

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Diana Rita Fernandes Martins

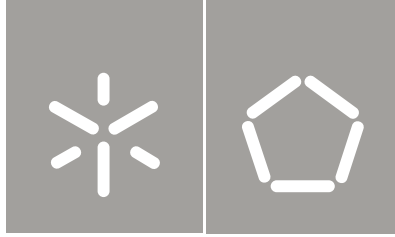
Definição de Layout de Protótipo Industrial  
Para Separação Gravítica de Embalagens  
Tetra Pak®

Diana Rita Fernandes Martins  
Definição de Layout de Protótipo Industrial Para  
Separação Gravítica de Embalagens Tetra Pak®

UMinho | 2013

dezembro de 2013





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Diana Rita Fernandes Martins

Definição de Layout de Protótipo Industrial  
Para Separação Gravítica de Embalagens  
Tetra Pak®

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

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professora Doutora Maria Cândida Lobo Guerra  
Vilarinho  
(Universidade do Minho)  
Doutora Joana Maria de Freitas Carvalho  
(CVR – Centro de Valorização de Resíduos)

## DECLARAÇÃO

Nome: Diana Rita Fernandes Martins

Correio electrónico: a51138@alunos.uminho.pt

Tel./Tlm.: 914833253

Número do Bilhete de Identidade:13009522

Título da dissertação:

Definição de Layout de Protótipo Industrial Para Separação Gravítica de Embalagens Tetra Pak®

Ano de conclusão: 2013

Orientadores:

Doutora Maria Cândida Lobo Guerra Vilarinho

Doutora Joana Maria de Freitas Carvalho

Designação do Mestrado:

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia

Área de Especialização: Energia e Ambiente

Escola:Engenharia

Departamento:Engenharia Mecânica

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

Guimarães, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

A todos aqueles que passaram na minha vida, que sempre me fizeram acreditar que basta lutarmos e os nossos sonhos tornar-se-iam realidade.

Uma dedicatória especial, ao meu avô, que sempre me ensinou que a humildade, generosidade e garra de vencer só se consegue com muito suor e lágrimas.

Adoro-te por tudo, estarás sempre comigo!



## **AGRADECIMENTOS**

Deixo aqui os meus sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização direta ou indireta da Tese de Mestrado.

Em primeiro lugar, à minha família um especial agradecimento, pais e irmão que apesar de todas as dificuldades sempre me orientaram e apoiaram nas minhas escolhas!

Ao meu namorado Rafael pelo amor que sempre me dedicou, carinho e paciência.

Um obrigado, à professora Doutora Cândida Vilarinho pela orientação, compreensão e auxílio na escrita deste trabalho.

À coorientadora Doutora Joana Carvalho, a Doutora Alexandra Castro e Eng. Carlos Carneiro um agradecimento pela disponibilidade prestada.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica pelo apoio prestado, nomeadamente ao professor Doutor José Carlos Teixeira e aos técnicos do laboratório de Metalúrgia Mecânica.

Ao CVR - Centro para a Valorização de Resíduos pela cedência do equipamento, das instalações e dos materiais usados nos ensaios.

Também agradeço aos meus amigos, que durante toda a minha viagem académica me demonstraram que os amigos são uma verdadeira família, que estão sempre por perto.

Um enorme obrigado a todos!





## RESUMO

Na presente proposta de dissertação, e em colaboração com o CVR - Centro de Valorização de Resíduos estudou-se a valorização das embalagens da Tetra Pak®, também conhecidas por embalagens multicamada. O objetivo primordial desta foi analisar as particularidades mais relevantes de algumas embalagens, estudar a separação das frações constituintes usando a tecnologia por via húmida e a de valorização energética e desenvolver, o *layout* de um equipamento otimizado capaz de realizar a sua reciclagem. Posteriormente, os materiais provenientes do processo de separação podem ser reincorporados na constituição de futuras embalagens, ou novos produtos, nomeadamente para recuperação de fibras de papel, que se encontram em maioria na sua composição, e também para a produção de alumínio e de parafina.

Numa primeira etapa, foram selecionadas embalagens com diferentes tipos de envase - Matinal, Agros e Compal Tetra Pak®. Foi realizada a separação do material por fragmentação dos resíduos de cada tipologia, para serem estudadas em separado, à escala laboratorial. De seguida realizou-se a separação por via húmida, modificando alguns parâmetros como a temperatura, velocidade de rotação e tempo de separação. Após a reciclagem mecânica, já com os resíduos secos, procedeu-se a pesagem das frações separadas, determinando as frações em separado obtidas e o respetivo rendimento.

Numa segunda etapa, foi dimensionado um protótipo à escala real de um “Hidrapulper”, para acolher as quatro embalagens multicamadas, de cada tipo de envase (Compal, Agros e Matinal), por forma a futuramente viabilizar os testes realizados em laboratório. Tendo como objetivo abordar o ciclo de reciclagem/valorização destas embalagens, permitindo a recuperação de todas as suas frações constituintes: papel, polietileno e alumínio. Foi igualmente efetuado o estudo das propriedades físicas e mecânicas das fibras de papel, após trituração e separação das diferentes frações remanescentes, realizadas a partir da experiência laboratorial.

Numa terceira etapa, foram comparados os resultados da valorização das embalagens por via húmida com os de direta (pirólise) registando as propriedades dos produtos gerados durante o processo, onde se inclui a identificação dos constituintes do gás de síntese e se analisou a composição do resíduo carbonoso.

A viabilidade económica dos dois processos foi igualmente avaliada. Os resultados obtidos nesta tese permitirão escolher com base no tipo de produtos ou fração que se pretende obter nos equipamentos quais instalações, possuem, qual o método com mais potencial

**Palavras-chave:** Tetra Pak®, reciclagem, valorização, “*Hidrapulper*”, pirólise.

## **ABSTRACT**

In this dissertation proposal , and in collaboration with the CVR - Centre for Waste Recovery studied the recovery of packaging from Tetra Pak ® , also known as multilayer packaging . The primary objective of this was to analyze the most relevant characteristics of some packages, study the separation of the constituent fractions using technology wet and energy recovery and develop the optimized layout of equipment capable of performing their recycling. Thereafter, the material from the separation process can be reintroduced in the formation of future packages or new products, in particular for recovery of paper fibers, which are mostly in their composition, and also for the production of aluminum and paraffin.

Matinal, Agros and Compal Tetra Pak ® - a first step, packages with different types of packaging have been selected. Separating waste from the fragmentation equipment of each type was performed to be studied separately on a laboratory scale. Then the separation is carried out by wet modifying some parameters such as temperature, speed and time separation. After mechanical recycling because with dry waste, proceeded to weigh the separated fractions, determining the separate fractions obtained and the respective yield.

In a second step, a prototype has been designed will a full scale " Hidrapulper " , to welcome the four multilayer packaging of each type of filling (Compal , Agros and Matinal) in order to facilitate future tests performed in the laboratory . Aiming to address the cycle of recycling/recovery of these packages, allowing the recovery of all its constituent fractions: paper, polyethylene and aluminum. It was also done to study the physical and mechanical properties of paper fibers, after grinding and separation of various fractions remaining, performed from the laboratory experiment.

In a third step , the results of the recovery of packaging were compared with wet direct (pyrolysis) noting the properties of the products generated during the process , which includes the identification of the constituents of syngas and analyzed the composition of the carbonaceous residue.

The economic viability of the two processes was also assessed. The results obtained in this thesis will choose based on the type of product or fraction to be obtained in the equipment which facilities have which method with more potential

**Keywords:** Tetra Pak®, recycling, reclamation, "*Hidrapulper*", pyrolysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organigrama de produção de resíduos no sector industrial (Castro, 2013) .....	6
Figura 2 – Sistemas de gestão de resíduos urbanos em Portugal (Palma, 2009). .....	9
Figura 3 - Hierarquia das operações de gestão dos resíduos. Adaptação de (Ferrão, et al., 2011). .....	11
Figura 4 – Sistemas de recolha seletiva de resíduos, ecopontos (GEOTA / Sociedade Ponto Verde). .....	13
Figura 5 - Ciclo de vida das embalagens longa vida (Green Savers, 2012). .....	15
Figura 6 – Entidades gestoras de resíduos de embalagens em Portugal (Resíduos Menos, 2011). .....	16
Figura 7 – Fluxograma da Recolha de Resíduos (INE , 2010). .....	21
Figura 8 - Primeira embalagem multicamada lançada em <i>Lund</i> , Suécia, em Novembro de 1952 (Tetra Pak international S.A.). .....	29
Figura 9 - O primeiro modelo da Tetra Pak para demonstrar a ideia do Dr. Ruben Rausing, construído em 1946 (Tetra Pak international S.A.). .....	30
Figura 10 - Uma das primeiras máquinas para embalagem de caixas em forma de tetraedro, em 1952 (Tetra Pak international S.A.). .....	30
Figura 11 - Primeira embalagens Tetra Pak® <i>Classic</i> (Sim é no amarelo). .....	31
Figura 12 - Composição das embalagens multicamadas Tetra Pak® (Protege o que é Bom)....	31
Figura 13 - Diferentes formas e formatos das embalagens de Tetra Pak® (Protege o que é Bom). .....	32
Figura 14 – As embalagens da Tetra Pak® e o ambiente – Selo FSC. ....	34
Figura 15 – Barreira física, função do alumínio, essencial para as ECAL.....	36
Figura 16 – Impressão sobre o papel (Tetra Pak Containers). .....	38
Figura 17 – Aspergimento de plástico líquido entre o rolo de alumínio e o papel (Tetra Pak Containers).....	38

Figura 18 - As diversas camadas numa embalagem de cartão asséptica para alimentos (Adaptado (Abreu, 2002)).	38
Figura 19 – Processo de corte das embalagens (Tetra Pak Containers).	39
Figura 20 processo de aquisição do formato da embalagem- (Tetra Pak Containers).	39
Figura 21 – Enchimento das embalagens e posterior fecho (Tetra Pak Containers).	39
Figura 22 – Diagrama do ciclo de valorização/reciclagem das embalagens Tetra Pak®.	41
Figura 23 – Papel Reciclado, utilizado para produção de novos produtos (Tetra Pak international S.A.).	42
Figura 24 - Fardo de polietileno com alumínio (Zuben, et al.).	42
Figura 25 - Extrusão do polietileno com alumínio (Zuben, et al.).	43
Figura 26 - Pellets obtidos pela extrusão do composto polietileno e alumínio (Zuben, et al.).	43
Figura 27 - Alguns materiais obtidos através da injeção ou laminação de peças (REF).	43
Figura 28 – Prensa utilizada na compressão térmica (Cerqueira, 2003; Neves).	44
Figura 29 – Telhas produzidas com polietileno e alumínio (Cerqueira, 2003; Neves)	44
Figura 30 - Produtos fabricados a partir do polietileno + alumínio (Neves; Neves, 2009).	44
Figura 31 – Imagem ilustrativa de um “Drumpulper” (Paper Machinery).	46
Figura 32 – Representação básica da estrutura de um “Hidrapulper” (Paper Machinery).	47
Figura 33 – “Hidrapulper” antes da segregação de embalagens (Neves, 1999).	48
Figura 34 – “Hidrapulper” após a desagregação de embalagens (Neves, 1999).	48
Figura 35 – Representação da rotação formada pelos rotores helicoidais ( Hahn, et al.).	48
Figura 36 – Rotor helicoidal de alta consistência (Zuben, et al.).	49
Figura 37 – Rotor helicoidal de média consistência (Zuben, et al.).	49
Figura 38 – Rotor helicoidal de baixa consistência (Zuben, et al.).	49
Figura 39 – Exemplo de peneira utilizada no “Hidrapulper” (Neves; Jonhson screens)	49
Figura 40 - Esquema simplificado da pirolise e da reciclagem física (Costa, 2006).	51
Figura 41 - Diagrama do ciclo de preparação dos resíduos.	54

Figura 42 - Instalação experimental: agitador e pormenor da hélice e placa de aquecimento (VELP Scientifica). .....	55
Figura 43 – Embalagem e um dos Sistemas de Abertura das Embalagens Tetra Brik ® da Agros (Tetra Pak international S.A.). .....	57
Figura 44 – Embalagem e Sistema de Abertura/Fecho das Embalagens Tetra Prisma ® Aseptic da Compal (Tetra Pak international S.A.).....	57
Figura 45 – Embalagem e o sistema de abertura / fecho das embalagens da Matinal (Tetra Pak international S.A.).....	58
Figura 46 - Estrutura auxiliar na separação da fração remanescente.....	59
Figura 47 – Processo laboratorial de reciclagem mecânica por via húmida de embalagens multicamadas.....	59
Figura 48 – Frações remanescentes (a, b e c) resultantes da separação gravítica por via húmida. ....	60
Figura 49 – Parte superior da embalagem da Matinal. ....	67
Figura 50 – Imagens captadas por microcâmara da fração remanescente de papel no alumínio. ....	69
Figura 51 - Zoom de fotografia às fibras de papel, captado por microcâmara. ....	69
Figura 52 - Aspeto geral da morfologia das fibras das amostras de pasta de papel, a 40x (CVR, 2013).....	70
Figura 53 - Morfologia das fibras encontradas nas embalagens multicamadas. ....	71
Figura 54 – Sequência de etapas operatórias na instalação para a realização dos ensaios de pirólise. ....	75
Figura 55 – Forno Rotativo, presente no CVR. ....	75
Figura 56 – Embalagens triturados no interior do forno. ....	75
Figura 57 – Caixa Intermédia de Recolha.....	76
Figura 58 – Teste da chama realizado na caixa intermédia de recolha.....	76
Figura 59 – Garrafa de condensados (A e B) utilizada no processo de pirólise. ....	76
Figura 60 - Teste do balão no caudalímetro (volume medido). ....	77

Figura 61 - Teste do balão na caixa de água (volume real).....	77
Figura 62 – Recolha de gases de síntese na coluna de água .....	77
Figura 63 – Teste da chama na coluna de água .....	77
Figura 64 – Recolha (A) e pesagem do resíduo obtido após pirólise (B). .....	78
Figura 65 – Resíduo aprisionado nas tampas do forno. ....	82
Figura 66 – Folhas de Alumínio pirolisado a 500°C .....	82
Figura 67 – Resíduo Carbonoso pirolisado a 500°C. ....	82
Figura 68 – Folhas de Alumínio .....	89
Figura 69 – Resíduo Carbonoso. ....	89
Figura 70 – Cadinho e alumínio prensado para avaliação do potencial de utilização em processo de fusão. ....	93
Figura 71 – Alumínio prensado no interior do cadinho.....	93
Figura 72 – alumínio agarrado as paredes do cadinho aos 800°C. ....	94
Figura 73 – Resultado final da mistura de alumínio puro (B) com o alumínio pirolisado a 650°C (A).....	95
Figura 74 – Projeto de um “Hidrapulper UM – 2013” .....	98
Figura 75 – Estrutura Circular Exterior, em que A (fração de P+P+A) e B (fração de papel) representam a saída dos diferentes materiais.....	98
Figura 76 – Estrutura Circular Interior, em que A representa a saída da fração P+P+A. ....	99
Figura 77 – Estrutura cilíndrica exterior perfurada, com representação do anel.....	99
Figura 78 – Estrutura cilíndrica interior, com representação dos canais de circulação água. ..	100
Figura 79 – Peneira com perfuração de 10mm. ....	101
Figura 80 – Veio de acionamento do movimento. ....	101
Figura 81 – Rotor helicoidal com raspador. ....	101
Figura 82 – Destroçador em estrela, utilizado para triturar as embalagens que sofreram separação por via húmida laboratorialmente. ....	131
Figura 83 – Imagem do equipamento - Triturador (TEQUIMAQ).. ....	131



Figura 84 - Moinho FELLERNER + ZIEGLER (CVR, 2013).....	132
Figura 85 – Grelha de 30 mm utilizada para a trituração das embalagens (CVR, 2013). .....	132
Figura 86 – Ensaio 1: a) Reservatório com o banho de água e b) Reservatórios com as diferentes frações de papel, plástico e alumínio, respetivamente. ....	133
Figura 87 - Ensaio 2: a) Conjunto de 2 redes, com diferente granulometria, b) Embalagens trituradas em banho de água dentro do reservatório e c) Desenho ilustrativo da estrutura de redes no reservatório. ....	133
Figura 88 - Ensaio 3: a) Conjunto de 3 redes, com diferente granulometria, b) Embalagens trituradas em banho de água dentro do reservatório e c) Desenho ilustrativo da estrutura de redes no reservatório. ....	134
Figura 89 - Ensaio 4: a) Estrutura de rede em forma de cilindro, b) Desenho ilustrativo da estrutura de redes no reservatório e c) Embalagens trituradas em banho de água dentro do reservatório. ....	134
Figura 90 – Forno rotativo utilizado nos teste de pirólise (CVR, 2013).....	139



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Código LER referente aos resíduos de embalagens. ....	7
Tabela 2 – Entidades Gestores de resíduos Urbanos, em Portugal.....	8
Tabela 3 – Balanço da quantidade de resíduos enviados para reciclagem nos primeiros trimestres (A. P.A.). ....	25
Tabela 4 - Identificação das amostras utilizadas no estudo. ....	56
Tabela 5 – Parâmetros experimentais utilizados nos ensaios laboratoriais de separação por via húmida das embalagens com envase da Agros. ....	61
Tabela 6 - Resultados obtidos da reciclagem à escala laboratorial de embalagens com envase da Agros. ....	62
Tabela 7 – Parâmetros experimentais utilizados nos ensaios laboratoriais de separação por via húmida das embalagens com envase da Compal. ....	63
Tabela 8 – Registo obtidos na separação por via húmida, à escala industrial, das embalagens com envase da Compal. ....	64
Tabela 9 - Parâmetros experimentais utilizados nos ensaios laboratoriais de separação por via húmida das embalagens com envase da Matinal.....	65
Tabela 10 – Resultados obtidos na separação por via húmida, à escala industrial, das embalagens com envase da Matinal.....	66
Tabela 11 – Parâmetros mais indicados para a separação por via húmida, de distintas tipologias de envase da Tetra Pak®. ....	67
Tabela 12 – Caracterização das fibras de papel recolhidas no processo de separação e respetivo método de análise. ....	70
Tabela 13 – Composição química da fração remanescente em alumínio, separado por via húmida.....	72
Tabela 14 – Volumes de gás medido durante o processo de pirólise no primeiro ensaio. ....	80
Tabela 15 – Volume total de gás de síntese gerado, durante o primeiro ensaio. ....	81

Tabela 16 – Registo de perdas de massas durante os primeiros ensaios de pirólise nas embalagens à temperatura de 500°C. ....	83
Tabela 17 - Concentração de monóxido de carbono $CO$ produzida durante o ensaio a 500°C. 84	
Tabela 18 - Concentração de hidrogénio produzida durante o ensaio a 500°C. ....	84
Tabela 19 - Concentração de dióxido de carbono produzida durante o ensaio a 500°C. ....	85
Tabela 20 - Concentração de metano produzida durante o ensaio a 500°C.....	85
Tabela 21 – Volumes medidos durante o processo de pirólise, durante o segundo ensaio.....	87
Tabela 22 – Volume total de gás de síntese gerado, durante o segundo ensaio.....	88
Tabela 23 – Registo de perdas de massas no segundo ensaio de pirólise das embalagens. ....	89
Tabela 24 – Análise Elementar do resíduo carbonoso a 650°C.....	90
Tabela 25 - Concentração de monóxido de carbono produzida durante o ensaio a 650°C. ....	91
Tabela 26 - Concentração de hidrogénio produzida durante o ensaio a 650°C. ....	91
Tabela 27 - Concentração de dióxido de carbono produzida durante o ensaio a 650°C. ....	92
Tabela 28 - Concentração de metano produzida durante o ensaio a 650°C.....	92
Tabela 29 – Composição química da fração remanescente de alumínio, separado por pirólise (FRX).....	96
Tabela 30 - Potência dos equipamentos utilizados nos ensaios de separação das frações. ....	104
Tabela 31 – Custos energéticos referente aos ensaios realizados laboratorialmente para cada tipo de envase. ....	104
Tabela 32 – Custos energéticos referentes aos dois processos de pirólise realizadas. ....	105
Tabela 33 – Quantidade de polpa de papel obtido através da reciclagem das diferentes tipologias de embalagens, por via húmida. ....	106
Tabela 34 – Valorização energética da polpa de papel, reciclada por via húmida. ....	106
Tabela 35 - Valorização do alumínio reciclado, por via húmida e pela pirólise.....	107
Tabela 36 – Tarifa do gás Propano praticada pela EDP. ....	108
Tabela 37 – Valorização do gás de síntese gerado nos processos de pirólise. ....	108
Tabela 38 - Valorização do resíduo carbonoso gerado nos processos de pirólise. ....	109

Tabela 39 – Balanço de custos, produtos e proveitos resultantes do processo mecânico por via húmida.....	109
Tabela 40 - Balanço de custos, produtos e proveitos resultantes da valorização energética por pirólise. ....	110
Tabela 41 – Características da Placa de Aquecimento e do Agitador.....	129
Figura 85 – Grelha de 30 mm utilizada para a trituração das embalagens .....	132
Tabela 42 – Reciclagem mecânica por via húmida de embalagens com envase da Compal. ..	135
Tabela 43 – Reciclagem mecânica por via húmida de embalagens com envasamento da Agros. .....	136
Tabela 44 – Reciclagem mecânica por via húmida de embalagens com envasamento da Matinal. .....	137



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção e Capitação diária de RU kg/hab.ano em Portugal Continental (A. P.A.).	23
Gráfico 2 – Destino Final dos Resíduos Urbanos Biodegradáveis, em 2011 (A. P.A.).	23
Gráfico 3 – Produção de Resíduos de Embalagens (t), face às quantidades recicladas e valorizadas (A. P.A.).	24
Gráfico 4 - Taxas de reciclagem e valorização de resíduos de embalagens (A. P.A.).	24
Gráfico 5 – DTA/TGA à temperatura de uma embalagem de Tetra Pak®, em atmosfera de árgon.	74
Gráfico 6 – Primeiro ensaio de Pirólise em embalagens da Tetra Pak®.	79
Gráfico 7 – Segundo ensaio de Pirólise em embalagens da Tetra Pak®.	86





## SIGLAS E ABREVIATURAS

RU	Resíduos Urbanos
RE	Resíduos de Embalagens
ECAL	Embalagens de cartão para Alimentos Líquidos
SPV	Sociedade Ponto Verde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RUB	Resíduos Urbanos Biodegradáveis
PERSU I	Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos aprovado em 1997
SIGRE	Sistema Integrado de Gestão de Resíduos de Embalagem
SGIR	Sistema de Gestão da Informação sobre Resíduos
SMAUT	Sistemas Municipais e/ou suas Empresas Concessionárias
VIC	Valor de Informação Complementar
UE-27	27 Estados-membros da União Europeia
A.P.A	Agência Portuguesa do Ambiente
UCAL	União Cooperativa abastecedora de leite de Lisboa
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
FSC	<i>"Forest Stewardship Council"</i> - Entidade que regula e certifica a gestão responsável das florestas mundiais
CEMPRE	Compromisso empresarial para a Reciclagem
AFCAL	Associação para uma Gestão Florestal Responsável
MOR	Mercado Organizado de Resíduos
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono

H <sub>2</sub>	Hidrogénio
CH <sub>4</sub>	Metano
C	Carbono
N	Azoto

## LISTA DE SIMBOLOS

g	grama
K	Kelvin
min	minuto
l	litro
rpm	rotações por minuto
%	Porcentagem
kg	quilograma
ton	tonelada
hab	habitante
dia	dia
J	Joule
°C	graus Celcius
BTU	“British Thermal Unit” – Unidade Térmica Britânica
mm	milímetros, comprimento.
ppm	Parte por milhão
$\epsilon$	Emissividade dos metais



## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	IV
RESUMO .....	VI
ABSTRACT .....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS .....	XVI
LISTA DE GRÁFICOS .....	XX
SIGLAS E ABREVIATURAS .....	XXII
LISTA DE SIMBOLOS .....	XXIV
ÍNDICE .....	XXVI
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Estado de Arte.....	3
1.1.1. Resíduos.....	4
1.1.2. Tipologia de resíduos .....	4
1.1.3. Resíduos de Embalagens .....	6
1.2. Gestão de Resíduos.....	7
1.2.1. Hierarquia de gestão de resíduos .....	10
1.2.2. Recolha Seletiva e seu Tratamento / Valorização .....	13
1.2.3. Operadores em Portugal.....	16
1.3. Reciclagem de Resíduos de Embalagens .....	18
1.3.1. Reciclagem de Resíduos de Embalagens em Portugal.....	20
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>27</b>
2. EMBALAGEM TETRA PAK®.....	27
2.1. Percurso Histórico.....	29
2.2. Estrutura das Embalagens.....	31

2.3.	Composição das Embalagens .....	32
2.3.1.	Papel .....	33
2.3.2.	Polietileno .....	35
2.3.3.	Alumínio .....	36
2.3.4.	Água e Eletricidade .....	37
2.3.5.	Compósitos.....	37
2.4.	Processo de Fabrico .....	37
2.5.	Potencial de Valorização das Embalagens .....	40
2.6.	Processos de Reciclagem .....	45
2.6.1.	Via Húmida – “Hidrapulper” .....	46
2.6.2.	Tecnologia de Pirólise.....	50
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>.....</b>	<b>53</b>
<i>3.</i>	<i>FASE EXPERIMENTAL.....</i>	<i>53</i>
3.1.	Caracterização e Pré-Tratamento das Embalagens .....	55
3.2.	Método de Separação por Via Húmida – “Hidrapulper” .....	58
3.2.1.	Embalagem da Agros .....	60
3.2.2.	Embalagem da Compal .....	62
3.2.3.	Embalagens da Matinal .....	65
3.2.4.	Papel Reciclado Por Via Húmida.....	68
3.2.5.	Separação do Alumínio Existente nas Embalagens por Via Húmida ....	72
3.3.	Pirólise – Valorização Energética .....	73
3.3.1.	Análise térmica das Embalagens da Tetra Pak® .....	73
3.3.2.	Primeiro Ensaio de Pirólise – 500°C .....	78
3.3.3.	Resultados Do Primeiro Ensaio de Pirólise .....	81
3.3.4.	Caracterização dos Resíduos Gerados Na Pirólise a 500°C.....	83
3.3.5.	Segundo Ensaio de Pirólise – 650°C.....	85

3.3.6. Resultados do Segundo Ensaio de Pirólise .....	88
3.3.7. Caracterização dos resíduos gerados na pirólise a 650°C.....	89
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>97</b>
<i>4. DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA TRATAMENTO POR VIA HÚMIDA DE EMBALAGENS TETRA PAK® .....</i>	<i>97</i>
4.1. Projeto de instalação .....	97
4.2. Vantagens e desvantagens do protótipo proposto .....	102
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>103</b>
<i>5. VIABILIDADE ECONÓMICA DOS PROCESSOS ESTUDADOS.....</i>	<i>103</i>
5.1. Via Húmida – “Hidrapulper” .....	103
5.2. Tecnologia de Pirólise.....	105
5.3. Processo Energético – Valorização dos Produtos.....	105
5.3.1. Valorização do Papel .....	106
5.3.2. Valorização do Alumínio .....	106
5.3.3. Valorização do Gás de Síntese .....	108
5.3.4. Valorização do Resíduo Carbonoso .....	108
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>111</b>
<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>123</b>





# *Capítulo 1*

## **1. INTRODUÇÃO**

A sustentabilidade mundial tem sido alvo de preocupação nos últimos anos face à crescente industrialização e intensa produção de resíduos, alertando socialmente e politicamente para a necessidade de um desenvolvimento equilibrado e saudável do ambiente. Incrementando e promovendo o desenvolvimento tecnológico de novos produtos, com origem na reciclagem e valorização de resíduos colocados em aterro ou sem destino ambientalmente correto.

Efetivamente, os reflexos da evolução social e industrial continuam a ser sentidos ao longo dos séculos, carregando problemas que vão desde a qualidade do ar e da água, até à dificuldade de deposição e identificação de soluções de tratamento corretas e adequadas para resíduos industriais e domésticos.

Em Portugal, os resíduos sólidos eram tradicionalmente colocados diretamente em lixeiras, contudo nas últimas décadas, a política e legislação ambiental assegurou o encerramento das mesmas e o encaminhamento dos resíduos para locais de valorização ou eliminação legislados e autorizados para o efeito. Entre 1995 a 2005 houve um aumento da produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em Portugal Continental, com exceção dos anos 2001 e 2004. Em 2005 a produção de resíduos urbanos em Portugal Continental atingiu as 4.5 milhões de toneladas, ou seja, cerca de 1.24 kg/hab por dia, com base nos dados do Sistema de Gestão da Informação sobre Resíduos (SGIR) (INE , 2010). Verificando-se que em 10 anos a deposição em lixeiras (73% em 1995) foi erradicada, passando a deposição a ser efetuada em aterro controlado (63% em 2005), consequência da implementação do Plano Estratégico dos

Resíduos Urbanos I (PERSU I). Em 2010 foram produzidos cerca de 1.722 mil toneladas de resíduos de embalagens, que comparativamente ao ano 2004 representa um aumento de cerca de 20% na sua produção (INE , 2010). Em Portugal, a quantidade de resíduos urbanos recolhidos seletivamente, em 2011, fixou-se nas 777 mil toneladas, o que representa 15% do total de 5,1 milhões de toneladas de resíduos recolhidos.

Atualmente, segundo dados da Sociedade Ponto Verde, no primeiro semestre de 2013, a reciclagem de resíduos de embalagens domésticas, do pequeno comércio e HORECA (setor industrial da restauração) obteve um crescimento de 3%, sendo encaminhadas para reciclagem 16.313 toneladas de resíduos de embalagens proveniente do fluxo urbano. Porém, os resíduos provenientes do fluxo não urbano (origem industrial ou comercial) também obtiveram um crescimento de 47% comparativamente com o período homólogo, tendo sido encaminhadas para reciclagem 153.570 toneladas de resíduos de embalagens. No total foram encaminhadas para reciclagem, no ano de 2013, 321 mil toneladas de resíduos de embalagens tendo-se obtido um crescimento superior a 20% (Sociedade Ponto Verde), demonstrando que apesar da atual situação socioeconómica de Portugal a reciclagem tem aumentado. Desta forma verifica-se que os resíduos são maioritariamente recolhidos através dos ecopontos e sistemas porta-a-porta (Palma, 2009).

Porém, apesar do panorama ser bastante positivo, ainda estamos longe de obter a máxima percentagem de resíduos reciclados. Em 2011, o total de resíduos exportados atingiu 62,3 mil toneladas de resíduos destinados a operações de valorização (97%) e eliminação (3%) verificando-se um acréscimo de 13% face à quantidade registada no ano anterior (INE, 2011).

Vários são os resíduos depositados em aterros sanitários que apresentam um excelente potencial de valorização, desperdiçando-se assim a oportunidade de extrair materiais ou energia a partir das mesmas. As embalagens Tetra Pak® são triadas e, por forma seletiva, são armazenadas para posteriormente serem submetidas ao processo de reciclagem. No entanto, é patente e relevante o interesse no desenvolvimento de novas tecnologias para valorização desta tipologia de embalagens produzindo soluções mais ecológicas, sustentáveis e economicamente mais atrativas.

A presente tese contribui para esta necessidade de desenvolvimento, contemplando o estudo da valorização/tratamento das embalagens Tetra Pak® a partir de dois processos

distintos, o processo mecânico por via húmida (“Hidrapulper”) e o processo de valorização energética por pirólise.

No processo mecânico por via húmida pretende-se potenciar a separação das distintas frações que compõem a embalagem permitindo que os produtos finais obtidos apresentem um valor acrescido e possam regressar a ciclos produtivos para gerar novos produtos.

No que diz respeito à valorização energética por pirólise, esta promoverá a degradação térmica do material que integra a embalagem, com a produção de produtos como resíduo carbonoso, gás de síntese e alumínio, produtos aos quais está associada um valor económico em função dos destinos que lhes são associados.

Com a análise de ambos processos de valorização, podem-se constituir alternativas à deposição em aterro, seleccionando o processo de separação mais favorável, promovendo a redução dos custos inerentes à sua gestão, com vantagens económicas expectáveis.

O encaminhamento para a reciclagem dos resíduos de embalagens passa primariamente pelo processo de triagem dos resíduos urbanos e não urbanos. Após reciclagem os materiais constituintes das embalagens são futuramente comercializados, conjuntamente com o desenvolvimento tecnológico, devolvendo-os depois à cadeia produtiva gerando novos empregos e criando novos produtos. Além disso, o custo da logística em alguns casos torna-se superior ao valor comercializado, refletido sobre as taxas de reciclagem praticadas. A sua reciclagem move uma cadeia de empresas recicladoras que se interessam pelos produtos/materiais gerados nos diversos processos de reciclagem aglomerando bastantes benefícios para as empresas de papel/cartão.

## **1.1. ESTADO DE ARTE**

Neste subcapítulo será elaborada uma breve descrição sobre a legislação ambiental aplicada aos resíduos, assim como, as formas de caracterização da sua perigosidade e as possíveis operações formas de eliminação e de valorização.

### **1.1.1. RESÍDUOS**

*“ ‘Resíduos’ quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer”*

DECRETO-LEI N.º 73/2011, 17 DE JUNHO.

O resíduo é um objeto sem valor para o seu proprietário. Pode ser de origem doméstica, industrial, agrícola ou hospitalar variando a sua perigosidade e forma de tratamento associada. Um resíduo pode constituir uma fonte de rendimento, seja na sua recolha, armazenamento, tratamento, valorização ou destino final. Hoje em dia, é grande o mercado de resíduos, aliás foi criado pelo Ministério do Ambiente e pela Agência Portuguesa do Ambiente (A.P.A.) um mercado de compra e venda de resíduos recicláveis. O Mercado Organizado de Resíduos (MOR) é uma iniciativa que permite às empresas comprar materiais recicláveis de forma a utilizá-los como matérias-primas noutros processos industriais, minimizando o impacto sobre o ambiente, diminuindo a quantidade de resíduos a encaminhar para aterro sanitário.

### **1.1.2. TIPOLOGIA DE RESÍDUOS**

A tipologia dos resíduos está geralmente relacionada com a sua origem. Assim os resíduos produzidos podem ser hospitalares, urbanos, agrícolas e industriais.

- Os *resíduo hospitalares (RH)* são resultantes de atividades de prestação de cuidados de saúde a seres humanos ou a animais, nas áreas da prevenção, diagnóstico, tratamento, reabilitação ou investigação e ensino, bem como de outras atividades envolvendo procedimentos invasivos, tais como acupunctura, piercings e tatuagens (Decreto-Lei n.º 73/11 de 17 de Junho).
- Nos *resíduos sólidos urbanos (RSU)* é incluído principalmente o resíduo doméstico de coleta pública, mas também resíduos produzidos em instalações públicas e comerciais.

- Os *resíduos agrícolas (RA)* são gerados direta e indiretamente em processos produtivos da atividade agrícola. Estes resíduos na sua generalidade são abandonados, queimados a céu aberto ou misturados com RSU.
- *Resíduos sólidos industriais (RSI)* são todos os resíduos sólidos e semissólidos resultantes de atividades industriais. É da tipologia de resíduos que mais contribui para as agressões ao ambiente, uma vez que neste se incluem produtos químicos, metais e solventes que ameaçam vários fatores do ambiente.

Nas atividades industriais, dependendo da tipologia, são gerados até três espécies de resíduos (Figura 1) sólidos, gasosos e líquidos, podendo estes dois últimos contribuir para a contaminação das frações sólidas. Os resíduos sólidos podem ser considerados como perigosos, não perigosos ou inertes.

- '*Resíduo Perigoso*', sendo este, o resíduo que apresenta uma ou mais das características de perigosidade constantes para a saúde e para o ambiente, referenciados no Anexo III do DL 73/2011 de 17 de Junho;
- '*Resíduos não Perigosos*' são todos aqueles que não se enquadram na definição de resíduos inertes, nem na definição de resíduos perigosos. Este tipo de resíduo pode manifestar características de biodegradabilidade, combustibilidade, solubilidade, mesmo não sendo considerado perigoso este acarreta riscos à saúde pública e ao meio ambiente, decorrentes da sua degradação enquanto resíduo (Resíduos Menos, 2011);
- *Resíduo inerte*: é o resíduo que não sofre transformações físicas, químicas ou biológica importantes e, em consequência, não pode ser solúvel nem inflamável, nem ter qualquer outro tipo de reação física ou química, e não pode ser biodegradável. Nem afetar negativamente outras substâncias com as quais entre em contacto de forma suscetível de aumentar a poluição do ambiente ou prejudicar a saúde humana, e cujos lixiviabilidade total, conteúdo poluente ecotoxicidade do lixiviado são insignificantes e, em especial, não põem em perigo a qualidade da águas superficiais

e/ou subterrâneas; (citado no artigo 3º do Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, republicado pelo Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de Junho).



Figura 1 - Organograma de produção de resíduos no sector industrial (Castro, 2013)

### 1.1.3. RESÍDUOS DE EMBALAGENS

As consequências das elevadas quantidades geradas de resíduos de embalagens são transversais às várias atividades económicas (industriais, comerciais e de serviços). Sendo atualmente considerados um "fluxo específico" de resíduos, com legislação própria que estabelece as responsabilidades e os princípios de gestão associados a este tipo de resíduos (Resíduos Menos, 2011).

*“ ‘Resíduo de embalagem’ é qualquer embalagem ou material de embalagem abrangido pela definição de resíduo adotado na legislação em vigor aplicável nesta matéria, excluindo os de produção”.*

DECRETO-LEI N.º 73/2011, 17 DE JUNHO.

A classificação dos resíduos de embalagens, conforme dados da Lista Europeia de Resíduos publicada na Portaria n.º 209/2004 de 3 de Março pertence ao código 15 01 (A. P.A.), descrito na seguinte Tabela 1.

Tabela 1 – Código LER referente aos resíduos de embalagens.

<b>15</b>	Resíduos de embalagens; absorventes, panos de limpeza, materiais filtrantes e vestuário de proteção não anteriormente especificados.
<b>01</b>	Resíduos da prospeção e exploração de minas e pedreiras, bem como de tratamentos físicos e químicos dos materiais extraídos.

Segundo o Anexo III da Diretiva 91/689/CE os resíduos de embalagens inserem-se na classificação dos resíduos não perigosos apelando para a sua reciclagem e valorização, sem pôr em perigo a saúde humana reduzindo a utilização de processos ou métodos suscetíveis de prejudicar o ambiente (A. P.A.).

## **1.2. GESTÃO DE RESÍDUOS**

As operações de gestão de resíduos devem ser realizadas por entidades devidamente habilitadas para o efeito e em instalações nas quais sejam asseguradas as condições adequadas para a armazenagem ou tratamento dos materiais em questão, dependendo do tipo de resíduos em causa, a natureza das operações e as instalações necessárias.

As operações de gestão de resíduos consistem na recolha, transporte, armazenamento, valorização e eliminação de resíduos.

Os operadores de gestão de resíduos estão agrupados em dois grandes tipos:

- Resíduos Urbanos;
- Resíduos não Urbanos.

De acordo com o tipo de resíduos, a gestão deverá ser realizada pelos sistemas de gestão de RSU ou pelos operadores licenciados para a gestão de resíduos não urbanos. (Pinheiro, et al., 2008).

Em Portugal, assim como outros países, possui um SGRU responsável gestão de resíduos urbanos englobando todos os meios humanos, logísticos, equipamentos e infraestruturas organizado para realizar as operações de reciclagem e posterior valorização de resíduos.

No final dos anos 90, a gestão dos resíduos resumia-se à recolha e deposição em mais de 300 lixeiras existentes no país. Contudo, após aplicação do PERSU, as lixeiras foram encerradas, sendo construídas novas estações de tratamento, valorização e deposição de resíduos completamente controladas, sendo geridas por vários concelhos, contrariamente ao cenário anteriormente existente. Os municípios desta forma auxiliam os sistemas de gestão de resíduos por forma a assegurar o desenvolvimento de soluções para gestão de resíduos que normalmente excediam as capacidades técnico-financeiras de um só município (Palma, 2009).

Contudo, com a atual conjuntura, Portugal passou de 257 entidades gestoras de resíduos para apenas 23 sistemas de gestão de resíduos urbanos, entre eles 12 multimunicipais e 11 intermunicipais (Palma, 2009), referenciados na Tabela 2.

Tabela 2 – Entidades Gestoras de resíduos Urbanos, em Portugal.

<b>MULTIMUNICIPAIS</b>		<b>INTERMUNICIPAIS</b>	
Valorminho	Resiestrela	Lipor	Amde (Gesamb)
Resulima	Valnor	Valsousa	Amagra (Ambilital)
Braval	Valorsul	Resíduos nordeste	Amcal
Resinorte	Amarsul	Ecobeirão	Resialentejo
Suldouro	Algar	Ecolezíria	
Valorlis		Resitejo	
Ersuc		Amtres (Tratolixo)	

Na Figura 2 estão localizados territórios abrangidos por cada sistema de gestão de resíduos urbanos em Portugal.



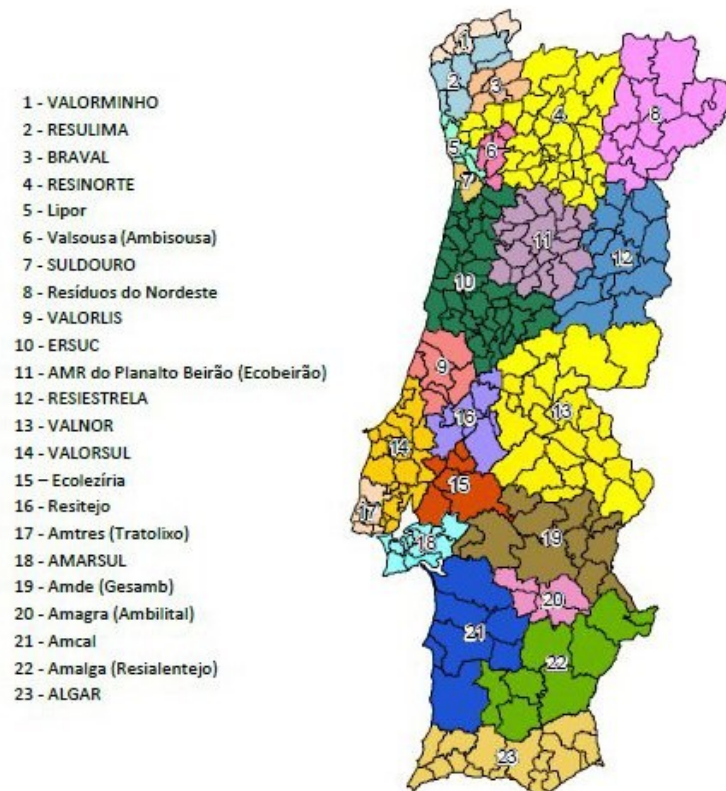


Figura 2 – Sistemas de gestão de resíduos urbanos em Portugal (Palma, 2009).

A política de gestão de resíduos assenta em estratégias que visam garantir a preservação do meio ambiente e a diminuição do consumo de recursos naturais. Para tal, a sensibilização ambiental transmitida à sociedade foca-se na política dos 4R's:

- “Reduzir” - diminuir a quantidade de resíduos, através da redução do consumo de produtos desnecessários;
- “Reutilizar” - reaproveitar os resíduos produzidos, como novos produtos a serem utilizados, sem necessidade de grandes processos de transformação;
- “Reciclar” - recuperação de resíduos através do seu processo de transformação em novos produtos.
- “Recuperar” - aproveitar o potencial energético da matéria em substituição de combustíveis fósseis. Neste processo entram essencialmente os resíduos orgânicos que não são passíveis de serem reciclados, assim como os refugos da triagem e da

compostagem ou os materiais depositados de forma indiferenciada. A recuperação permite ainda reduzir o peso e o volume dos resíduos a enviar para destino final, ou seja, para aterro sanitário e introduzir no setor da construção um material inerte que resulta do processo.

### **1.2.1. HIERARQUIA DE GESTÃO DE RESÍDUOS**

A hierarquia de resíduos visa a estruturação da gestão de resíduos através de diferentes ações, que se podem aplicar no seu tratamento, que se encontram por ordem ascendente de importância. Assim pelo Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, Artigo 7º deve-se proceder ao acondicionamento, recolha, transporte e encaminhamento para destino final ambientalmente mais apropriado, obedecendo ao princípio da hierarquia das operações de gestão de resíduos:

- A gestão de resíduos deve assegurar que à utilização de um bem sucede uma nova utilização ou que, não sendo viável a sua reutilização, se procede à sua reciclagem ou ainda a outras formas de valorização;
- A eliminação definitiva de resíduos, nomeadamente a sua deposição em aterro, constitui a última opção de gestão, justificando-se apenas quando seja técnica ou financeiramente inviável a prevenção, a reutilização, a reciclagem ou outras formas de valorização;
- Os produtores de resíduos devem proceder à separação dos resíduos na origem de forma a promover a sua valorização por fluxos e fileiras;
- Deve ser privilegiado o recurso às melhores tecnologias disponíveis com custos economicamente sustentáveis que permitam o prolongamento do ciclo de vida dos materiais através da sua reutilização, em conformidade com as estratégias complementares adotadas noutros domínios.

A política e a legislação em matéria de resíduos devem respeitar a ordem de prioridades no que se refere às opções de prevenção e gestão de resíduos, referenciadas na pirâmide

hierárquica da Figura 3. As ações de tratamento de resíduos estão organizadas, do topo para o fundo, do recurso mais importante para aquele que deve ser utilizado só em última circunstância.



Figura 3 - Hierarquia das operações de gestão dos resíduos. Adaptação de (Ferrão, et al., 2011).

Segundo a hierarquia de gestão de resíduos, a prevenção e redução são as operações prioritárias segundo a política ambiental em vigor, enquanto a deposição em aterro sanitário aparece como medida a considerar apenas quando as anteriores não são aplicáveis nomeadamente por questões económicas ou técnicas.

### ***Prevenção e Redução***

Nesta categoria, estão abrangidas as medidas capazes de reduzir a produção de resíduos. É a etapa mais importante e mais complexa, encontrando-se no topo da pirâmide, apresentando maior sustentabilidade ambiental. Nesta fase é implementada a prevenção da formação de resíduos, quando tal não for possível recorre-se a medidas preventivas de minimização ou redução. As medidas visam alterações na conceção, transformação e utilização de produtos ou substâncias, com o intuito de reduzir o consumo de matérias-primas e a sua perigosidade.

### ***Reutilização***

A reutilização de resíduo é elaborada para que possam ser utilizados e não desaproveitados, para outros processos menos proveitosos, depois da sua utilização.

### ***Reciclagem***

A reciclagem é um dos setores com mais ênfase na atualidade. Nesta etapa a formação de resíduos não pode ser evitada nem reduzida. Pretende-se o aproveitamento dos materiais reciclados como matéria-prima.

### ***Valorização***

Nesta categoria estão abrangidas todas as tecnologias de valorização energética para o aproveitamento do potencial energético dos resíduos.

### ***Eliminação***

Nesta etapa, está incluída a deposição de resíduos em aterro, assim como as restantes operações de eliminação. Encontra-se no último patamar da hierarquia de resíduos, sendo a última opção a ser considerada quanto ao fim a dar aos resíduos.

Com base na hierarquia de gestão de resíduos, foram fixadas as seguintes metas a alcançar até 2020 (DL n° 73/11):

- Um aumento mínimo global para 50% em peso relativamente à preparação para a reutilização e a reciclagem de resíduos urbanos, incluindo o papel, o cartão, o plástico, o vidro, o metal, a madeira e os resíduos urbanos biodegradáveis;
- Um aumento mínimo para 70% em peso relativamente à preparação para a reutilização, a reciclagem e outras formas de valorização material, incluindo operações de enchimento que utilizem resíduos como substituto de outros materiais, resíduos de construção e demolição não perigosos, com exclusão dos materiais naturais definidos na categoria 17 05 04 da Lista Europeia de Resíduos (LER).

### 1.2.2. **RECOLHA SELETIVA E SEU TRATAMENTO / VALORIZAÇÃO**

*“**Recolha seletiva**’ a recolha efetuada de forma a manter o fluxo de resíduos separados por tipo e natureza com vista a facilitar o tratamento específico”.*

DECRETO-LEI N.º 73/2011, 17 DE JUNHO.

Em Portugal a recolha consiste num sistema de recolha seletiva porta a porta ou por via de ecoponto. Em alguns municípios já se faz a recolha seletiva porta a porta de embalagens, sendo bastante aceite pela população, tratando-se de um sistema de recolha de embalagens plásticas, metálicas e de papel e cartão, em dias pré-definidos, acompanhados por viaturas adequadas e facilmente identificáveis. O modo de deposição dos resíduos varia consoante a tipologia das habitações e/ou zonas alvo, podendo ser por sacos ou cestos coloridos. Deste modo, os ecopontos que existem nas vias públicas destinados à recolha de resíduos de papel/cartão, vidro e embalagens de plástico e metal, para reciclagem, são da responsabilidade destes sistemas de recolha, mas a gestão dos resíduos de embalagens é da responsabilidade da SPV. Para tal, existem ecopontos, com cores diferenciadas, para cada tipo de resíduo, como se pode ver na Figura 4.



Figura 4 – Sistemas de recolha seletiva de resíduos, ecopontos (GEOTA / Sociedade Ponto Verde).

Os projetos de recolha são circunscritos pelos sistemas de gestão de resíduos e municípios que definem e implementam circuitos de recolha de acordo com as especificidades das áreas geográficas onde estão implementados, da população e das necessidades que entretanto vão surgindo, sendo o grande objetivo recolher a maior percentagem de materiais para reciclagem (Sociedade Ponto Verde).

De entre os vários ecopontos existentes podem-se destacar os seguintes:

- Ecoponto Amarelo (Embalão): Embalagens de metal e plástico;
- Ecoponto Azul (Papelão): Cartão e papel;
- Ecoponto Verde (Vidrão): Vidro;
- Ecoponto Vermelho (Pilhão): Pilhas e acumuladores.

Para além da recolha seletiva, tratamento e eliminação dos resíduos indiferenciados os sistemas intermunicipais e multimunicipais são também responsáveis pela recolha de alguns fluxos específicos de resíduos, como embalagens pilhas e baterias portáteis (Palma, 2009).

No caso particular das pilhas, baterias portáteis, eletrodomésticos, lâmpadas, lixo orgânico, entre outros, existe pontualmente a recolha destes resíduos na sua área de recolha, conjugada com o sistema de recolha em ecopontos e com empresas, instituições e grandes superfícies comerciais (Palma, 2009).

Todavia, no caso das embalagens multicamadas, inicialmente existiram algumas divergências quanto ao contentor mais indicado para a deposição de embalagens. Após uma análise da SPV e do Ministério do Ambiente, a deposição das embalagens passou a ser no ecoponto amarelo. Contribuindo para uma correta separação com vista à sua valorização, proporcionando uma maior sustentabilidade ambiental, conservando o ambiente e a natureza (Green Savers, 2012), passando por uma triagem mais elaborada, sendo separadas do plástico e do metal em fardos específicos, posteriormente encaminhados para reciclagem, sendo triadas pelos retomadores acreditados<sup>1</sup> de papel cartão, não sendo valorizados corretamente (Tetra Pak).

Nasce portanto a necessidade de tratamento/valorização dos resíduos. A crescente preocupação com a procura do desenvolvimento sustentável, aliada ao aumento do uso de aparas na produção de embalagens e ao desenvolvimento tecnológico têm impulsionado a investigação de matérias-primas que possam agregar valor aos produtos e ao mesmo tempo atender as exigências ambientais e sociais.

O desperdício desta embalagem, além das implicações ambientais, representa uma enorme perda de valor energético. Sendo esta embalagem constituída por materiais recicláveis

---

<sup>1</sup> Retomadores Acreditados são a entidade responsável pela recolha e processamento dos resíduos de embalagens urbanas de metal recolhidas no âmbito Sistema Ponto Verde (SPVNET).

inseridos no ciclo produtivo, representa menores gastos de matéria-prima, reduzindo a deposição em aterros sanitários e menores gastos energéticos. Sendo importante a realização da análise do ciclo de vida do produto, tanto para a logística quanto para a verificação da viabilidade económica de um processo produtivo (Figura 5).

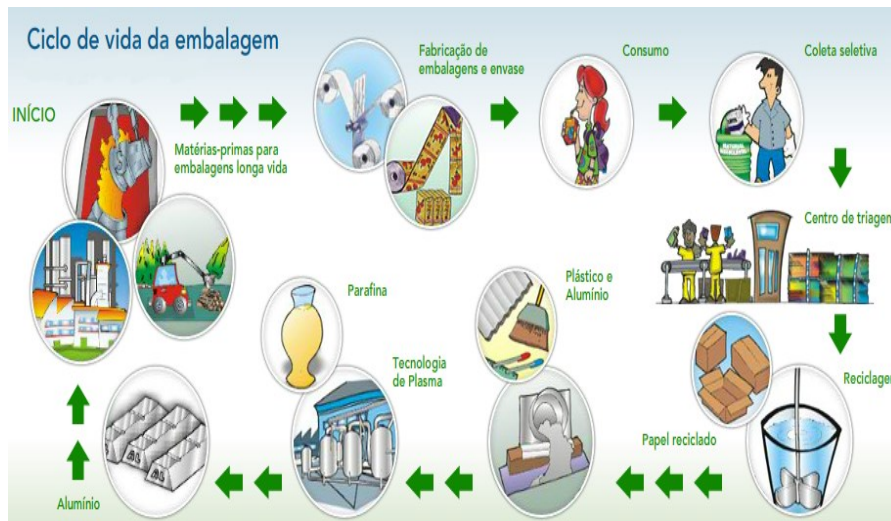


Figura 5 - Ciclo de vida das embalagens longa vida (Green Savers, 2012).

A utilização deste tipo de análise facilita a verificação dos custos existentes em cada produto, ajudando no reconhecimento de gastos com aquisição, operação, manutenção, transporte e deposição final. Por isso, a importância da análise completa do seu ciclo de vida permite verificar todos os processos sofridos pelo produto, desde a sua fabricação até ao seu fim, incluindo o impacto sobre o ambiente e os custos associados ao tratamento para minimização desse impacto (Zortea, 2001).

Sendo uma ferramenta de grande uso tanto na parte logística, como na parte econômica, a análise do ciclo de vida tornou-se um estudo de grande importância na prevenção da poluição. Este tipo de análise facilita a verificação, tanto qualitativa, quanto quantitativa, dos produtos desde a sua origem até o seu descarte, mostrando o caminho e processos sofridos por este produto desde a sua fabricação até o fim de sua vida útil.

Em relação às embalagens Tetra Pak®, as dificuldades verificadas no ciclo de vida minimizando o impacto ambiental, é enorme, tendo em consideração o carácter de compósito laminado de materiais com características físicas e químicas muito distintas. De salientar que a comunidade europeia estabeleceu recentemente que os plásticos e compósitos devem ser

reciclados, não obstante as dificuldades resultantes do fato dos compósitos serem constituídos por dois ou mais materiais diferentes.

Porém, a utilização crescente de materiais compósitos conduz naturalmente ao aumento de componentes que estão fora de serviço, o depósito em aterro, o destino da maioria dos resíduos de materiais compósitos. Todavia, como os plásticos e os compósitos não são biodegradáveis, quando depositados num aterro apresentam vida quase infinita e causam poluição ambiental. De fato, as sobras e as peças degradadas destes materiais não podem continuar a ser enviadas para aterros, devido à falta de espaço para novos aterros, à opinião pública negativa e a legislação cada vez mais restritiva.

### 1.2.3. OPERADORES EM PORTUGAL

A aplicação das medidas e ações preconizadas na legislação portuguesa regula a gestão do fluxo das embalagens e resíduos de embalagens através do licenciamento de entidades gestoras. Os operadores de gestão de embalagens são licenciados com base nas especificações das mesmas.

Neste âmbito, em Portugal existem atualmente três entidades gestoras licenciadas para a gestão de embalagens e resíduos de embalagens não reutilizáveis (Figura 6).



Figura 6 – Entidades gestoras de resíduos de embalagens em Portugal (Resíduos Menos, 2011).

Em qualquer um destes SIGRE, os operadores são responsáveis pela colocação das embalagens no mercado nacional, transferindo a sua responsabilidade na gestão e destino final das embalagens não reutilizáveis para a entidade gestora.





- A Sociedade Ponto Verde é a entidade responsável pelo SIGRE ou sistema Ponto Verde, licenciada gerir e organizar os resíduos de embalagens não reutilizáveis (em nome dos Embaladores/Importadores, fabricantes de embalagens e materiais de embalagem e distribuidores). É garante o correto encaminhamento desses resíduos para a valorização e reciclagem, dando continuidade à sua vida útil. A adesão ao SPV afigura-se uma solução economicamente mais vantajosa do que a criação de um sistema de gestão próprio para as embalagens.



- O Valorfito, designação pelo qual é conhecido o Sistema Integrado de Gestão de Embalagens e Resíduos em Agricultura tem como objetivo a recolha periódica dos resíduos de embalagens primárias de produtos fitofarmacêuticos e sua gestão final, seguindo as exigências do Despacho Conjunto n.º 369/2006, de 2 de Maio, publicado na Série 2 do DR n.º 84.



- Tem por objetivo a harmonização das disposições nacionais respeitantes à gestão de embalagens ou resíduos de embalagens a fim de, por um lado, prevenir e reduzir o seu impacto no ambiente, em todos os estados membros, assim como em países terceiros, assegurando assim um elevado nível de proteção ambiental e, por outro lado, garantir o funcionamento do mercado interno e evitar entraves ao comércio e distorções e restrições da concorrência.

Alguns dos operadores da recolha das embalagens são as empresas produtoras de papel, pois estas possuem 75% de fibra de papel na sua constituição, sendo um ponto importante na reinserção do ciclo produtivo de papel.

Apesar de estarmos consciencializados das vantagens acrescidas sobre a valorização destes resíduos, uma parte considerável destas embalagens continua a ser encaminhada para aterros ou simplesmente ser incinerada. Só as embalagens recicladas, recolhidas em ecopontos, ou atividades de sensibilização, são encaminhadas para países que possuem empresas especializadas na sua degradação/valorização.

Em 2011, as entidades SPV, VALORMED e VALORFITO contribuíram para a valorização de cerca de 1 milhão de toneladas de resíduos de embalagens, registando uma quebra de 4% face às quantidades registadas em 2010 (INE, 2011).

### **1.3. RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE EMBALAGENS**

*“**Reciclagem**’ qualquer operação de valorização, incluindo o reprocessamento de materiais orgânicos, através da qual os materiais constituintes dos resíduos novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins mas que não inclui a valorização energética nem o reprocessamento em materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento”.*

DECRETO-LEI N.º 73/2011, 17 DE JUNHO.

Surgindo a necessidade de reciclar, para a sua implementação é necessário o desenvolvimento de planos de sensibilização ambiental que visem implementar na sociedade a consciencialização da necessidade e importância da reciclagem, pois sem a colaboração da mesma através da separação dos produtos para os locais devidos, reciclar torna-se um objetivo muito difícil. Da sua realização, resulta não só o desvio da quantidade de resíduo encaminhada para aterro, mas igualmente a prevenção do meio ambiente, através da diminuição da poluição do solo, da água e do ar, assim como, na redução do consumo de matérias – primas usadas no fabrico de novos produtos e da extração de recursos naturais.

A reciclagem encontra-se dividida em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária. A reciclagem primária envolve o reprocessamento dos resíduos com o objetivo de obter um produto igual ou similar ao original. Em geral é o que acontece aos componentes fabricados com resinas termoplásticas não reforçadas. Na reciclagem secundária, o produto obtido após reciclagem mecânica não apresenta as mesmas propriedades do material original. Isto acontece porque, durante a vida do produto, algumas das suas propriedades degradam-se e não são recuperáveis. Na reciclagem terciária, os polímeros usados nos compósitos são separados nos seus componentes químicos a partir da reciclagem química. Os hidrocarbonetos obtidos podem ser usados como monómeros, polímeros, *fuel* e outros produtos químicos, contribuindo para a conservação dos recursos petrolíferos. As fibras e cargas obtidas por este processo podem ser usadas para compostos de moldação. Finalmente, na reciclagem quaternária (reciclagem energética), os resíduos são queimados e a energia a partir do gás ou *fuel* produzido pelo processo é usada para outras aplicações.

O tratamento/valorização das embalagens de Tetra Pak® industrialmente é realizado através da reciclagem secundária (processo mecânico por via húmida) e terciária (tecnologia de pirólise).

### **Processo mecânico por via húmida**

No processo de reciclagem secundária de embalagens é utilizando um “Hidrapulper”, semelhante a um liquidificador gigante, estando englobado nos processos de reciclagem secundário. Durante a agitação do material com água e sem produtos químicos, as fibras são hidratadas, separando-se das frações remanescente (plástico + alumínio). Em seguida, essas fibras são purificadas e podem ser utilizadas no ciclo de produção de papel.

A polpa celulósica proveniente da pasta de papel contém fibras que estão no primeiro ciclo de reciclagem e portanto, seu uso incrementa as propriedades mecânicas do papel. Alguns autores Meredino e Neves (Neves) compararam as propriedades mecânicas do papel obtidas da mistura em diversas proporções de papel cartão com polpas obtidas da reciclagem destas embalagens. Estes estudos demonstraram que há um ganho expressivo na resistência do papel à medida que se aumenta a concentração de fibras de embalagens. Outro ponto importante a se considerar é a fração remanescente do processo (polietileno e alumínio), que ao contrário da

matéria-prima convencional (papel), pode ser reciclado gerando uma mais-valia ao sistema de reciclagem.

Aquando da remoção da polpa de papel da fração remanescente de alumínio e polietileno, no ciclo de reciclagem das embalagens de Tetra Pak®, esta é posteriormente prensada e seca ao ar, enquanto, o alumínio e o polietileno são introduzidos em novos processos de fabrico de novos produtos (vassouras, telhas placas, etc) (Cerqueira, 2003).

### **Tecnologia de pirolise**

A pirolise é um processo térmico que visa na ausência de oxigénio, obter distintas frações de produtos combustíveis líquidos, sólidos e gasosos, com distintas aplicações.

Ao aplicar esta técnica aos resíduos de embalagens, pretende-se promover produtos combustíveis sólidos (carvão), um gás de síntese com poder calorífico e o alumínio separado das frações.

Efetivamente a tecnologia de pirolise pode ser utilizada na valorização/tratamento de resíduos de embalagens, decompondo os diversos materiais termicamente sob temperaturas elevadas e na ausência de oxigénio. Como as temperaturas atingidas são bastante inferiores a temperatura de queima, as fibras retêm a sua resistência inicial e não se tornam frágeis. Assim, as fibras são separadas e reutilizadas como reforços ou cargas, nomeadamente nos compostos de moldação (Moura, et al., 2005).

Este processo produz hidrocarbonetos reutilizáveis, tais como monómeros, *fuel* e produtos químicos, o que contribui para a conservação dos recursos petrolíferos (Moura, et al., 2005). Com a utilização desta tecnologia, são obtidos produtos com boas características para serem valorizados energeticamente, tal como os gases de síntese, o resíduo carbonoso e o alumínio.

#### **1.3.1. RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE EMBALAGENS EM PORTUGAL**

Em Portugal, a reciclagem de resíduos de Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos (ECAL) é regida pela Diretiva n.º 94/62/CE, de 20 de Dezembro sendo posteriormente alterada pela Diretiva 2004/12/CE, de 11 de Fevereiro (A. P.A.). A diretiva abrange todas as embalagens colocadas no mercado da comunidade e todos os resíduos de embalagens. Sejam utilizadas ou produzidas a nível da indústria, do comércio, de escritórios, lojas ou serviços, a nível doméstico

ou a qualquer outro nível independentemente do material utilizado. Por forma a dar cumprimento ao previsto na decisão da comissão n.º 97/138 de 3 de Fevereiro, posteriormente alterada pela decisão 2005/270/CE, de 22 de Março, Portugal remete anualmente à comissão europeia os quantitativos nacionais de embalagens e RE (A. P.A.)

Estando a Europa cada vez mais restrita aos efeitos colaterais da reciclagem e apesar do período difícil que a Europa atravessa, cada vez mais pessoas continuarão a separar os seus resíduos aproximando os valores obtidos das metas estabelecida pela legislação, dando continuidade a um caminho de sucesso cívico, com o empenho de todos os parceiros do SIGRE. Reciclar atualmente é um fator importante na sociedade, gerando aproximadamente 2300 postos de trabalho, devolvendo 70 milhões de euros por ano a economia do país (SPVNET).

No caso dos resíduos urbanos de embalagens, a SPV estabelece parcerias com os Sistemas Municipais e/ou suas Empresas Concessionárias que efetuam a recolha seletiva e triagem dos resíduos de embalagens separados pelo cidadão/consumidor na sua área de intervenção.

A reciclagem de RU de embalagens em Portugal pode ter quatro origens distintas: a recolha seletiva, o pré-tratamento de instalações de tratamento mecânico (mecânico e biológico de resíduos urbanos), a incineração e o fluxo de resíduos indiferenciados (reciclagem orgânica de resíduos de embalagens), referenciadas na Figura 7.

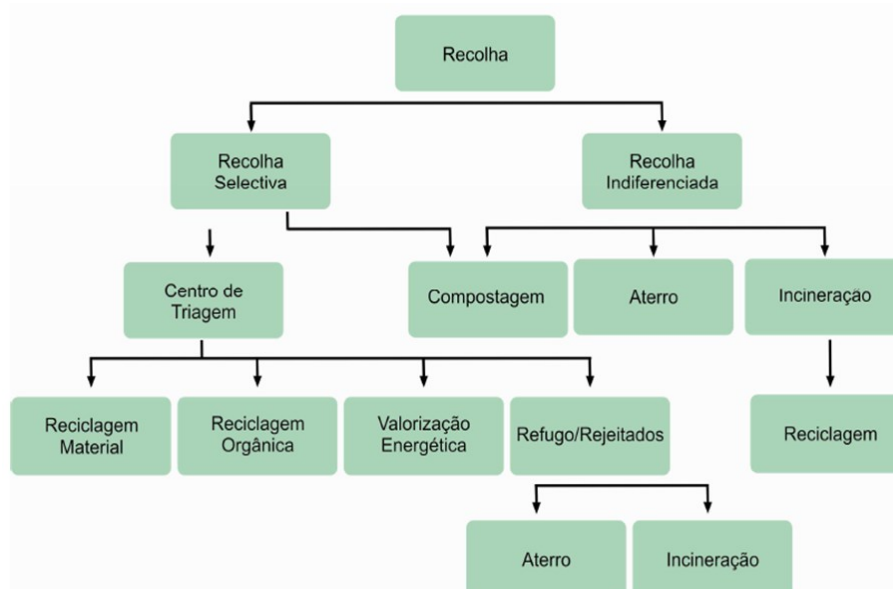


Figura 7 – Fluxograma da Recolha de Resíduos (INE , 2010).

Os resíduos de embalagens provenientes da recolha seletiva são obtidos através da recolha por ecopontos, porta-a-porta e/ou ecocentros sofrendo a intervenção direta da SPV no mercado (INE , 2010).

Os RE são provenientes da recolha indiferenciada, designando-se por isso como fluxos complementares à recolha seletiva. Para os resíduos provenientes do fluxo complementar, o Sistema Multimunicipal, Intermunicipal e Autarquia (SMAUT) recebe o valor de informação complementar por cada tonelada encaminhada para reciclagem. Os operadores de recolha, autarquias e sistemas multimunicipais ao aderirem ao SPV, beneficiam de um valor de contrapartida, pago pela SPV, em função das quantidades de resíduos de embalagens recolhidos seletivamente, triados e efetivamente entregues a SPV para retoma (Sociedade Ponto Verde).

Todavia, na gestão destes resíduos, não há intervenção direta da SPV para o encaminhamento dos mesmos, sendo este operacionalizado pelo SMAUT, ou seja, vende diretamente estes resíduos a entidades devidamente licenciadas para o tratamento e reciclagem dos mesmos, reportando essa informação à SPV.

A produção total de resíduos urbanos em Portugal continental, no ano de 2011, foi de aproximadamente 4.894 milhões de toneladas, tendo-se verificado uma diminuição de cerca de 6% em relação ao ano anterior. O valor registado em 2011 (4.768 milhões de toneladas) encontra-se acima da meta prevista no plano estratégico para os resíduos sólidos urbanos de 2007-2016 (Vilão, et al., 2012).

Segundo dados referenciados pela Agência Portuguesa do Ambiente em 2012, a produção de RU por habitante verifica-se que a capitação anual em 2011 foi de 487 kg/hab.ano correspondendo a uma produção diária de 1.33 kg/hab.dia (Gráfico 1). Os últimos valores disponíveis para a UE - 27 indicam que a capitação média europeia em 2010 foi de 502 kg/hab.ano. (A. P.A.).

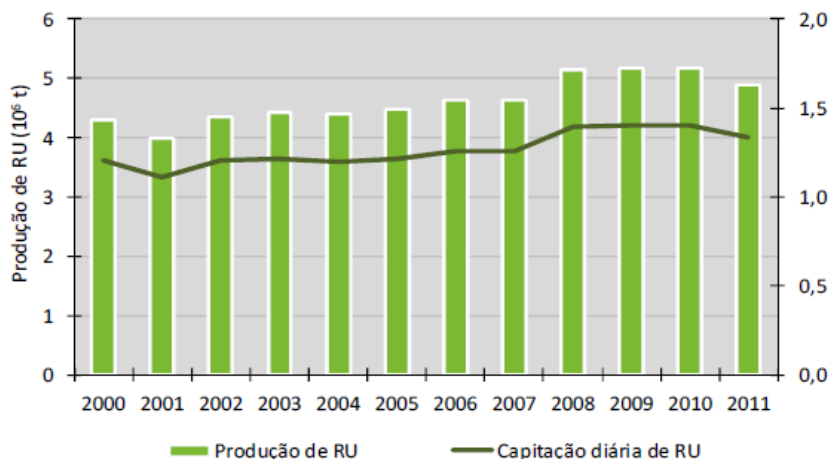


Gráfico 1 – Produção e Capitação diária de RU kg/hab.ano em Portugal Continental (A. P.A.).

Do total produzido em Portugal em 2011, 84.4% corresponde a recolha indiferenciada e 15.6% a recolha seletiva. Em termos regionais constata-se que a região de Lisboa e Vale do Tejo apresenta a maior produção de RU (Gráfico 2) seguindo-se a região Norte, com 39% e 31%, respetivamente, em 2011 (A. P.A.).

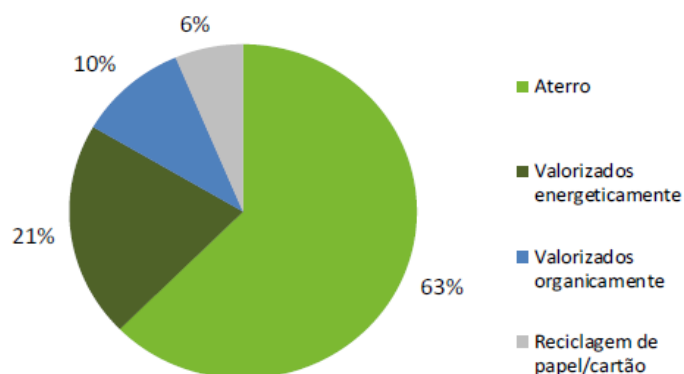


Gráfico 2 – Destino Final dos Resíduos Urbanos Biodegradáveis, em 2011 (A. P.A.).

No período analisado no Gráfico 3, entre 2004 e 2011, assistiu-se a um aumento da quantidade de resíduos de embalagens produzidas entre 2004 e 2006, seguido de uma estabilização entre 2006 e 2008, sendo que nos últimos três anos se registou um ligeiro decréscimo nas quantidades produzidas. Em 2011, registava uma produção de cerca de 1.584 mil toneladas de RE (Gráfico 3), dados provisórios (A. P.A.), a que corresponde uma taxa de

reciclagem de 57% valor ligeiramente superior ao verificado no ano de 2010 (56%), tendo cumprido e ultrapassado a meta prevista para 2011 (55%) (A. P.A.).

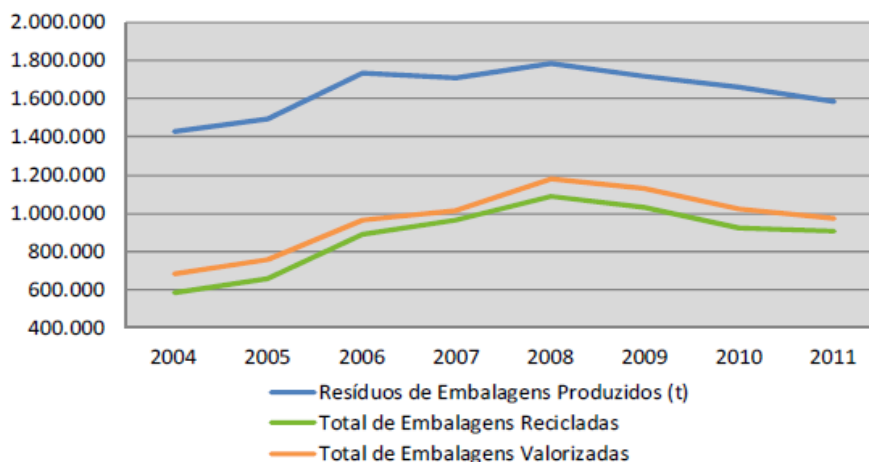


Gráfico 3 – Produção de Resíduos de Embalagens (t), face às quantidades recicladas e valorizadas (A. P.A.).

Em termos de valorização global a meta definida foi também atingida, verificando-se uma valorização de 62%, sendo que a meta imposta era de 60%, conforme se verifica no Gráfico 3.

Numa análise por fileiras (Gráfico 4) verifica-se que todos os materiais apresentam uma taxa de reciclagem superior à meta imposta para 2011 (A. P.A.).

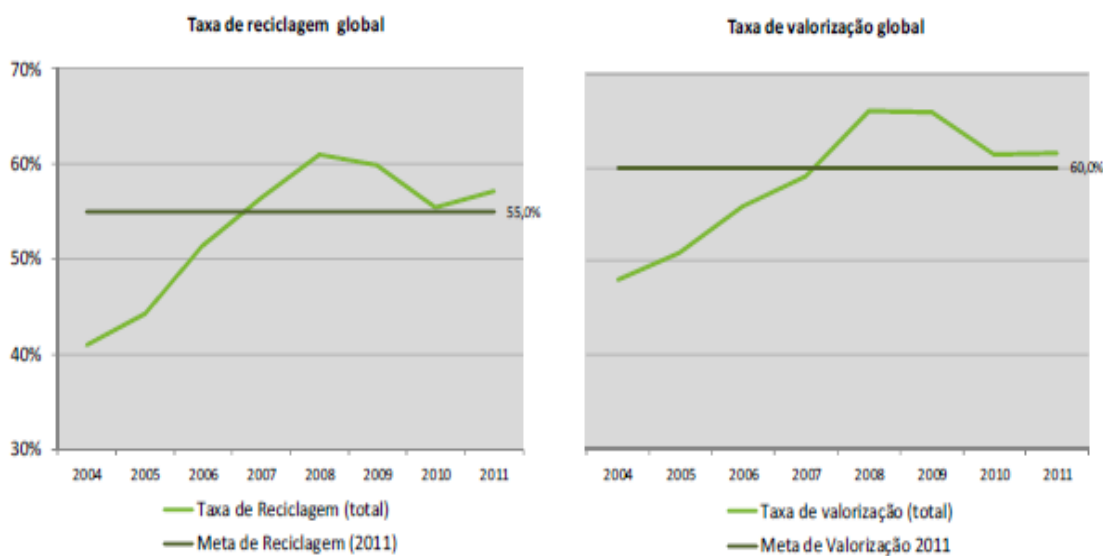


Gráfico 4 - Taxas de reciclagem e valorização de resíduos de embalagens (A. P.A.).



A Sociedade Ponto Verde foi responsável pela reciclagem de 710 986 toneladas de RE, sendo 392 705 toneladas de RE provenientes do fluxo urbano e 318 281 toneladas provenientes do fluxo não urbano. A quantidade de RE declaradas à SPV representa 78% do total de RE produzidos (Vilão, et al., 2012).

Dados referenciados na SPV indicam o balanço de quantidades de resíduos de embalagem de origem urbana encaminhados para reciclagem, visualizados na

Tabela 3 (A. P.A.).

Tabela 3 – Balanço da quantidade de resíduos enviados para reciclagem nos primeiros trimestres (A. P.A.).

<b>Balanço (Janeiro – Junho)</b>	<b>2013</b>	<b>2012</b>
Papel/Cartão	46.481	44.676
Vidro	78.857	81.745
Plástico	30.993	25.453
Metal	10.740	8.897
Madeira	1.246	2.058
Total	168.313	162.830

Conforme se verifica na tabela, assim como nos gráficos anteriormente ilustrados, a reciclagem tem vindo a aumentar de ano para ano, elevando os patamares de reciclagem, permitindo que novas tecnologias sejam desenvolvidas para melhor eficácia de todos os processos envolvidos, segundo dados referenciados pela SPV (A. P.A.).



## Capítulo 2

### 2. EMBALAGEM TETRA PAK®

A necessidade de sobrevivência do homem primitivo obrigou-o a criar as primeiras embalagens da humanidade. Conchas marinhas, cascas de castanhas ou de coco constituíram as primeiras embalagens utilizadas para beber e armazenar alimentos. Usados em estado natural, sem qualquer beneficiamento, os primeiros recipientes passaram, com o tempo, a ser fabricados com a sustentação manual do homem, surgindo as tigelas de madeira, bolsas de pele, os potes de barro e as cestas de fibras naturais, permitindo ultrapassar a preocupação em conservar alimentos em quantidades mais significativa, para os períodos de forte escassez

*“ ‘Embalagem’ são todos e quaisquer produtos feitos de materiais de qualquer natureza utilizados para conter, proteger, movimentar, manusear, entregar e apresentar mercadorias, tanto matérias-primas como produtos transformados, desde o produtor ao utilizador ou consumidor, incluindo todos os artigos «descartáveis» utilizados para os mesmos fins, sem prejuízo do disposto no número seguinte”.*

DECRETO-LEI Nº 366-A/97 DE 20 DE DEZEMBRO

Na sua definição mais simplista, as embalagens são todas e quaisquer produtos feitos de materiais de distinta natureza utilizados para conter, proteger, movimentar, manusear, entregar e apresentar mercadorias, tanto matérias-primas como produtos transformados, desde o

produtor ao utilizador ou consumidor, incluindo todos os amigos "descartáveis" utilizados para os mesmos fins.

As embalagens têm como objetivo as seguintes funções:

- Conservação de alimentos por períodos prolongados;
- Volume ocupado é minorado;
- Economia de energia elétrica (não necessita de refrigeração enquanto fechados, seja no transporte ou no armazenamento);
- Identificar o fabricante e o padrão de qualidade;
- Atrair a atenção do consumidor;
- Instituir o consumidor no uso do produto.

No entanto, estas também necessitam de usufruir de alguns requisitos essenciais para manter as propriedades dos alimentos nos modos desejados:

- Não ser tóxica e ser compatível com o alimento;
- Assegurar a proteção sanitária;
- Fornecer a proteção contra a passagem de humidade, ar e luz;
- Apresentar resistência ao impacto;
- Possuir boa aparência e causar boa impressão;
- Facilidade de forma, peso e tamanho;
- Apresentar transparência quando necessário;
- Ser de fácil eliminação;
- Estar associado a um baixo custo.

As embalagens, em estudo, são comercialmente conhecidas como Tetra Pak® e correspondem a um tipo particular de embalagens designadas ECAL. A sua utilização tem aumentado no decorrer dos anos tanto em quantidade quanto em diversidade de produtos envasados. Esta tipologia de embalagens pode ser classificada em dois modelos distintos: assépticas ou não-assépticas, se forem produzidas com ou sem alumínio, respetivamente. De forma geral, as embalagens que possuem a barreira de alumínio permitem que o alimento nelas embalado seja armazenado sem necessidade de refrigeração, o que não acontece com as

embalagens sem alumínio, necessitando de refrigeração por forma a manter as características dos alimentos.

## 2.1. PERCURSO HISTÓRICO

O maior feito para a indústria de embalagens começou em 1930, quando o alemão *Ferdinand Jagenberg*, fundador da *Combibloc*, inventou a primeira embalagem de papel impermeável para acondicionar alimentos. *Ferdinand Jagenberg* resolveu vender a patente do produto para a família *Rausing*, fundadores de *Tetra Pak®* (Damas, 2008).

Em 1951, *Dr. Ruben Rausing* idealizou a embalagem chamada de *Tetra Classic*, em formato tetraedro (quatro faces), de forma triangular e com base horizontal de acordo com a Figura 8. O primeiro produto inovador da empresa Tetra Pak®, em cartão de papel, usado para guardar e transportar leite (Tetra Pak international S.A.).



Figura 8 - Primeira embalagem multicamada lançada em *Lund*, Suécia, em Novembro de 1952 (Tetra Pak international S.A.).

Em 1950, o *Dr. Ruben Rausing* já tinha criado técnicas para produção de cartões herméticos, utilizando um sistema de cartolinas forradas a plástico (Figura 9). Um ano após este lançamento, a empresa, já havia idealizado o conceito, com a comercialização da primeira máquina de embalagens multicamadas (Figura 10), sendo o creme de leite o primeiro produto a ser comercializado neste tipo de embalagens (Tetra Pak international S.A.).

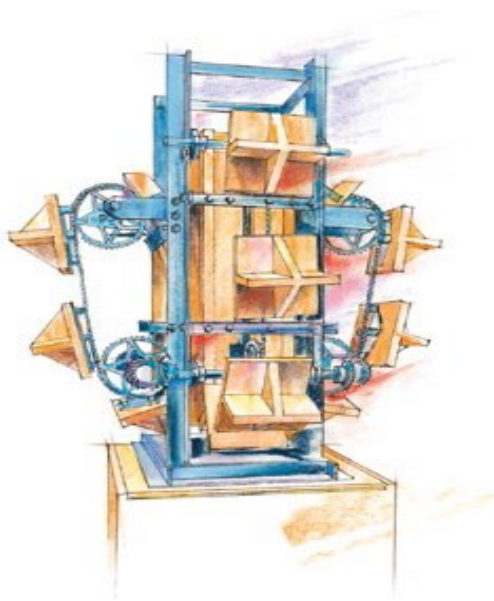


Figura 9 - O primeiro modelo da Tetra Pak para demonstrar a ideia do Dr. Ruben Rausing, construído em 1946 (Tetra Pak international S.A.).

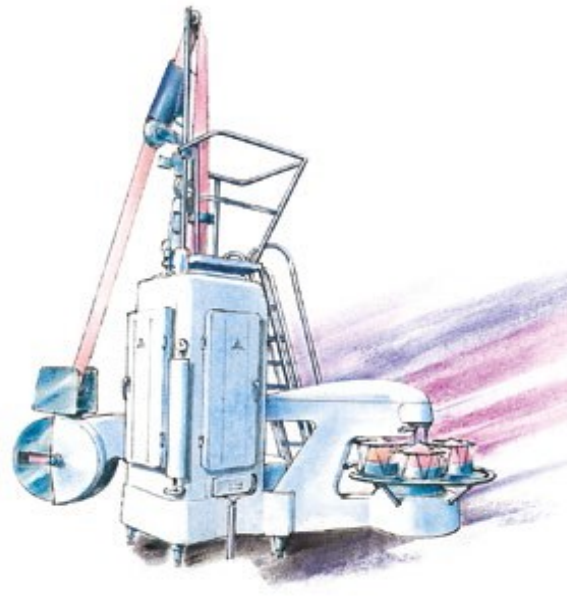


Figura 10 - Uma das primeiras máquinas para embalagem de caixas em forma de tetraedro, em 1952 (Tetra Pak international S.A.).

Posteriormente o leite pasteurizado foi sendo inserido no mercado, minimizando o problema de abastecimento de leite na segunda Guerra Mundial, utilizando a primeira embalagem tetraédrica (Tetra Pak international S.A.). Era o começo da embalagem multicamada. Durante os anos cinquenta com o aperfeiçoamento do recipiente asséptico foram-se resolvendo igualmente os problemas de armazenamento, tendo ganho o formato de um paralelepípedo. Em 1961, já estava implementado o uso comercial das embalagens multicamadas (Tetra Pak international S.A.).

As embalagens de cartão da Tetra Pak® chegam a Portugal três anos após serem apresentadas à imprensa pelo seu fundador, *Ruben Rausing*. Este defendia que uma embalagem deve economizar mais do que o seu custo, princípio de todos os sistemas de embalagens da Tetra Pak® (Protege o que é Bom).

Em Portugal, a primeira máquina para enchimento de leite em embalagens de cartão no formato tetraédrico foi instalada na União das Cooperativas Abastecedoras de Leite (UCAL) em 1964. Utilizada no armazenamento de leite pasteurizado utilizando as inovadoras embalagens *Tetra Classic* de 300 ml (Figura 11) (Tetra Pak international S.A.).

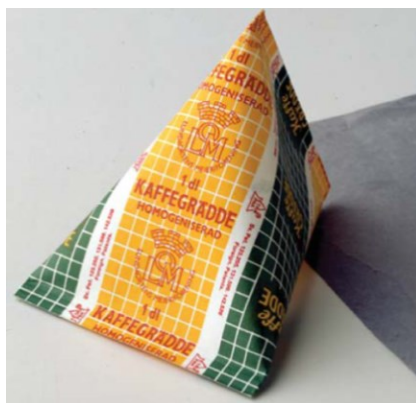


Figura 11 - Primeira embalagem Tetra Pak® Classic (Sim é no amarelo).

## 2.2. ESTRUTURA DAS EMBALAGENS

As embalagens asséticas possuem uma estrutura multicamada que fornece a proteção ideal aos alimentos neles armazenados. Sendo constituídas por três materiais distintos: o papel, o plástico (polietileno) e o alumínio, distribuídos em seis camadas, estruturadas por multicamadas de papel, plástico e alumínio (Figura 12).

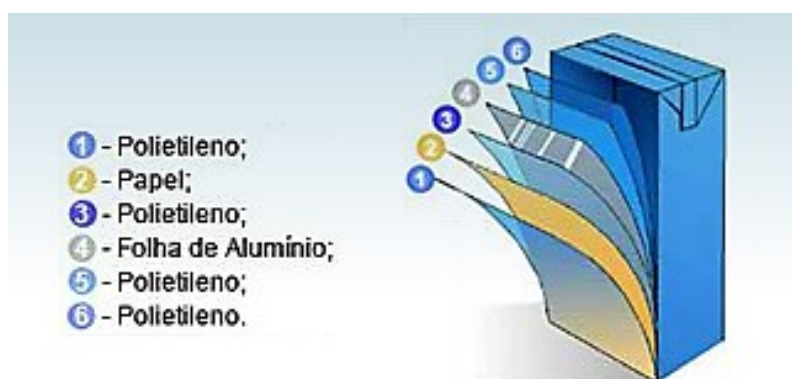


Figura 12 - Composição das embalagens multicamadas Tetra Pak® (Protege o que é Bom).

A diversidade de formas e tamanhos de embalagens da Tetra Pak® é significativa, possuindo um vasto mercado de ofertas. Estas embalagens pesam em média 27g (Figura 13), contudo a quantidade de materiais separados é semelhante, independentemente do tipo de envase das quais 20g são parte integrante do papel, 5.7g de plástico e 1.3g de alumínio (Tetra Pak international S.A.).



Figura 13 - Diferentes formas e formatos das embalagens de Tetra Pak® (Protege o que é Bom).

Estas embalagens utilizam um mínimo de matérias-primas, uma embalagem de 1 litro pesa em média 27 gramas, sendo que 97% desse peso refere-se ao produto de envase e apenas 3% ao material de embalagem. Desta forma é economizada energia e combustível durante as fases de enchimento, transporte e armazenagem (Tetra Pak international S.A.).

Pelos fatores de inovação introduzidos, as embalagens contribuíram para a ampliação do conceito de proteção associado hoje em dia às embalagens alimentares, não somente nos aspetos de extensão do processo de tratamento dos produtos e de proteção/informação do consumidor, como também no plano ambiental. Atualmente, muitos alimentos são envasados, tais como leite, leite condensado, natas, sumos e refrigerantes, extrato de alimentos frescos, entre outros (AFCAL; Tetra Pak international S.A.).

Estas embalagens são 100% recicláveis e na sua constituição são utilizadas fibras de papel extraídas de florestas geridas de modo sustentável (AFCAL).

### **2.3. COMPOSIÇÃO DAS EMBALAGENS**

Neste capítulo serão abordados os materiais que constituem as embalagens da Tetra Pak®. Estas embalagens multicamadas, assim como a maioria das ECAL, salvo algumas exceções, são constituídas por papel, alumínio e plástico (polietileno).



### 2.3.1. PAPEL

As embalagens Tetra Pak® são constituídas por 75% de papel. O papel utilizado nas embalagens designado de papel *duplex* oferece suporte mecânico e resistência à embalagem, possibilitando o seu transporte e empilhamento, protegendo-a de eventuais quedas e permitindo receber a impressão dos rótulos.

A celulose<sup>3</sup> usada na fabricação de papel é obtida de florestas replantadas e certificadas, através um processo produtivo que não utiliza cloro (Tetra Pak international S.A.). Sendo este um recurso natural renovável é necessário assegurar a sua preservação, procurando o uso de matérias-primas renováveis, e processos sustentáveis, na fabricação do papel.

Contudo, na produção e ou reutilização de papel (reciclados ou não reciclados), as características mais relevantes são as propriedades óticas (brilho e alvura), resistência à tração, mecânicas (dobras e laminação), ao arrebentamento (índice de arrebentamento), de desempenho gráfico (capacidade de impressão e resistência ao arrancamento superficial da fibra), absorção de água e rugosidade (Neves, et al., 2001). As propriedades óticas do papel são extremamente importante no aspeto visual do tipo de papel utilizado. No entanto para o tipo de papéis branqueados a alvura<sup>4</sup> e a brancura são fatores muito importantes e estão relacionados com a capacidade do papel em absorver e refletir a luz e estão interligados com a quantidade de lenhina<sup>5</sup> residual na polpa celulósica e aos processos de branqueamento aplicados na celulose. A rugosidade<sup>6</sup> é outro dos fatores que determinam a qualidade ótica do papel, no entanto, todos os fatores anteriormente descritos são condicionados em função do destino final do papel.

Além disso, o processo de fabrico do papel, devido ao aumento do mercado papelero, assim como, o aumento das exigências sobre a qualidade do produto, tem originado um impacto extremamente negativo no ambiente. Contudo, a reciclagem de embalagens multicamadas

---

2 Papel duplex é formado por uma camada branqueada e celulose não branqueada sendo as diferentes camadas unidas ainda na seção de formação do papel (Neves, 2009).

3 Celulose é o grupo químico de substâncias da parede celular que pode ser isolado por processos químicos extrativos que renovam os outros constituintes do lenho (Lima, et al., 1988).

4 Alvura é a medida por incidir luz sobre uma folha e medir quanto dessa luz incidente é refletida (unidade %) (Neves, 2009).

5 Lenhina ou lignina é a fração, não polissacarídea da parede celular que pode ser isolada da madeira por diferentes processos de extração uns que solubilizam a lenhina e outros que, solubilizando a fração polissacarídea (Lima, et al., 1988).

6 Rugosidade é o grau de irregularidade da superfície do papel ou cartão, em relação a outra idealmente lisa e plana (NBR 5342:1993) (Neves, 2009).

tornou-se bastante atraente, quer do ponto de vista de gestão de recursos, quer do ponto de vista económico, devido à obtenção de fibras secundárias a partir da aquisição de celulose, abrindo espaço para o mercado de papel mais barato, reduzindo a elevada quantidade de papel nos aterros sanitários, assim como, possibilitar uma maior eficiência das áreas florestadas para a obtenção de celulose.

Em Portugal, o papel utilizado nas ECAL é proveniente da celulose do caule de árvores de *Pinus pinaster*<sup>7</sup> e *Eucalyptus globulus*<sup>8</sup>, parte representativa de espécimes na biodiversidade da floresta portuguesa (Carvalho, 2013).

### Selo FSC®

As embalagens multicamadas são maioritariamente compostas por cartão proveniente de florestas geridas de forma responsável e certificadas segundo os mais elevados padrões estabelecidos pelo FSC (Figura 14). Promovendo uma gestão florestal ambientalmente apropriada garantindo que a exploração florestal de madeira e de produtos não-lenhosos é feita corretamente, mantendo a biodiversidade da floresta, a produtividade e os processos ecológicos. Desta forma são colocados no mercado embalagens totalmente sustentáveis que utilizam apenas matérias-primas renováveis, com uma pegada ambiental mínima e sem desperdícios (FSC Forest Stewardship Council, A.C).



Figura 14 – As embalagens da Tetra Pak® e o ambiente – Selo FSC.

---

<sup>7</sup> *Pinus pinaster* é designado como pinheiro-bravo, originária da região da Europa e Mediterrâneo (Carvalho, 2013).

<sup>8</sup> *Eucalyptus globulus* é designado por eucalipto-comum ou eucalipto-da-Tasmânia sendo originária da Austrália (Carvalho, 2013).

O FSC colabora de forma ativa com os fornecedores, organizações (Associação para uma Gestão Florestal Responsável (AGFR)) e outras partes interessadas a nível global, cooperando com as populações locais e com a sociedade em geral. Integrando um forte incentivo na população local, por forma a manter os recursos florestais aderindo aos planos de gestão de longo prazo (Green Savers, 2012).

O primeiro produto de embalagens em cartão a ostentar o selo do FSC foi lançado pela britânica *Sainsbury*, em 2007. Nesse ano foram produzidas dois mil milhões de embalagens da Tetra Pak® com o símbolo FSC. Em 2011, a Tetra Pak® distribuiu mais de 18.4 mil milhões de embalagens certificadas pelo FSC a nível mundial (Tetra Pak international S.A.).

Em Portugal, a primeira ECAL lançada pela Tetra Pak com certificação FSC®, foi a *Tetra Evero Aseptic* com a marca Matinal. As primeiras marcas portuguesas a colocar o símbolo do FSC nas suas embalagens de cartão foram a Sumol + Compal e Agros (Protege o que é Bom) (Tetra Pak international S.A.).

Estima-se que em 2010, em Portugal, foram distribuídas mais de 270 milhões de embalagens com a certificação FSC, quantidade que se estima que duplique em 2013, ultrapassando os 572 milhões de embalagens (Green Savers, 2012).

### **2.3.2. POLIETILENO**

As embalagens de tetra Pak® são constituídas por 20% de polietileno ( $(CH_2 - CH_2)_n$ ) de baixa densidade (PEBD) extraído do petróleo, pertencente à classe dos materiais poliméricos termoplásticos. Este polímero tem como objetivo isolar o papel da humidade (camada externa), impedir o contato direto do alumínio com os alimentos (camada interna) e promover a adesão entre os outros materiais (camada intermédia) (Neves, 1999). O polímero utilizado nas camadas de aderência, é um copolímero de poli (etileno-co-ácido metacrílico) responsável pela adesão da camada de PEBD à folha de alumínio. O PEBD apresenta uma estrutura macromolecular menos cristalino e menos densa que o PEAD, tornando-o razoavelmente flexível, permite que seja usado na produção de filmes de pequena espessura. Esse facto está aliado ao custo reduzido e ao fácil processamento (Pousada, et al., 1983). Outra propriedade importante do polietileno é o fator de ser apolar e assim não ter afinidade por água, o que é essencial para o uso nas ECAL.

Segundo o relatório Sócio - Ambiental da Tetra Pak®, o processo de fabricação das embalagens gera cerca de 190 kg de resíduos por milhão de embalagens produzidas (Tetra Pak

international S.A.). E sendo o polietileno um material termoplástico podem ser reaquescidos e moldados repetidas vezes em novas formas sem alteração significativa das suas propriedades mecânicas (Smith, et al., 2012).

### 2.3.3. ALUMÍNIO

O alumínio constitui 5% das embalagens de Tetra Pak®. Este é extraído da bauxite em refinarias, estando presente nas ECAL apenas uma camada fina de alumínio que se encontra entre as camadas de polietileno. O alumínio tem como objetivo gerar uma barreira física na entrada de agentes externos como por exemplo, a entrada de ar e luz, evitando a oxidação e fotoxidação, assim como troca de odores e aromas entre o alimento e o meio envolvente, como se pode visualizar na Figura 15.



Figura 15 – Barreira física, função do alumínio, essencial para as ECAL.

Sendo o alumínio um dos materiais mais abundantes na superfície terrestre é extraído da mineração de jazidas. O processo de extração consiste na purificação da bauxite por reações alcalinas para produção da alumina (ou óxido de alumínio), através de eletrólise fazendo a redução do metal oxidado na forma metálica. O resultado desse processo é a produção de alumínio puro, matéria-prima para a indústria da fundição e produção das ligas com características específicas para os diversos setores industriais (Neves, 2009).

Em função da sua espessura, os laminados de alumínio classificam-se em chapas e folhas. As chapas apresentam espessura superior a 0.15mm, disponíveis nas formas planas, bobinas ou discos. As folhas utilizadas no segmento de embalagens flexíveis apresentam espessura variável dependente do tipo de aplicação, geralmente acima de 0.005mm, pois

quanto menor a espessura maior é a possibilidade de formação de microfuros. Contudo, acima de 0.025mm a quantidade de microfuros fica reduzida, tornando as folhas de alumínio num material impermeável ou de máxima barreira aos gases e vapor de água (Corso). A sua resistência química a solventes e a gordura é favorável, assim como a sua resistência à água se mantém regular. Contudo, a resistência a ácidos muito fracos e a bases é pobre, caso este não seja protegido com um fluxo refletor (verniz ou cera). O alumínio desta forma não é afetado pela luz ou por temperaturas abaixo de 280°C (Neves, 2009).

#### **2.3.4. *ÁGUA E ELETRICIDADE***

A água não faz parte diretamente da embalagem, mas é um dos elementos mais importantes para a produção do papel, dado ser um meio, ao qual todos os componentes que constituem o papel são dispersos na solução. Este elemento contribui para dissolver as matérias-primas utilizadas na produção de papel e os aditivos e químicos usados na produção.

A eletricidade utilizada no processo de produção de celulose é especialmente usada para acionar motores/bombas. Neste processo, algumas indústrias recuperam cerca de 60% da energia elétrica como vapor de baixa pressão (SCA, 2010).

#### **2.3.5. *COMPÓSITOS***

As embalagens Tetra Pak® apresentam um carácter de compósito laminado, sendo constituído por camadas alternadas de papel, polietileno e alumínio, além dos rótulos impressos.

Os materiais constituintes dos compósitos podem ser orgânicos, inorgânicos ou metálicos, podendo ser sintéticos ou naturais. Podem, no entanto, apresentar-se na forma de partículas, fibras, lâminas ou espumas. No caso das embalagens ECAL, estas apresentam uma estrutura laminar.

### **2.4. PROCESSO DE FABRICO**

O processo de fabricação das embalagens multicamadas inicia-se com a impressão sobre o papel, adicionando uma cor de cada vez à folha de papel (cada embalagem pode ter até 6 cores). Verificando-se a qualidade de impressão Figura 16.

Posteriormente a folha é levada para laminagem, intercalando-a com o filme de polietileno de baixa-densidade. Dentro do laminador a folha de papel é aquecida de modo a garantir a aderência à camada plástica (grãos - pellets). Ainda dentro do laminador, é aspergido plástico líquido entre o rolo de alumínio e o papel aquecido. Seguidamente todas as camadas convergem, formando um rolo Figura 17.



Figura 16 – Impressão sobre o papel (Tetra Pak Containers).



Figura 17 – Aspergimento de plástico líquido entre o rolo de alumínio e o papel (Tetra Pak Containers).

Uma vez adicionados todos os componentes, forma-se o denominado “Jumbo” que segue para corte onde cada faixa impressa se transforma num rolo, o que otimiza a logística, refletindo-se em benefícios ambientais (Figura 18).

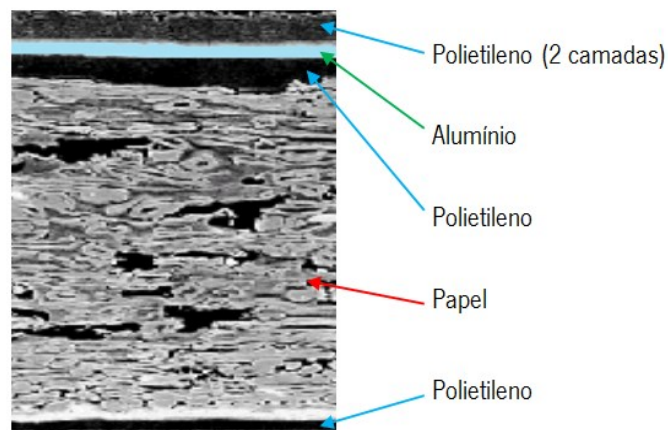


Figura 18 - As diversas camadas numa embalagem de cartão asséptica para alimentos (Adaptado (Abreu, 2002)).

Com todos os componentes unidos, um rolo mestre transporta-os para corte (Figura 19). O rolo é levado para uma máquina, que o corta e enrola.



Figura 19 – Processo de corte das embalagens (Tetra Pak Containers).

Nesta etapa, os rolos são colocadas em linha com as máquinas de enchimento, simultaneamente adquirem o formato da embalagem. Seguidamente coloca-se o rolo na máquina de enchimento, onde é guiado por rolos mecânicos e esterilizado. Neste percurso, as duas partes da embalagem são unidas num tubo contínuo Figura 20.

Na etapa seguinte, uma máquina enche o recipiente com o produto e em seguida é cortado em pacotes individuais, largando-os para dobragem (Figura 21). O fecho e a selagem das embalagens, após o seu enchimento é elaborado por processos térmicos, com o auxílio de finas tiras gomadas de polietileno (Neves, 2009). As embalagens, depois de dobradas são ejetadas e levadas até ao consumidor.



Figura 20 processo de aquisição do formato da embalagem- (Tetra Pak Containers)



Figura 21 – Enchimento das embalagens e posterior fecho (Tetra Pak Containers).

A produção das embalagens da Tetra Pak® produz um impacto reduzido ao meio ambiente, devido ao recurso de modernas técnicas de fabricação que conduzem à minimização da poluição restante do processo.

Todavia, como na maioria dos processos industriais são prejudiciais ao meio ambiente, a Tetra Pak® contorna a situação, recorrendo ao uso de tintas a base água durante a impressão, substituindo solventes orgânicos. Reduzindo os impactos causados, a Tetra Pak possui um Sistema de Gestão Ambiental para apoiar o Desenvolvimento Sustentável, baseado na *Norma ISO 14001*. Este sistema é um programa de melhoria contínua do processo produtivo com diminuição dos impactos das operações no ambiente (Tetra Pak international S.A.).

## **2.5. POTENCIAL DE VALORIZAÇÃO DAS EMBALAGENS**

O potencial de valorização de embalagens tem vindo a aumentar e apesar da crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental, outrora estes resíduos eram fonte de produção energética, emitindo elevados teores de poluição. Contudo, com a evolução das tecnologias foi possível retirar estes resíduos dos aterros sanitários, introduzindo na população uma mentalidade de reciclagem e valorização de resíduos urbanos.

Segundo fontes da Tetra Pak® foram recicladas, no mundo, em 2012 mais de 39 mil milhões de embalagens multicamada devido a divulgação de atividades e iniciativas sobre a reciclagem, em todos os países que estão presentes (Tetra Pak international S.A.; Tetra Pak, 2009). Em alguns países, nomeadamente no Brasil, EUA e na China, a reciclagem das fibras de papel (maioritariamente embalagens (75%)) começa nas fábricas de papel (Tetra Pak international S.A.)

Desta forma, desde 2002 foi registado um aumento na recolha e reciclagem de embalagens, assim como o aumento de infraestruturas responsáveis pela sua reciclagem. As iniciativas utilizadas serviram para alertar a sociedade sobre os benefícios da reciclagem de embalagens usadas passando pelos colaboradores, consumidores e pelas autoridades responsáveis, procurando fiabilizar os processos de reciclagem de embalagens no ciclo produtivo de outros produtos. Após a recolha seletiva, as embalagens são enviadas para empresas de reciclagem onde se procede a sua valorização Figura 22.



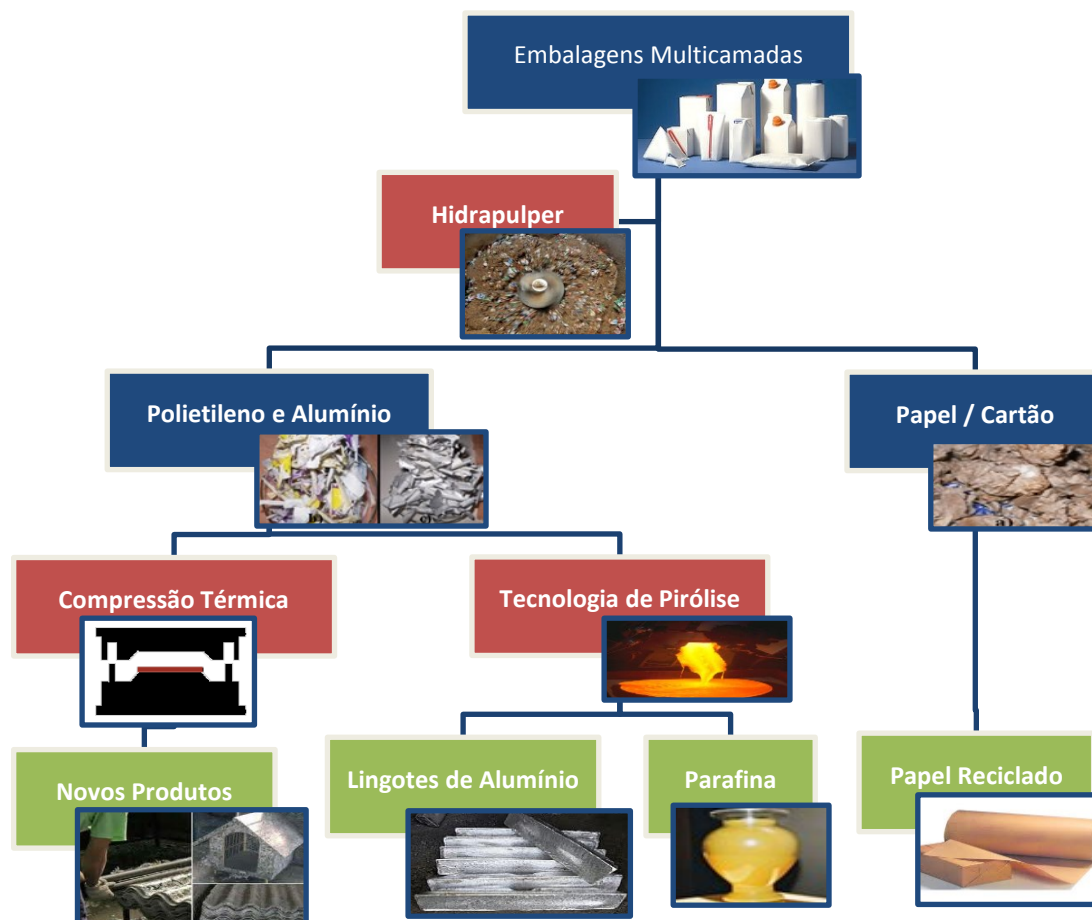


Figura 22 – Diagrama do ciclo de valorização/reciclagem das embalagens Tetra Pak®.

Depois do processo de recolha e separação das fibras de papel através do processo mecânico utilizando o “Hidrapulper”, as fibras de papel são lavadas e purificadas, sendo reintroduzidas no ciclo de produção de papel onde são utilizadas para a produção de diversos tipos de produtos (Figura 23) como o papelão ondulado, o papel cartão, embalagem para ovos, palmilhas para sapatos, papel *Tissue* etc.

9 *Tissue* são papéis sanitários suaves com menor uso de fibras virgens, são papéis resistentes, absorventes e suaves na forma de lenços de papel, papéis-toalha, guardanapos ou papéis higiênicos (Voith).



Figura 23 – Papel Reciclado, utilizado para produção de novos produtos (Tetra Pak international S.A.).

A fração remanescente (maioritariamente constituída alumínio mas contendo ainda polietileno e alumínio) é acondicionada em fardos como apresentado na Figura 24.



Figura 24 - Fardo de polietileno com alumínio (Zuben, et al.).

Posteriormente são encaminhados para recicladores de plásticos, passando por um novo processo de depuração, retirando as fibras residuais de papel aprisionadas. Após o processo de limpeza, o polietileno contendo alumínio é centrifugado e seco.

Contudo, a fração remanescente poderá ser reciclada utilizando três tecnologias distintas. A primeira tecnologia é a extrusão do polietileno com alumínio, originando um composto pelletizado (Figura 25) matéria-prima para a indústria de transformação de plástico, podendo ser usado nos processos de injeção, laminação de peças plásticas, rotomoldagem ou sopro (Zuben, et al.)

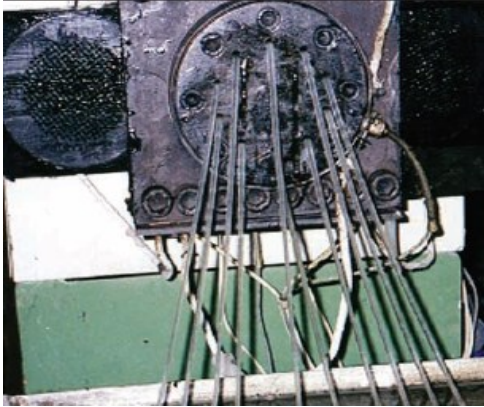


Figura 25 - Extrusão do polietileno com alumínio (Zuben, et al.)



Figura 26 - Pellets obtidos pela extrusão do composto polietileno e alumínio (Zuben, et al.).

A extrusão consiste na passagem do material por uma matriz em que o material será aquecido, atingindo o ponto de plasticidade sendo posteriormente cortado em grãos. As peças produzidas por este processo podem dar origem a cabides, cestos do lixo, vassouras, canetas, placas, réguas, e telhas para a construção civil (Figura 27).



Figura 27 - Alguns materiais obtidos através da injeção ou laminação de peças (REF).

A segunda tecnologia envolvida é a compressão térmica, neste processo as embalagens são cortadas, lavadas, trituradas e espalhadas em camadas numa prensa (Figura 28) a 180°C. A redução do tamanho do material facilita sua fusão e dá ao produto acabado maior homogeneidade (Cerqueira, 2003; Neves). Posteriormente o calor funde o polietileno que plastifica a fibra já comprimida, bem como as aparas de alumínio, originando a uma placa com elasticidade. Esta placa é submetida a um arrefecimento (5 a 10 min), transformando-se assim

num aglomerado resistente com uma superfície impermeável e brilhante (Figura 29) (Cerqueira, 2003).



Figura 28 – Prensa utilizada na compressão térmica (Cerqueira, 2003; Neves).



Figura 29 – Telhas produzidas com polietileno e alumínio (Cerqueira, 2003; Neves)

Esses produtos podem ser moldados (Figura 30) dando origem a móveis como mesas e cadeiras, telhas, etc. (Borges, 2007; Neves).



Figura 30 - Produtos fabricados a partir do polietileno + alumínio (Neves; Neves, 2009).

Contudo, a fração remanescente de polietileno + alumínio ainda poderá ser reciclada a partir da tecnologia pirólise. Esta fração ao ser pirolisadas, originará para além de alumínio de elevada pureza que poderá ser usado como desoxidante de ligas de ferro e em refusão com fluxo

protetor, gases de síntese de valor acrescentado por possuírem elevado poder calorífico. E a presença do material polimérico contribuirá para a produção de gás de síntese, assim como para a formação de um resíduo carbonoso com elevado poder combustível, produtos que podem ser utilizados internamente em empresas que promovem a reciclagem destas embalagens ou em outras empresas cujo processo produtivo necessite de produtos combustíveis no estado sólido e/ou gasoso. Segundo Daliana Borges, a tecnologia de pirólise tem a capacidade de processar 8 mil toneladas de plástico e alumínio por ano, o que equivale à reciclagem de 32 mil toneladas de embalagens multicamadas (Borges, 2007). Esta tecnologia é executada na ausência de oxigénio, sem existir a queima dos resíduos e com eficiências energéticas próximas dos 90% (CEMPRE). Dados do CEMPRE referem que as embalagens multicamadas possuem um poder calorífico de 21.000 BTU (*British Thermal Unit* – Unidade Térmica Britânica), isso significa que uma tonelada de embalagens gera energia (na forma de calor) o equivalente ao que é obtido na queima de 5 metros cúbicos de lenha (50 árvores adultas) ou 500 quilos de óleo combustível (CEMPRE).

O potencial de valorização revelou ser bastante benéfico mostrando que em cada tonelada de embalagens da ECAL recicladas, é evitado o abate de cerca de 15 árvores adultas e a emissão de perto de 900 kg de gases com efeito de estufa (total). Reduzindo de 2 a 3 metros cúbicos de espaço ocupado em aterro sanitário (AFCAL; Green Savers, 2012). Sendo que 300 embalagens de 1 litro vazias, quando espalmadas ocupam o espaço equivalente a 14 litros (AFCAL) No entanto, a valorização energética de duas toneladas de ECAL geram energia equivalente a 1 tonelada de petróleo (AFCAL).

## **2.6. PROCESSOS DE RECICLAGEM**

A reciclagem apresenta-se, atualmente como uma indústria em desenvolvimento e aparece como alternativa muito importante e significativa a utilização de recursos naturais. Este processo motivado por fatores ambientais e económicos em países desenvolvidos, permite fazer face às necessidades de matérias-primas, para a crescente industrialização, em países em vias de desenvolvimento.

As novas indústrias recolhem, separam e processam materiais abandonados como desperdícios, isto é, sem qualquer valor económico. Assim, os sectores de recuperação de metal, papel, produtos químicos e têxteis, há muito estabelecidos, são agora complementados para recuperação de desperdícios sólidos urbanos, tal como acontece com as embalagens.

O processo de valorização/tratamento das embalagens de Tetra Pak® é presentemente realizados por diversos processos e tecnologias. Sendo explicitados nos subcapítulos posteriores as duas tecnologias utilizadas para valorização de embalagens multicamadas. A primeira tecnologia refere-se a um processo mecânico utilizando a via húmida para a separação das diferentes frações. Enquanto a segunda tecnologia, mais recente, provoca a degradação térmica dos materiais que constituem as embalagens, originando materiais com potenciais energéticos.

### **2.6.1. VIA HÚMIDA – “HIDRAPULPER”**

As primeiras tecnologias implementadas para reciclagem das diversas camadas de materiais que compõem as embalagens multicamadas foram baseadas no “*Drumpulper*” (Figura 31) ou desagregador centrífugo, onde o ciclo de reciclagem é contínuo e as embalagens inseridas constantemente, assim como a polpa de papel, a qual é extraída de forma contínua. O polietileno e o alumínio são extraídos no final do sistema.



Figura 31 – Imagem ilustrativa de um “Drumpulper” (Paper Machinery).

A principal desvantagem desta tecnologia é o valor do investimento, assim como a grande área necessária à instalação dos equipamentos (posição horizontal).

Todavia, o método mais utilizado para a reciclagem por via húmida funciona em descontínuo, sendo semelhante a um liquidificador gigante denominado “Hidrapulper” (Figura 32), Este desagregador requer um investimento menor, necessita de menor área na instalação, sendo um equipamento bastante mais versátil.

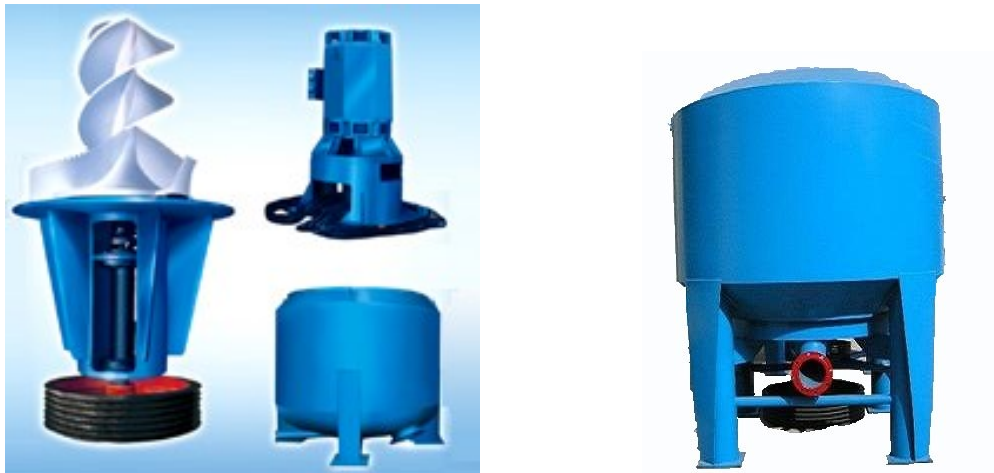


Figura 32 – Representação básica da estrutura de um “Hidrapulper” (Paper Machinery).

Este equipamento permite a separação quase total do cartão, do plástico e do alumínio, sem necessidade da adição de nenhum agente químico. A embalagem inteira é acondicionada no desagregador, sendo agitadas, através de um rotor com movimento centrífugo, juntamente com água, durante um período de tempo que pode durar 15 a 60 min pela agitação do material com água quente (Neves, 2009). Contudo o processo torna-se mais demorado se recorrer a água fria de 30 a 40 min (Neves, 1999). Segundo o autor (Fernando Luiz Neves) a média de desagregação de embalagens em instalações existentes no Brasil e na América Latina, assim como em testes obtido por Abreu, no Canadá, a maioria das instalações é de baixa consistência (Abreu, 2002) . Sendo 15 min o tempo de desagregação, necessitando posteriormente de mais 15 min para o bombeamento da polpa e limpeza do rejeito ainda no “Hidrapulper”. Com este sistema o equipamento poderá desagregar uma batelada a cada 30 min efetuando entre 3 a 5 ciclos de limpeza após o bombeamento da polpa nos 15 min finais. Com este processo a quantidade de fibra agregada na fração remanescente está compreendida entre 5% e 7% (Neves, 2009). Sendo a etapa de limpeza feita inserindo mais água no equipamento após bombeamento da polpa com o objetivo de extrair o máximo de material fibroso, como se pode visualizar na Figura 33 e Figura 34.



Figura 33 – “Hidrapulper” antes da segregação de embalagens (Neves, 1999).



Figura 34 – “Hidrapulper” após a desagregação de embalagens (Neves, 1999).

Para tal, é necessário o estudo e a caracterização das embalagens multicamadas para determinarmos qual o tipo de rotor utilizado no processo de desagregação das fibras de papel, assim como a velocidades de rotação e a temperatura utilizada. Este equipamento pode trabalhar em alta, média (10% a 16%) ou baixa consistência (4% a 6%) pois este componente afeta diretamente a qualidade das fibras de papel (Abreu, 2002; Neves), visualizado na Figura 35.

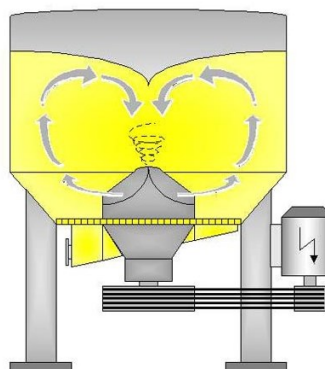


Figura 35 – Representação da rotação formada pelos rotores helicoidais ( Hahn, et al.).

Outro fator importante no processo de reciclagem das embalagens é o tipo de rotor utilizado. Estes influenciam diretamente o processo de reciclagem, pois o objetivo não é triturar o papel, mas sim desagregar completamente as fibras da restante fração remanescente, diminuindo os cortes efetuados nas fibras (Figura 36, Figura 37 e Figura 38). Estudos realizados, também determinam que o número de vezes que se consegue reciclar as fibras de papel é



fortemente afetada pelo tipo de rotor utilizado, assim como as suas propriedades. Sendo o rotor mais indicado para a separação de embalagens multicamadas, o rotor helicoidal de alta consistência (Damas, 2008). Estes rotores evitam cortes excessivos no processo de reciclagem, melhorando o grau de refino da pasta, obtendo ganhos energéticos na fabricação do papel. Isto deve-se ao fato de processos baixa consistência (Figura 38) o papel reciclado terá menos resistência ao rasgo, conforme o patamar de consistência aumenta da baixa até alta, a resistência ao rasgo diminui, enquanto a resistência ao alongamento aumenta, pois as fibras são menores e menos entrelaçadas entre si (Hahn, et al.).



Figura 36 – Rotor helicoidal de alta consistência (Zuben, et al.).



Figura 37 – Rotor helicoidal de média consistência (Zuben, et al.).



Figura 38 – Rotor helicoidal de baixa consistência (Zuben, et al.).

Após o tempo de desagregação a fração remanescente de polietileno + alumínio é separada, enquanto, a fração remanescente de fibras de papel passa pela peneira. O autor Fernando Neves, refere que em testes e operações de reciclagem, o diâmetro da perfuração varia de 4mm a 12mm (Neves).

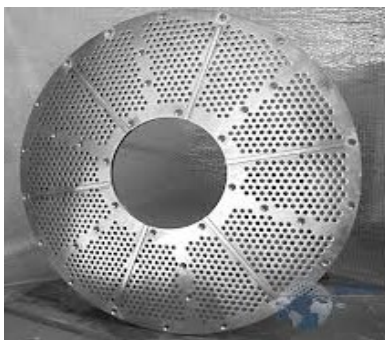


Figura 39 – Exemplo de peneira utilizada no “Hidrapulper” (Neves; Jonhson screens)

A primeira separação da fibra e do rejeito do “Hidrapulper” composto de alumínio e polietileno é feita no próprio equipamento após a desagregação. O material fibroso que está suspenso em água é retirado por bombeamento pela parte inferior do “Hidrapulper”, passando por uma placa perfurada que evita passagem do polietileno e do alumínio. Estes são retirados do desagregador através de uma saída lateral sendo a descarga feita por gravidade. Logo em seguida, o polietileno com alumínio passa por um lavador de plásticos que tem o objetivo de extrair as fibras aprisionadas. As fibras retornam para o processo enquanto o alumínio e o polietileno são prensados e secos ao ar.

### **2.6.2. TECNOLOGIA DE PIRÓLISE**

A tecnologia de pirólise é uma tecnologia inovadora para tratamento/valorização das frações constituintes das embalagens Tetra Pak®, plástico e alumínio, resultante do processo de recuperação das fibras de papel.

Esta tecnologia utiliza energia elétrica para produzir um jato de plasma a 15 mil graus Celcius para aquecer a mistura de plástico e alumínio.

A reação de pirólise ocorre num processo de carbonização utilizado para maximizar a produção de produtos gasosos e líquidos (Luengo, et al., 2012) . Neste processo ocorre a decomposição física da matéria orgânica na ausência de ar ou oxigênio, em ambiente anóxico<sup>10</sup>, sendo, por isso considerada uma tecnologia ambientalmente correta, não existindo combustão dos resíduos, fato que evita a produção de gases de efeito estufa, as emissões tóxicas e a oxidação do alumínio (Castro, 2013).

Os produtos da pirólise são compostos gasosos, líquidos e sólidos, cujas proporções relativas dependem do método e dos parâmetros operatórios utilizados, tais como as pressões e a temperatura. O aumento da temperatura no processo de pirólise provoca a quebra das ligações covalentes originais dos compostos químicos, conduzindo à formação de fragmentos moleculares de menores dimensões. Estes podem combinar-se com o hidrogênio e originar hidrocarbonetos gasosos, como por exemplo, metano, etano, propano, etc. Estas moléculas podem continuar a crescer e formar macromoléculas que contém muito pouco hidrogênio,

---

<sup>10</sup> Anóxico sem a presença de oxigênio (Castro, 2013).

originando um resíduo carbonoso. A diluição nas reações de pirólise minimiza reações secundárias que podem conduzir a formação de alcatroes e de resíduos carbonosos (Costa, 2006).

Os produtos gasosos resultantes da pirólise são constituídos por hidrogénio e hidrocarbonetos ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_x$ ), contendo um elevado poder calorífico, utilizado na produção de energia (Figura 40). O resíduo carbonoso, que se forma, pode ser usado na indústria do aço, para produção de carvão ativado (Wu, et al., 2001). Os produtos líquidos decorrentes do processo termoquímico podem, no entanto, ser utilizados diretamente como combustível, ou serem, posteriormente, convertidos em combustíveis secundários ainda mais valiosos ou em produtos químicos para a indústria. Sendo estes produtos semelhantes aos obtidos a partir do petróleo, o seu processamento poderá ser realizado pelas tecnologias desenvolvidas para o petróleo e seus derivados (destilação, polimerização, alquilação, isomerização, hidrogenação, etc.) (Costa, 2006). Na Figura 40 pode-se visualizar um esquema da tecnologia de pirólise e da reciclagem física.

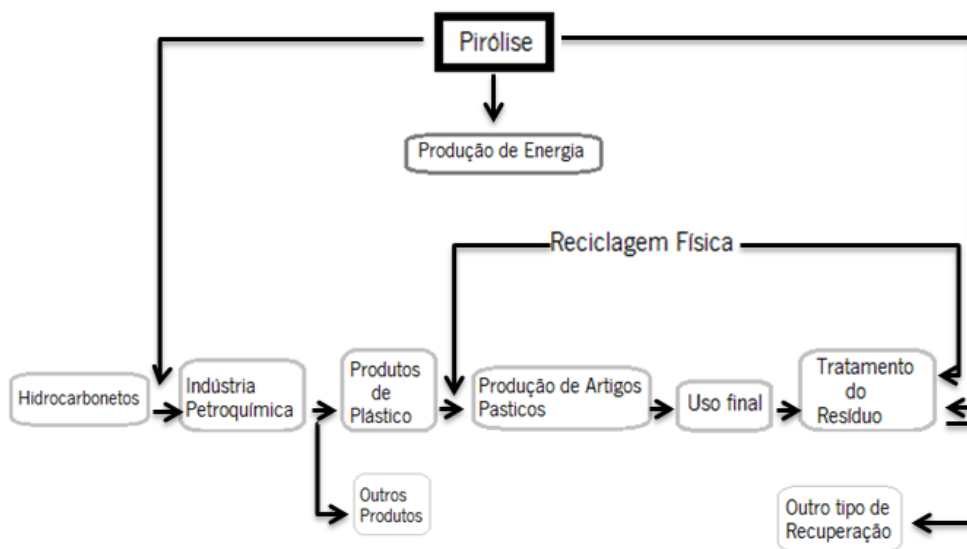


Figura 40 - Esquema simplificado da pirólise e da reciclagem física (Costa, 2006).

Pode-se observar na figura anterior, que no processo de pirólise a produção de hidrocarbonetos líquidos, podem ou não, depois de processados, serem utilizados na produção de novos plásticos, na indústria petroquímica. A reciclagem física apenas permite a reintrodução

do resíduo, após reciclagem, no processo de fabrico de artigos plásticos, podendo substituir a utilização de matéria-prima virgem (Costa, 2006).

Atualmente o objetivo industrial no processo de pirolise é a obtenção de produtos líquidos que poderão ser usados como combustíveis ou como matéria-prima substituindo a fonte de energia tradicional (Costa, 2006). Sendo especialmente apropriado para a reciclagem de misturas de resíduos plásticos, uma vez que não exige a presença de um tipo de plástico específico, tendo como vantagem a permissão da existência de contaminantes.

Contudo, uma das desvantagens na utilização desta tecnologia são os elevados consumos energéticos e os elevados custos de funcionamento. Podendo conduzir a desequilíbrios económicos, motivando a procura de novas soluções tecnológicas para a valorização/tratamento de resíduos de embalagens. Sendo que, o volume de gases inicialmente gerado é mais baixo do que na combustão convencional. Contudo, um dos pontos críticos de limitação desta tecnologia é o teor de sólidos presentes nos RSU, poder calorífico superior e humidade (CVR, 2013).

## *Capítulo 3*

### **3. FASE EXPERIMENTAL**

Neste capítulo serão abordadas as componentes experimentais realizadas no âmbito do tratamento/valorização de embalagens multicamada de Tetra Pak®. As embalagens foram caracterizadas e submetidas a pré-tratamento, sendo posteriormente submetidas à fase de separação das distintas frações através do processo mecânico (“Hidrapulper”) por via húmida e por recurso a tecnologia de valorização por pirólise.

Inicialmente as embalagens em estudo foram submetidas a um processo de abertura, lavagem com água e secagem, método processual após o qual foram trituradas individualmente.

Na Figura 41 pode-se visualizar o ciclo de preparação a que cada tipologia de embalagens da Tetra Pak® foi submetida.

No total foram estudadas três tipologias de embalagens: envase da Compal, da Agros e da Matinal.



Figura 41 - Diagrama do ciclo de preparação dos resíduos.

As amostras foram pesadas previamente à fragmentação sem as tampas de plástico, apenas considerando o material diretamente envolvido nas três frações papel, alumínio e polietileno, que se pretende recuperar.

A fragmentação dos resíduos de embalagens foi realizada no moinho em estrela (TEQUIMAQ), tendo sido testadas diferentes granulometrias de trituração (5mm e 30mm), por forma a seleccionar o tamanho das partículas mais apropriada para a separação das embalagens, nas diferentes tecnologias. Para as granulometria mais finas (5mm), embora fosse possível a separação dos RE por gravidade, a existência de pequenas partículas de pasta de papel, inviabilizava a separação das frações na sua totalidade. Em alternativa, optou-se por seleccionar para este trabalho uma granulometria superior (30mm), onde por agitação vertical na presença de água quente, se promoveu a desfragmentação das diferentes frações que constituem a embalagem.

O agitador utilizado é da marca *Velp Científica*, modelo *Stirrer Type BS* (Figura 42). No Anexo A são apresentadas as características e as especificações técnicas desta tipologia de equipamentos.

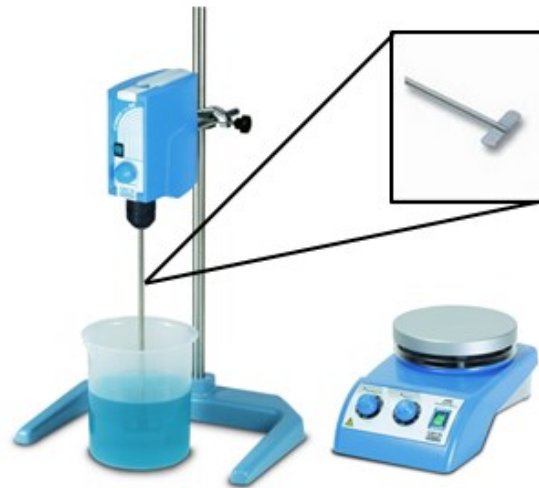


Figura 42 - Instalação experimental: agitador e pormenor da hélice e placa de aquecimento (VELP Scientifica).

Para a granulometria selecionada, a maior dificuldade reteve-se na separação entre as frações papel e alumínio em algumas tipologias de embalagem, nomeadamente nas que não utilizam cartão branqueado.

O papel existente nas embalagens da Tetra Pak®, em alguns casos é branqueado sem cloro reduzindo o impacto ambiental causado pelos agentes químicos, recorrendo a branqueadores como a água oxigenada e o ozono (Medeiros, 2008).




No caso das embalagens em estudo, pela análise visual, foi possível verificar que se tratava maioritariamente de cartão branqueado, devido a coloração que a camada de pasta de papel apresentava.

### **3.1. CARACTERIZAÇÃO E PRÉ-TRATAMENTO DAS EMBALAGENS**

Para o presente trabalho foram selecionadas amostras de três diferentes tipologias e envasamento de ECAL, para análise comparativa da fração obtida em cada uma das mesmas.

As três amostras estudadas foram numeradas e encontram-se descritas na Tabela 4 por diferentes tipos de tipologia de envase, marca do produto envasado, marca da embalagem e tipologia da mesma.

Tabela 4 - Identificação das amostras utilizadas no estudo.

<b>Embalagens</b>	<b>Tipologia Envase</b>	<b>Marca Envasado</b>	<b>Marca Embalagem</b>	<b>Tipologia Embalagem</b>
	Leite Meio Gordo	Agros	Tetra Pak	Tetra Brik
	Compal (variadas)	Compal	Tetra Pak	Tetra Prisma
	Leite Meio Gordo	Matinal	Tetra Pak	Tetra Evero

Esta seleção foi representativa das embalagens de Tetra Pak® mais utilizadas pelos consumidores portugueses, apresentando diferentes tipologias de envase e embalagem.

A Tetra Pak® disponibiliza uma gama de embalagens atrativa, oferecendo ao cliente conformidade, simplicidade de abertura e prazo de validade otimizado garantindo o selo de qualidade aos seus fornecedores.

As embalagens selecionadas possuem características específicas que as tornam bastante apelativas para o público alvo, tanto pelas suas funções como pelo seu design atrativo. Para o estudo das mesmas, foi utilizado o volume de 1000ml. Nenhum tipos de embalagens em estudo, necessita de refrigeração ou de conservantes.

A primeira embalagem referenciada na Tabela 4 é a Tetra Brik® Aseptic (Figura 43) com envase da Agros. Esta embalagem está bastante familiarizada em Portugal devido à sua simplicidade e facilidade de empilhar e/ou armazenar (compacta). Assim como, o baixo custo de venda ao consumidor. Esta tipologia de embalagem possui igualmente uma vasta gama de opções de abertura (Tetra Pak international S.A.).



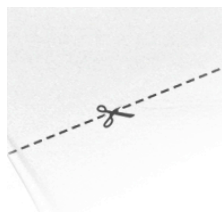


Figura 43 – Embalagem e um dos Sistemas de Abertura das Embalagens Tetra Brik® da Agros (Tetra Pak international S.A.).

A embalagem apresentada na Figura 44 refere-se à Tetra Prisma® Aseptic (envase da Compal) com um formato único de 8 faces, resistente/robusta, material de embalagem reforçado e com impressão de elevada qualidade (material metalizado ou não-metalizado).

Esta embalagem acolhe o enchimento de diferentes produtos, incluindo sumos de fruta, Iced Tea, produtos proteicos, bebidas energéticas, água, substitutos de refeições e bebidas de leite enriquecidas ou aromatizadas. Apresenta uma fácil manipulação, ideal para o consumo em movimento devido à sua abertura/fecho (Tetra Pak international S.A.).



Figura 44 – Embalagem e Sistema de Abertura/Fecho das Embalagens Tetra Prisma® Aseptic da Compal (Tetra Pak international S.A.).

A última embalagem considerada é a Tetra Evero Aseptic® com envase da Matinal. Foi a primeira embalagem asséptica multicamada, com formato de uma garrafa para o enchimento de leite ultrapasteurizado, incluindo leite enriquecido com cálcio, proteínas, fibras, vitaminas A e D e minerais.

Esta embalagem prima pelas excelentes características de manipulação, assim como, pela sua inovadora imagem de marca. O sistema de abertura de um só passo garante a frescura e a segurança do produto (Figura 45).

Segundo estudos realizados pela Tetra Pak® os consumidores consideram que esta nova embalagem facilitou o processo de abertura, manipulação e derrame (Tetra Pak international S.A.).



Figura 45 – Embalagem e o sistema de abertura / fecho das embalagens da Matinal (Tetra Pak international S.A.).

Para a totalidade das tipologias de embalagens procedeu-se ao estudo laboratorial da viabilidade da separação por via húmida, após prévia fragmentação.

Para as diferentes tipologias de embalagens (Compal, Agros e Matinal) foi igualmente estudado o seu potencial de valorização energética.

### **3.2. MÉTODO DE SEPARAÇÃO POR VIA HÚMIDA – “HIDRAPULPER”**

Para a realização das experiências, foram selecionadas 4 embalagens de cada tipologia de embalagens, sendo testados distintos parâmetros, nomeadamente a intensidade de rotação da hélice do agitador, a temperatura do banho e a quantidade de água adicionada, otimizando os melhores critérios para a futura conceção de um sistema de separação das diferentes componentes que integram a embalagem.

A temperatura de base utilizada para os ensaios foi de 100°C, com o propósito de reduzir o tempo de execução da separação. Contudo, na indústria de reciclagem de papel as empresas utilizam água industrial com temperatura na faixa dos 30 a 35°C, para auxiliar o processo de desagregação, tornando o processo industrial mais económico (Neves, 1999).

O tempo de execução e a velocidade de rotação selecionado inicialmente foi sendo modificado no decorrer dos ensaios, analisando a separação e a tipologia de embalagem utilizada, assim como as características do papel.

Foi também utilizada como auxílio na separação dos materiais, uma estrutura de rede em forma tubular (Figura 46) para ajudar na separação da polpa de papel da fração de remanescente.



Figura 46 - Estrutura auxiliar na separação da fração remanescente.

A utilização desta estrutura auxiliar foi previamente desenvolvida no âmbito do projeto da Unidade Curricular Integradora VI (ANEXO C), com diferentes estruturas/configurações que permitiam separar as diferentes frações remanescentes.

Para a avaliação do rendimento da separação dos distintos materiais por via húmida, em cada ensaio laboratorial foram introduzidas num reservatório de vidro embalagens fragmentadas misturadas com água, de acordo com o ilustrado na Figura 47.



Figura 47 – Processo laboratorial de reciclagem mecânica por via húmida de embalagens multicamadas.

No final do processo de separação por via húmida, retira-se a estrutura auxiliar separando a fração remanescente de papel da fração de polietileno + papel + alumínio (P+P+A). A maioria da fração de papel deposita-se no fundo do reservatório por ação gravítica (densidade mais elevada quando molhado) sendo as restantes fibras presentes na água captadas com o auxílio de um coador (malha de rede aproximadamente 1mm).

Na Figura 48, apresentam-se as frações resultantes da separação das embalagens de Tetra Pak® por via húmida.



a) Fração de papel

b) Fração de Polietileno

c) Fração de polietileno + alumínio + papel

Figura 48 – Frações remanescentes (a, b e c) resultantes da separação gravítica por via húmida.

Realçando que a percentagem de cartão separada deverá ser superior à da fração remanescente, devido à composição das embalagens (75% papel). Possibilitando a reinserção da polpa no ciclo produtivo de novos produtos.

Nos subcapítulos posteriores serão descritos os parâmetros experimentais utilizados para cada tipo de envase, assim como os resultados obtidos.

### **3.2.1. EMBALAGEM DA AGROS**

Nesta tipologia de embalagens foram realizadas 4 experiências (devido às distintas características quanto ao seu peso/tipologia). Os resíduos de embalagem, após fragmentação e pesagem, foram colocados no reservatório, dentro da estrutura auxiliar, e imersos em água quente, como mostra a Figura 47.

Na Tabela 5, são indicados os diferentes parâmetros utilizados nas experiências laboratoriais.

Tabela 5 – Parâmetros experimentais utilizados nos ensaios laboratoriais de separação por via húmida das embalagens com envase da Agros.

<b>Ensaio</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>T (h/min)</b>	<b>Água (l)</b>	<b>n (rpm)</b>
1	28	100	1h30	4	1000
2	28	150	2h	4	1000
3	28	100	2h	4	1400
4	16	100	2h	3	1000

No final do processo, preconizado de acordo com as condições referidas na Tabela 5, ficaram evidenciadas as diferentes frações representativas das embalagens.

A fração de papel separou-se graviticamente depositando-se no fundo do reservatório, enquanto a restante fração remanescente, constituída essencialmente pela componente metálica e polimérica permaneceu aprisionada na estrutura auxiliar.

No ANEXO D, na Tabela 43 pode-se visualizar a modificação de parâmetros no processo de reciclagem.

No final do processo de separação, as frações individuais de materiais foram pesadas para determinação da percentagem de separação atingida.

### **Análise e Discussão De Resultados da Agros**

Os resultados relativos às percentagens de separação obtidas, para os diferentes ensaios, são apresentados na Tabela 6.

Estes resultados são de extrema importância para a definição de *layout* de protótipo industrial para separação gravítica de embalagens Tetra Pak®.

Tabela 6 - Resultados obtidos da reciclagem à escala laboratorial de embalagens com envase da Agros.

Ensaios	Papel		Polietileno		P+P+A	
	Massa (g)	%	Massa (g)	%	Massa (g)	%
1	17.96	64.1	1.12	4.0	8.79	31.4
2	19.96	71.3	1.26	4.5	6.29	23.9
3	21.23	75.8	1.17	4.2	5.51	19.7
4	12.51	79.1	0.71	4.3	3.21	19.5

Nesta tipologia de envase foi verificado que as perdas de água após separação não eram significativas. O tempo de execução selecionado inicialmente (ensaio 1 da Tabela 5) foi reduzido, dado a fração remanescente ainda conter uma fração considerável de polpa de papel agregada. Todavia, no ensaio 2 o aumento da temperatura e do tempo de separação para 2h beneficiou todo o processo de separação.

No ensaio 3 o aumento da velocidade de rotação permitiu obter uma massa de papel superior às dos dois ensaios mencionados anteriormente, reduzindo a quantidade de papel agregado na fração remanescente.

Por fim, no último ensaio (ensaio 4 na Tabela 5) o peso em estudo foi inferior (16g), dado este tipo de envase registar menor peso ( $\approx 25 g$ ) e diferente tipologia, relativamente ao envase da Compal e da Matinal. Para este ensaio, em que a relação sólida/líquido foi distinta da registada nos outros três ensaios, foi possível registar a maior percentagem de papel separada, com um valor de 79,1% nas condições de tempo e temperatura de 100°C e 2h, respetivamente.

Contudo, no final de cada ensaio foi verificado que algumas fibras celulósicas ficavam aprisionadas à estrutura auxiliar registando-se uma perda total de 0.28 g, na tipologia de embalagens da Agros.

### **3.2.2. EMBALAGEM DA COMPAL**

Neste processo de separação foram realizadas 5 experiências com o resíduo das embalagens da Compal, após pré separação de acordo com o mencionado anteriormente para

as embalagens Agros. Na Tabela 7, são indicados os diferentes parâmetros utilizados nas experiências laboratoriais.

Tabela 7 – Parâmetros experimentais utilizados nos ensaios laboratoriais de separação por via húmida das embalagens com envase da Compal.

<b>Ensaio</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>T (h/min)</b>	<b>Água (l)</b>	<b>n (rpm)</b>
1	28	100	1h30	4	1000
2	28	100	2h	4	1400
3	28	100	5h	4	1000
4	28	100	2h	3	1000
5	30	150	2h	4	1000

Assim como verificado nos ensaios anteriores, com envase da Agros, no final do processo de separação ficaram evidenciadas as diferentes frações representativas das embalagens da Tetra Pak®.

A fração de papel ficou depositada no fundo do reservatório enquanto a restante fração remanescente ficou retida na estrutura auxiliar.

No ANEXO D, na Tabela 42 é possível visualizar alguns dos efeitos provocados pela modificação dos parâmetros em estudo.

No final do processo de separação, as frações de papel, polietileno e a fração remanescente (constituída por papel, polietileno e alumínio) foram pesadas para determinação da percentagem de separação atingida.

### **Análise e Discussão De Resultados da Compal**

Os resultados relativos às percentagens de separação obtidas para este tipo de envase, para as diferentes condições experimentais, são apresentados na Tabela 8. Estes resultados serão tidos em consideração na otimização dos recursos a utilizar no desenvolvimento de um protótipo de separação por via húmida desta tipologia de embalagens.

Tabela 8 – Registo obtidos na separação por via húmida, à escala industrial, das embalagens com envase da Compal.

Ensaio	Papel		Polietileno		P+P+A	
	Massa (g)	%	Massa (g)	%	Massa (g)	%
1	18.08	66.4	1.75	6.3	7.55	27.0
2	19.75	70.5	1.36	4.9	6.75	24.1
3	20.14	71.9	1.05	3.8	6.67	23.9
4	18.65	66.6	1.11	4.0	8.12	29.0
5	20.21	67.4	1.39	4.9	8.38	27.9

Pela análise efetuada a partir das Tabela 7 e Tabela 8, no ensaio 1, pode-se verificar que o tempo de execução inicialmente selecionado foi demasiado curto para promover uma separação eficiente (1h30min), constatando-se que uma fração considerável de polpa de papel permanece agregada na restante fração. Por outro lado, no ensaio 2, com um tempo de separação de 2h, verificou-se que ao aumentar a velocidade de rotação uma menor quantidade de fibras de papel se encontra agregadas à fração remanescente, sendo o parâmetro que mais influência detém na desagregação das diferentes frações.

No ensaio 3, o tempo de separação foi consideravelmente superior, verificando-se que a percentagem de papel agregado tinha sido reduzida, com uma taxa de separação de 71.9%. apesar da significativa taxa de separação atingida, o tempo de separação de 5h será um fator limitador para aplicação num processo industrial.

As perdas de água não foram significativas (ensaio 4 na Tabela 7), assim como na tipologia da Agros.

Relativamente ao aumento da temperatura verificado no ultimo ensaio, foi significativo, verificando-se que quanto maior for a temperatura a que a solução se encontra, mais rápida é a remoção da polpa de papel da fração remanescente, registando uma taxa de separação de 67,4%. Demonstrando que não são justificáveis os gastos energéticos associados a um aumento de temperatura. Efetivamente, a análise dos resultados obtidos revela que o tempo e a velocidade de agitação jogam um papel fundamental no rendimento da separação.



E por último, o peso do último ensaio aumentou, dado ser a restante pesagem de resíduo, daí o seu peso ser ligeiramente superior aos ensaios anteriores.

Contudo, assim como foi verificado na tipologia da Agros, ficavam aprisionadas na estrutura auxiliar cerca de 1.42 g de fibras celulósicas.

### 3.2.3. **EMBALAGENS DA MATINAL**

Nas experiências com o envase da Matinal, sendo esta uma embalagem com características próprias e distintas das duas embalagens anteriores, foram igualmente realizadas 4 experiências, submetidas ao procedimento de preparação ilustrado na Figura 47.

Na Tabela 9, são indicados os diferentes parâmetros utilizados nas experiências laboratoriais.

Tabela 9 - Parâmetros experimentais utilizados nos ensaios laboratoriais de separação por via húmida das embalagens com envase da Matinal.

<b>Ensaio</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>T (h/min)</b>	<b>Água (l)</b>	<b>n (rpm)</b>
1	28	100	1h30	4	1000
2	28	100	2h30	4	1400
3	28	150	2h30	4	1000
4	32	100	2h30	3	1000

Tal como verificado nas duas embalagens anteriores, as condições experimentais selecionadas permitiram a separação das diferentes frações integrantes das embalagens.

As frações separadas foram pesadas para determinação do rendimento de separação em função dos parâmetros operatórios em estudo.

No ANEXO D, na Tabela 43 pode-se visualizar nas imagens, a modificação de parâmetros no processo de reciclagem.

## Análise e Discussão De Resultados da Matinal

A Tabela 10 apresenta os resultados relativo às percentagens de separação obtidas, para as diferentes condições experimentais, informações a ter em consideração na definição do *layout* a definir e implementar industrialmente.

Tabela 10 – Resultados obtidos na separação por via húmida, à escala industrial, das embalagens com envase da Matinal.

Ensaios	Papel		Polietileno		P+P+A	
	Massa (g)	%	Massa (g)	%	Massa (g)	%
1	20.01	71.46	1.65	5.89	6.34	22.64
2	20.14	71.93	1.22	4.36	6.64	23.71
3	19.86	70.93	1.36	4.86	6.78	24.21
4	1.07	3.34	30.92	96.63	0.4	0.03

No processo de reciclagem, assim como nos casos anteriores, foi registado que as perdas associadas à quantidade de água não eram significativas, verificando não ser um parâmetro muito importante nesta fase de projeto.

O tempo de ensaio selecionado inicialmente demonstrou ser reduzido, dado existir ainda uma fração considerável de polpa de papel na fração remanescente. Por essa razão, em todos os outros ensaios realizados foi aumentada a duração de ensaios para as 2h30min. Embora no ensaio 2 se tenha testado o efeito da velocidade de agitação (1400 rpm), e no ensaio 3 o parâmetro em estudo fosse a temperatura (150°C), nos três ensaios realizados as frações de papel separado não diferem significativamente, apresentando valores compreendidos entre 70.93 - 71.93%.

Já no ensaio 2, a quantidade de papel agregado tinha sido reduzido, justificando esse incremento com o aumento da velocidade de rotação. No ensaio 3, o aumento de temperatura continua a ser significativa, auxiliando o processo de separação.

Ao longo do ensaio 4 (Tabela 9) as perdas de água por evaporação são negligenciados, o que permite afirmar que o volume se manteve constante para os tempos de ensaio implementados.

No entanto, a percentagem de polietileno registado na Tabela 10 é muito superior ao verificado nos restantes materiais, sendo constituído, quase na sua totalidade, a parte superior da embalagem correspondente a parte de polietileno, como se pode verificar Figura 49.



Figura 49 – Parte superior da embalagem da Matinal.

Ao contrário das restantes embalagens, o nível de separação das frações presentes na embalagem com envase da Matinal, não demonstra uma dependência tão significativa dos parâmetros experimentais implementados.

Assim como foi verificado nas tipologias anteriores, ficaram aprisionadas na estrutura auxiliar cerca de 0.39 g de fibras celulósicas, na tipologia da Matinal

Em suma, na Tabela 11 pode-se verificar o resumo dos resultados obtidos através dos ensaios realizados para as diferentes tipologias de envase.

Tabela 11 – Parâmetros mais indicados para a separação por via húmida, de distintas tipologias de envase da Tetra Pak®.

<b>Tipologia de envase</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>T (h/min)</b>	<b>Água (l)</b>	<b>n (rpm)</b>	<b>% Papel</b>
Agros	16	100	2h	3	1000	79.10
Compal	28	100	5h	4	1000	71.90
Matinal	28	100	2h30	4	1400	71.93

Na análise da tabela, pode-se concluir que a embalagem Tetra Brik da Agros é a embalagem mais facilmente reciclada pelo processo mecânico, por via húmida. A embalagem da

Compal ultrapassou muito a média de tempo utilizado, embora os resultados obtido se assemelhem aos obtidos, da percentagem de massa obtida, na embalagem de Matinal.

#### **3.2.4. PAPEL RECICLADO POR VIA HÚMIDA**

A quantidade de papel reciclado que é inserido na indústria de papel, ainda não está estipulado nem regulamentada por lei, deixando à sensibilidade e responsabilidade das empresas a sua reinserção no ciclo de vida de um novo produto. No entanto, existe um limite na percentagem de adição de fibras recicladas (50 %) para não afetar a estrutura da embalagem (rigidez) (Neves, et al., 2001).

Quando a fibra de celulose é reciclada, ocorre uma diminuição do comprimento, isto é, ela é cortada durante o processo de desagregação no “Hidrapulper”, por via húmida. Isso causa uma diminuição na qualidade do papel, impedindo que a embalagem nova seja produzida com cartão 100% reciclável.

A fibra nova é constantemente solicitada para o processo de reciclagem uma vez que as fibras apenas podem ser recuperadas até ao limite máximo de sete vezes (SCA, 2010). Apenas cerca de 80% das fibras recicladas poderão ser recuperadas no processo de destintagem<sup>11</sup>. Uma reciclagem repetida gradualmente resulta em fibras mais pequenas e fracas que têm eventualmente de ser crivadas durante o processo de recuperação. Estas fibras gastas poderão posteriormente ser incineradas para produzir energia (SCA, 2010).

Do ponto de vista ambiental, segundo dados referenciados pelo FSC, tanto o papel certificado<sup>12</sup> pelo FSC quanto o reciclado são melhores do que o papel virgem não certificado (SCA, 2010). O papel certificado tem garantia de origem enquanto, o papel reciclado reduz o desperdício de matéria-prima. Além disso, o papel certificado é produzido de maneira responsável, de acordo com critérios ambientais, sociais e económicos, já o papel reciclado não é, necessariamente. O reciclado leva cerca de 60% de fibras virgens na sua composição.

---

<sup>11</sup> *Destintagem* consiste na remoção das partículas de tinta aderente à superfície das fibras (SCA, 2010).

<sup>12</sup> Papel certificado pelo FSC numa embalagem ou produto, assegurando que o mesmo foi fabricado a partir de florestas que são geridas respeitando e garantindo as necessidades ambientais, sociais e económicas das gerações presentes e futuras (Sociedade Ponto Verde).

Algumas empresas com a Smurfit Kappa, utilizem na produção de papel uma mistura de 70 % de fibras de recicladas com 30% e de fibras virgens (Smurfit Kappa).

A sequência de imagens da Figura 50 e da Figura 51, elaborada no CVR, possibilitou, respectivamente, a identificação da quantidade de papel residual que permanece aprisionado ao alumínio, bem como das fibras de papel separadas.

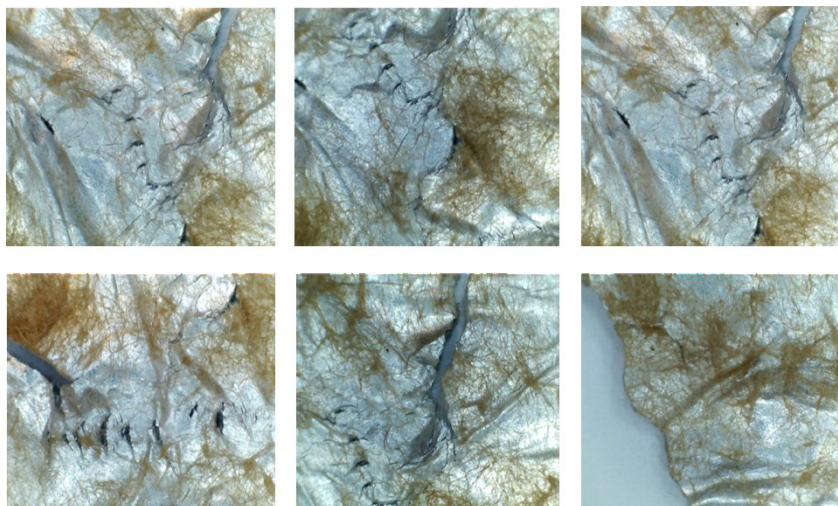


Figura 50 – Imagens captadas por microcâmara da fração remanescente de papel no alumínio.

Estas imagens foram na sua totalidade obtidas com microcâmara permitindo na Figura 51 observar ainda a disposição das fibras de papel recolhidas na separação, a título de exemplo.

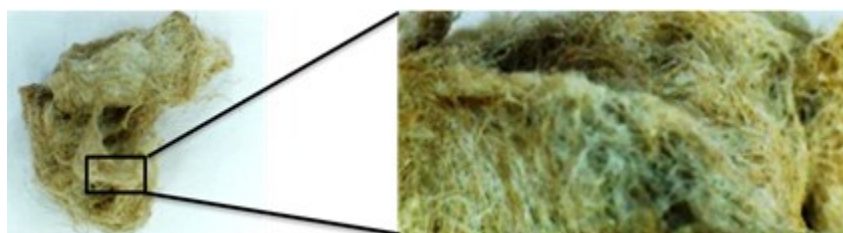


Figura 51 - Zoom de fotografia às fibras de papel, captado por microcâmara.

Pode-se visualizar na figura anterior que ao papel apresenta uma coloração amarelada, a qual resulta do fato de o processo de secagem ser realizado com incidência de luz, não sendo o mais recomendável, dado afetar as características da polpa celulósica de papel (CVR, 2013).

A qualidade da pasta de papel, separada pelos processos implementados laboratorialmente, foi avaliada segundo os parâmetros de humidade, massa volúmica, coarseness<sup>13</sup> e morfologia das fibras. Os resultados apresentados na Tabela 12 são referentes à média de 3 amostragens.

Tabela 12 – Caracterização das fibras de papel recolhidas no processo de separação e respetivo método de análise.

<b>ENSAIO</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>MÉTODO</b>
Humidade (%)	6,9	EN 20638:1994
Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> )	0,50	ISO 534:2005
COARSENESS (µg/m)	156,8	FIBER TESTER L&W

As Figura 52 e Figura 53 apresentam o aspeto geral da amostra de pasta de papel e a comparação entre as várias morfologias existentes.

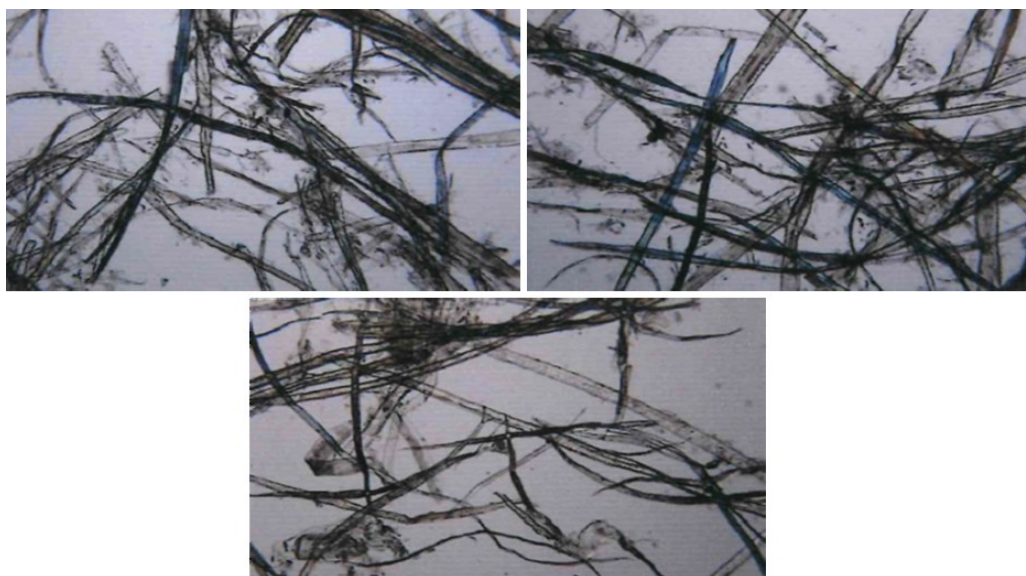
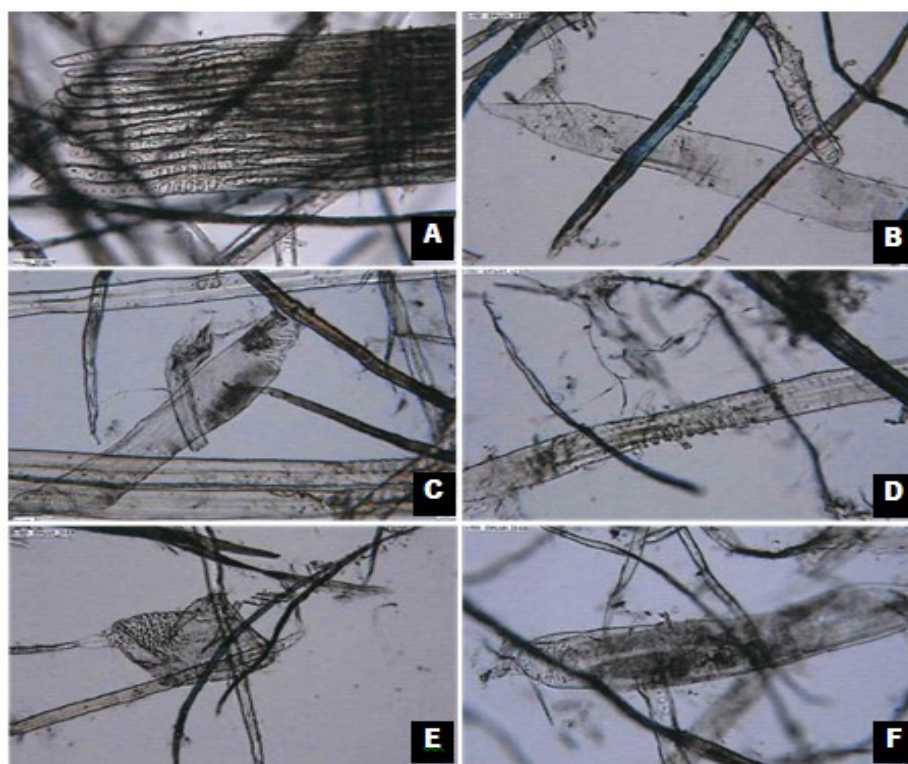


Figura 52 - Aspeto geral da morfologia das fibras das amostras de pasta de papel, a 40x (CVR, 2013).

<sup>13</sup> *Coarseness* é uma medida da média de peso de fibras por unidade de comprimento, frequentemente indicados em unidades (mg/m).

Segundo Neves (Neves, et al., 2001) os efeitos da reciclagem ao longo dos ciclos fazem com que as fibras celulósicas percam as suas propriedades iniciais, concluindo que existe uma relação entre o corte dos traquídeos (fibra longa) durante os processos de reciclagem e as propriedades de resistência ao corte e alongamento. Referem ainda que a utilização de fibras celulósicas de ECAL aumenta a resistência a dobras, índices de tração, corte e alongamento. Igualmente (Neves, 1999) expõe que a desagregação em alta consistência favorece os resultados de alongamento assim como o aumento de refino da fibra, mantendo as características da fibra mais próximas das originais, evitando assim o corte excessivo das mesmas.



<b>A</b>	"Shive" de <i>Pinus sylvestris</i>
<b>B</b>	<i>Fibrotraqueídeos</i> típicos de <i>Pinus</i> e elementos vasculares típicos de <i>Bétula</i>
<b>C</b>	<i>Fibrotraqueídeos</i> típicos de <i>Pinus sylvestris</i>
<b>D</b>	Elementos vasculares típicos de <i>Eucalyptus sp</i>
<b>E</b>	Elementos vasculares típicos de <i>Bétula</i> .

Figura 53 - Morfologia das fibras encontradas nas embalagens multicamadas.

Alguns autores afirmam que a espessura da parede varia bastante e é ela uma das mais importantes de suas propriedades. Conforme variam as dimensões das fibras e a sua morfologia, existem importantes características nos processos de fabricação do papel que também são afetadas. A população fibrosa (A) e a “coarseness” das fibras podem, até certo ponto, refletir bastante nesse comportamento potencial das polpas e no seu desempenho em termos papeleiros (Menegazzo, 2012).

### **3.2.5. SEPARAÇÃO DO ALUMÍNIO EXISTENTE NAS EMBALAGENS POR VIA HÚMIDA**

Da metodologia por vi húmida aplicada no âmbito deste trabalho resulta uma fração de papel, uma fração polimérica e uma fração de alumínio, mas ainda com algum papel e polietileno.

Com base na espectrometria de fluorescência de Raio X da marca *Philips* e modelo *X'Unique II*, existente nos laboratórios de Metalurgia do Departamento de Engenharia Mecânica, foi analisada a composição da fração de alumínio, separada por via húmida (Tabela 13).

Tabela 13 – Composição química da fração remanescente em alumínio, separado por via húmida.

<b>Nome dos elementos</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Erro absoluto (%)</b>
Al	80.5	0.7
Ca	1.59	0.2
Cu	0.299	0.02
Fe	12.9	0.2
Mn	0.166	0.01
P	0.555	0.05
S	0.503	0.04
Si	214	0.2
Zn	1.28	0.02

Pela análise da tabela, pode-se visualizar que o grau de pureza do alumínio é significativo, superior a 80.5%, podendo ser incorporado como matéria-prima em processos de fundição de peças em alumínio. Contudo em função do grau de pureza exigido, pode eventualmente ser



necessário eliminar ou reduzir alguns elementos/materiais presentes na folha de alumínio, nomeadamente as fibras celulósicas e polietileno.

### **3.3. PIRÓLISE – VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA**

Paralelamente ao estudo da separação por via húmida das diferentes componentes que integram as embalagens Tetra Pak realizou-se o estudo da valorização energética das mesmas pelo processo de pirólise.

Neste capítulo será abordada a tecnologia de pirólise para valorização/tratamento das embalagens Tetra Pak® bem como os fatores que influenciam a natureza dos produtos resultantes do processo (composição do resíduo, temperatura, pressão e o tempo de reação).

Numa primeira fase foram determinadas as temperaturas mais indicadas para a realização dos processos de pirólise, desta tipologia de material, tendo-se recorrido para o efeito a análise termogravimétrica (DTA/TGA) do material a submeter a valorização das embalagens de Tetra Pak® (Korkmaz, et al., 2009).

#### **3.3.1. ANÁLISE TÉRMICA DAS EMBALAGENS DA TETRA PAK®**

Esta análise foi realizada no laboratório de Metalurgia no departamento de Engenharia Mecânica, em atmosfera de árgon, não sendo reativo em condições normais (inerte), no equipamento DTA/TGA 2960 TA Instruments.

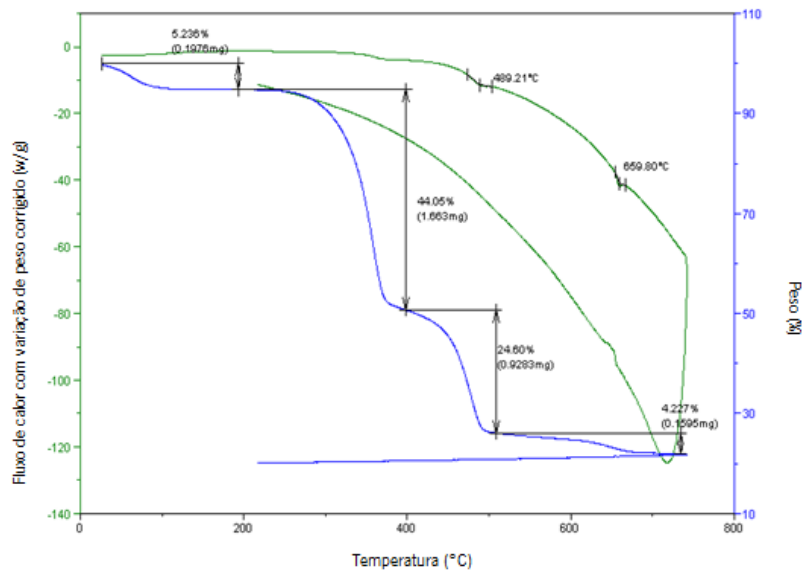


Gráfico 5 – DTA/TGA à temperatura de uma embalagem de Tetra Pak®, em atmosfera de argón.

Através do gráfico foi possível verificar a existência de perda de peso acentuada à temperatura de 400°C, ocorrendo linearmente entre os 400 e os 500°C. Com base nestes resultados, foi elaborado um plano laboratorial de ensaios de pirólise com aplicação de diferentes temperaturas de reação (400, 500 e 650 °C). A temperatura máxima foi limitada ao valor de 650°C, para prevenir a fusão do alumínio no interior do forno.

Para a realização dos ensaios de pirólise, foi utilizado um forno rotativo (Figura 55) existente no CVR. As características do mesmo se apresentam no ANEXO E. Neste, foi possível analisar e quantificar as perdas de massa do resíduo, bem como a captar gás para posterior caracterização e promover a recolha do resíduo carbonoso e do alumínio, produtos finais do tratamento. Posteriormente foi avaliado o potencial de utilização do alumínio nos processos de fundição.

### **Procedimento laboratorial do tratamento de valorização energética**

Inicialmente foi recolhida uma mistura de embalagens da Tetra Pak® as embalagens foram abertas, submetidas a um processo de lavagem com água para retirar restos de produtos e secas (ar) sendo posteriormente trituradas num moinho com grelha de 30mm existente no CVR (Figura 85 do ANEXO E).

A Figura 54 ilustra o esquema experimental seguido nos ensaios de valorização energética

e que engloba as recolhas das distintas tipologias de produtos, quer sólidos, quer gasosos que se formam ao longo do ensaio.

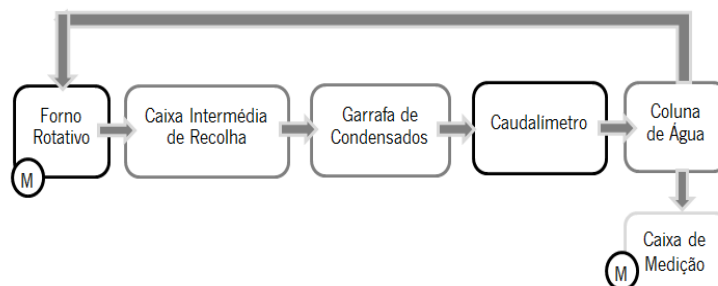


Figura 54 – Sequência de etapas operatórias na instalação para a realização dos ensaios de pirólise.

Os resíduos são colocados no interior do forno, no decorrer da reação os gases passam pela caixa intermédia, sendo condensados na garrafa de condensados. Posteriormente passam para o caudalímetro, sendo quantificado o volume de gás produzido em cada patamar de temperatura (caixa de medição), sendo constantemente controlada a pressão da reação (coluna de água).

Inicialmente, nos ensaios de pirólise, os resíduos triturados foram colocados no interior do forno rotativo (aproximadamente 1/3 do volume do forno) sendo depois fechado para realização de vácuo (Figura 56).



Figura 55 – Forno Rotativo, presente no CVR.



Figura 56 – Embalagens triturados no interior do forno.

Durante o processo de pirólise, foram produzidos óleos e gases de síntese que foram recolhidos na caixa intermédia de recolha (Figura 57). Nessa etapa, foi possível realizar os testes de chama (Figura 58), no gás libertado, provando o poder combustível do mesmo.



Figura 57 – Caixa Intermédia de Recolha.



Figura 58 – Teste da chama realizado na caixa intermédia de recolha.

Os gases atravessam a caixa intermédia, passando para a garrafa de condensados (Figura 59). Os gases ao serem condensados diminuem a sua temperatura, retendo água e óleo que fica aprisionado na garrafa. O gás prossegue para o caudalímetro (Figura 60) onde é registado o volume de gás de síntese formado.



Figura 59 – Garrafa de condensados (A e B) utilizada no processo de pirólise.

No caudalímetro foi realizado o teste do balão (Figura 60), calibrando as medições obtidas durante o processo (Figura 61). A calibração efetuada consistiu na correção do volume medido,

utilizando um coeficiente de correção do gás, dado a instalação existente ter sido dimensionada para HCl.



Figura 60 - Teste do balão no caudalímetro (volume medido).



Figura 61 - Teste do balão na caixa de água (volume real).

Os gases que passam pelo caudalímetro seguem em direção à coluna de água (Figura 62), ficando livres de contaminações, sendo recolhidos para análise. Nessa etapa é regulada a pressão do processo de pirólise e realizado o teste de chama (Figura 63).



Figura 62 – Recolha de gases de síntese na coluna de água



Figura 63 – Teste da chama na coluna de água

No final, são recolhidos os produtos gerados após pirólise (Figura 64), verificada a perda de massa e efetuada a análise e a caracterização dos produtos resultantes (resíduo carbonoso e alumínio).



Figura 64 – Recolha (A) e pesagem do resíduo obtido após pirólise (B).

### **3.3.2. PRIMEIRO ENSAIO DE PIRÓLISE – 500°C**

Neste primeiro teste foram inseridos 1242g de resíduo de embalagens triturado no interior forno promovendo o seu aquecimento em atmosfera de vácuo até à temperatura de 400°C, numa primeira fase. O aumento da temperatura foi gradual para promover uma reação eficiente com a formação de gás de síntese, controlando sempre os níveis de pressão.

O Gráfico 6 representa a evolução da reação no primeiro ensaio de pirólise, registando o aumento da temperatura, o caudal de gás produzido e a pressão gerada no sistema, finalizando o processo aos 152 minutos de reação.

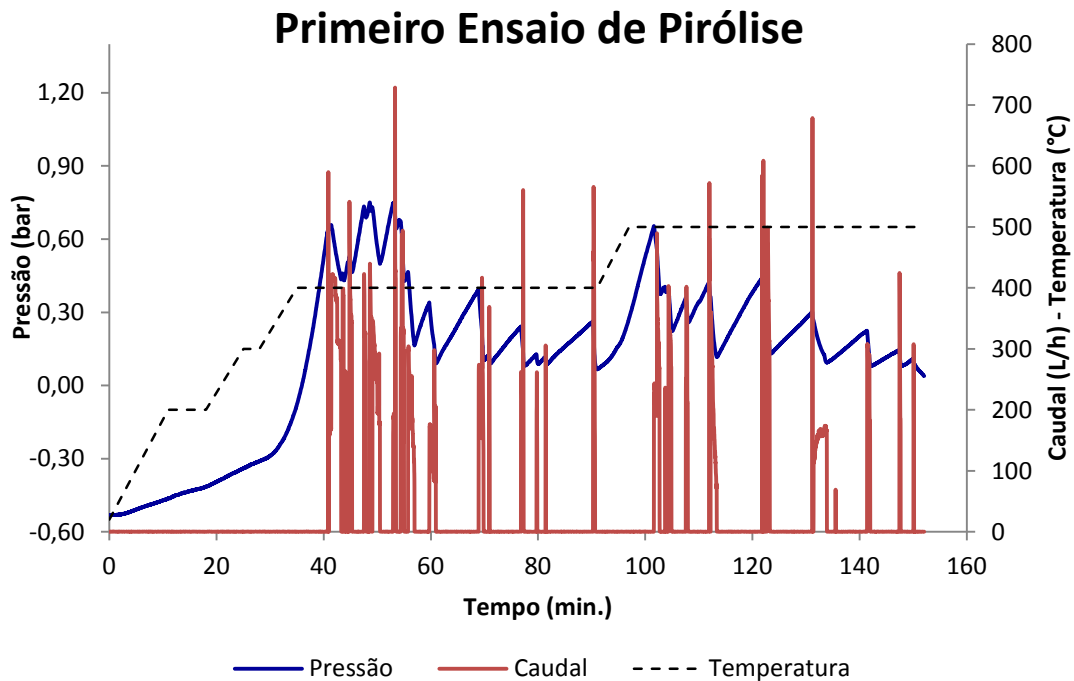


Gráfico 6 – Primeiro ensaio de Pirólise em embalagens da Tetra Pak®.

Pela análise do gráfico, verifica-se que a linha a tracejado representa a evolução da temperatura. Nos limiares de temperaturas a 400 e 500°C a reação prolongou-se durante um período de tempo mais extenso dado serem efetuados testes para análise. À temperatura de 400°C foram realizados os primeiros testes, o teste do balão e o teste de chama. O teste de chama permitiu verificar que o volume de gases gerados não é suficiente para promover a combustão. A pirólise realizada a 500°C gera já um volume de gases que promove a combustão. Relativamente à pressão o comportamento inicial que exibe ou evidência resulta da inercia provocada durante o aquecimento do forno. O teor de humidade, desempenha um papel predominante no rendimento da pirólise pois dificulta o aumento de temperatura no forno, tornando a reação mais demorada e economicamente mais dispendiosa.

Ainda no gráfico é possível visualizar oscilações significativas do caudal no decorrer da reação, provocadas pelos sucessivos aumentos de pressão que ocorrem durante a libertação de gases.

No gráfico é possível identificar duas fases do processo, a primeira fase que ocorre até à temperatura de 400°C durante 97 minutos, e a segunda fase que tem duração durante 55

minutos à temperatura de 500°C. Durante as duas fases foram realizados testes de medição ao volume de gás produzido.

### Ensaio do Balão

Inicialmente foram realizados testes do balão (Figura 60 e Figura 61) à temperatura de 400 e 500°C, a diferentes volumes (2L e 3L).

Na Tabela 14, foram registados os volumes de gás medidos a diferentes temperaturas, durante o decorrer do primeiro processo de pirólise.

Tabela 14 – Volumes de gás medido durante o processo de pirólise no primeiro ensaio.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>a (mm)</b>	<b>Volume medido (L)</b>	<b>Volume corrigido (L) *</b>	<b>Volume na coluna (L)</b>
400	261	2	1.90	4.08
400	381	3	2.96	5.95
500	238	2	1.80	3.71
500	378	3	2.93	5.90

\* Coeficiente de correção para o gás.

a – altura da coluna de água.

Pela análise da tabela, é possível verificar que o volume medido no caudalímetro (volume medido) é inferior ao valor registado na coluna (real). Esta discrepância é provocada pela sujidade (óleos) aprisionada no seu interior e pela instalação existente ter sido projetada para HCl (fluido mais denso), razão pela qual é elaborada uma correção de volumes, utilizando um coeficiente de correção de gás.

De realçar que a compressão do balão altera o volume total (valor medido no caudalímetro), sendo necessário retirar o ar antes do ensaio do balão (Tabela 15).



Tabela 15 – Volume total de gás de síntese gerado, durante o primeiro ensaio.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volume medido (L)</b>	<b>Volume coluna (L)</b>
400	47.83	98.02
500	29.79	60.42

Na tabela podemos verificar que na primeira fase do processo, à temperatura de 400°C, o volume total de gás produzido foi 48L, e na segunda fase foi gerado um volume total de gás de 29L à temperatura de 500°C. Este aumento de volume de gás produzido, deve-se ao fato de o material polimérico ainda não ter pirolisado na sua totalidade.

Para efeitos de composição de resultados de eficiência da pirólise no gás gerado, será tido em consideração os valores referentes ao volume medido após correção.

### **3.3.3. RESULTADOS DO PRIMEIRO ENSAIO DE PIRÓLISE**

Na primeira fase do processo, à temperatura de 400°C, não foi realizada a análise do gás de síntese após pirolise, uma vez que os gases recolhidos não entraram em combustão, demonstrando que a reação de pirólise tenha sido incompleta.

Para o ensaio de pirolise realizado à temperatura de 500°C, o forno foi aberto no final do mesmo para recolha do resíduo carbonoso (Figura 65).

Foi ainda possível identificar a presença de óleo resultante da reação que se encontra misturado com o material polimérico, que nas condições estabelecidas não foram pirolisadas. Estas distintas frações podem ser visualizadas na Figura 65.

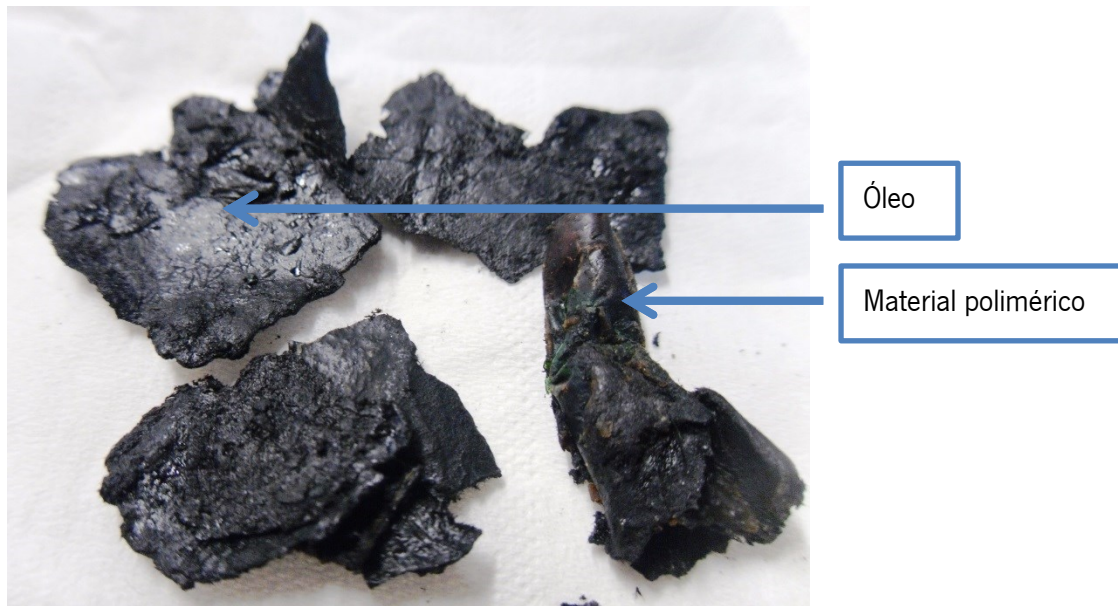


Figura 65 – Resíduo aprisionado nas tampas do forno.

A realização de ensaios de pirólise em duas fases a 400 e 500°C, permite verificar a influência da temperatura nos produtos resultantes do processo. Efetivamente o aumento da temperatura do processo traduz-se num aumento do volume de gás de síntese produzido assim como o produto com melhores propriedades, nomeadamente um resíduo carbonoso com elevado teor em carbono e folhas de alumínio Figura 66 e Figura 67, respetivamente.



Figura 66 – Folhas de Alumínio pirolisado a 500°C



Figura 67 – Resíduo Carbonoso pirolisado a 500°C.

Pela análise das figuras anteriores, podemos visualizar que a 500°C, o alumínio obtido após o processo não contém contaminação dos restantes materiais, ao contrário do verificado para a temperatura de 400°C.

Posteriormente foram contabilizadas as perdas de massa do resíduo após pirólise, salientando que a embalagem é maioritariamente constituída por papel (Tabela 16), o que justifica a elevada percentagem de perda de massa registada.

Tabela 16 – Registo de perdas de massas durante os primeiros ensaios de pirólise nas embalagens à temperatura de 500°C.

<b>Temperatura</b>	<b>Massa Inicial (g)</b>	<b>Massa Final (g)</b>	<b>Perda de Massa (%)</b>
500°C	1242	478	61.5

Como seria espectável, as perdas de massa foram consideráveis (61.5%), sendo que uma grande parte do papel e do plástico pirolisou perdendo volume, gerando gás de síntese. Esta perda de massa até à temperatura de 500°C pode ser verificada no Gráfico 5, pela análise do DTA, registando 73,86% de perdas.

### **3.3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS NA PIRÓLISE A 500°C**

Uma vez que a pirolise a 500°C provou ser mais eficiente do que a realizada a 400°C, foi efetuada a caracterização dos produtos resultantes da pirolise, nomeadamente, o resíduo carbonoso, o gás de síntese e as folhas de alumínio apenas para a temperatura mais elevada (500°C),

#### **Gás de Síntese Gerado a 500°C**

Com a finalidade de analisar a composição do gás de síntese libertado durante o ensaio de pirólise à temperatura de 500°C, foi medida a percentagem de metano ( $CH_4$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), Hidrogénio ( $H_2$ ) e monóxido de carbono ( $CO$ ). Para efeito os gases foram recolhidos (Figura 62) e analisados por recurso aos seguintes métodos de cromatografia gasosa. Os valores registados nas medições encontram-se nas Tabela 16 a Tabela 19. O método

utilizado comparou os valores da libertação do gás de síntese ao gás padrão. Verificando-se que em todos os elementos, o valor do gás de síntese foi sempre inferior ao verificado no gás padrão.

A libertação de  $CO$  à temperatura de  $500^{\circ}C$  foi aproximadamente de 25% registando uma concentração média de 7564 ppm, realizada a partir da leitura de três libertações de gás verificada na Tabela 17.

Tabela 17 - Concentração de monóxido de carbono ( $CO$ ) produzida durante o ensaio a  $500^{\circ}C$ .

	<b>Libertação de Gás</b>	<b>Padrão</b>	<b>500°C</b>
<b>CO (ppm)</b>	1	31308.7	7504.7
	2	30417.7	7623.7
	3	28885	
<b>Média (ppm)</b>		30204	7564
<b>% CO</b>		100	<b>25</b>

A libertação de  $H_2$ , verificada foi de aproximadamente 2%, registando-se uma concentração média de 6853 ppm nas duas libertações de gás.

Tabela 18 - Concentração de hidrogénio produzida durante o ensaio a  $500^{\circ}C$ .

	<b>Libertação de Gás</b>	<b>Padrão</b>	<b>500°C</b>
<b>H<sub>2</sub> (ppm)</b>	1	249112.5	6904.9
	2	249479.5	6800.6
	3	245446.8	
<b>Média (ppm)</b>		248013	6853
<b>% H<sub>2</sub></b>		80	<b>2</b>

Através da Tabela 19 pode-se verificar que a libertação de Dióxido de Carbono foi aproximadamente de 24 % registando uma média de 7166 ppm nas três libertações de gás.

Tabela 19 - Concentração de dióxido de carbono produzida durante o ensaio a 500°C.

	<b>Libertação de Gás</b>	<b>Padrão</b>	<b>500°C</b>
<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	1	12007.5	6438.7
	2	11562.1	7191.2
	3	11800.7	7867.4
<b>Média (ppm)</b>		11790	7166
<b>% CO<sub>2</sub></b>		40	<b>24</b>

A libertação de  $CH_4$  foi aproximadamente de 9%, nas três libertações de gás, verificando uma concentração média 1584 ppm (Tabela 20).

Tabela 20 - Concentração de metano produzida durante o ensaio a 500°C.

	<b>Libertação de Gás</b>	<b>Padrão</b>	<b>500°C</b>
<b>CH<sub>4</sub></b> <b>(ppm)</b>	1	7283	1476.8
	2	6801.5	1641.2
	3	7119.7	1634.2
<b>Média (ppm)</b>		7068	1584
<b>% CH<sub>4</sub></b>		40	<b>9</b>

Verificamos pela análise dos gráficos, que a libertação de  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ , e  $CH_4$  decorreu durante a valorização energética do resíduo. Sendo registados valores médios de  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ , e  $CH_4$  de 7564, 6853, 7166 e 1584 ppm respetivamente.

### **3.3.5. SEGUNDO ENSAIO DE PIRÓLISE – 650°C**

Na segunda experiência de pirólise, procedemos ao mesmo plano laboratorial anterior, modificando a temperatura máxima pretendida (650°C), finalizando o processo aos 170 minutos, como se pode visualizar no Gráfico 7. Tal foi efetuado depois de se verificar que para a temperatura de 500°C, ainda existia material não pirolisado associado ao resíduo carbonoso.

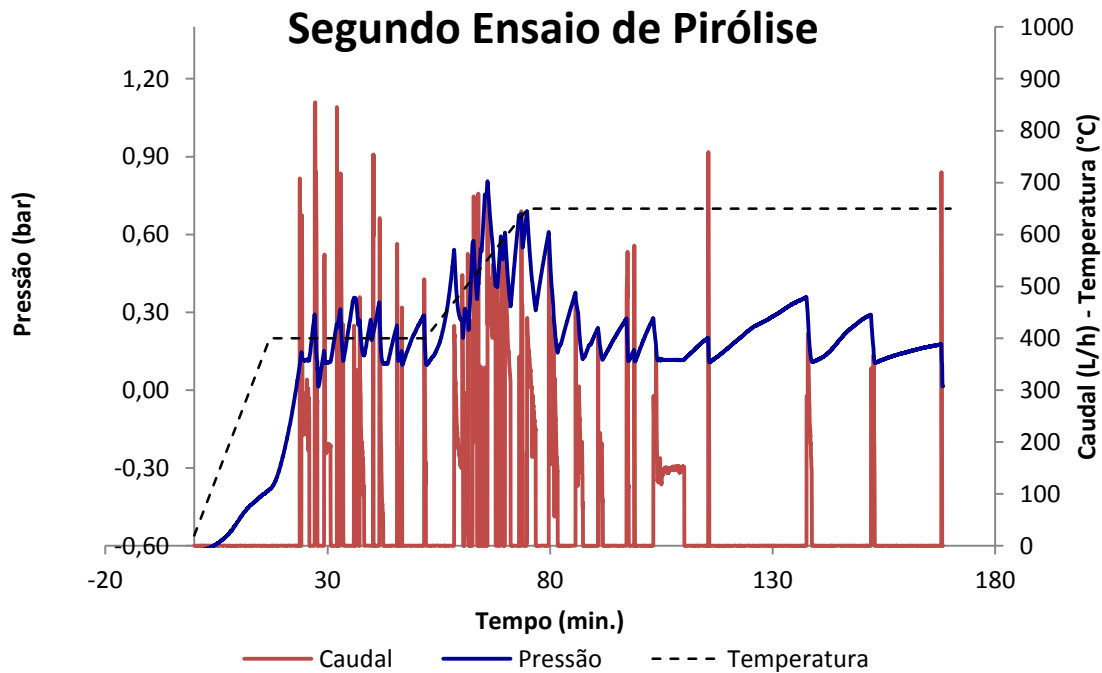


Gráfico 7 – Segundo ensaio de Pirólise em embalagens da Tetra Pak®.

Assim como foi verificado no primeiro ensaio, a linha a tracejado representa a evolução da temperatura, à temperatura de 400 e 650°C. À temperatura de 400°C foi efetuado o teste do balão e o teste da chama, assim como à temperatura de 650°C.

Também como ocorreu no ensaio anterior, no início da curva de pressão verificou-se um ligeiro declive devido à inercia de aquecimento do forno e ao teor de humidade presente no material carregado no forno.

O segundo ensaio de pirólise também se encontra dividido em duas fases, a primeira fase ocorre até à temperatura de 400°C durante 75 minutos, enquanto, a segunda fase ocorre à temperatura de 650°C durante os 95 minutos restantes. Com a elaboração das duas fases pode-se analisar a crescente progressão do volume de gases gerados, assim como, permitir que a reação ocorra gradualmente, por forma a obter os melhores produtos de reação.

Posteriormente foram realizadas medições de volume de gás de síntese produzido, sendo efetuado o ensaio do balão.

Na parte final da reação, o forno foi inclinado por forma a permitir que o resíduo se desloque para os dois lados do forno, para a abertura (onde são inseridos os resíduos triturados)

e para o fecho do forno (saída dos resíduos pirolisados). Na tentativa de minimizar as discrepâncias na medição da temperatura ao longo das várias zonas do forno.

A temperatura foi registada, com o auxílio de um pirômetro com uma emissividade<sup>14</sup> de 0.20, uma média de 450°C de temperatura nos topos.

### Ensaio do Balão

Foram realizados 2 testes do balão a diferentes volumes (2L e 3L), por forma a calibrar estas medições obtidas a partir do processo de pirólise, conforme elaborado graficamente ilustrado no ensaio anterior.

Como podemos verificar na Tabela 21, o volume medido no caudalímetro é sempre inferior ao valor registado na coluna (real), consequência de impurezas retidas no seu interior como óleos, havendo necessidade de promover a correção do mesmo. De realçar que para a temperatura de 400°C só foi realizado o teste do balão para 3L, dado já termos dados relativos a este patamar de temperatura.

Tabela 21 – Volumes medidos durante o processo de pirólise, durante o segundo ensaio.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>a (mm)</b>	<b>Volume medido (L)</b>	<b>Volume corrigido (L) *</b>	<b>Volume coluna (L)</b>
400	-	2	-	-
400	330	3	2.83	5.15
650	255	2	1.90	3.98
650	498	3	2.94	7.78

\* Coeficiente de correção para o gás.

a – altura da coluna de água.

<sup>14</sup> *Emissividade* é a capacidade de um objeto emitir radiação eletromagnética. Sendo que a emissividade ( $\epsilon$ ) do aço inoxidável varia entre os 0,17 – 0,85.

Tal como apresentado na tabela de volume de gás medido no primeiro ensaio, o volume medido no presente ensaio é similar ao valor do volume corrigido, pelos fatores de correção (Tabela 22).

Tabela 22 – Volume total de gás de síntese gerado, durante o segundo ensaio.

<b>Temperatura</b>	<b>Volume medido (L)</b>	<b>Volume coluna (L)</b>
400 °C	40.14	82.26
650 °C	112.89	228.93

Na tabela, podemos verificar que a primeira fase do processo, à temperatura de 400°C, liberta o volume total acumulado de aproximadamente 40L, enquanto, na segunda fase o volume acumulado de gás libertado, à temperatura de 650°C, é cerca de 112L.

### **3.3.6. RESULTADOS DO SEGUNDO ENSAIO DE PIRÓLISE**

Tal como ocorreu no primeiro ensaio de pirólise, à temperatura de 400°C, não foi realizado a análise do gás de síntese gerado após pirólise.

A temperatura máxima registada no processo de pirólise foi no segundo ensaio a 650°C, temperatura próxima do ponto de fusão do alumínio, verificado na análise térmica ( $\approx 660^\circ\text{C}$ ), e que importava não ultrapassar. Na Figura 69, pode-se visualizar os resíduos obtidos neste segundo ensaio de pirólise.





Figura 68 – Folhas de Alumínio



Figura 69 – Resíduo Carbonoso.

Através da análise da figura, pode-se visualizar que à temperatura de 650°C toda a amostra reage no processo, fato que não acontece com a temperatura de 400°C (reação incompleta). Destacando-se que o alumínio obtido após pirólise se apresenta sem contaminações de fibras de material ou material polimérico, tendo obtido uma tonalidade dourada.

O registo das perdas de massa do resíduo pirolisado, no segundo ensaio, são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Registo de perdas de massas no segundo ensaio de pirólise das embalagens.

<b>Temperatura</b>	<b>Massa Inicial (g)</b>	<b>Massa Final (g)</b>	<b>Perda de Massa (%)</b>
650°C	1242	304.03	75.5

As perdas de massa foram superiores, em relação à temperatura de 650°C, tendo perdido cerca de 75,5% da sua massa inicial, valor significativamente superior ao obtido na pirólise a 500°C (61.5%), o que demonstra maior eficiência do processo.

### **3.3.7. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS NA PIRÓLISE A 650°C**

Foi elaborada a caracterização dos resíduos resultantes da pirólise a 650°C, nomeadamente, o resíduo carbonoso, o gás de síntese e as folhas de alumínio.

### **Análise Elementar do Resíduo Carbonoso**

Pela análise elementar realizada no equipamento *Truspec* existente no CVR, pode-se observar que a composição química do resíduo carbonoso a 650°C é essencialmente constituída por carbono, confirmada pela análise da Tabela 24. Este resíduo apresenta ainda na sua constituição azoto e em teores residuais hidrogénio.

Tabela 24 – Análise Elementar do resíduo carbonoso a 650°C.

<b>Elementos</b>	<b>Percentagem (%)</b>
C	86.2
N	3.08
H	0.64

Pela análise da tabela, pode se verificar que o resíduo carbonoso obtido à temperatura de 650°C tem um elevado teor em Carbono (86.2%). O que torna viável de utilização deste resíduo como combustível, substituindo o carvão tradicionalmente empregue, dado possuir um elevado teor calorífico, consequência da sua composição química.

### **Gás de Síntese Gerado a 650°C**

Com a finalidade de analisar a composição do gás de síntese libertado durante o ensaio de pirólise à temperatura de 650°C, foi medida a percentagem de metano ( $CH_4$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), Hidrogénio ( $H_2$ ) e monóxido de carbono ( $CO$ ).

A libertação de  $CO$  à temperatura de 650°C foi aproximadamente 24% registando uma concentração média entre os 3 ensaios de 7137 ppm, apresentada na Tabela 25.

Este valor é similar ao verificado para a temperatura de pirólise de 500°C. Verificando-se que o valor do gás de síntese foi sempre inferior ao verificado no gás padrão, assim como na pirólise a 500°C.

Tabela 25 - Concentração de monóxido de carbono produzida durante o ensaio a 650°C.

	<b>Libertação de Gás</b>	<b>Padrão</b>	<b>650°C</b>
<b>CO (ppm)</b>	1	31308.7	7226.8
	2	30417.7	7118
	3	28885	7066.6
<b>Média (ppm)</b>		30204	7137
<b>% CO</b>		100	<b>24</b>

Na Tabela 26, a libertação de  $H_2$ , verificada à temperatura de 650°C, foi aproximadamente de 11%, registando uma concentração média de 35245 ppm, entre as três libertações de gás.

O teor deste elemento é significativamente superior ao registado para o ensaio a 500°C, recuperando um gás com maior poder calorífico.

Tabela 26 - Concentração de hidrogénio produzida durante o ensaio a 650°C.

	<b>Libertação de Gás</b>	<b>Padrão</b>	<b>650°C</b>
<b>H<sub>2</sub> (ppm)</b>	1	249112.5	38340.4
	2	249479.5	34202.2
	3	245446.8	33192,6
<b>Média (ppm)</b>		248013	35245
<b>% H<sub>2</sub></b>		80	<b>11</b>

Através da Tabela 27 podemos verificar que a libertação de dióxido de carbono foi de aproximadamente 13% registando uma média de 3718 ppm, entre as três libertações de gás.

Tabela 27 - Concentração de dióxido de carbono produzida durante o ensaio a 650°C.

	<b>Libertação de Gás</b>	<b>Padrão</b>	<b>650°C</b>
<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	1	12007.5	3734.2
	2	11562.1	3829.5
	3	11800.7	3591.6
<b>Média (ppm)</b>		11790	3718
<b>% CO<sub>2</sub></b>		40	<b>13</b>

Por fim, a libertação de  $CH_4$  foi de aproximadamente 21%, registrando uma concentração média da libertação do gás, de 3714 ppm (Tabela 28).

Tabela 28 - Concentração de metano produzida durante o ensaio a 650°C.

	<b>Libertação de Gás</b>	<b>Padrão</b>	<b>650°C</b>
<b>CH<sub>4</sub></b> <b>(ppm)</b>	1	7283	3820.1
	2	6801.5	3527.6
	3	7119.7	3794.6
<b>Média (ppm)</b>		7068	3714
<b>% CH<sub>4</sub></b>		40	<b>21</b>

Pela análise dos gráficos, verifica-se que a libertação de  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ , e  $CH_4$  decorreu durante a valorização energética do resíduo, à temperatura de 650°C. Sendo registados valores médios de  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ , e  $CH_4$  de 7137, 35245, 3718 e 3714 ppm. A composição do gás de síntese obtida, para a maioria das componentes em estudo difere significativamente da apresentada a 500°C. para uma superior temperatura de pirolise o gás de síntese apresenta poder calorífico mais elevado o que o torna com poder calorífico superior.

### Caracterização e Fusão das folhas de alumínio

Tendo a propriedade de se ligar a uma vasta gama de metais, o alumínio recuperado (elevado teor de pureza) após pirólise foi prensado de forma a possibilitar a sua fusão e posterior vazamento na forma de lingotes.

Inicialmente foi recolhida uma pequena amostra de folhas de alumínio (pirolisado a 650°C) sendo posteriormente prensado como se pode visualizar na Figura 68. Seguidamente, a amostra de alumínio prensado foi inserida dentro do cadinho cerâmico (Figura 71) e submetido a fusão no forno elétrico a 750°C, durante 10 min. O molde metálico para vazamento do alumínio foi colocado à temperatura de 175°C para aquecimento num forno.



Figura 70 – Cadinho e alumínio prensado para avaliação do potencial de utilização em processo de fusão.



Figura 71 – Alumínio prensado no interior do cadinho.

Após 10 minutos à temperatura selecionada, o cadinho foi retirado do forno e observando-se que ainda não tinha sofrido o processo de fusão, encontrando-se agarrado às paredes do cadinho. No entanto, a amostra apresentava uma tonalidade prateada.

Seguidamente foi aumentada a temperatura para 800°C, repetindo-se o mesmo procedimento. Após 5 minutos retirou-se o cadinho do forno e foi possível visualizar que não estava fundido, como se pode visualizar na Figura 72.



Figura 72 – alumínio agarrado as paredes do cadinho aos 800°C.

Foi posteriormente colocada uma pequena amostra de alumínio puro dentro do cadinho, voltando a colocar no forno a 750°C. Passados 5 minutos, foi possível averiguar que o alumínio puro e a amostra de alumínio pirolisado ainda se encontravam na fase sólida.

No final do processo, a temperatura foi aumentada para 800°C, e o cadinho com a amostra de alumínio puro mais alumínio pirolisado foi colocado dentro do forno, durante 5 minutos. O cadinho foi retirado do forno, verificando que o alumínio puro tinha fundido, localizando-se na parte superior da amostra, sendo vazado para um lingote. Ao contrário, a amostra de alumínio pirolisado, localizado no fundo do cadinho, não tinha fundido.

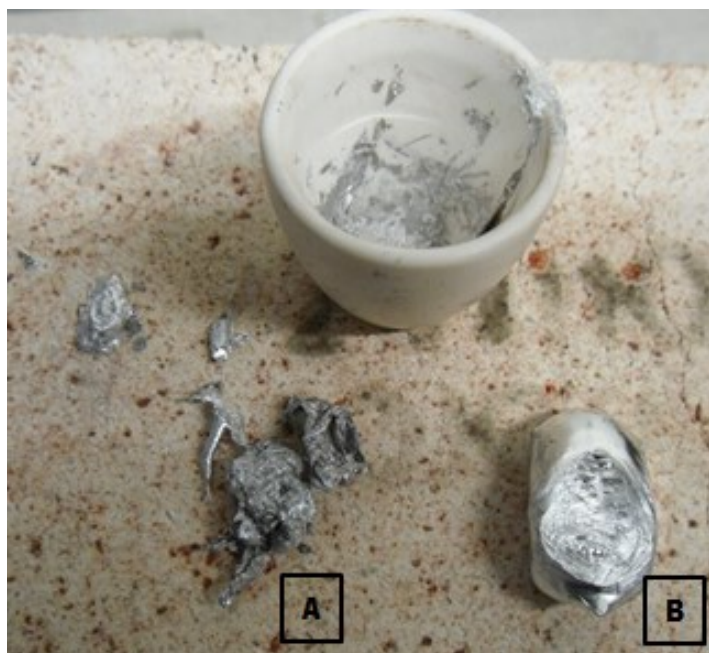


Figura 73 – Resultado final da mistura de alumínio puro (B) com o alumínio pirolisado a 650°C (A).

Pela análise das etapas anteriores, pode-se concluir que a camada oxidada entre as folhas de alumínio, não permitiu a sua fusão. Pois a exposição aos agentes atmosféricos, após pirólise, poderia ter originado uma película de alumina que protege o alumínio da corrosão e da abrasão, sendo necessário, evitar-se, quanto possível, o contacto de alumínio com os gases da combustão (Mesquita, 1971).

E como o óxido de alumínio ou alumina insolúvel no metal líquido e, como a sua densidade é sensivelmente igual à do alumínio, fica em suspensão sempre que se provoque uma agitação do metal, tal como se verificou na análise da Figura 73.

Sendo aconselhável a utilização de uma substância refratária para evitar o ataque pelo alumínio fundido e a elaboração de um pé de banho, por forma a verificar se o alumínio pirolisado funde.

A composição química do alumínio pirolisado a 650°C foi determinada por espectrometria de fluorescência de Raio X. Os resultados da mesma são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Composição química da fração remanescente de alumínio, separado por pirólise (FRX)

	<b>Nome dos elementos</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Erro absoluto (%)</b>
1	Al	98.6	0.2
2	Ca	0.0439	0.006
3	Cu	0.0121	0.001
4	Fe	1.11	0.02
5	Mn	0.0316	0.002
6	Pb	0.0211	0.001
7	Si	0.175	0.02
8	Ti	0.0131	0.003
9	V	0.0140	0.002
10	Zn	1.28	0.02

Pela análise da tabela, pode-se verificar que a concentração de alumínio é bastante elevada, apresentando boas características para vaziar na forma de lingotes (Korkmaz, et al., 2009).

Comparativamente à análise química efetuada à fração de alumínio por separação gravítica (80.5%) pode-se verificar que a presença de material polimérico e de fibras de papel, na fração de alumínio, é significativa, reduzindo o teor de pureza. Contudo isso não acontece na tecnologia de pirólise, já que todas as frações foram pirolisadas à exceção do alumínio, registrando 98.6% de pureza.



## *Capítulo 4*

### **4. DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA TRATAMENTO POR VIA HÚMIDA DE EMBALAGENS TETRA PAK®**

No âmbito do presente trabalho foi definido um protótipo de instalação de separação por via húmida de embalagens Tetra Pak®, à escala piloto, projetado por recurso ao *software AUTODESK INVENTOR® PROFESSIONAL 2013*.

#### **4.1. PROJETO DE INSTALAÇÃO**

O protótipo desenvolvido para separação das fibras de papel durante a separação gravítica por via húmida foi ponderado e baseado na estrutura elementar interna de um “Drumpulper”, assim como nas experiências realizadas com rede tubular e no funcionamento normal de um “Hidrapulper”.

O “Hidrapulper UM - 2013” ilustrado na Figura 74, foi projetado à escala de outros modelos existentes na indústria de papel, para realização de experiências sobre a reciclagem de embalagens longa vida. Este equipamento tem como objetivo principal desagregar os resíduos nas suas partes equivalentes. Porque ao promoverem a redução das partículas do resíduo dificultam a separação das frações remanescentes, permitindo deste modo reduzir a quantidade de polpa de papel agregada na fração de polietileno + alumínio.

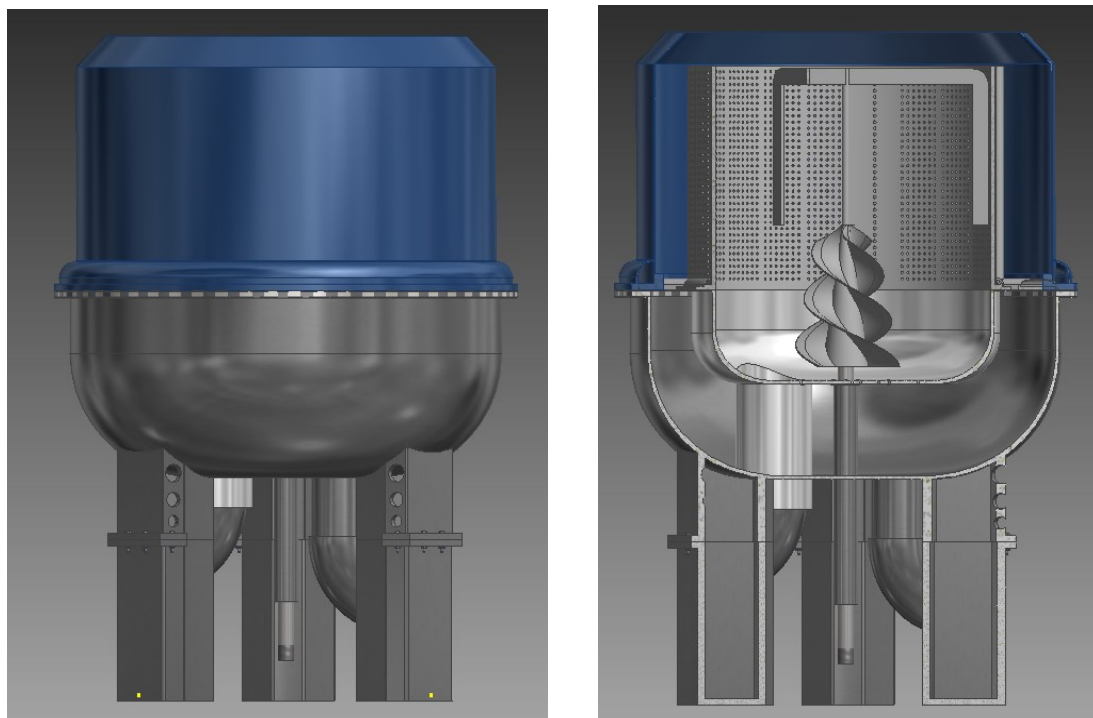


Figura 74 – Projeto de um “Hidrapulper UM – 2013”.

O “Hidrapulper” aqui proposto é constituído por duas estruturas circulares, uma exterior (Figura 75) e outra interior (Figura 76).

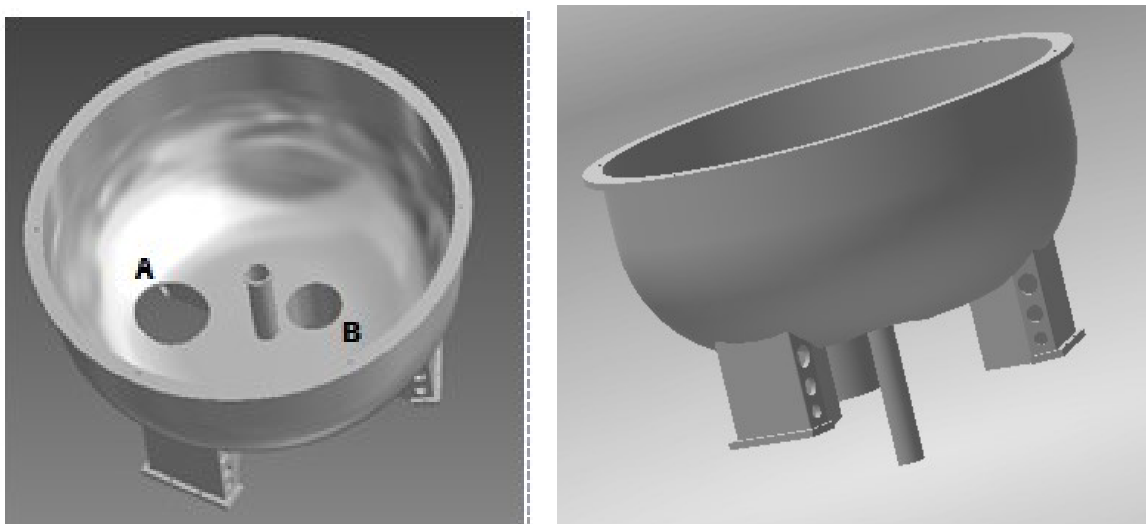


Figura 75 – Estrutura Circular Exterior, em que A (fração de P+P+A) e B (fração de papel) representam a saída dos diferentes materiais.

Na figura pode-se visualizar a estrutura circular externa, responsável pelo suporte do equipamento, assim como da estrutura circular interna (Figura 76).

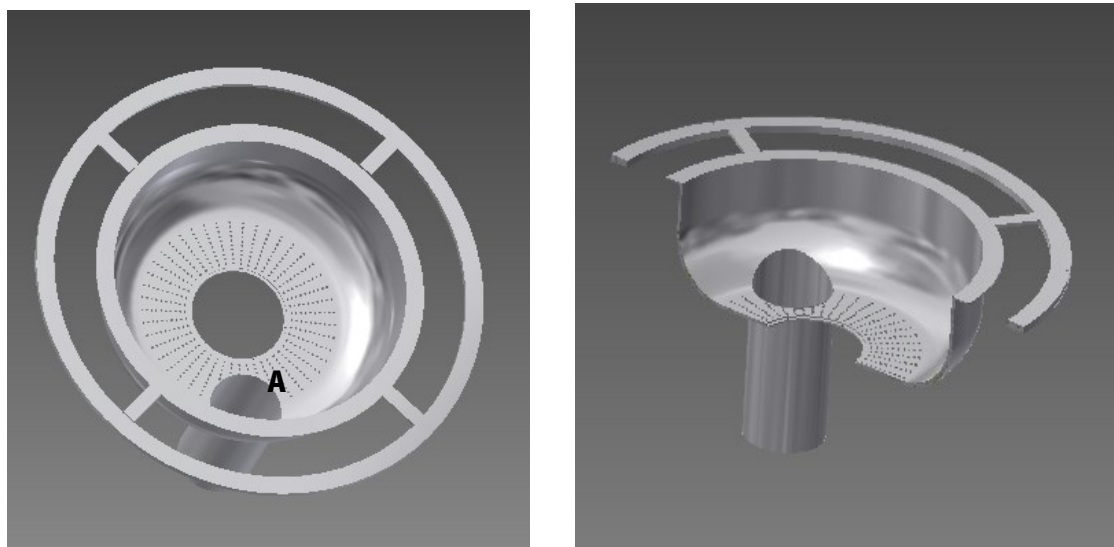


Figura 76 – Estrutura Circular Interior, em que A representa a saída da fração P+P+A.

A estrutura exterior responsável pela entrada da água no sistema corresponde à estrutura cilíndrica exterior (Figura 78). Na base possui um anel, à volta da estrutura que permite a conexão com a parte cilíndrica interior perfurada (Figura 78).

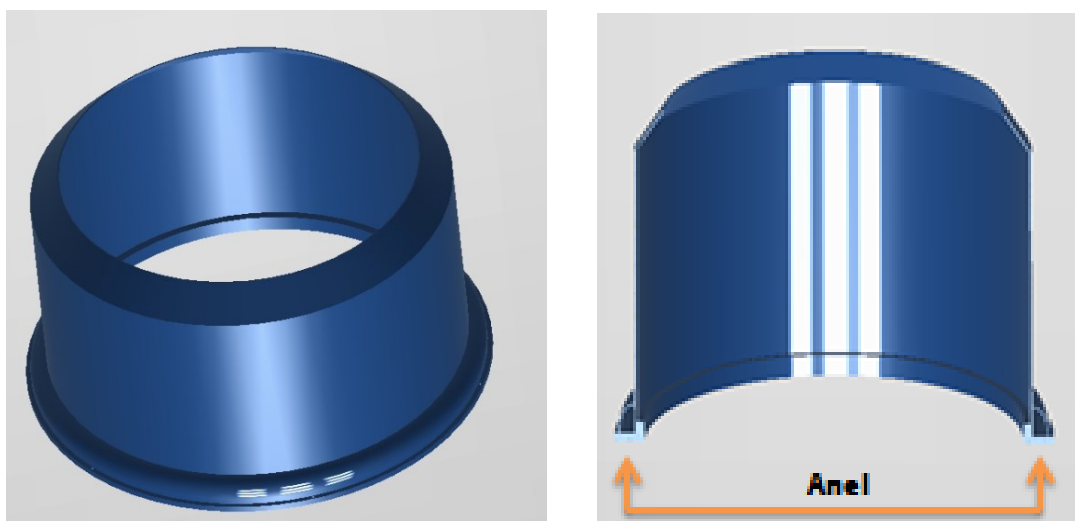


Figura 77 – Estrutura cilíndrica exterior perfurada, com representação do anel.

A estrutura exterior tem como principal função armazenar a polpa de papel proveniente da separação, enquanto a estrutura interior retém a restante fração remanescente de polietileno+alumínio, indústria, em geral, o diâmetro da tubo (A) fica entre 12 e 16 polegadas.

A estrutura cilíndrica interior, é constituída por quatro canais de circulação de água verticais, localizadas na face exterior da estrutura, permitindo a projeção de água com pressão nos resíduos de embalagens, promovendo a separação mais eficiente da polpa de papel da restante fração remanescente.

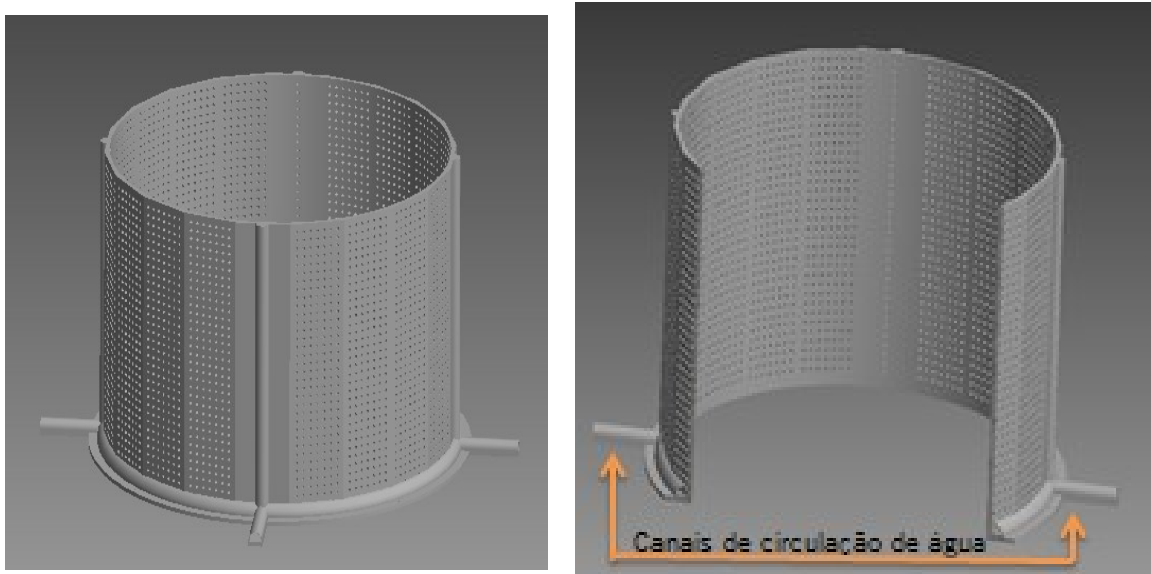


Figura 78 – Estrutura cilíndrica interior, com representação dos canais de circulação água.

Esta estrutura, possui igualmente interligada na sua estrutura cilíndrica interior uma peneira com furos de 10mm (Figura 79), sendo que na indústria de papel os furos verificados nas peneiras em experiências e operações de desagregação de papel variam entre 4 a 12mm (Neves, 1999).

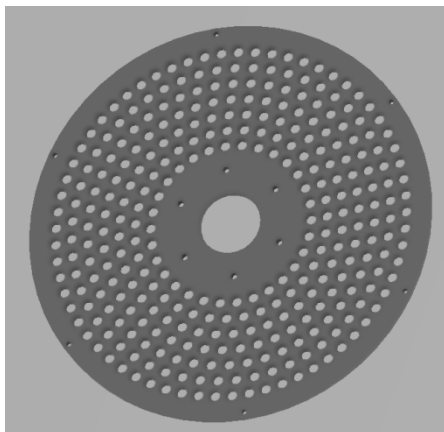


Figura 79 – Peneira com perfuração de 10mm.



Figura 80 – Veio de acionamento do movimento.

Tanto a peneira, como toda a estrutura cilíndrica e circular interna foi pensada na solução mais eficiente, tendo como função principal separar o papel da fração remanescente durante o processo de reciclagem.

No “Hidrapulper”, um dos órgãos mais importantes no equipamento é o rotor helicoidal (Figura 80) dado ser o mecanismo responsável pela agitação dos resíduos através de um veio de transmissão de movimento (Figura 81) por correias ao motor elétrico. Geralmente nas fabricas de papel as rotações helicoidais utilizadas variam entre 280 a 450 rpm (Neves, 1999).

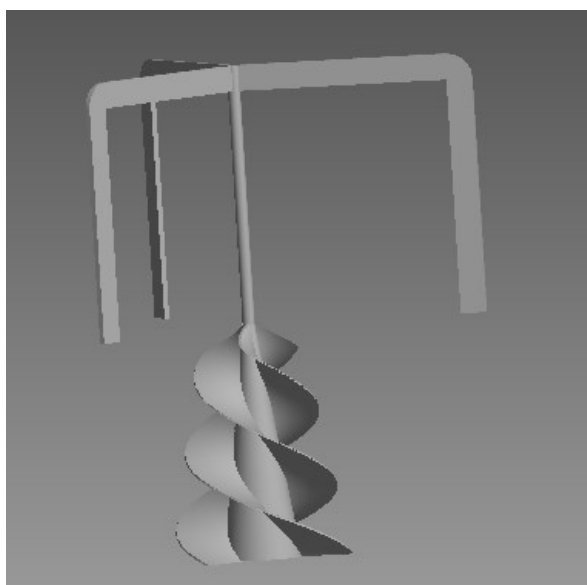


Figura 81 – Rotor helicoidal com raspador.

O raspador presente na estrutura do rotor helicoidal tem como principal função ajudar a “empurrar” as fibras para a perfuração e também a limpeza/desobstrução dos furos, permitindo a livre circulação de fibras de papel.

## **4.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROTÓTIPO PROPOSTO**

A elaboração/desenvolvimento do protótipo proposto com base na recolha de dados relativos à separação por via-húmida, nomeadamente as obtidas no Capítulo 3 desta tese. Este equipamento apresenta inúmeras vantagens no processo de separação, bem como algumas desvantagens resultantes da estrutura apresentada.

Poderão então resumir-se as características deste protótipo de seguinte forma:

### *Vantagens:*

- Sistema eficiente, garantindo a separação eficaz das distintas frações que constituem o resíduo;
- Poupança energética associada à recirculação de água evitando desperdícios e gastos adicionais em cada processo de separação;
- Otimização do sistema atualmente existente em unidades industriais que promovem a reciclagem de embalagens Tetra Pak®.

### *Desvantagens:*

- Viscosidade elevada do papel, que constituem um inconveniente, exigindo um sistema de filtros dispendioso de forma a garantir que a recirculação de água seja o mais limpa possível;
- Possuir uma perfuração adequada de forma a reduzir contaminações na polpa de papel, no caso de existirem partículas pequenas da restante fração remanescente.
- Seleção do rotor helicoidal selecionado, verificar se este provocaria cortes nos resíduos durante a separação.

# *Capítulo 5*

## **5. VIABILIDADE ECONÓMICA DOS PROCESSOS ESTUDADOS**

Neste capítulo será abordada a viabilidade económica no processo de reciclagem das embalagens Tetra Pak®, comparando as duas tecnologias estudadas para a sua valorização, via húmida e valorização energética por pirólise.

### **5.1. VIA HÚMIDA – “HIDRAPULPER”**

Para o cálculo dos custos energéticos inerentes a este método assumiu-se uma tarifa de eletricidade de 0.17 (€/kWh), sendo que este valor corresponde a uma média das tarifas de média tensão e já inclui a taxa de IVA aplicada no setor. A potência total utilizada em cada ensaio corresponde à soma da potência do agitador juntamente com a da placa, correspondendo às diferentes velocidades e temperaturas usadas. Note-se que estes valores são estimados, uma vez que apenas se teve acesso ao valor real da potência máxima de ambos os equipamentos usados (Tabela 30).

Tabela 30 - Potência dos equipamentos utilizados nos ensaios de separação das frações.

<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>POTÊNCIA (W)</b>
Agitador	60
Placa de Aquecimento	630
Total	690

Durante o decorrer desta fase, foram contabilizados os custos inerentes aos ensaios efetuados ao longo do projeto, visualizados na Tabela 31.

Tabela 31 – Custos energéticos referente aos ensaios realizados laboratorialmente para cada tipo de envase.

	<b>COMPAL</b>	<b>AGROS</b>	<b>MATINAL</b>
Potência Total (W)	690	690	690
Tempo Total (h/min)	12h30	7h30	9h
Custo (€)	1.442	0.856	1.056

De entre todos os ensaios realizados laboratorialmente, pode-se concluir que o que teve menores custos de consumo de energia foi a embalagem da Agros, ao passo que aquele que obteve mais gastos energéticos foi a embalagem da Compal. Desta forma, tendo em consideração o menor tempo de operação e os consumos energéticos mais baixos, a embalagem da Agros foi o processo que obteve um melhor rendimento.

Tal como foi referido anteriormente, para uma total separação das embalagens entre as diferentes frações, das embalagens da Agros, foram necessárias 7 horas e 30 minutos. Com utilização contínua dos dois equipamentos, referenciados na Tabela 30, para um custo elétrico de 0.17 (€/kWh), o ensaio teve o custo de 0.856€ uma vez que se procedeu à separação de 4 embalagens.



## 5.2. TECNOLOGIA DE PIRÓLISE

Para a determinação dos custos energéticos na tecnologia de pirólise, assumiu-se uma tarifa de eletricidade de 0.17(€/kWh), já inclui a taxa de IVA aplicada no setor. A potência total utilizada em cada ensaio corresponde potência do forno rotativo elétrico (30kW)

Quanto aos ensaios de pirólise das embalagens da Tetra Pak®, estes tiveram uma duração de aproximadamente 152 a 170 minutos para as temperaturas 500 e 650°C, respetivamente.

Na Tabela 32, são mencionados os gastos energéticos associados à tecnologia de pirolise, para os diferentes ensaios.

Tabela 32 – Custos energéticos referentes aos dois processos de pirólise realizadas.

<b>PIRÓLISE</b>	<b>PRIMEIRO ENSAIO</b>	<b>SEGUNDO ENSAIO</b>
Potência Total (kW)	30	30
Duração (h/min)	2h31	2h50
Custo (€)	11.78	12.75

Assim, o custo total do processo de pirólise foi de 24.53€. Contudo, foi no segundo ensaio que foram registadas as melhores propriedades na análise dos produtos obtidos, assim como os maiores consumos energéticos associados. Tal fato é justificado e expectável pela maior temperatura associada ao processo de 650°C em deferimento de 500°C.

## 5.3. PROCESSO ENERGÉTICO – VALORIZAÇÃO DOS PRODUTOS

Neste subcapítulo será analisado o potencial de a valorização dos produtos resultantes após tratamento de pirólise. Realçando que no caso do gás de síntese e do resíduo carbonoso foram pesquisados para efeitos comparativos os produtos similares existentes na indústria, como o gás propano e o carvão vegetal.

### 5.3.1. VALORIZAÇÃO DO PAPEL

Na análise de valorização de papel, foi estimado o peso de uma folha de papel reciclado e determinada valorização do papel que se obteria na separação por via húmida.

Na Tabela 33, pode-se visualizar a quantidade de polpa de papel obtido através da reciclagem das diferentes tipologias de embalagens.

Tabela 33 – Quantidade de polpa de papel obtido através da reciclagem das diferentes tipologias de embalagens, por via húmida.

<b>EMBALAGENS</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>PESO (kg)</b>
Compal	Papel/Cartão	0.968
Agros	Papel/Cartão	0.717
Matinal	Papel/Cartão	0.611

Na Tabela 34 pode-se analisar os custos energéticos associados à reciclagem/valorização da polpa de papel existente nas ECAL.

Tabela 34 – Valorização energética da polpa de papel, reciclada por via húmida.

<b>Pasta de Celulose (€/kg)</b>	<b>Compal (€)</b>	<b>Agros (€)</b>	<b>Matinal (€)</b>
0.20356*	0.197	0.146	0.124

\* <http://www.indexmundi.com/> (Novembro 2013)

Da fração de papel separada em cada tipo de envase, pode-se concluir que por cada 100Kg de polpa de papel reciclado, seria obtido um ganho aproximado de 20€.

### 5.3.2. VALORIZAÇÃO DO ALUMÍNIO

Na análise sobre a valorização do alumínio, foram consideradas as duas tecnologias utilizadas, o processo mecânico por via húmida e pela tecnologia de Pirólise.

Pela análise da Tabela 33, pode-se verificar a quantidade de alumínio que se obtém após o processo de reciclagem por via húmida. Da observação é possível registar que a quantidade de

alumínio obtida por via húmida é inferior, à quantidade a produzida ou formada adquirida por pirólise. Realçando que as quantidades experimentadas, nas diferentes tecnologias, foram bastante distintas.

Contudo, foi elaborada uma média de peso de P+P+A, das diferentes embalagens (Compal, Agros e Matinal), para o processo mecânico por via húmida.

A valorização do alumínio será uma estimativa sobre a percentagem de alumínio (5%) na composição das embalagens multicamadas, como se pode visualizar na Tabela 35.

Tabela 35 - Valorização do alumínio reciclado, por via húmida e pela pirólise.

<b>TECNOLOGIAS</b>	<b>VIA HÚMIDA</b>	<b>PIRÓLISE</b>
Al (%)	80.5	98.6
Preço de Mercado (€/Kg)	1.296*	1.296*
Quantidade (Kg)	0.02714	0.0621
Custo de Valorização (€)	0.035	0.080

\* <http://www.indexmundi.com/>(Novembro 2013)

Pela análise da tabela anterior, pode-se concluir que no processo de pirólise a percentagem de alumínio reciclado é muito superior ao verificado na via húmida, já que se assume que o processo de pirólise não depende este material. Todavia, a quantidade reciclada foi bastante diferente, assim como o grau de pureza das folhas de alumínio. Pode-se verificar que o teor de pureza é distinto nas duas tecnologias envolvidas, isto porque na tecnologia de pirólise, a fração de polpa de papel e de polietileno tinham sido pirolisadas, ficando o alumínio com elevada pureza, comparativamente com a tecnologia por via húmida. Nos cálculos efetuados anteriormente não foram contabilizados o grau de pureza no preço do alumínio.

Contudo, pode-se concluir que por cada 100 kg de alumínio, teríamos um ganho de 127.9€, o qual pode ser utilizado em processos de fundição. Este valor foi indicado tendo como base em valores da bolsa de valores de materiais.

### 5.3.3. VALORIZAÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE

Para a valorização do gás de síntese, foi utilizado a tarifa utilizada para o gás propano, dado ser utilizado com gás industrial. Foi utilizado o valor máximo do consumo anual, considerando que este gás iria ser utilizado numa indústria. Na Tabela 36 pode-se visualizar as especificações do gás propano (ANEXO F)

Tabela 36 – Tarifa do gás Propano praticada pela EDP.

<b>Tarifa</b>	<b>Consumo anual (<math>m^3</math>)</b>	<b>Energia (<math>€/m^3</math>) com IVA</b>
Prop3	2.413 a 7.239	4.071

\*<http://www.edp.pt> (Dezembro 2013)

\*IVA a 23%

Na Tabela 37, estão indicados os gastos energéticos associados à tecnologia de pirólise, para os diferentes ensaios, relativamente ao gás propano.

Tabela 37 – Valorização do gás de síntese gerado nos processos de pirólise.

<b>PIRÓLISE</b>	<b>PRIMEIRO ENSAIO</b>	<b>SEGUNDO ENSAIO</b>
Gás Propano ( $€/m^3$ )	4.071	4.071
Volume Total de Gás (L)	77.62 (47.83 + 29.79)	153.03 (40.14 + 112.89)
Custo de Valorização (€)	0.316	0.623

### 5.3.4. VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO CARBONOSO

Na valorização do resíduo carbonoso, o combustível utilizado foi o carvão vegetal apresentando na sua constituição de 85 a 95% de carbono, semelhante à percentagem apresentada pelo resíduo carbonoso 86.2%.

As embalagens de tetra Pak® são constituídas por cerca de 75% de papel e considerando que a tecnologia de pirólise não o degradada termicamente. A valorização do papel será uma

estimativa sobre a quantidade de papel, considerando que a fração de plástico se transforma em gás de síntese. Na Tabela 38 pode-se visualizar a valorização energética do carvão vegetal.

Tabela 38 - Valorização do resíduo carbonoso gerado nos processos de pirólise.

<b>PIRÓLISE</b>	<b>SEGUNDO ENSAIO</b>
Carvão vegetal (€/kg)	0.80*
Quantidade (kg)	0.932
Valorização (€)	0.745

\*Carvão Vegetal *Delgarden* de 5 kg.

Não foi utilizado o combustível industrial, dado não possuímos fontes para o uso.

Em suma, nas seguintes tabelas encontram-se o balanço relativo as custos associados a cada processo, assim como produtos e proveitos resultantes. Na Tabela 39 pode-se verificar o resumo dos resultados obtidos através dos ensaios realizados por via húmida.

Tabela 39 – Balanço de custos, produtos e proveitos resultantes do processo mecânico por via húmida.

<b>Duração Total dos ensaios</b>	29h	
<b>Custos Elétricos (Totais)</b>	3.354€	
<b>Produtos</b>	Pasta de celulose	Alumínio
<b>Proveitos</b>	0.467€	0.035€

Relativamente ao processo de pirólise, pode-se verificar na Tabela 40, o balanço deste tipo de tecnologia, para valorização de resíduos de embalagens.

Tabela 40 - Balanço de custos, produtos e proveitos resultantes da valorização energética por pirólise.

<b>Duração Total dos ensaios</b>	5h21min		
<b>Custos Energéticos (Totais)</b>	24.53€		
<b>Produtos</b>	Gás de Síntese	Alumínio	Resíduo Carbonoso
<b>Proveitos</b>	0.939€	0.080€	0.745€

## *Conclusão*

De um modo geral, a reciclagem apresenta, cada vez mais, um papel relevante no tratamento dos resíduos, assim como na preservação do meio ambiente e na redução de recursos naturais usados como matéria-prima.

No que diz respeito às embalagens da Tetra Pak®, formadas por cartão, polietileno e alumínio, estes materiais ou componentes podem ser reciclados originando novos materiais e ou produtos. O cartão pode ser recuperado por via húmida, originando uma pasta de papel reciclado, ao passo que os restantes materiais (polietileno e alumínio) podem originar novos materiais e produtos, recorrendo a técnicas de ou fundição e prensagem a quente ou desde que separados. Os materiais que constituem estas embalagens podem ainda ser valorizados termicamente, nomeadamente a técnica de pirolise que permitirá isolar o alumínio e transformar as restantes frações em materiais sólidos e gasosos combustíveis. Poderá ainda formar uma fração líquida. Atualmente, no mercado internacional existem, embora num número bastante reduzido, empresas com equipamentos próprios para a reciclagem deste tipo de embalagens, que separam o cartão da restante fração, acrescentando valor as técnicas de reciclagem, reutilizando e reduzindo as matérias-primas extraídas na natureza.

A escolha das amostras selecionadas neste estudo parece coerente com o consumo dos consumidores, sendo as embalagens Tetra Brik da Tetra Pak® as mais usadas no mercado, com um vasto leque de marcas de produtos envasados recorrem à sua utilização.

No decorrer deste trabalho, foram realizados ensaios laboratoriais com a finalidade de estudar a via húmida e a via energética de valorização desta tipologia de unidades, bem como

---

definir o layout de soluções de um equipamento otimizado para a separação por via húmida de embalagens Tetra Pak®.

Através dos ensaios elaborados concluímos que a partir do método por via húmida as frações separadas apresentam características muito semelhantes aos seus materiais de origem, porém, foram necessárias 7h30m para separar a tipologia de envase da Agros. Apesar da morosidade registada no decorrer da separação, verificou-se que este apresenta custos energéticos bastante inferiores aos registados no processo de pirólise.

Contudo, sendo a fração de papel a mais significativa na embalagem, também possui o processo de reciclagem mais simples o que não se verifica com a fração de polietileno+alumínio. Esta fração remanescente pode ser separada nos seus diferentes constituintes através da tecnologia de pirolise.

A análise do comportamento térmico efetuado através de DTA/TGA, verificou-se que a temperatura mais indicada para a valorização energética da fração remanescente de P+P+A seria de 650°C. tal foi confirmado nos ensaios realizados em forno rotativo, registando que nesse patamar de temperatura foram obtidos os melhores resultados nos produtos formados após pirólise, aproximadamente 2h51m de tempo de reação.

Os gases de sínteses analisados à temperatura de 500°C, no primeiro ensaio de valorização energética conduzem à libertação de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> em tores residuais 7564, 6853, 7166 e 1584 ppm, respetivamente. No entanto, à temperatura de 650°C, durante o segundo ensaio verificou-se igualmente a produção de um gás de síntese que inclui na sua composição de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, e CH<sub>4</sub> com tores médios significativamente superior aos obtidos a 500°C, 7137, 35245, 3718 e 3714 ppm. Pela análise das concentrações registadas verifica-se que os tores de CO e CO<sub>2</sub> diminuíram minorando os efeitos nefastos ao ambiente, assim como os tores de H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Todavia, os tores de hidrogénio e metano aumentaram, constituindo um combustível com elevado poder calorífico. Paralelamente foi produzido um resíduo carbonoso proveniente da degradação térmica dos materiais, durante o processo de pirólise, com elevado teor em carbono (86.2). Pode-se registar que o aumento dos gases é verificado com a pirólise do material polimérico, sendo necessário potenciar a formação de um gás de síntese mais rico, separando a fração de papel da fração antes de realização da pirolise.



O alumínio recuperado a partir do processo de pirólise também apresenta um elevado grau de pureza (98.6%) relativamente ao conseguido por a via-húmida (80.6%), que ainda mantém fibras agarradas.

No entanto, considera-se que a otimização da geometria da hélice mais adequada para a agitação das embalagens de Tetra Pak® deverá ser estudada em trabalhos futuros, assim como, a elaboração de um equipamento à escala real implementado numa indústria de papel, com maior capacidade de valorização de embalagens.



## *Trabalhos Futuros*

Analisada a componente experimental, e os resultados a que conduziu, permitiu identificar alguns trabalhos futuros que importa referir:

- Determinação do índice de viscosidade presente na polpa de papel das embalagens;
- Validação do protótipo, utilizando um *Software* de simulação de fluidos;
- Construção do protótipo, por forma a validar os ensaios laboratoriais;
- Fusão do alumínio reciclado.



## *Bibliografia*

**Hahn André F., Cavalheiro Andrei Z. e Santana Fábio E.** Projeto Conceitual de um Desagregador Para Reciclagem de Papel [Jornal]. - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Araranguá : [s.n.].

**A. P.A.** Resíduos [Online] // Agência Portuguesa do Ambiente. - 24 de Setembro de 2013. - <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=943>.

**Abreu Mario** Reciclagem de Cartão para Bebidas [Relatório]. - Sweden : [s.n.], 2002.

**AFCAL** As embalagens que protegem os alimento e cuidam do ambiente [Relatório].

**Agostini Caroline Broering** Produção de Papel a partir de Aparas de Papel Reciclado [Relatório]. - 2006.

AGRF - Associação para uma Gestão Florestal Responsável [Online] // FSC Portugal. - 22 de 07 de 2013. - <http://www.pt.fsc.org/>.

**Borges Daliana Gomes** Aproveitamento de Embalagens Cartonadas em Compósitos de Polietileno de Baixa Densidade [Relatório]. - São Paulo : [s.n.], 2007.

**Carvalho Miguel** Eucalipto já se tornou a primeira espécie da floresta nacional - Público [Online] // Eucalipto já se tornou a primeira espécie da floresta naciona. - 01 de Janeiro de 2013. - 2013 de Maio de 15. - <http://www.publico.pt/economia/noticia/eucalipto-ja-se-tornou-a-primeira-especie-da-floresta-nacional-1582656>.

**Castro Alexandra Manuela Neves de** Mecanismos de Decomposição Pirolítica de Resíduos com PVC Ccom vista à sua Valorização [Relatório]. - 2013.

---

**Celulose** Celulose online [Online] // Curiosidades - Fabricação do papel. - 07 de 07 de 2010. - 07 de 10 de 2013. - <http://www.celuloseonline.com.br/curiosidades/Fabricao+do+Papel>.

**CEMPRE** CEMPRE - Compromisso Empresarial Para Reciclagem [Online] // CEMPRE. - 24 de 10 de 2013. - [http://www.cempre.org.br/ft\\_longavida.php](http://www.cempre.org.br/ft_longavida.php).

**Cerqueira Mario Henrique de** Placas e Telhas produzidas a partir de reciclagem do Polietileno/Alumínio presentes nas embalagens Tetra Pak [Relatório]. - 2003.

**Curso Marinês Paula** Slideshare [Online] // Apostila de embalagem. - 02 de 10 de 2013. - <http://www.slideshare.net/andreiafaion/apostila-de-embalagem>.

**Costa Paula Alexandra da Conceição** "Produção de hidrocarbonetos líquidos e gasosos por pirólise de resíduos plásticos" [Relatório]. - Lisboa : [s.n.], 2006.

**CVR** Relatório de Projeto Interno do CVR. - 2013.

**Damas Emerson de Almeida** Reciclagem das embalagens cartonadas longa vida - análise de viabilidade técnica [Online]. - 2008. - 3 de Abril de 2013. - [www.revita.ind.br/upload/trabalhos/pdf/1271274079.pdf](http://www.revita.ind.br/upload/trabalhos/pdf/1271274079.pdf).

Eu reciclo, eu transformo [Online] // Tetra Pak. - 26 de 06 de 2013. - [http://www.tetrapak.com.br/eu\\_transformo\\_com\\_a\\_tetra\\_pak/#/ciclo+de+vida+da+embalagem/](http://www.tetrapak.com.br/eu_transformo_com_a_tetra_pak/#/ciclo+de+vida+da+embalagem/).

**Ferrão Paulo Manuel Cadete e Pinheiro Luísa** Plano Nacional De Gestão de Resíduos 2011 - 2020 [Relatório]. - Lisboa : [s.n.], 2011.

**FSC Forest Stewardship Council, A.C** FSC Portugal.

**GEOTA / Sociedade Ponto Verde** o Meu Eco ponto - GEOTA / Sociedade Ponto Verde [Online] // o Meu Eco ponto. - 29 de 11 de 2013. - <http://www.omeuecoponto.pt/scid/omeuecoponto/defaultLocateEco.asp>.

**Green Savers** Tetra Pak distribui 20 mil milhões de embalagens certificadas [Online] // Green Savers. - 14 de 11 de 2012. - 27 de 06 de 2013. - <http://greensavers.sapo.pt/2012/11/14/tetra-pak-distribui-20-mil-milhoes-de-embalagens-certificadas>.

---

**Green Savers** Tetra Pak distribui 20 mil milhões de embalagens certificadas [Online] // Green Savers. - 14 de 11 de 2012. - 27 de 06 de 2013. - <http://greensavers.sapo.pt/2012/11/14/tetra-pak-distribui-20-mil-milhoes-de-embalagens-certificadas>.

**INE** Gestão de Resíduos em Portugal 2004 - 2009 [Relatório]. - 2010.

**INE** Estatística do Ambiente [Relatório]. - Lisboa : INE, I.P., 2011.

**Jonhson screens** Placas de extração - Jonhson screens [Online]. - 1 de 10 de 2013. - <http://www.johnsonscreens.com/pt-br/content/placas-de-extra-o>.

**Korkmaz Ahmet [et al.]** Pyrolysis of the Tetra Pak [Relatório]. - 2009.

**Lima António Vasconcelos e Castro Alberto Gomes** Ciência e Tecnologia dos Materiais [Livro]. - Gondomar : Intelecto, 1988.

**London Metal Exchange** LME Aluminium [Online]. - 11 de 12 de 2013. - <http://www.lme.com/metals/non-ferrous/aluminium/>.

**Luengo Carlos Alberto, Felfli Felix Eliecer Fonseca e Guilherme Bezzon Guilherme** CAPÍTULO X - PIRÓLISE E TORREFAÇÃO DE BIOMASSA [Relatório]. - 2012.

**Medeiros Daniel Reis** Tratamento de Efluentes do Branqueamento da Polpa Celulósica por Processos Oxidativos Avançados Baseados em Ozônio [Relatório]. - São Paulo : [s.n.], 2008.

**Menegazzo Miguel Lara** CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE CELULOSES BRANQUEADAS DE PINUS E EUCALYPTUS EM ANALISADOR ÓPTICO AUTOMÁTICO DE FIBRAS [Relatório]. - BOTUCATU - SP : [s.n.], 2012.

**Mesquita Adolfo Da** Tecnologia da fundição de ligas de alumínio [Livro]. - Lisboa : Instituto Nacional de Investigação Industrial, 1971.

**Moura Marcelo F.S.F, Morais Alfredo B. e Magalhães António G.** Materiais Cmpósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico [Livro]. - Porto : Publisndústria, 2005.

**Neves Fernando** Desenvolvimento Ambiental [Artigo] // "O Papel". - 1999.

**Neves Fernando Luiz e Neves José Mangolini** Cartões multifolhados: Efeito da interação de fibras e recicladas [Conferência]. - 2001.

---

**Neves Fernando Luiz** Eletrodissolução de Alumínio em Polpa Celulósica Proveniente da Reciclagem de Embalagens Cartonadas Multicamadas- [Relatório]. - São Paulo - SP : [s.n.], 2009.

**Neves Fernando Luiz** Novos Desenvolvimentos para Reciclagem de Embalagens Longa Vida [Relatório]. - Brasil : [s.n.].

**Neves Fernando Luiz** Portal São Francisco [Online] // Embalagens Longa Vida. - 19 de 02 de 2013. - WWW.PORTALSAOFRANCISCO.COM.BR.

**Neves Fernando** Recycling Process of Tetra Pak Aseptic Packaging [Artigo] // O papel. - 1999. - Desenvolvimento Ambiental.

Noticias - Tetra Pak alerta para reciclagem e proteção das floresta em Oeiras [Online] // Net Resíduos. - GCi, 27 de 03 de 2013. - 27 de 06 de 2013. - <http://www.netresiduos.com/pt/?det=2841>.

Noticias - Tetra Pak no bom caminho para fabricar embalagens que utilizem apenas materiais renováveis [Online] // Net Resíduos. - 22 de 03 de 2013. - 27 de 06 de 2013. - <http://www.netresiduos.com/pt/?id=1527&det=2824&mid=%29>.

**Owens Corning** Moldagem por compressão [Online] // Owens Corning. - 20 de 05 de 2013. - <http://www.owenscorning.com.br/>.

**Palma Isabel** Naturlink a ligação a natureza [Online] // Sistemas de gestão de resíduos urbanos. - 2009. - 20 de 08 de 2013. - <http://naturlink.sapo.pt/Natureza-e-Ambiente/Gestao-Ambiental/content/Sistemas-de-gestao-de-residuos-urbanos/section/2?bl=1>.

**Paper Machinery** paper Machinery [Online] // fiber sorter at paper machiner. - 10 de 09 de 2013. - [http://www.paper-machinery.com/search/fiber\\_sorter/](http://www.paper-machinery.com/search/fiber_sorter/).

**Pinheiro Luísa e Carreira Lurdes** Guia de Acompanhamento da Gestão de Resíduos na Administração Pública [Relatório]. - Amadora : [s.n.], 2008.

**Pousada António Sérgio e Bernardo Carlos Alves** "Introdução à Engenharia de Polímeros" [Livro]. - Braga - Universidade do Minho : [s.n.], 1983.

**Protege o que é Bom** Ambiente e Sustentabilidade [Online] // Protege o que é Bom. - 10 de Abril de 2013. - <http://www.protegeoqueebom.pt/2013/04/09/tetra-pak-embala-mais-de-77-mil-milhoes-de-litros-de-alimentos-em-todo-o-mundo/>.



PulpanPaper - Technology [Online]. - 23 de 07 de 2013. - <http://www.pulpanpaper-technology.com/contractors/environmental/purac/>.

**QNINT** Química Nova Interativa - Sociedade Brasileira de Química [Online] // [qnint.s bq.org.br](http://qnint.s bq.org.br). - 19 de Março de 2013. - <http://qnint.s bq.org.br/qni/visualizarTema.php?idTema=44>.

Reciclar Material de Embalagens com um Componente de Alumínio [Online] // Excelência em embalagem. - 11 de Junho de 2013. - <http://excelenciaemembalagem.wordpress.com>.

**RENOVA** Introdução aos processos de produção de celulose e papel [Online]. - 01 de 10 de 2013. - [tecnicel pa.com/files/CelulosePapel.doc](http://tecnicel pa.com/files/CelulosePapel.doc).

**Resíduos Menos** Manual de Gestao de Resíduos Industriais [Relatório]. - 2011.

**SCA** produção de papel - SCA [Online] // Papermaking. - Tryckeribolaget, 04 de 2010. - 2013 de 10 de 09. - [http://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=OCDEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.sca.com%2FGlobal%2FPublicationpapers%2Fpdf%2FBrochures%2FPapermaking\\_PT.pdf&ei=RDNVUsDaFoerhQevr4DoDg&usq=AFQjCNGeZw6F8cNQfiT-LgEgD9lr87RAmw&bvm=bv.53760139,d](http://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=OCDEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.sca.com%2FGlobal%2FPublicationpapers%2Fpdf%2FBrochures%2FPapermaking_PT.pdf&ei=RDNVUsDaFoerhQevr4DoDg&usq=AFQjCNGeZw6F8cNQfiT-LgEgD9lr87RAmw&bvm=bv.53760139,d).

**Sim é no amarelo** Porquê Amarelo? - Sim, é no amarelo. [Online] // Certificação FSC. - 23 de 07 de 2013. - <http://www.simenoamarelo.pt/1261/certificacao-fsc.htm>.

**Smith William F. e Hashem Javad** Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais [Livro]. - [s.l.] : AMGH Editora Ltda, 2012.

**Smurfit Kappa** Smurfit Kappa Group. - Barcelona : [s.n.].

**Sociedade Ponto Verde** Sociedade ponto verde [Online] // Ponto verde. - 2013 de 06 de 26. - [http://www.pontoverde.pt/5\\_2\\_banco\\_imagens.php](http://www.pontoverde.pt/5_2_banco_imagens.php).

**SPVNET** SPVNET [Online] // Documentos - Retomadores. - 23 de 07 de 2013. - <http://www.spvnet.net/documentos.asp?idCatDoc=17>.

**TEQUIMAQ** Tequimaq (c) - Máquinas para a Industria Química e Cortiçeira [Online] // TEQUIMAQ. - 20 de 10 de 2013. - <http://www.tequimaq.pt/industria-corticeira.html>.

**Tetra Pak Containers** youtube - “How it’s made” [Online] // “How it’s made” – Tetra Pak Containers. - 2012 de 10 de 22. - <http://www.youtube.com/watch?v=5llrOxRPyOU>.

---

**Tetra Pak international S.A.** Home [Online] // Tetra Pak. - 10 de 04 de 2013. - <http://www.tetrapak.com/pt/>.

**Tetra Pak** Porquê Amarelo? - Sim, é no amarelo. [Online] // Para ajudar o ambiente, coloque as embalagens de cartao da Tetra Pak no Ecoponto Amarelo.. - 23 de 07 de 2013. - <http://www.simenoamarelo.pt/1261/certificacao-fsc.htm>.

**Tetra Pak** Relatório de Sustentabilidade 2008-2009 [Relatório]. - [s.l.] : Pancrom Indústria Gráfica, 2009.

UCAL - União das cooperativas abastecedoras de leite de lisboa, U.C.R.L. [Online] // Portugalio. - 22 de 07 de 2013. - <http://www.portugalio.com/ucal-uniao-das-cooperativas-abastecedoras-de-leite-de-lisboa-ucrl/>.

**VELP Scientifica** Analytical Instrumental - VELD scientifica [Online] // Velp. - 26 de 06 de 2013. - [http://www.velp.com/en/products/lines/3/stirring\\_line](http://www.velp.com/en/products/lines/3/stirring_line).

**Vilão Regina [et al.]** Relatório do Estado do Ambiente 2012 [Relatório]. - [s.l.] : Agência Portuguesa do Ambiente, I.P., 2012.

**Voith** Voith [Online] // Tissue. - 01 de 10 de 2013. - <http://www.voith.com/br/mercados-e-setores-de-negocios/papel/tipos-de-papel/papel-tissue-12787.html>.

**Wu Chao-Hsinung e Chang Hwa-Shan** Pyrolysis of Tetra Pack In Municipal Solid Waste [Entrevista]. - 2001.

**Zalewska Sergio** O processo de refino da celulose [Online] // O processo de refino da celulose. - 07 de Maio de 2013. - <http://www.tecnicaindustrial.net>.

**Zortea Rafael Batista** Análise dos custos para a reciclagem das fibras de papel das embalagens Tetra Pak em Porto Alegre [Relatório]. - Porto Alegre : [s.n.], 2001.

**Zuben Fernando Von e Neves Fernando Luiz** Reciclagem do Alumínio e Polietileno presentes nas Embalagens Cartonadas Tetra Pak. [Relatório].

# *Anexos*



## **ANEXOS**

ANEXO A - Agitador e Placa de Aquecimento .....	127
ANEXO B – Características do destroçador de papel.....	131
ANEXO C – Ensaio Realizados para a Seleção de uma Estrutura Auxiliar de Separação por Via Húmida.....	133
ANEXO D – Fotos da Reciclagem de embalagens da Tetra Pak®.....	135
ANEXO E – Características do Forno Rotativo .....	139
ANEXO F– EDP Tarifa do Gás Propano.....	141



## ANEXO A - Agitador e Placa de Aquecimento

A) *Catálogo da Placa de Aquecimento:*



**ARE**

Heating plate		Aluminum alloy
Heating plate dimensions	mm	∅ 155
	(in)	∅ 6.1
Stirring speed rpm		up to 1200
Stirring volume L		up to 15
Temperature regulation °C		Ambient to 370
Overtemperature protection		•
Counter reaction		
Dimensions (WxHxD)	mm	165x115x280
	(in)	(6.5x4.5x11.0)
Weight	Kg	2.6
	(lb)	(5.7)
Power Supply		115 or 230 V
Power		630 W

## B) Catálogo do Agitador:



ES



BS

Stirring speed rpm		from 50 to 1300	from 50 to 2000
Stirring volume L		up to 15	up to 25
Maximum viscosity mPa*s		1,000	10,000
Maximum torque Ncm		17	75
Maximum shaft diameter mm		8.5	8.5
Counter reaction			
Dimensions (WxHxD) mm		80x160x200	80x215x196
	(in)	(3.1x6.3x7.9)	(3.1x8.5x7.7)
Weight	Kg	1.7	2.8
	(lb)	(3.7)	(6.2)
Power Supply		115 or 230 V	115 or 230 V
Power		35 W	60 W

<http://www.velp.com/en/>



Tabela 41 – Características da Placa de Aquecimento e do Agitador.

<b>MODELO</b>	Velp Cientifica Stirrer Type BS
<b>VELOCIDADE DE ROTAÇÃO</b>	50 a 2000 rpm
<b>GAMA DE TEMPERATURAS</b>	50 a 370 °C
<b>DIÂMETRO DO RESERVATÓRIO</b>	14 cm
<b>DIÂMETRO DA VARETA</b>	7 mm
<b>POTÊNCIA</b>	690 W



## ANEXO B – Características do destroçador de papel

### a) Destroçador em Estrela

Inicialmente foi utilizado o destroçador em estrela utilizado numa empresa, para a trituração de papel das primeiras experiências laboratorialmente.

#### Características:

- Potência: 7.5 >> 75 cv
- Capacidade (ton/H-M3):0.5 >> 5



Figura 82 – Destroçador em estrela, utilizado para triturar as embalagens que sofreram separação por via húmida laboratorialmente.



Figura 83 – Imagem do equipamento - Triturador (TEQUIMAQ)..

**b) Moinho Fellner + Ziegler**

Moinho utilizado para a trituração das embalagens d Tetra Pak® aquando da valorização energética utilizada no forno rotativo, presente nas instalações do CVR.



Figura 84 - Moinho FELLNER + ZIEGLER (CVR, 2013).

Na seguinte imagens está ilustrada a grelha utilizada para a trituração das embalagens, optou-se por este tipo de espaçamento, dado não ser muito aconselhado colocar os resíduos de embalagens, nomeadamente derivada a presença de folhas de alumínio. Podendo entrar num processo de fusão, dada a superfície de contato ser elevada.



Figura 85 – Grelha de 30 mm utilizada para a trituração das embalagens (CVR, 2013).

## ANEXO C – Ensaio Realizados para a Seleção de uma Estrutura Auxiliar de Separação por Via Húmida.

Após realizados ensaios, no âmbito da Unidade Curricular Integradora VIII foi verificado que o 4 ensaio foi o mais eficiente, embora o terceiro tenha sido o único capaz de separar as fibras de cartão da água. Procedeu-se ao desenvolvimento do equipamento, à escala laboratorial, com base numa junção destes dois ensaios.

### Ensaio 1

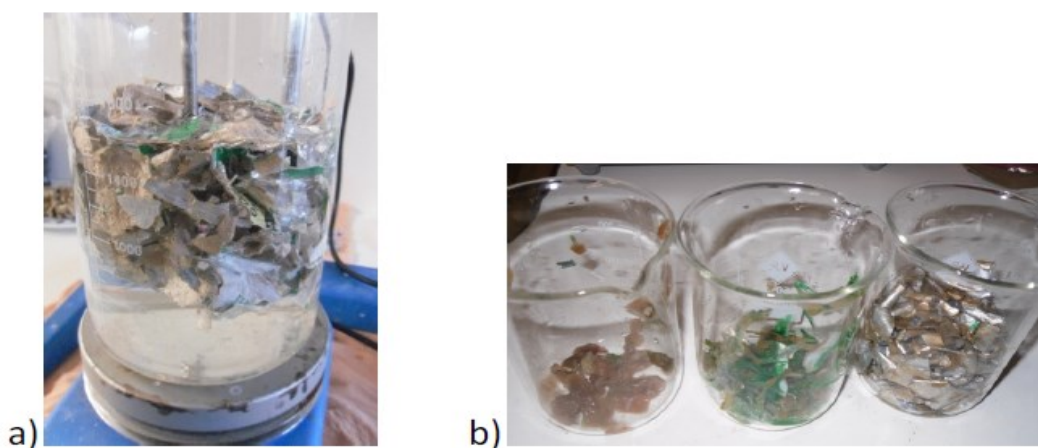


Figura 86 – Ensaio 1: a) Reservatório com o banho de água e b) Reservatórios com as diferentes frações de papel, plástico e alumínio, respetivamente.

### Ensaio 2

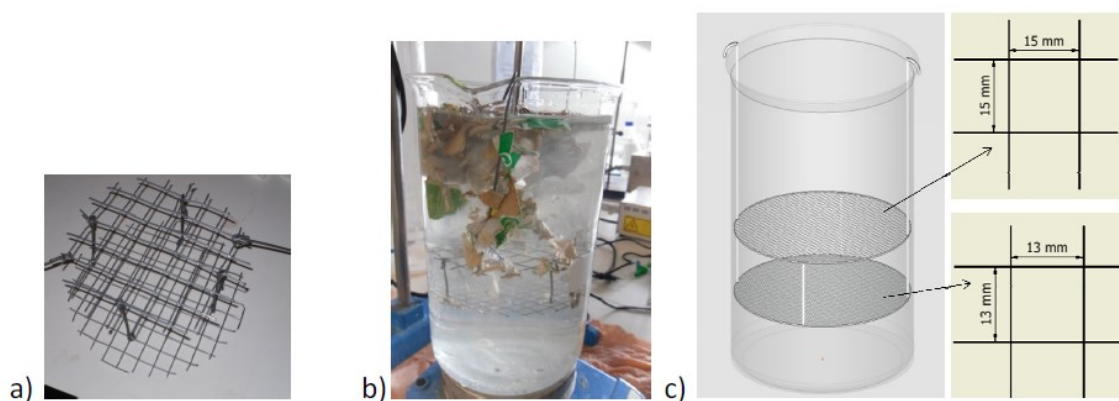


Figura 87 - Ensaio 2: a) Conjunto de 2 redes, com diferente granulometria, b) Embalagens trituradas em banho de água dentro do reservatório e c) Desenho ilustrativo da estrutura de redes no reservatório.

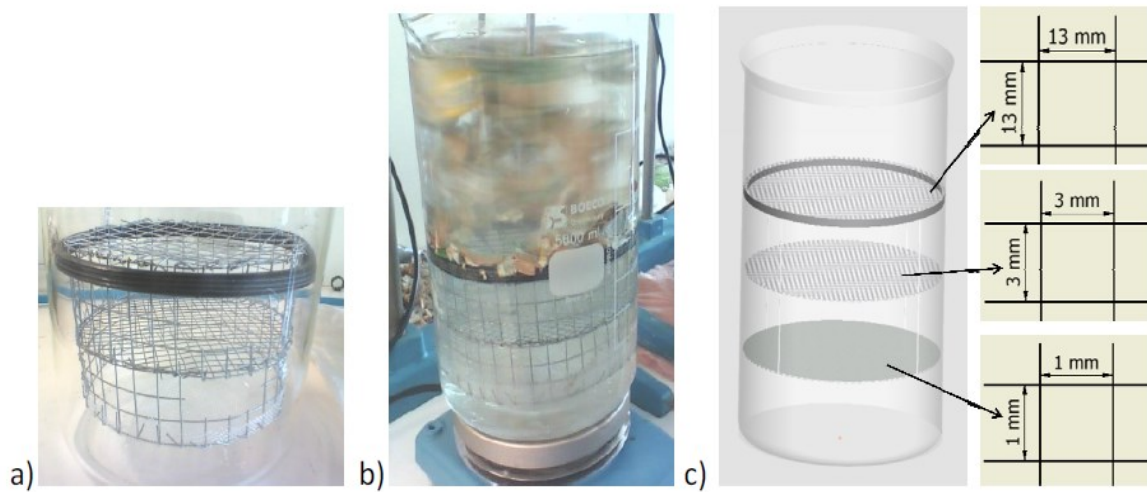
**Ensaio 3**

Figura 88 - Ensaio 3: a) Conjunto de 3 redes, com diferente granulometria, b) Embalagens trituradas em banho de água dentro do reservatório e c) Desenho ilustrativo da estrutura de redes no reservatório.

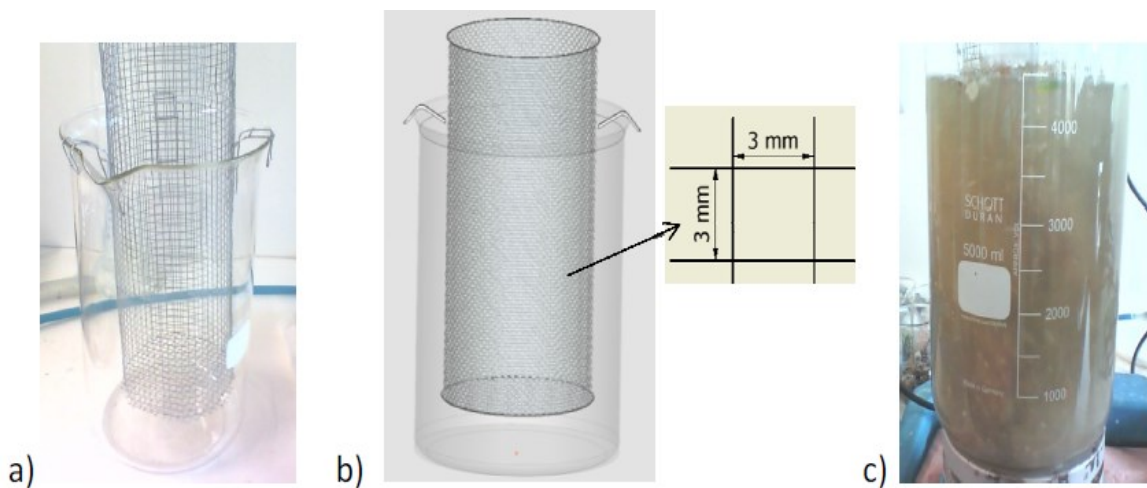
**Ensaio 4**

Figura 89 - Ensaio 4: a) Estrutura de rede em forma de cilindro, b) Desenho ilustrativo da estrutura de redes no reservatório e c) Embalagens trituradas em banho de água dentro do reservatório.

**ANEXO D – Fotos da Reciclagem de embalagens da Tetra Pak®**

Tabela 42 – Reciclagem mecânica por via húmida de embalagens com envase da Compal.

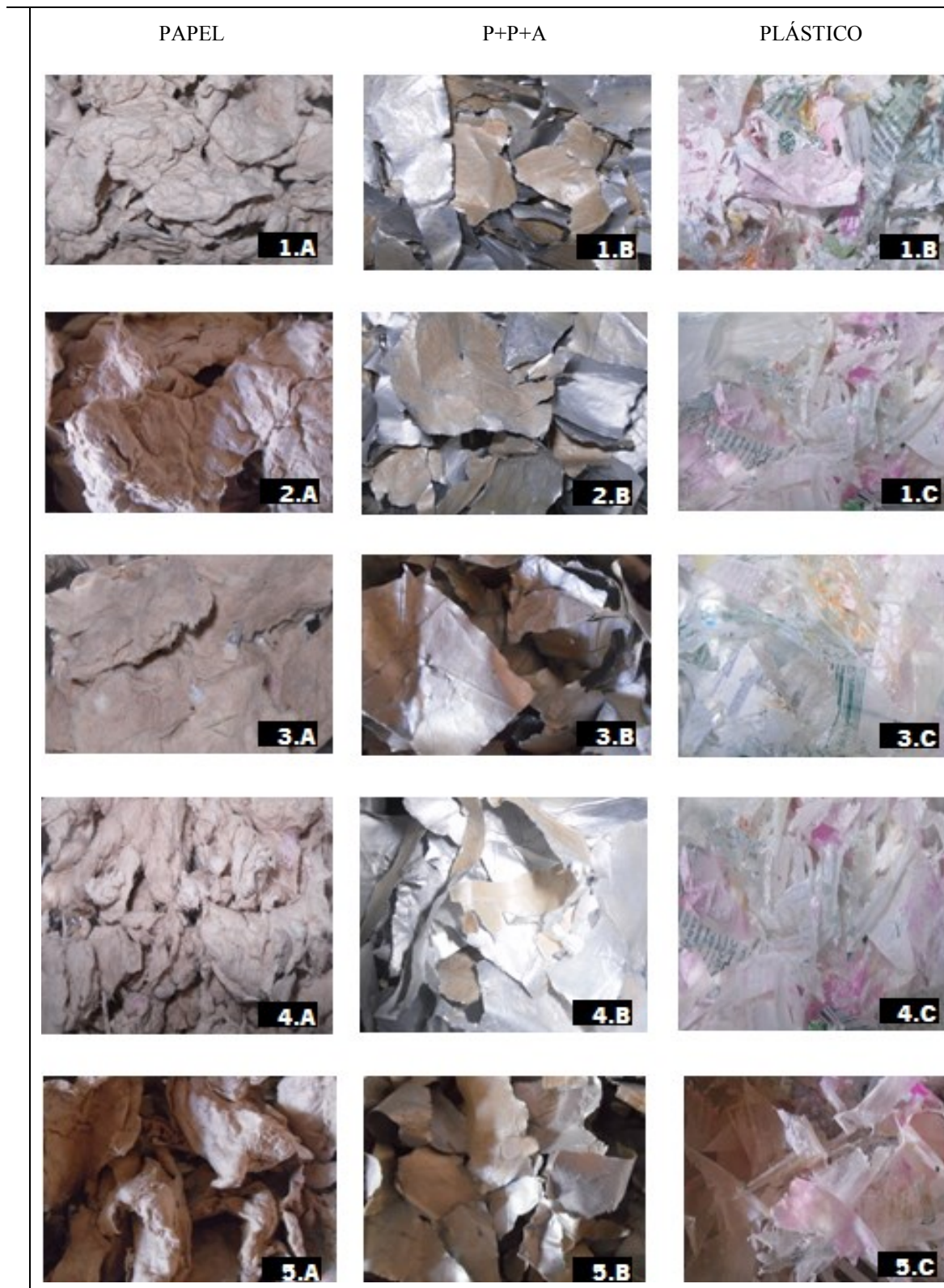
*ENSAIOS LABORATORIAIS COM ENVASE DA COMPAL*

Tabela 43 – Reciclagem mecânica por via húmida de embalagens com envasamento da Agros.

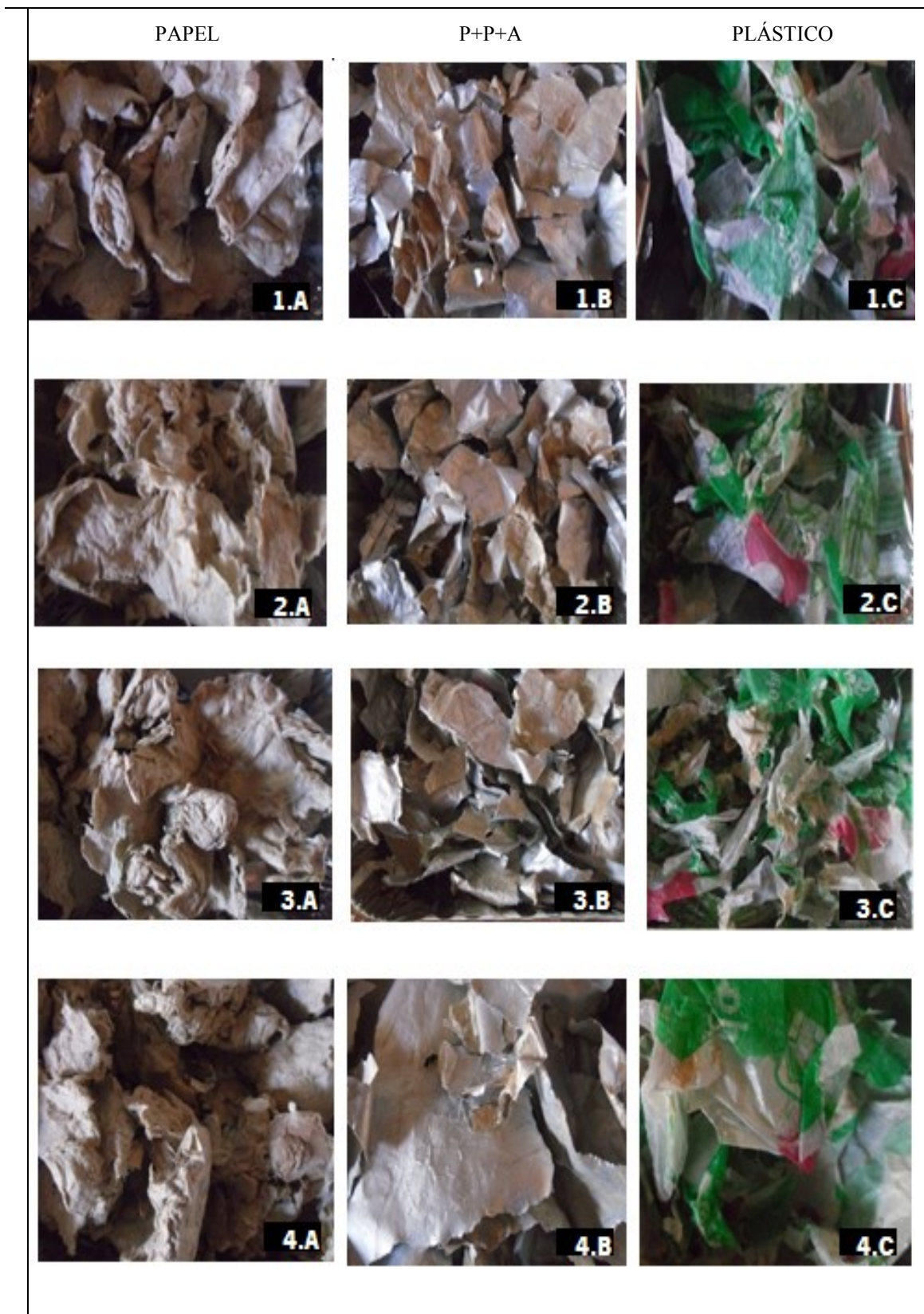



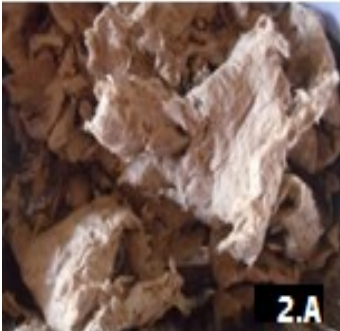
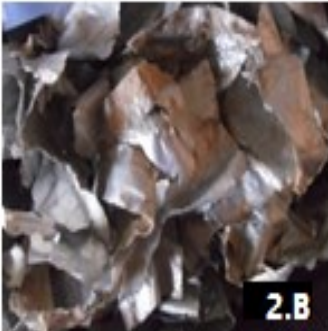





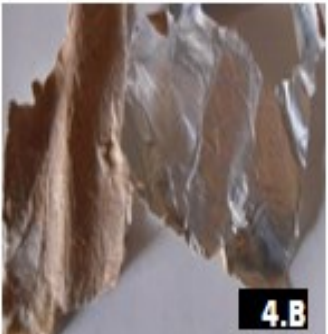

*ENSAIOS LABORATORIAIS COM ENVASE DA AGROS*



Tabela 44 – Reciclagem mecânica por via húmida de embalagens com envasamento da Matinal.

*ENSAIOS LABORATORIAIS COM ENVASE DA MATINAL*

PAPEL	P+P+A	PLÁSTICO
 1.A	 1.B	 1.C
 2.A	 2.B	 2.C
 3.A	 3.B	 3.C
 4.A	 4.B	 4.C



## ANEXO E – Características do Forno Rotativo

Dado ser um forno feito com os parâmetros requeridos pelo CVR, possui as seguintes características.

<b>Forno</b>	<b>Rotativo</b>
Ano de Fabrico	2011
Tensão alimentação	400 V
Potência Instalada	30 KW
Peso	600 Kg
Tipo de combustível	Eletricidade

Características do motor:

<b>Marca</b>	<b>SEW-EURODRIVE</b>
Potência	0,12 KW
Cos $\varphi$	0,69
Peso	10 Kg



Figura 90 – Forno rotativo utilizado nos teste de pirólise (CVR, 2013).



**ANEXO F– EDP Tarifa do Gás Propano****Tarifário**

Tarifa	Consumo anual (m3)	Energia (€/m3) sem IVA	Termo tarifário fixo (€/dia) sem IVA
PropG		3,915	0,060
Prop1	0-83	3,915	0,060
Prop2	83-180	3,820	0,126
	180 a 2.413	3,686	
Prop3	2.413 a 7.239	3,310	0,806

\*

**Notas:**

1. Tarifário em vigor a partir de 01.12.2012
2. Acresce IVA à taxa de 23%.