem 241 garrafas, de 29 marcas distintas, 9 tamanhos diferentes e várias colorações. Esta diversidade de valores reflete que, de facto, a amostra cumpre os requisitos pretendidos de variedade. Tenha-se em conta a Figura 4.1, onde se encontra a distribuição de garrafas para as diferentes marcas.

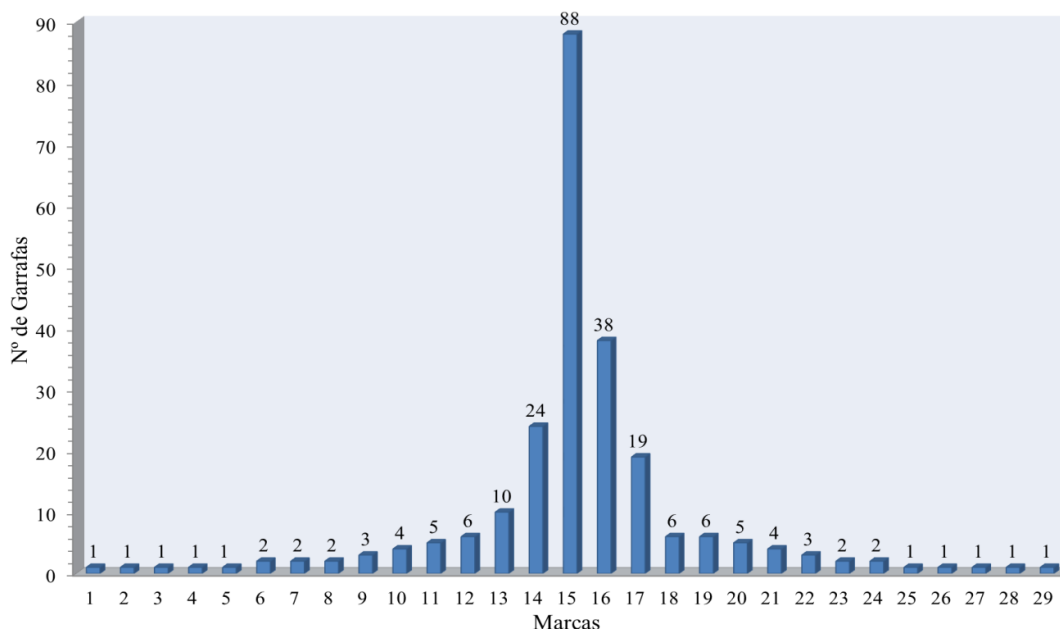


Figura 4.1 - Distribuição das marcas na amostra

Embora a mostra seja heterogénea verifica-se que as marcas 13 a 17 (designação real em Anexo II – Tabela II.1) correspondem à maior ocorrência, pois a recolha de garrafas é “viciada”, ou seja, os maiores fornecedores de garrafas como a Universidade de

Minho e os diferentes cafés possuem a tendência de comercializar um determinado produto. Estes serão os materiais que mais influenciam o produto final porque se sabe que as características do material no fim da linha de reciclagem são resultado da mistura de garrafas obtidas.

PREPARAÇÃO DO MATERIAL

Como foi discutido na Capítulo II os rótulos e cola representam um tipo de contaminação e, portanto, para os remover recorre-se, geralmente, a produtos químicos, que pressupõe uma natureza hostil, pois a remoção de cola assim o exige. Ora, isto no CCVG não é aceitável por dois motivos:

- 1 – Pelo bem-estar dos intervenientes, que é ameaçado com a utilização de elementos agressivos;
- 2 – Pela inexistência de uma estação de tratamento de águas e de canalizações especiais.

Por consequência, retirou-se o rótulo e cortou-se a zona onde se encontrava a cola.

Levou-se a cabo a separação de materiais antecipada, para resguardar a eficácia deste processo a 100% visto que a etapa de separação de materiais por densidades ainda carecia de estudo. Uma outra razão foi que nem todas as garrafas rececionadas possuíam tampa, ou seja, a obtenção desse tipo de material estaria limitado portanto com a apartação garantia-se a maximização do material para permitir os testes à mistura com percentagens superiores.

Quanto as amostras, tem-se que a de PET foi a de maior extensão porque é o material que apresenta maior dificuldade de reciclagem e por isso requer mais testes, trata-se, também, do material que se encontra em maior quantidade, é normal que para o mesmo número de garrafas se obtenha mais PET. Ao passo que pelas razões opostas a A-PE foi bastante mais reduzida que a anterior.

Para a A-M2 o cálculo das percentagens foi feito a partir dos valores da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Percentagem de PE para diferentes volumes

VOLUMES (L)	0,33	0,5	1	1,25	2	5	6
m_{PET} (g)	9,85	11,77	34,00	41,65	48,76	72,51	68,89
m_{PE} (g)	1,42	1,36	2,75	2,69	2,68	9,11	8,13
% PE	14,42	11,55	8,08	6,46	5,50	12,56	11,80

A percentagem escolhida para efetuar a mistura foi a de 15% de PE, pois para os volumes de 0,33, 0,5, 1, 1,25, 2, 5 e 6 L, o valor encontrado para o primeiro foi o mais elevado, confirmando os dados bibliográficos. Esta escolha prende-se com a incompatibilidade entre materiais, quanto mais PE contiver no PET maior será a perda das propriedades mecânicas, logo testou-se a pior situação que poderá acontecer no centro.

4.2 – GRANULAÇÃO

Neste processo tem que se ter em conta a dimensão e forma dos grânulos e a eventualidade de encravamentos e atolamentos do moinho, estes dois últimos implicam a paragem do processo para abrir o moinho e retirar partes da garrafa que impedem a trituração, tal é inadmissível que se verifique, ou seja, não é comportável que se interrompa o processo para limpar/desencravar as lâminas a meio da moagem várias vezes ao dia.

ALIMENTAÇÃO DO MOINHO

É necessário ter sempre em mente que as condições têm que ser coadunadas com as necessidades dos visitantes, isto é, terá que ser efetuada de forma mais eficaz e eficiente possível, visto que não se pretende tempos de espera muito longos.

Para a A-PET, os 7 primeiros estudos foram reportados pela Sara Sampaio [1], no entanto foram repetidos nesta dissertação, pois o equipamento encontrava-se inativo há bastante tempo. As conclusões encontram-se expressas na Tabela 4.2.

Quanto à A-PE, o material das tampas e anilhas foi triturado sem nenhum entrave quando se colocou todo numa só etapa.

Ensaçou-se a A-M1 de acordo com a experiência A8 da Tabela 3.3, porque a trituração do PE foi relativamente simples e como granular o corpo da garrafa era a parte mais complicada, utilizou-se a condição mais eficiente da A-PET. Os resultados demonstraram que a garrafa completa comportava-se da mesma forma que o corpo da garrafa, ou seja, a condição da experiência 8 é, também, a mais adequada.

Tabela 4.2 - Conclusões das experiências realizadas na granulação para A-PET

EXPERIÊNCIAS	CONCLUSÃO
A1	Foi um processo moroso e o moinho encravou diversas vezes.
A2	Tinha o objetivo de simular a chegada inconstante dos visitantes sem controlo do número de garrafas colocadas. Tal como a experiência anterior a inviabilidade deve-se aos encravamentos resultantes da alimentação desregrada e à duração longa do processo.
A3	Por se adicionar de uma só vez conjuntos de 10 garrafas torna a granulação bastante descontínua, o que implica uma participação mais passiva dos visitante e além de mais era demorado. A utilização do ruído como sinal de introdução de mais garrafas é incorreta porque este nem sempre indica a mesma situação.
A4	Para lotes de 10 garrafas o tempo de espera de 2 minutos e 30 segundos não é suficiente. Para estas estarem todas moídas é preciso um tempo superior e ao fim da duração estabelecida muitas garrafas ficavam retidas na câmara do moinho. O ensaio é, também, descontínuo, pelas mesmas razões que a experiência anterior.
A5	O processo quando comparado com os anteriores (experiências nº 1, 2, 3, 4) apresentou melhores resultados, embora permanecesse fragmentos granulados de forma incompleta, sobretudo, para garrafas de volumes superiores. Impossibilita uma envolvimento mais ativa dos intervenientes.
A6	Este método foi eficaz e permitia colmatar o defeito da descontinuidade das experiências 1-5, uma vez que se alimentava o moinho com uma garrafa de cada vez e com tempos de espera entre adições inferiores. Contudo, ainda se verificou atolamentos à entrada da zona das lâminas.
A7	Como as experiências nº5 e nº 6 apresentaram bons resultados, tentou-se conjugar condições de ambas para obter um melhor resultado. De fato, alimentar cinco garrafas de cada vez com 30 segundos de intervalo é bastante eficaz. Aliás, é o modo mais adequada que Sara Sampaio [1] declarou no seu estudo. Ainda que poucos, os atolamentos e encravamentos ainda ocorrem.

A8

Este método mostrou ser o mais útil, já que os problemas em que se para a etapa da granulação raramente acontecem. Embora o tempo de espera seja superior ao da experiência 7, é preferível ao desencravamento sistemático da máquina.

NÚMERO DE GRANULAÇÕES

A granulação é uma etapa bastante importante de todo o processo, pois se esta for efetuada incorretamente poderá verificar-se uma paragem de fluxo do material no equipamento de injeção, então é fundamental que os grânulos obtidos possuam tamanhos e formas uniformes, para que posteriormente durante o processo de injeção se fundam com maior homogeneidade.

Quando se efetuou uma fase de granulação para o PET o material teve dificuldades a escoar na tremonha, somente com o auxílio de um varão de latão é que se conseguiu alimentar a injetora para que ocorresse a plasticização, esta dificuldade deve-se a heterogeneidade dos grânulos, pois uns amoleceram em primeiro lugar tornando-se um obstáculo para os restantes. Quando submetido a duas granulações consecutivas o material flui sem qualquer dificuldade. Portanto a forma correta de funcionamento da linha para o PET será granular duas vezes. Com a Figura 4.2 a), observa-se que o PET granulado uma vez é menos uniforme do que o submetido à segunda condição Figura 4.2 b), pois o corpo da garrafa é bastante flexível e na primeira ocasião a garrafa é triturada, mas os grânulos podem se deformar e atravessar o crivo de 10 mm, a segunda granulação refina os grânulos, aumenta a homogeneidade e diminui a sua dimensão. Visitar Anexo III e Figura III.1 para visualizar o resultado da Figura 4.2 em maior dimensão.

Note-se que na linha típica de reciclagem de PET a 2ª granulação é feita, apenas, após a lavagem estar concluída, contudo devido a logística da organização do percurso e do equipamento, era benéfico que as fases de granulação fossem consecutivas.

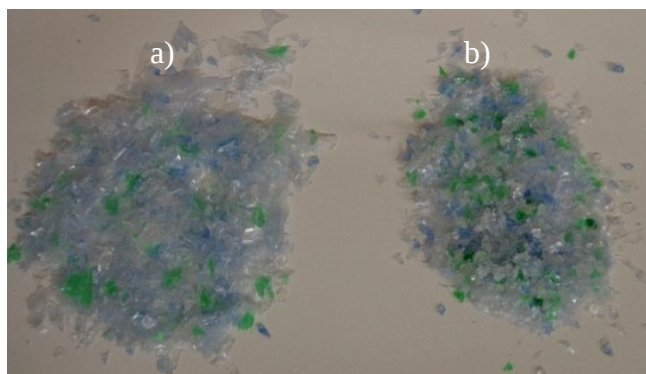


Figura 4.2 a) Uma fase de granulação; b) Duas fases de granulação

Outro aspeto que poderia ser limitador deste ensaio era a dimensão das garrafas. No estudo anterior da Sara Sampaio [1] conclui-se que o melhor seria restringir a chegada de garrafas a volumes iguais ou inferiores a 0,5 L, pois as dimensões superiores provocavam atolamentos do moinho, mas como se pode concluir pela Figura 4.3 estar-se-ia a restringir bastante o volume, sendo que o maior número da amostra total recolhida, 96 garrafas, corresponde a um tamanho, 1,5 L, superior ao máximo estipulado anteriormente. Um visitante pode sempre trazer um recipiente de casa e não deve estar limitado na sua escolha. É por esta razão que se prensou manualmente as garrafas de plástico com volumes superiores a 0,5 L antes da trituração. O resultado foi satisfatório, visto que o grande problema residia na utilização de garrafas com dimensões superiores às da câmara do moinho, ao reduzi-lo as lâminas tornaram-se capazes de cumprir a sua função.

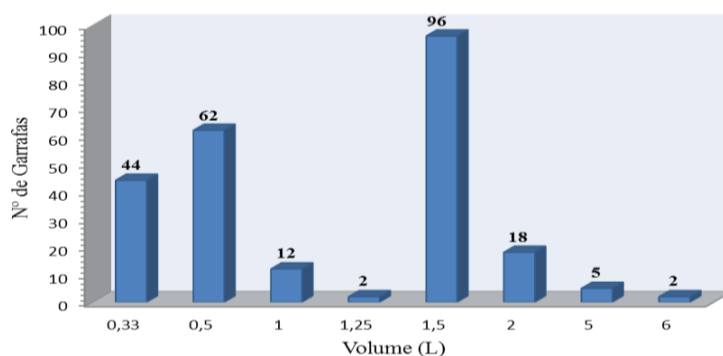


Figura 4.3 – Distribuição dos volumes na amostra

4.3 – SEPARAÇÃO DE MATERIAIS

Esta etapa aproveita o facto dos materiais, que constituem a garrafa plástico, possuírem massas volúmicas distintas. A massa volúmica do PET e do PE são respetivamente, 1,41 [31] e 0,941 – 0,965 [15] g cm⁻³, ao introduzir estes materiais na tina com água, de massa volúmica 1 g cm⁻³, o material mais denso, PET, submerge, enquanto o de menor densidade, o PE, flutua, Figura 4.4 a). Com o coador consegue-se retirar tanto o material do corpo da garrafa, Figura 4.4 b), como o das tampas, Figura 4.4 c).



Figura 4.4 - Teste de separação por densidades; a) Separação do PE do PET; b) Remoção do PET; c) Remoção do PE.

No entanto, esta separação não se consegue efetuar na sua totalidade, pois existem sempre grãos de PET que flutuem, como se pode observar numa amostra deste material imerso em água, Figura 4.5, devido à sua elevada área superficial em relação à sua espessura, e existem, também, grãos que ficam aprisionados no conjunto depositado no recipiente, muito dificilmente se terá uma apartação completa por mais que se agite a água. Portanto, é importante estudar se é possível injetar a mistura, pois assim não será necessário efetuar a separação de materiais, nem a prévia a todas as etapas da reciclagem nem a por densidades.

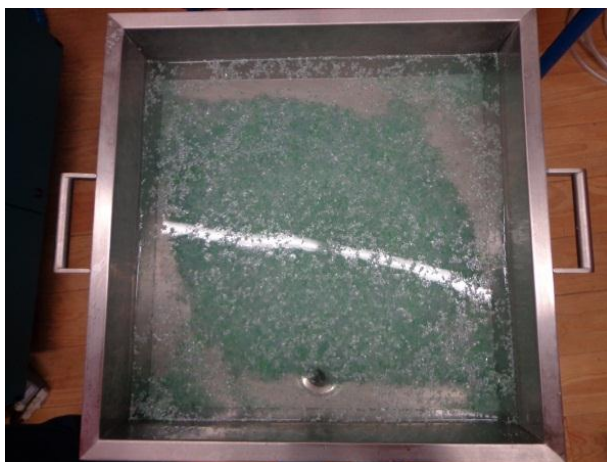


Figura 4.5 – A-PET imersa em água

4.4 – SECAGEM E DESUMIDIFICAÇÃO

SECAGEM

A estufa era, inicialmente, direcionada, apenas, para a A-PE, mas ensaiou-se as outras duas, A-PET e A-M2, porque o equipamento que efetua a desumidificação, fá-la através de um cilindro de sílica que absorve a humidade e como o PET é um material que por si só tem tendência de gerar muito pó, se o conjugar com humidade excessiva pode se formar uma camada no cilindro que reduz em muito o tempo de vida desse componente. A secagem serviu, então, para retirar o grosso da humidade.

No manual do secador CONAIR aconselha-se a colocar PE na estufa a 85 °C durante uma hora, portanto testou-se essas temperaturas para todas as amostras visto que o objetivo era comum. A A-PE ao fim de aplicados esses parâmetros encontra-se completamente seca e com os grânulos soltos, ou seja, com baixo teor de humidade. Enquanto para a A-PET e A-M2 existe um certo grau de coesão entre grânulos, no entanto a maior porção da humidade é retirada e, então, encontram-se prontas a desumidificar.

A avaliação dos parâmetros mais adequados para secagem e desumidificação é feito a partir de uma teste de teor de humidade para o PET e do resultado que se obtém nas peças processadas por moldação por injeção para os três tipos de amostra.

TESTE DE HUMIDADE

Quando se seca a A-PET durante 7 horas (1 hora no secador a 85 °C e 6 horas no secador-desumidificador a 170 °C) o teor de humidade é de 0,06 %, com a diminuição dos tempos de residência no desumidificador para um total de 5 e 3 horas, o teor aumenta para 1% e 2,2 %, a Figura 4.6 traduz essa evolução. Note-se que até o valor mais baixo de teor de humidade, 0,06 %, está acima do requisito mínimo de 0,02 %, no entanto a peça a injetar, um porta-chaves, não possui especificações muito elevadas, ou seja, este, apenas, tem que manter, apenas, a sua integridade física quando sujeita a esforços pelos visitantes. Portanto procedeu-se à injeção do PET com estes tempos de secagem.

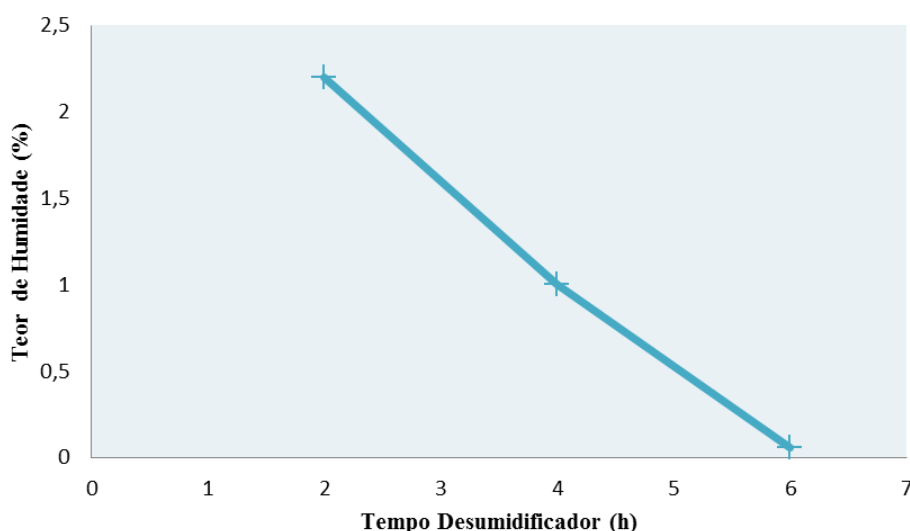


Figura 4.6 - Evolução do teor de humidade com o aumento do tempo de secagem no desumidificador

4.5 – CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DE INJEÇÃO

Nesta secção discute-se a qualidade das peças injetadas para as condições a que foram submetidas.

A-PET

Na Tabela 4.3 encontram-se as condições de processamento utilizado para este tipo de amostra.

Na Figura 4.7 está uma peça de PET injetada com o tempo de secagem de 7 horas, conclui-se que esta secagem é suficiente para o PET, pois as peças apresentam uma resistência mecânica que permite aos intervenientes manuseá-la sem esta se quebrarem, ou seja, a contaminação do PET com água e acetaldeído não foi excessiva e, por consequência, a redução da massa molecular não foi de tal ordem que resultasse em perdas de propriedades mecânicas que inviabilizassem o seu uso. Fica assim estabelecido o patamar mínimo provisório para as peças injetadas em termos de secagem, 1 hora a 85 °C no secador e 6 horas no secador-desumidificador a 170 °C, e os respetivos 0,06% de humidade. Ainda na Figura 4.7 pode-se observar uns pontos negros na peça, este devem-se a sujidades, pois a purga do cilindro foi feito com PP, que possui um ponto de fusão de aproximadamente 165 °C e para injetar o PET utilizam-se temperaturas bastante mais elevadas até valores de 280 °C, uma das causas prováveis é que o PP esteve demasiado tempo a essa temperatura, o que degradação resultando nesses pontos. Amostra também é amorfa pois como não tem organização, a luz passa através da peça é por isso que é transparente.



Figura 4.7 - PET com 1 hora a 85 °C na estufa e 6 horas a 170 °C no desumidificador

No entanto, existe a exigência para que o processo de reciclagem seja o mais célere possível de forma a conseguir uma produtividade diária adequada com os requisitos do CCVG., que ainda se encontram por definir. Portanto utilizou-se um intervalo de secagem inferior, 1 hora de secador a 85 °C e 4 horas no secador-desumidificador a 170 °C, a peça injetada resultante encontra-se na Figura 4.8. Novamente as peças injetadas com este intervalo de tempo não apresentam os problemas típicos de uma secagem deficiente porque quando submetidas mais uma vez a um teste qualitativo de quebra elas mantiveram a sua integridade, ou seja, a hidrólise que ocorre no cilindro da máquina injetora ainda não é suficiente para por em causa a qualidade da peça final. Assim, estabeleceram-se estes tempos como o novo patamar mínimo provisório para injetar as peças. Nesta peça já aconteceu cristalização, mesmo que o molde esteja a mesma temperatura para esta injeção como para a injeção I, ao longo do tempo o molde

vai aumentando a temperatura à medida que o nº de peças injetadas aumenta, e assim o arrefecimento é mais lento dando oportunidade da estrutura cristalina do polímero se organize, como se pode ver é baça a peça então provavelmente o molde já não se encontra a 30 °C.



Figura 4.8 - PET com 1 hora a 85 °C na estufa e 4 horas a 170 °C no desumidificador

Utilizou-se uma vez mais o secador durante 1 hora a 85 °C e modificou-se o tempo do desumidificador de 4 para 2 horas, nesta fase as peças injetadas eram mais frágeis do que as obtidas pelas condições anteriores mas este fator ao contrário do esperado é benéfico, pois ajuda a separar o ataque e o jito do porta-chaves. A peça, no entanto, não fratura portanto os 2,2% de humidade são o novo limite mínimo, na Figura 4.9 encontra-se a peça injetada. Na Figura 4.9 encontra-se bem evidenciado a diferença entre uma peça que recristalizou e outro que permaneceu amorfo, isto deve-se ao aumento da temperatura do molde com sucessivas peças injetadas, ou seja, a peça amorfa foi das primeiras a ser processada e a que é opaca foi processada posteriormente.



Figura 4.9 - PET com 1 hora a 85 °C na estufa e 2 horas a 170 °C no desumidificador

Na A-PET da Figura 4.10 não se secou no desumidificador, as peças são bastante frágeis e formaram-se bolhas no fundido resultado da secagem insuficiente, é intolerável esta conjectura na linha proposta. Conclui-se, assim, que os grânulos de PET antes de serem injetados têm que permanecer, no mínimo, 1 hora a 85 °C no secador e 2 horas no secador-desumidificador.



Figura 4.10 - PET com 1 hora a 85 °C na estufa

A-PE

Na Tabela 4.4 estão as condições adequadas para processar o PE. A peça injetada com este material apresenta efeito de jato, como se pode observar na Figura 4.11, que resulta ou de temperaturas e pressões muito elevadas ou de ataques no molde muito estreitos, o que resulta que o fundido entra com elevadas velocidades. Portanto existem dois tipos de abordagens a tomar neste caso, uma será reduzir os parâmetros operacionais responsáveis. Noutra terá que se efetuar um estudo do molde e do fluxo para verificar se o ataque não é demasiado estreito para este material.

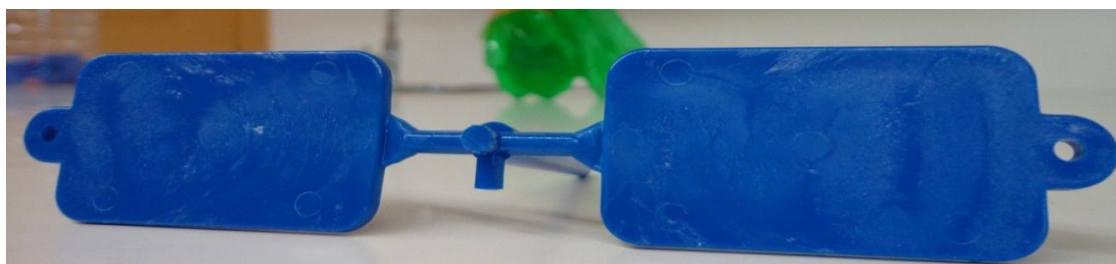


Figura 4.11 - PE com 1 hora a 85 °C na estufa

A-M2

As últimas duas injeções foram para testar a mistura, na Tabela 4.5 estão os valores para a injeção. Na primeira mistura secou-se o PET e o PE em separado segundo as condições adequadas para ambos, processou-se e o resultado encontra-se na Figura 4.12. A peça em termos mecânicos apresenta estabilidade, mais uma vez a sua integridade mantém-se, ou seja, a mistura PET mais PE é viável e portanto a linha mais simples será processar ambos os materiais em conjunto. Um dos defeitos que ocorre deve-se ao efeito de jato que também acontece nesta injeção, resultado da ação do PE na mistura e portanto têm que ser estudado o ataque do molde, pois não se pode alterar as condições de injeção porque o PET. Verificou-se laminagem em algumas peças que se traduziu numa pequena rebarba, mas nada de significativo, pois a mistura não se encontrava bem distribuída havendo concentrações excessivas de PE, reduzindo a coesão entre materiais.



Figura 4.12 - PET e PE com 1 hora a 85 na estufa e PET com mais 2 horas a 140 C no desumidificador

A mistura mostra resultados promissores, no entanto se a secagem dos componentes tiver que ser feita em separado, esta é tão viável como injetar ambos os materiais em separado. Note-se que a secagem tem que ser feita para os dois materiais e portanto é impossível produzi-la sem primeiro colocar o PET no secador durante uma hora e depois colocar este desumidificador e o PE no secador, com a devida limpeza dos equipamentos. O ideal será secar a mistura em conjunto, como o PE - AD tem temperatura de fusão de 140 °C, colocou-se a 130 °C durante 4 horas desumidificador após secagem habitual, dentro de valores de alguns produtores, para o PE não fundir. De fato, o PE não fundiu durante a desumidificação e os resultados da injeção foram semelhantes ao da secagem anterior, ou seja, este é o caso ideal para a linha proposta para o CCVG porque simplifica ao máximo todo o processo.



Figura 4.13 - PET com 1 hora a 85 °C na estufa e 6 horas a 170 °C no desumidificador

Alguns dos defeitos começaram a surgir assim que se afastava dos valores das tabelas 4.3 à 4.5 onde se encontra as condições de processamento adequadas, estes são as rebarbas e rechupes, o primeiro surgiu quando se utilizava pressões e temperaturas muito elevadas enquanto o seguinte ocorreram pelo contrário, as temperaturas e pressões não eram suficientes para preencher a cavidade moldante.



Figura 4.14 - Defeitos resultantes da inadequação das variáveis operatórias de injeção; a) Rebarba; b) Rechupe.

Tabela 4.3 – Condições de processamento para o PET

CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO			PET			
			INJEÇÃO I	INJEÇÃO II	INJEÇÃO III	INJEÇÃO IV
INJEÇÃO	Perfil de Temperaturas na injeção (°C)	Posição 1	230			
		Posição 2	240			
		Posição 3	260			
		Bico	270			
	Velocidade de Injeção (%)		25			
	Pressão de Injeção (bar)	Primária	100			
		Secundária	80			
	Ponto de Comutação (mm)		10			
	Tempos de Injeção (s)	t _{2ª} pressão	5			
		t _{arrefricimento}	15			
	Temperatura do Molde (°C)		30			
	Curso do Parafuso (cm)		40			
SECADOR	Tempo (h)		1			
	Temperatura (°C)		85			
DESUMIDIFICADOR	Tempo (h)		6	4	2	[-] ³
	Temperatura (°C)		170	170	170	[-] ³
Nº DE GRANULAÇÕES			2			

³Não se submeteu à desumidificação.

Tabela 4.4 - Condições de processamento para o PE

CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO			PE
			INJEÇÃO I
INJEÇÃO	Perfil de Temperaturas na injeção (°C)	Posição 1	200
		Posição 2	210
		Posição 3	220
		Bico	220
	Velocidade de Injeção (%)		10
	Pressão de Injeção (bar)	Primária	80
		Secundária	60
	Ponto de Comutação (mm)		8
	Tempos de Injeção (s)	t _{2ª pressão}	5
		t _{arreficimento}	15
	Temperatura do Molde (°C)		30
	Curso do Parafuso (cm)		40
SECADOR	Tempo (h)		1
	Temperatura (°C)		85
Nº DE GRANULAÇÕES			2

Tabela 4.5 - Condições de processamento para a A-M2

CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO			A-M2	
			INJEÇÃO I	INJEÇÃO II
INJEÇÃO	Perfil de Temperaturas na injeção (°C)	Posição 1	230	
		Posição 2	240	
		Posição 3	260	
		Bico	270	
	Velocidade de Injeção (%)		10	
	Pressão de Injeção (bar)	Primária	120	
		Secundária	80	
	Ponto de Comutação (mm)		10	
	Tempos de Injeção (s)	t _{2ª} pressão	5	
		t _{arreficimento}	15	
	Temperatura do Molde (°C)		50	
	Curso do Parafuso (cm)		40	
SECADOR	Tempo (h)		1	
	Temperatura (°C)		85	
DESUMIDIFICADOR	Tempo (h)		PET – 2	Mistura - 4
	Temperatura (°C)		PET - 170	Mistura - 140
Nº DE GRANULAÇÕES			2	

4.6 – PERCURSO DO VISITANTE NO CCVG

Em Anexo IV – Figura IV.1 encontra-se o layout da sala de reciclagem proposta para o CCVG no qual figura uma seta que representa o fluxo dos visitantes.

O visitante entrará na sala de reciclagem pela porta P₁ do layout em anexo onde será feita a entrega do objeto de estudo, isto é, das garrafas de plástico ao monitor em serviço, o qual efetuará as verificações necessárias para se proceder à granulação. Neste passo, o visitante, colocará as garrafas, devidamente preparadas, no moinho, segundo uma sequência fundamentada na secção 4.2. Devidamente triturado o material, será requisitado a um dos visitantes que o recolha da gaveta onde se encontra depositado e o coloque na bacia de lavagem. Os indivíduos irão participar no processo procedendo à lavagem conveniente do material. Esta etapa ajudará também a seguir, a eventual separação dos materiais. Segue-se o armazenamento onde se encontrará material previamente preparado. Note-se que, doravante, a participação no processo será restrita ao monitor, sendo que se trabalhará com equipamentos que apresentam perigo para quem não os souber operar, devido a diversos fatores, como é o caso de elevadas temperaturas a que eles irão funcionar. O material será colocado então no secador e no desumidificador, conforme as especificações determinadas no trabalho prático. Logo após, fazendo uso do alimentador, será depositado material a injetar na tremonha da máquina, aqui o visitante poderá ver a injeção de alguns porta-chaves alusivos ao CCVG, conjuntamente com o braço robô que retira as peças da máquina para colocar no tapete rolante. Os participantes no fim deste processo poderão ficar com as peças injetadas. De notar que a secagem do material é um processo moroso, portanto será necessário a preparação *á priori* do material.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

5.1 – PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Para o desenvolvimento deste projeto, foi necessário estudar e, por consequência, conhecer todos os eventuais problemas que os materiais que constituem uma garrafa de plástico apresentam na reciclagem. Esta base teórica foi fundamental para perceber todas as etapas que envolvem a reciclagem mecânica de garrafas de plástico, o equipamento que se havia concebido e adquirido, previamente na dissertação da Sara Sampaio [1], e para delinear o seu *layout* na sala destinada à reciclagem do CCVG tendo em conta o percurso do visitante.

O trabalho experimental assentou no pressuposto de obter uma linha que fosse o mais eficaz possível, para tal estudou-se o PET, o PE e a Mistura (15 % PE). O processo de reciclagem proposto para o sistema didático é constituído em linhas gerais pelas seguintes etapas: remoção prévia de contaminantes, em que os rótulos e as zonas com cola são retirados; a granulação, em que as garrafas são trituradas e se pretende obter flocos com dimensões uniformes, para que a fusão durante o processamento ocorra uniformemente; lavagem, para descontaminação dos plásticos de gordura, sujidade e cola, bem como a eliminação dos remanescentes rótulos; separação por densidades dos materiais (opcional); secagem e desumidificação, cujo objetivo é reduzir o teor de humidade e finalmente injeção, em que os flocos limpos e secos podem novamente ser utilizados como matéria-prima e serem reprocessados.

Quanto ao estudo da granulação teve-se o objetivo de determinar as condições adequadas de trituração, nomeadamente a forma de alimentação e o nº de granulações a efetuar. Concluiu-se que a granulação é eficaz se se triturar duas vezes as garrafas para obter grânulos mais uniformes e, assim, conseguir uma melhor fluência na máquina injetora e se se granular segundo a sequência de 5 garrafas, com um intervalo de 45 segundos entre elas, e de um 1 minuto ao fim da colocação do conjunto para evitar atolamentos e encravamentos do moinho.

Seguiu-se um breve estudo sobre a lavagem e separação por densidades para os grânulos de PET e PE. Os materiais, de fato, separaram-se após a agitação provocada pela lavagem porque possuem massas volúmicas diferentes, mas para este processo não se consegue um rendimento de 100 %, portanto a forma mais simples da linha será injetar a

mistura, se possível, removendo, então, a etapa de separação de materiais à linha de reciclagem. Se se pretender separar completamente os materiais, PET do PE, terá que se efetuar operações prévias à granulação, que se forem os visitantes a realizar põe em risco o seu bem-estar e se for o monitor da linha irá despende mais tempo para a reciclagem, portanto são evitáveis.

Posteriormente, quantificaram-se os tempos mínimos de secagem e desumidificação necessários para uma injeção não problemática, onde se avaliou os valores existentes na bibliografia. Para tal secaram-se, o PET, PE e a Mistura e desumidificaram-se o PET e a A-M com diferentes tempos e temperaturas para posterior análise de teor de humidade e de peças injetadas. Verificou-se que os dados bibliográficos são demasiado rigorosos porque as peças obtidas no Centro não possuem especificações muito elevadas. Para todos os materiais o mais adequado será secar na estufa durante 1 hora a 85 °C, quanto à desumidificação para o PET o mais apropriado será estar no secador-desumidificador durante 2 horas a 170 °C enquanto a mistura deverá permanecer durante 4 horas a 140 °C.

Um último estudo, dirigiu-se a encontrar as condições de injeção para os diferentes tipos de amostra para, posteriormente, automatizar todo o processo articulando-o com o braço robô e o tapete rolante existente no CCVG. Após a injeção das peças fez-se uma análise visual e qualitativa das peças obtidas, foi através desta que se encontrou os valores do parágrafo anterior. Determinou-se, também, que a injeção da mistura é possível, com as condições mais desfavoráveis em termos de quantidade de poliolefinas no PET, e portanto este será o sistema de reciclagem mais simples. No entanto, encontrou-se também valores adequados para o PET e o PE. Com a análise dos defeitos nos materiais em separado foi possível inferir a causa dessas imperfeições nas peças obtidas com a mistura e, assim, determinar testes futuros para completar ainda mais os estudos.

Muito resumidamente, a linha aconselhada, ou seja, a mais simples constituirá em triturar as garrafas que são rececionados no Centro sem qualquer tipo de operação de separação de materiais prévia, triturando duas vezes segundo a sequência proposta. De seguida segue-se a lavagem onde a etapa de separação por densidades é retirada. Após a lavagem o material é colocado indiferenciadamente no secador durante uma hora a 85 °C e, posteriormente, desumidificado a 140 °C durante no mínimo 4 horas. Através de um alimentador faz-se chegar à tremonha da máquina de injeção que segundo as condições da Tabela 4.5 é injetado, depois removido pelo braço robô e colocado no tapete rolante.

Note-se que aquando a visita do CCVG as peças vão estar preparadas, o visitante não está presente na íntegra nas etapas de secagem e desumidificação.

Vai ser sempre dada a escolha, com atenção para a limitação de quantidade, do tipo de material que se pretende integrar nos porta-chaves, de acordo com a estética pretendida, tendo que se adaptar a linha para tal. No caso do PET e o PE a separação de materiais, ou prévia ou por densidades, é necessária e as condições de processamento são, também, diferentes como está explícito nas respetivas Tabelas 4.3 e 4.4.

5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No seguimento desta dissertação existem, ainda, alguns estudos a realizar:

✓ Um exame mais pormenorizado do material do PE, pois este apresentou, sistematicamente, defeitos relacionados com o efeito de jato, com consequências nas peças injetadas da mistura. Para tal, é interessante fazer um estudo do molde para verificar se os ataques existentes possuem uma espessura suficiente para injetar o PE sem a ocorrência deste tipo de defeitos.

✓ Projetar e construir novas placas moldantes, que permitam obter peças com outro tipo de pormenores, como por exemplo o logotipo do CCVG, que ainda está indefinido.

✓ Utilizar temperaturas de molde baixas ($> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$). As temperaturas de molde que se utilizaram foram no mínimo a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, pois devido à logística de montagem do equipamento não foi possível utilizar o refrigerador para obter temperaturas de molde inferiores, isto tem particular interesse para obter peças com características visuais diferentes, como transparência. Portanto, estudar mais condições de processamento.

✓ Analisar a influência que a cola poderá ter nos produtos finais, pois se esta não for crítica na redução de propriedades mecânicas simplifica o processo de reciclagem a utilizar no CCVG.

✓ Conceber um catálogo com as peças possíveis para que cada grupo de pessoas antes de visitar possa escolher o tipo de peças que pretende, e assim se possa adaptar o ciclo conforme cada necessidade.

✓ Formar grupos de estudo para avaliar a vertente pedagógica do projeto.

✓ Efetuar eventuais diferentes nos equipamentos para aumentar a eficiência destes.

✓ Articular o braço robô e tapete com o ciclo de processamento encontrado nesta dissertação.

✓ Testar o aproveitamento dos jitos e ataques resultantes da injeção no CCVG.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFIA

6.1 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sampaio, S; "*Desenvolvimento de um Sistema Didático de Reciclagem de Garrafas de Plástico*"; Dissertação de Mestrado; Universidade do Minho, Guimarães, 2009
2. GUIMARAES 2012 CEC: "*Apresentação*"; www.guimaraes2012.pt visitado em 13 / 02 /12
3. CIENCIAVIVA: "*Centros de Ciência Viva*" ; www.cienciaviva.pt/centroscv/rede visitado em 14 / 06 /12
4. Recursos Básicos Sobre Plásticos E Polímeros; www.gorni.eng.br/textpol.html; “*A evolução dos materiais poliméricos ao longo do tempo*”, 2003 visitada em 13/ 02 / 12
5. Brydson J; "*Plastics materials*"; Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999
6. PLASTICEUROPE: "*What is Plastic*"; www.plasticseurope.org visita em 04 / 04 / 12
7. Candian, L; “*Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais*”; Dissertação de Mestrado; Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009
8. agl.groupbg.com visitada em 05 / 02 / 12
9. Crawford J; "*Plastic Engineering*"; Butterworth-Heinemann 1998
10. INTRAPLÁS, “*As formas do plástico*”; www.intraplas.pt, 2008 visitada em 05 / 02 / 12
11. AMBIENTE; Página oficial da empresa; www.ambiente-sa.com, 2008 visitada em 07 / 02 / 12
12. PlasticEurope: *Plastics – the Facts 2012*; www.plasticseurope.org visitada em 04 / 04 / 12

13. SILVA, P; *“Inovação ambiental na gestão de embalagens de bebidas em Portugal”*, Dissertação de Mestrado; Instituto Superior Técnico, 2002
14. Gomes, H; *“Obtenção, caracterização mecânica de PET/Amido plastificado e cálculo das incertezas das medições”*; Dissertação de Mestrado, Universidade de São Francisco, Itaíba, 2006
15. Khan Z, Kamaruddin S, Siddiquee A; *"Feasibility study of use of recycled High Density Polyethylene and multi response optimization of injection moulding parameters using combined grey relational and principal component analyses"*; Materials & Design; 2010; vol. 31:2925–2931.
16. Forlin F, Faria J; *"Considerações sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas"*; FEA- Departamento de Tecnologia de Alimentos; Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol.12, nº1, p. 1-10, 2002
17. Gonçalves-Dias, S; Teodósio, A; *“Estrutura da cadeia reversa: “caminhos” e “descaminhos” da embalagem PET*, Produção São Paulo 2006; vol. 16:429–441.
18. Rolim, A; *“A reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo em oito empresas do Rio Grande do Sul”*; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000
19. KIPPER, L; *“Ações Estratégicas Sistêmicas Para a Rede Sustentável de Reciclagem de Plásticos”*; Tese de Doutorado; Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis; 2005
20. PLASTVAL; *“Damos ao Plástico o Valor Devido”*; www.plastval.pt; 2008
21. Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho
22. EUROFARMA: *"Projeto Consciência Limpa"*; www.eurofarma.com.br/pdf/meioambiente/Residuos.pdf visitada em 22 / 06 / 12
23. www.pontoverde.pt visitada em 22 / 06 / 12
24. www.lipor.pt visitada em 22 / 06 / 12
25. Oliveira M: *"Gestão de resíduos plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no Brasil"*; Dissertação de Mestrado; Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia; Rio de Janeiro, 2012
26. Azapagic, A., Emsley, A., Hamerton, I. (2003), *"Polymers, the Environment and Sustainable Development"*; John Wiley & Sons Ltd., Inglaterra, 219 p.

27. CANELLAS, S; “*Reciclagem de PET , visando a substituição de agregado miúdo em argamassas miúdo em argamassas*”; Dissertação de Mestrado; PUC – Pontifícia Universidade Católica; Rio de Janeiro, 2005
28. Candian L, Dias AA: Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais [Internet]. . Cadernos de Engenharia de Estruturas 2009 [cited 2012 Nov 12];volume 11:1–16.
29. Alves, Ana Cláudia; "A Reciclagem de PET na Fabricação de Jeans: o Caso da Parceria Rhodia-Ster, Santista, M. Officer e Coopa-Roca"; XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba-PR, 23 a 25 Outubro 2002.
30. Navarro R, Ferrandiz S, Lopez J, Seguí V: "The influence of polyethylene in the mechanical recycling of polyethylene terephthalate". Journal of Materials Processing Technology 2008;195:110–116.
31. Awaja F, Pavel D: "Recycling of PET". European Polymer Journal 2005;41:1453–1477.
32. Santos P, Pezzin H: "Mechanical properties of polypropylene reinforced with recycled-pet fibres"; Journal of Materials Processing Technology 2003 Dec;143-144:517–520.
33. Awaja F, Pavel D: "Statistical models for optimisation of properties of bottles produced using blends of reactive extruded recycled PET and virgin PET"; European Polymer Journal 2005;41:2097–2106.
34. Torres N, Robin J, Boutevin B: "Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection molding". European Polymer Journal 2000; 36:2075–2080.
35. Throne JL. "Effect of recycle on properties and profits, algorithms". Adv Polym Technol 1987;7(4):347–60
36. Yoda N. "Corporate management in the age of global environmental awareness, a case study of PET-bottle- recycling issues in Japan". Polym Int 1999;48:944–51
37. Inata H, Matsumura S. "Chain extenders for polyesters IV. Properties of the polyesters chain extended by 2,20-bis(2- oxazoline)". J Appl Polym Sci 1987;33:3069–79.
38. Olabisi O. "Handbook of thermoplastics". New York, USA: Marcel Dekker Inc.; 1997. 39. Charrier J: Polymeric materials and processing. New York, USA, Hanser Publishers, 1991.
40. Scheirs J. "Polymer recycling, science, technology and application". John Wiley and Sons Ltd; 1998.
41. Cardi N, Po R, Giannotta G. "Chain extension of recycled poly(ethylene terephthalate) with 2,2,bis(2-oxazoline)". J Appl Polym Sci 1993;50:1501–9.

42. Paci M, La Mantia FP. *"Influence of small amounts of polyvinylchloride on the recycling of polyethylene terephthalate"*. Polym Degrad Stab 1999;63:11–4.
43. ABIPET: Um incentivo à reciclagem; www.abipet.org.br
44. Demertzis PG, Johansson F, Lievens C, Franz R. *"Studies on the development of a quick inertness test procedure for multi-use PET containers-sorption behaviour of bottle wall strips"*. Pack Technol Sci 1997;10:45–58.
45. Dodbiba, G., Haruki, N., Shibayama, A., Miyazaki, T., Fujita, T., 2002. *"Combination of sink-float separation and flotation technique for purification of shredded PET-bottle from PE or PP flakes"*. Int. J. Miner. Process. 65, 11–29.
46. Mantia F La, Vinci M: *"Recycling poly (ethyleneterephthalate)"*; Polymer degradation and stability 1994.
47. De Moura Giraldi a. LF, De Jesus RC, Mei LHI: *"The influence of extrusion variables on the interfacial adhesion and mechanical properties of recycled PET composites"*. Journal of Materials Processing Technology 2005 May;162-163:90–95.
48. Giannotta G, Po G, Cardi N. *"Processing effects on poly(ethylene terephthalate) from bottle scraps"*. Polym Eng Sci 1994;34:1219.
49. PITA, F; *"Volume I - Armazenamento e Tratamento de RSU"*; Departamento De Ciências Da Terra – Faculdade De Ciências E Tecnologia Da Universidade De Coimbra; Coimbra, 2002
50. Spinacé M, De Paoli M: *"A tecnologia da Reciclagem de Polímeros"*. Química Nova, vol. 28, n. 1, ISSN 0100-4042, 2005
51. MANCINI, A; AGNELLI, J; MANRICH, S; *"Determinação da variação da viscosidade intrínseca do poli (tereftalato de etileno) de embalagens"* Artigo Técnico Científico; Polímeros; São Carlos, 2004
52. Fabio R: *"Estudo Teórico-Experimental do Fabrico de Peças Poliméricas por Injecção"*, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010;
53. Hurmuzlu Y, Nwokah O. *"Mechanical systems design handbook, modelling measurement and control"*. CRC Press; 2002. disponível online em www.crcpress.com.
54. Incarnato L, Scarfato P, Di Maio L, Acierno D: *"Structure and rheology of recycled PET modified by reactive extrusion"*. Polymer 2000 Aug;41:6825–6831.
55. Silva Spinacé M a, Lucato MU, Ferrão MF, Davanzo CU, De Paoli M: *"Determination of intrinsic viscosity of poly(ethylene terephthalate) using infrared spectroscopy and multivariate calibration method"*. Talanta 2006 May 15;69:643–9.

ANEXOS

ANEXO I

IMAGENS DE EQUIPAMENTOS DA LINHA DE RECICLAGEM DA GARRAFAS DE
PLÁSTICO



Figura I.1 a) Secador CONAIR; b) Desumidificador CONAIR.



Figura I.2 - Tina de aço.



Figura I.3 - Moinho da TRIA



Figura I.4 - Alimentador CONAIR



Figura I.5 - Tapete rolante com proteção



Figura I.6 - Refrigerador EQUIFAB



Figura I.7 - Robô PIKO.



Figura I.8 a) Termorregulador; b) Injetora BOY 22M.

ANEXO II

ANÁLISE DA AMOSTRA RECOLHIDA

Tabela II.1 – Análise da Amostra de Matéria-Prima

MARCAS	VOLUME (L)	Nº DE GARRAFAS	COLORAÇÃO
Água Caramulo (1)	0,50	1	Transparente
Água de Nascente Amanhecer (2)	0,50	1	
Água de Nascente Serra de Montemouro (3)	0,33	1	
Picolé Laranja (4)	1,5	1	Translúcidas e Verde
Lima Limão A Nossa Loja (5)	2	1	
Fresky (6)	1,5	2	
Água Pingo Doce (7)	1,5	2	Transparentes
Ajax (8)	1	2	
Água Mineral (9)	1,5	3	
Sprite (10)	1	4	Translúcidas e Verdes
Água Penacova (11)	0,50	2	Transparentes
	1,5	3	
Água de Nascente (12)	0,5	4	
	1,5	2	
Frisumo (13)	1,5	10	
Vitalis (14)	0,5	6	
	1,5	15	
	5	3	
	0,33	42	
Luso (15)	0,50	43	
	1,5	3	
Salutis (16)	1,5	38	
Coca-Cola (17)	1	5	
	1,5	4	
	2	10	

ANEXO III

IMAGEM DO RESULTADO DE GRANULAÇÕES CONSECUTIVAS

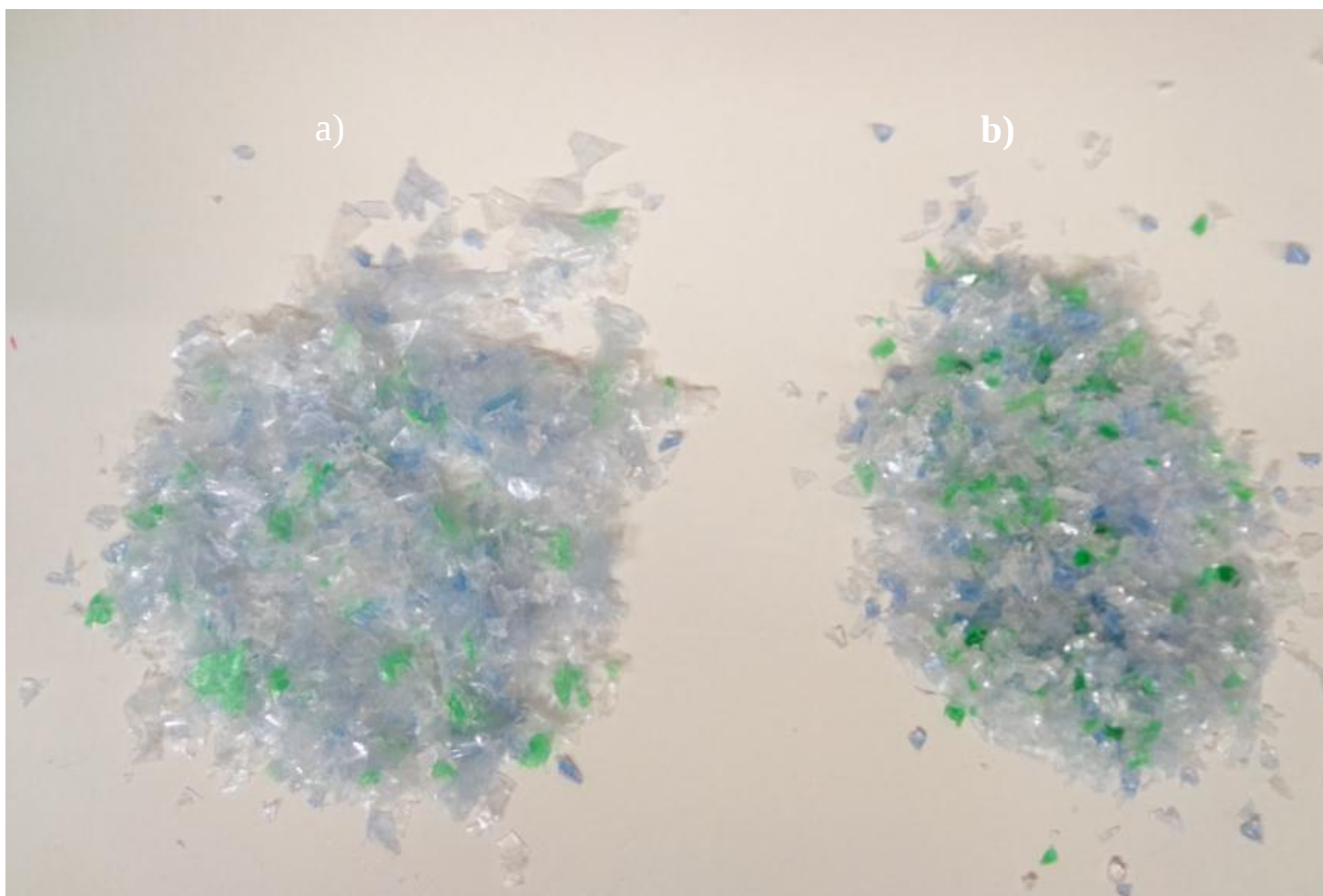
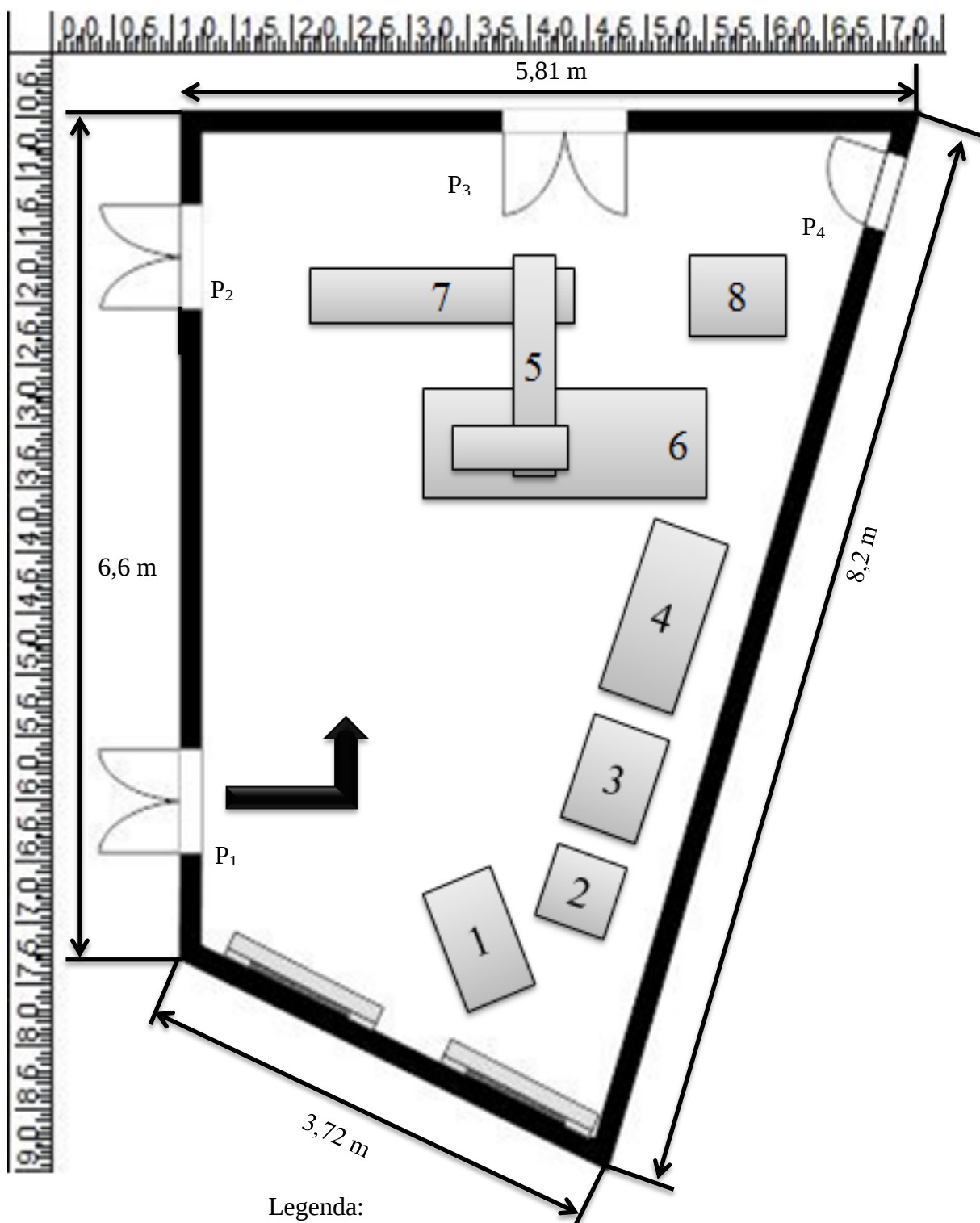


Figura III.1 a) Uma fase de granulação; b) Duas fases de granulação

ANEXO IV

PLANTA DA SALA DE RECICLAGEM DO CENTRO DE CIÊNCIA VIVA



Legenda:

- 1 – Moinho Tria;
- 2 – Tina de Aço;
- 3 – Recipiente de Armazenamento;
- 4 – Secador e Desumidificador CONAIR;
- 5 – Braço Robô PIKO;
- 6 – Injetora BOY 22M;
- 7 – Tapete Rolante;
- 8 – Refrigerado EQUIFAB;

Figura IV.1 – Layout da sala de reciclagem