



Caracterização e separabilidade com base na forma das partículas de polímeros de REEE

Ana Rita Antunes Marçal

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia do Ambiente

Júri

Presidente: Professor António Jorge Gonçalves de Sousa (IST-UTL DECivil)

Orientador: Professora Maria Teresa da Cruz Carvalho (IST-UTL DECivil)

Coorientador: Doutor Pedro Miguel Berardo Duarte Pina (IST-UTL DECivil)

Vogal: Professora Maria da Graça Madeira Martinho (FCT-UNL DCEA)

Julho 2013

Agradecimentos

A todos os que direta ou indiretamente me apoiaram na realização deste trabalho, em especial:

- À Prof. Dr.^a Maria Teresa Carvalho, pela orientação científica, apoio e dedicação;

- Ao Prof. Dr. Pedro Pina, pela orientação na temática da análise de imagem;

- À Eng.^a Ana Marcelo da Recieletric e à Eng.^a Alexandra Fernandes da Renascimento, muito obrigada pelas amostras, pela cortesia, atenção e disponibilidade durante as visitas técnicas.

Os meus sinceros agradecimentos.

Resumo

A utilização de equipamentos elétricos e eletrônicos está a aumentar e conseqüentemente a produção dos seus resíduos (REEE) também. Na Europa, cerca de 40% dos plásticos, que são o segundo maior constituinte dos REEE, são enviados para aterro como conseqüência da separação ineficiente dos plásticos dos contaminantes devido às características do próprio fluxo de REEE: entre outras, ao grau de fragmentação, à coloração escura e à aproximação das densidades dos plásticos nos REEE. Neste contexto, propôs-se investigar se a forma das partículas resultantes da fragmentação de plásticos com densidades idênticas é um fator de diferenciação entre materiais. Foram analisadas imagens de ABS, HIPS e PS provenientes de instalações de tratamento de REEE, em função do calibre, do tipo de plástico e do tipo de fragmentação (com diferentes equipamentos). Utilizaram-se três indicadores morfológicos que descrevem a partícula nas vertentes de comportamento das arestas, aproximação à circularidade e alongamento.

Os resultados indicam que o alongamento das partículas é maior para partículas de menor calibre. As partículas fragmentadas em meio industrial são mais circulares que as fragmentadas em laboratório e nas últimas, a circularidade diminui com o aumento do calibre devido a irregularidades nas arestas. Em termos de materiais, os plásticos ABS e HIPS, quando fragmentados no laboratório não apresentaram nenhuma diferença significativa na sua forma independentemente do REEE que os originou. Sobre os materiais fragmentados em meio industrial, a circularidade das partículas foi a principal característica diferenciadora. Os plásticos, cujas partículas apresentaram maiores diferenças foram o PS proveniente de gavetas de frigoríficos e o PS proveniente de monitores.

Foi proposto também realizar um conjunto de ensaios de carácter exploratório para estudar se a diferença na forma das partículas de diferentes plásticos conduziria à sua separação. A separabilidade dos plásticos foi testada com um equipamento de separação gravítica – Recglass – onde a forma das partículas seria o fator determinante na separação. Para estes ensaios foram utilizadas amostras de misturas binárias de PS e ABS com diversos calibres e composições. Os produtos dos ensaios de separação revelaram sempre um aumento do teor de cada material de acordo com a diferença de forma das partículas e obteve-se um grau de separação concordante com uma potencial separação através da forma. É sugerido portanto a realização de um plano fatorial consistente que permita uma análise estatística sólida das relações entre variáveis envolvidas, no sentido de demonstrar a extensão da possibilidade da separação pela forma.

Deste modo, conclui-se que a forma das partículas relaciona-se de forma diferente com as três condicionantes estudadas (calibre, material e processo de fragmentação) e que existindo indícios de separação através da forma é essencial prosseguir a investigação no sentido de quantificar e validar estatisticamente a influência de todas as variáveis, com o objetivo de otimizar a separação tanto do conjunto ABS/PS, como de verificar a aplicabilidade a outros conjuntos de polímeros de difícil separação atual como o POM/PVC.

Palavras-chave: REEE, plásticos, forma, análise de imagem, separação

Summary

The use of electronic and electrical equipment is increasing and consequently the production of their waste (WEEE) is increasing as well. In Europe about 40% of plastic, the second largest component of WEEE, is sent to landfill as a result of inefficient separation from plastics and their contaminants due to characteristics of the flow itself, for example: the degree of fragmentation, dark coloration and close densities of plastics in WEEE. In this context, it was proposed to investigate whether the shape of identical densities plastics fragmented particles is a differentiating factor between materials. Images of ABS, HIPS and PS from WEEE treatment facilities were analyzed according to size, type of plastic and type of fragmentation (usage off different equipment). Three morphological indicators were used to describe the behavior of the particle regarding their convexity of silhouette, circularity and elongation.

Image analysis results indicate that the elongation of the particles is greater for smaller size class particles. Industrially fragmented particles are more close to circular shape than those fragmented in the laboratory and regarding the later, circularity decreases with increasing of size class due to convex irregularities of their silhouette. The particles of HIPS and ABS, when fragmented in the laboratory, and within each size class, do not present a significant difference from each other in any shape index. Regarding industrial fragmented material, particle circularity was the main distinguishing feature, mainly between PS particles from refrigerator drawers and PS particles from monitors.

It was proposed as well to perform a set of tests with exploratory character to investigate whether the difference in particle shape can lead to separation of different plastics. The separation tests were conducted in gravity concentration equipment - Recglass – where particle shape would be the determining factor in the separation. In these experiments were used binary mixtures of PS and ABS with various compositions and size classes. Separation products were enriched with each plastic according to the difference in particle shape and the separation degree is consistent with shape difference between the two plastics. Therefore, in order to explore separation due to the shape feature, It is suggested the concretization of a sound factorial design experiment which allows a valid statistical analysis on the relationships between all process variables.

Thus, it can be concluded that particle shape relates differently to the three conditions studied (size class, type of plastic and fragmentation process). In the light of the degree of separation accomplished and the validity of these results, it is essential to continue the quantification and statistic validation of the influence of all variables, bearing in mind the goal of optimizing the separation of ABS / PS and the assessment of applicability to other difficult separation plastics such as POM/PVC.

Keywords: REEE, plastic, shape, image analysis, separation

Acrónimos

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

AI – Análise de imagem

Amb3e - Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

ANREEE – Associação Nacional para o Registo de REEE

CRT – Tubos de raios catódicos

EEE – Equipamentos elétricos e electrónicos

EM – Estado-membro

ERP Portugal - Associação Gestora de R.E.E.E.

HIPS –Poliestireno de alto impacto

PA – poliamida

PBC - Placas de circuito impresso

PC – Policarbonato

PE - Polietileno

PP - Polipropileno

PPO - Óxido de Polifenileno

PS – Poliestireno

PU - Poliuretano

REEE – resíduos de equipamentos elétricos e electrónicos

RSU – Resíduos sólidos urbanos

RoHS - Restrição de substâncias perigosas

SAN - Styrene acrylonitrile resin

UE – União Europeia

Índice Geral

1.	Introdução.....	1
1.1.	Conceitos chave	1
1.2.	Objetivos e perguntas chave	3
1.3.	Metodologia geral e estrutura da dissertação	4
2.	Caracterização da situação de referência.....	7
2.1.	Gestão de REEE em Portugal.....	7
2.1.1.	Sistema de gestão de REEE	7
2.1.2.	Fluxo de REEE no sistema de gestão.....	11
2.1.3.	Polímeros nos REEE	14
2.2.	Separação de plásticos provenientes de REEE.....	17
2.2.1.	Características gerais dos plásticos	17
2.2.2.	Separação manual	18
2.2.3.	Separação ótica.....	19
2.2.4.	Separação pela densidade.....	19
2.2.5.	Separação pelas características superficiais	20
2.2.6.	Separação pela forma	21
2.3.	Análise de imagem na determinação da forma das partículas	24
2.3.1.	Técnica de análise de imagem.....	24
2.3.2.	Quantificação da forma das partículas	25
2.4.	Síntese da situação de referência	27
3.	Caracterização de plásticos de REEE	29
3.1.	Metodologia	29
3.1.1.	Recolha de amostras.....	29
3.1.2.	Equipamento.....	31
3.1.3.	Metodologia	31
3.2.	Resultados e discussão.....	37
3.2.1.	Análise granulométrica	37
3.2.2.	Análise da forma.....	39
3.3.	Síntese da caracterização de plásticos	56

4.	Separabilidade.....	57
4.1.	Metodologia.....	57
4.1.1.	Seleção de amostras.....	57
4.1.2.	Equipamento.....	58
4.1.3.	Plano experimental.....	59
4.1.4.	Análise dos resultados.....	61
4.2.	Resultados e discussão.....	64
4.2.1.	Ensaio preliminares.....	64
4.2.2.	Regulação dos parâmetros operacionais.....	65
4.2.3.	Ensaio de separação.....	69
4.3.	Síntese da separabilidade de polímeros.....	72
5.	Conclusões e trabalho futuro.....	73
6.	Referências.....	75
	Anexos.....	a
6.1.	Resultados experimentais da análise granulométrica.....	a
6.2.	Resultados experimentais da análise de imagem.....	b
6.3.	Resultados experimentais da separabilidade.....	f

Índice de figuras

Figura II-1: Esquema dos fluxos inerentes ao sistema de gestão de REEE em Portugal (adaptado de (Carvalho (2008))	11
Figura II-2 - Evolução das quantidades (em toneladas) de EEE colocadas no mercado português entre os anos de 2008 e 2011 (ANREEE, 2012b)	11
Figura II-3 - Composição das componentes de plástico em frigoríficos (% peso) (adaptado de Murakami (2001) <i>in</i> (Pascoe (2005)).....	14
Figura II-4 - Fluxo dos polímeros da cadeia de EEE	16
Figura III-1: Etapas da diminuição de calibre - peça original (superior esquerda), após fragmentação manual (superior direita) e após trituração com o moinho de lâminas Retsch RM 2000 (inferior).....	32
Figura III-2: Processo de tratamento da imagem: (superior esquerda) imagem original; (superior direita) imagem em escala de cinzentos; (inferior esquerda) imagem binária com imperfeições; (inferior direita) imagem binária corrigida.....	34
Figura III-3: Índices de circularidade e de forma para figuras geométricas conhecidas.....	35
Figura III-4 - Distribuição granulométrica dos materiais ABS, PS e HIPS fragmentados no laboratório.	38
Figura III-5: Distribuição granulométrica dos materiais ABS, PS e HIPS fragmentados em meio industrial.	39
Figura III-6: Resultado da análise de imagem ao material ABS preto de calibre +5,6-8mm.....	40
Figura III-7- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do ABS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria, da amostra A1.....	41
Figura III-8- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do ABS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria da amostra A2a.....	42
Figura III-9- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do ABS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria da amostra A2b.....	43
Figura III-10- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do HIPS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria da amostra A1.....	44
Figura III-11- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do PS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria da amostra A2a.....	45
Figura III-12- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do PS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria da amostra A2b.....	46
Figura III-13 - Desvio padrão do SL, IC e IF do PS "preto" fragmentado em locais diferentes em função do calibre.	47
Figura III-14- Coeficiente de dispersão do SL, IC e IF do PS "preto" fragmentado em locais diferentes em função do calibre.	48
Figura III-15- Média dos índices (SI,IC,IF) para o ABS das amostras A1 e A2a em função da classe granulométricas.	49
Figura III-16-Média dos índices (SI,IC,IF) para o HIPS das amostras A1 e A2a em função da classe granulométricas.	49

Figura III-17- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para todas as partículas de ABS e HIPS, fragmentados no laboratório em função da granulometria.	50
Figura III-18: Partículas de ABS preto de calibre +4-5,6mm processadas em meio industrial (esquerda) e no laboratório (direita).....	53
Figura III-19- SL do ABS em função do calibre e do processo de fragmentação.....	54
Figura III-20-IC do ABS em função do calibre e do processo de fragmentação.....	54
Figura III-21: Variação do IC do ABS para cada meio de fragmentação, em função do calibre e da solidez (SL).....	55
Figura IV-1: Esquema (à esquerda) e fotografia (à direita) do equipamento de concentração gravítica utilizado (adaptado de (Dias and Carvalho, 2012)).....	59
Figura IV-2: Metodologia de avaliação dos parâmetros ótimos de separação de polímeros	61
Figura IV-3: Esquema do processo de concentração gravítica com as características da alimentação e dos produtos.....	62
Figura IV-4- PS "cristal" com calibre +4-5,6mm no produto superior (à direita) e inferior (à esquerda) dos ensaios no Recgalss com ângulo com a horizontal de 15°, velocidade 0,075m/s e altura de alimentação de 16cm.	64
Figura IV-5: Recuperações dos plásticos PS e ABS em função do ângulo com a horizontal (granulometria +4-5,6mm, composição PS:ABS 36%:64%, altura de alimentação de 16 cm e velocidade da tela de 0,075 m/s).	65
Figura IV-6: Taxa de concentração de PS e ABS obtidos em função do ângulo com a horizontal (com granulometria +4-5,6mm e composição PS:ABS 36%:64%, altura de alimentação de 16 cm e velocidade da tela de 0,075 m/s).	66
Figura IV-7- Recuperações dos plásticos PS e ABS em função da altura de alimentação (com granulometria +4-5,6mm, composição PS:ABS 36%:64%, ângulo com a horizontal de 21° e velocidade da tela de 0,075 m/s).	66
Figura IV-8- Taxa de concentração de PS e ABS obtidos em função da altura de alimentação (com granulometria +4-5,6mm, composição PS:ABS 36%:64%, ângulo com a horizontal de 21° e velocidade da tela de 0,075 m/s).	67
Figura IV-9- Recuperações dos plásticos PS e ABS em função da velocidade da tela (granulometria +4-5,6mm, composição PS:ABS 36%:64%, ângulo com a horizontal 21°, altura de alimentação de 16 cm).....	67
Figura IV-10- em função da velocidade da tela (granulometria +4-5,6mm, composição PS:ABS 36%:64%, ângulo com a horizontal 21°, altura de alimentação de 16 cm).....	68
Figura IV-11: Recuperação e teor de PS e ABS da mistura binária com granulometria +4-5,6mm.....	69
Figura IV-12: Recuperação e teor de PS e ABS da mistura binária com granulometria +5,6-8mm (à direita).....	70

Índice de tabelas

Tabela II-1 - Principais alterações introduzidas com a Diretiva 2012/19/EU (adaptado de(ANREEE (2012a))	9
Tabela II-2 - Catalogação dos REEE de acordo com a legislação presente e futura e as entidades gestoras em Portugal.	12
Tabela II-3 - Rede de recolha de REEE de cada entidade gestora (AMB3E, 2011; ERP Portugal, 2011).....	13
Tabela II-4: Propriedades gerais dos plásticos ABS, PS, HIPS, PP	17
Tabela III-1: Características das amostras recolhida nas instalações da Renascimento.....	30
Tabela III-2: Características das amostras recolhidas nas instalações do grupo Ambigroup	30
Tabela III-3: Características das técnicas e material utilizado em cada etapa do estudo	31
Tabela III-4 - Legenda detalhada da Figura III-4 e Figura III-5.	37
Tabela III-5: Resultado numérico da análise de imagem às partículas numeradas (#) de ABS preto de calibre +5,6-8mm, com a média (μ), desvio padrão (σ) e o coeficiente de dispersão (CD) dos índices calculados.....	40
Tabela III-6- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do HIPS fragmentado no laboratório em função do calibre, da amostra A2a.....	44
Tabela III-7-Os desvios relativos para cada índice (SL,IC e IF) entre ABS e HIPS, fragmentados em laboratório, em função do calibre	51
Tabela III-8: Os desvios relativos para cada índice (SL,IC e IF) entre PS “cristal” os diferentes tipos de ABS, fragmentados em laboratório, em função do calibre.....	51
Tabela IV-1: Média, desvio padrão, coeficiente de dispersão dos índices (SI,IC,IF) para o par com melhor potencial de separação	58
Tabela IV-2: Variáveis operacionais possíveis de controlar no Recglass.	59
Tabela IV-3-Varáveis da alimentação a testar nos ensaios de separação	61
Tabela IV-4: Resultados dos ensaios de separação da fração +4-5,6mm da amostra com composição PS:ABS 36%:64%	68
Tabela IV-5-Média (μ), desvios padrões (σ) e coeficientes de dispersão (CD) da recuperação (η) e teor (t) dos materiais ABS e PS.	70
Tabela IV-6- Diferenças de recuperação e taxas de concentração numa mistura binária com diferentes granulometrias e composições de alimentação	71
Tabela 0-1: Distribuição granulométrica do material ABS e HIPS provenientes da Renascimento (amostra A1).....	a
Tabela 0-2: Distribuição granulométrica do material ABS, PS e HIPS provenientes da Recieletric (amostra A2a).....	a
Tabela 0-3:Distribuição granulométrica do material ABS e PS provenientes da Recieletric (amostra A2b).	a
Tabela 0-4: Média, desvio padrão (DP) e coeficiente de dispersão (CD) dos índices de solidez (SL), de circularidade (IC) e de forma (IF) para os materiais constituintes da amostra A1.....	b

Tabela 0-5:Média, desvio padrão (DP) e coeficiente de dispersão (CD) dos índices de solidez (SL), de circularidade (IC) e de forma (IF) para os materiais constituintes da amostra A2a.	c
Tabela 0-6:Média, desvio padrão (DP) e coeficiente de dispersão (CD) dos índices de solidez (SL), de circularidade (IC) e de forma (IF) para o ABS amostra A2b.	d
Tabela 0-7: Média, desvio padrão (DP) e coeficiente de dispersão (CD) dos índices de solidez (SL), de circularidade (IC) e de forma (IF) para o PS amostra A2b.....	e
Tabela 0-8: Ensaio de afinação dos parâmetros - variação do ângulo.....	f
Tabela 0-9: Ensaio de afinação dos parâmetros - variação da altura de alimentação.....	f
Tabela 0-10: Ensaio de afinação dos parâmetros - variação da velocidade da tela.....	g
Tabela 0-11: Ensaio de separação - Fração +4-5,6mm composição PS:ABS 50%:50%.....	g
Tabela 0-12: Ensaio de separação - Fração +5,6-8mm composição PS:ABS 50%:50%.....	g
Tabela 0-13:Ensaio de separação - Fração +4-5,6mm composição PS:ABS 27%:73%.....	h

1. Introdução

A diversidade de desafios nas vertentes económica, social e ambiental da sustentabilidade é uma fonte de questões que carece de investigação e desenvolvimento de soluções, sendo por isso difícil eleger a área mais adequada para definir uma tese de mestrado no curso de engenharia do ambiente. No entanto, alinhando a vocação pessoal com a crescente produção de resíduos de equipamento elétrico e eletrónico (REEE) e com o aumento das metas de reciclagem a nível europeu, a separação de polímeros provenientes dos REEE foi considerada uma problemática adequada a uma dissertação no âmbito do ramo de tecnologias do ambiente.

1.1. *Conceitos chave*

São apresentadas as definições de alguns conceitos utilizados neste trabalho, de acordo com as mais recentes diretivas europeias relevantes para a temática do REEE.

“«Equipamentos elétricos e eletrónicos» ou «EEE», os equipamentos dependentes de corrente elétrica ou de campos eletromagnéticos para funcionarem corretamente, bem como os equipamentos para geração, transferência e medição dessas correntes e campos, e concebidos para utilização com uma tensão nominal não superior a 1 000 V para corrente alternada e 1 500 V para corrente contínua” *in Diretiva 2012/19/EU* (UE, 2012a)

“«Resíduos», quaisquer substâncias ou objectos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer” *in Directiva 2008/98/CE*(UE, 2008)

“«Resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos» ou «REEE», equipamentos elétricos e eletrónicos que constituem resíduos (...), incluindo todos os componentes, subconjuntos e materiais consumíveis que fazem parte integrante do produto no momento em que este é descartado” *in Diretiva 2012/19/UE*(UE, 2012a)

“«Tratamento», qualquer operação de valorização ou de eliminação, incluindo a preparação prévia à valorização ou eliminação;” *in Directiva 2008/98/CE* (UE, 2008)

“«Valorização», qualquer operação cujo resultado principal seja a transformação dos resíduos de modo a servirem um fim útil, substituindo outros materiais que, caso contrário, teriam sido utilizados para um fim específico, ou a preparação dos resíduos para esse fim, na instalação ou no conjunto da economia.” *in Directiva 2008/98/CE* (UE, 2008)

“«Reciclagem», qualquer operação de valorização através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins. Inclui o reprocessamento de materiais orgânicos, mas não inclui a valorização energética nem o reprocessamento em materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento” *in Directiva 2008/98/CE* (UE, 2008)

“«Eliminação», qualquer operação que não seja de valorização, mesmo que tenha como consequência secundária a recuperação de substâncias ou de energia.” *in Directiva 2008/98/CE* (UE, 2008)

1.2. *Objetivos e perguntas chave*

A situação atual no contexto da gestão, tratamento de REEE e separação dos plásticos está descrita com mais pormenor no capítulo seguinte, mas para entender os fatores que levaram à proposta dos objetivos é necessário ter em mente os seguintes pontos. Os REEE constituem um fluxo heterogéneo de resíduos e para os REEE de pequena dimensão, muitos materiais só podem ser separados para posterior reciclagem após fragmentação (UNEP, 2007). A utilização da triagem ótica, técnica usada habitualmente na separação de polímeros, sofre de algumas limitações devido à coloração escura frequente das partículas a separar (Chancerel & Rotter, 2009) e ao pequeno calibre resultante da fragmentação (Gent, Menendez, Toraño, & Torno, 2011). A densidade é uma propriedade largamente usada na separação dos polímeros mas que não pode ser aplicada na separação de polímeros com densidades aproximadas. Técnicas como a flutuação por espumas têm sido aplicadas com algum sucesso em alguns pares de polímeros mas não em todos (Tsunekawa et al., 2012). Considerando que a forma das partículas é uma propriedade que afeta a maioria dos processos de separação, colocou-se a hipótese de essa propriedade ter um papel mais relevante e ser um potencial fator de diferenciação.

No contexto da gestão e tratamento dos REEE, existem conjuntos de polímeros, por exemplo o par PS¹/ABS² ou HIPS³/ABS, que não são separados em instalações convencionais, focadas em extrair os componentes mais valiosos e/ou perigosos. Estes conjuntos de polímeros são portanto os alvos ideais para verificar se a forma das partículas após fragmentação é um fator de diferenciação e para analisar os efeitos do processo de fragmentação na forma das partículas. Deste modo o objetivo do presente trabalho foi fornecer uma resposta às questões-chave:

- É a forma um fator de diferenciação dos polímeros de REEE com igual densidade para os quais ainda não existe uma solução industrial generalizada, nomeadamente os conjuntos PS/ABS ou HIPS/ABS?

Como a perceção da forma é *a priori* uma realização visual, considerou-se a utilização de uma técnica de análise de imagem para testar essa hipótese, pois permite uma avaliação cómoda e prática com resultados quantitativos praticamente imediatos e com baixa margem de erro (Pina & Lira, 2009).

A utilização da forma das partículas como possível fator de separação parte da resposta à questão “qual o nível da diferença na forma que permite separação?”. Para adaptar esta questão aos recursos alocados a este trabalho decidiu-se abordar a temática da separação numa perspetiva mais imediata. Deste modo colocou-se a segunda questão chave que completa o objetivo deste trabalho:

¹ poliestireno

² acrilonitrila butadieno estireno

³ poliestireno de alto impacto

- Qual o nível de separação obtido num processo de concentração gravítico, considerando a forma das partículas analisadas e certas condições operacionais?

1.3. *Metodologia geral e estrutura da dissertação*

As respostas às perguntas chave deste trabalho foram obtidas utilizando uma metodologia baseada na recolha e estudo de amostras provenientes de instalações de tratamento de REEE – Renascimento, Recielectric e Recipolymers (as últimas do grupo Ambigroup).

A visita às instalações teve como objetivos conhecer o processamento dos REEE e a coleção de amostras de diferentes polímeros e de etapas distintas desse processamento. Da visita às instalações da Renascimento resultou a recolha amostras de polímeros HIPS e ABS, que foram fragmentados e analisados nas instalações do CERENA (IST) para apurar a diferença na forma das partículas de diferentes polímeros sujeitas ao mesmo processo de fragmentação. Na visita às instalações do grupo Ambigroup foram cedidas amostras de diferentes polímeros – ABS, HIPS e PS – de duas etapas distintas do processamento realizado naquelas instalações. Uma das amostras foi posteriormente fragmentada nas instalações do CERENA para permitir comparar o efeito do processo de fragmentação na forma dos polímeros.

Com o intuito de caracterizar as partículas de polímeros de REEE, o material das amostras cedidas que se encontrava inteiro foi fragmentado no laboratório. Foi efetuada uma análise granulométrica através de crivagem para posteriormente ser possível relacionar o calibre com a forma das partículas.

O estudo da forma das partículas foi efetuado com recurso à análise computacional de imagens das partículas, separadas por material, coloração, fração granulométrica e processo de fragmentação.

Para obter uma resposta à segunda questão chave foi selecionada a mistura de polímeros que apresentava maior diferença na forma das partículas e fácil identificação visual. Esta mistura foi sujeita a ensaios de separação com o equipamento Recgalss; este é baseado numa técnica de separação gravítica a seco, onde a forma da partícula pode ser o fator determinante na separação, desde que a densidade e o calibre das partículas sejam idênticos. Na separação foram avaliados os parâmetros operacionais e a influência de parâmetros relativos à amostra.

O produto final do estudo está concretizado no presente texto, organizado de acordo com a sequência das atividades realizadas, nos seguintes capítulos:

- Capítulo I – Introduziu o contexto, a relevância, os objetivos e a estrutura geral do trabalho;
- Capítulo II – É contextualizada e justificada a concentração do trabalho nos polímeros provenientes de REEE; é identificada a problemática da separação de polímeros; são investigadas várias técnicas de análise de imagem para apurar a mais adequada ao estudo; são estabelecidos objetivos específicos e definida a metodologia para os concretizar;
- Capítulo III – Esta secção engloba todo o processo de caracterização da amostra de polímeros de REEE. São identificados os métodos a utilizar e os materiais necessários em todas as etapas, desde a recolha das amostras até à análise de resultados;

- Capítulo IV - Os ensaios de separabilidade estão descritos neste capítulo assim como o desenvolvimento do plano laboratorial e os principais resultados;
- Capítulo V - É feita uma síntese dos principais resultados, expõem-se as principais conclusões do estudo e apresentam-se sugestões de trabalho futuro.

2. Caracterização da situação de referência.

Os objetivos propostos partem da análise da situação atual quer em termos de gestão de REEE em Portugal quer em termos de separação de polímeros provenientes de REEE. Deste modo, é importante apresentar essa gestão e resumir o que tem sido realizado em termos de investigação na separação de polímeros provenientes de REEE.

2.1. *Gestão de REEE em Portugal*

Na sociedade atual os equipamentos elétricos e eletrónicos (EEE) têm um papel preponderante, pois a sua utilização está a crescer substancialmente e os resíduos provenientes destes equipamentos (REEE) acompanham também esse ritmo de crescimento (UE, 2012a). O programa comunitário considera os REEE como um dos domínios-alvo a regular com vista à aplicação dos princípios da prevenção, da valorização e da eliminação segura dos resíduos (UE, 2012b).

2.1.1. Sistema de gestão de REEE

O quadro legislativo dos REEE em vigor em Portugal, ao contrário de alguns países como a Bélgica, Holanda, Suécia ou Dinamarca, só se iniciou com a transposição das diretivas europeias. Em matéria de EEE e REEE a legislação europeia é atualmente baseada em três diretivas chave que abordam as temáticas da produção holística, da restrição de substâncias perigosas e a implementação de sistemas de gestão de REEE:

- Diretiva 2009/125/CE (21 de Outubro de 2009) relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de conceção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia (UE, 2009);
- Diretiva 2011/65/UE (8 de Junho de 2011) relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrónicos (UE, 2011);
- Diretiva 2012/19/UE (4 de Julho de 2012) relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (UE, 2012a).

A Diretiva 2009/125/CE é a sucessora da Diretiva 2005/32/CE (UE, 2009) e prossegue com o objetivo de otimizar o desempenho ambiental dos produtos, conservando as respetivas características funcionais. Esta diretiva apresenta novas oportunidades para o fabricante, o consumidor e a sociedade em geral. A reformulação alarga o âmbito de aplicação a todos os produtos relacionados com o consumo de energia e assegura a harmonização, a nível comunitário, dos requisitos de conceção ecológica para todos os produtos cujo impacto no consumo de energia seja significativo (UE, 2009).

A Diretiva 2011/65/UE, também conhecida como RoHS-2 (Restriction of Hazardous Substances) aborda um dos problemas dos REEE, a presença de materiais perigosos, através do controlo na fonte, de modo a diminuir o risco ambiental da utilização dos produtos e otimizar o sucesso dos sistemas de gestão de REEE com aumento de material potencialmente valorizável e reciclável (UE,

2012a). A sua precedente (Diretiva nº2002/95/CE) exigia que a partir de 1 de Julho de 2006, os novos equipamentos elétricos e eletrónicos colocados no mercado não contivessem chumbo, mercúrio, cádmio, crómio hexavalente, polibromobifenilo e éter de difenilo polibromado (com exceções documentadas). Os novos equipamentos abrangidos foram colocados no mercado até 22 de Julho de 2012. Com as novas restrições, as substâncias não são alteradas mas são especificadas detalhadamente as exceções e limitações de utilização. São também discriminados e explicitados os deveres dos diversos operadores económicos, de forma a melhorar o seu desempenho ambiental e diminuir a divergência na aplicação a nível nacional do princípio da responsabilidade do produtor. Embora estas diretivas contribuam para reduzir as substâncias perigosas contidas nos novos EEE, as substâncias restritas continuarão presentes nos REEE da geração anterior por muitos anos (Schlummer, Gruber, Mäurer, Wolz, & Van Eldik, 2007).

A Diretiva 2012/19/UE veio reformular a Diretiva 2002/96/CE (23 de Janeiro de 2002) no sentido de a atualizar e clarificar. O conceito de EEE é redefinido, sendo concedido um período de adaptação para os novos equipamentos abrangidos até Agosto de 2018. Outra alteração relevante prende-se com a definição das metas de recolha que serão calculadas através da quantidade de equipamentos no mercado nos três anos anteriores. A partir de 2019, as novas metas de recolha implementadas – 85% dos REEE produzidos – têm como alvo a separação de aproximadamente 10 milhões de toneladas (aproximadamente 20 kg per capita), uma quantidade cinco vezes superior às metas atuais (4 kg *per capita*).

Para combater a exportação ilegal de REEE encoberta pelo comércio de “bens em segunda mão”, esta diretiva irá impor aos exportadores a realização de testes e entrega de documentos que garantam a natureza dos seus EEE.

A Tabela 2-1 resume não só alterações mencionadas mas também as respeitantes à burocracia envolvida tanto na catalogação de REEE como na comercialização de EEE.

Tabela 2-1 - Principais alterações introduzidas com a Diretiva 2012/19/EU (adaptado de ANREEE (2012a))

	Antes	Depois	Prazos
Âmbito	Âmbito semiaberto, com produtos de acordo com a definição e funcionalidade descrita no anexo I	Âmbito aberto, incluindo todos os EEE, estando todas as exclusões definidas	A partir de 25 Agosto 2018
Metas de recolha	4 kg/habitante.ano	45% ¹ EEE colocados no mercado nos três anos anteriores	A partir de 25 Julho 2016
		65% EEE colocados no mercado nos três anos anteriores Ou 85% dos REEE gerados	A partir de 25 Julho 2019
Registo e declarações	Cada EM ² tem procedimentos de registo e de declaração específicos	Procedimentos de registo e declaração harmonizados	A partir de 25 Julho 2012
Representante legal	Não considerado	Aquando da exportação para um EM onde o produtor não esteja estabelecido este é obrigado a nomear um representante legal/autorizado, responsável pelo cumprimento desse produtor, nesse EM	A partir de 25 Julho 2012
Categorias	10 Categorias	6 Categorias	A partir de 25 Julho 2018

¹ As percentagens indicadas referem-se ao peso

² Estado membro

A legislação vigente em Portugal resulta da transposição das diretivas anteriores para os seguintes documentos, notando que a Diretiva 2012/19/EU ainda não foi transposta:

- Decreto-Lei n.º 230/2004 de 10 de Dezembro (alterado pelos Decretos-Leis n.º 174/2005 de 25 de Outubro; 178/2006 de 5 de Setembro; 132/2010 de 17 de Dezembro). Estabelece o regime jurídico a que fica sujeita a gestão dos REEE e transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º2002/95/CE e a Diretiva n.º 2002/96/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de Janeiro de 2003, alterada pela Diretiva n.º2003/108/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 8 de Dezembro.

- Decreto-Lei n.º 12/2011 de 24 de Janeiro transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2009/125/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de Outubro, relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de conceção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia.
- Decreto-Lei n.º 79/2013 de 11 de junho transpõe para o quadro legislativo português a Diretiva 2011/65/UE que reformula a restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em EEE.

Segundo este quadro legislativo, a partir de Agosto de 2005 os EEE colocados no mercado tinham de ser provenientes de produtores com um sistema de gestão de REEE licenciado. Esta obrigação pode ser cumprida através da aprovação, pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA) de um sistema de gestão individual ou pela adesão a um sistema integrado. Em Portugal existe um sistema de gestão integrada de REEE gerido atualmente por duas associações – Amb3e (Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos) e ERP Portugal (Associação Gestora de Resíduos), licenciadas desde 2006. Estas entidades encontram-se sujeitas aos princípios e objetivos de gestão estabelecidos no Decreto-Lei n.º 230/2004, nomeadamente a recolha de REEE numa proporção de, pelo menos, 4 kg por habitante e por ano, e o cumprimento de taxas de valorização e de percentagens de reutilização e reciclagem de componentes, materiais e substâncias compreendidas entre 50 e 80%, conforme as categorias de EEE (MAOT, 2004).

Os produtores de EEE estão legalmente sujeitos ao registo de forma a tornar possível o acompanhamento e a fiscalização do cumprimento das suas obrigações estipuladas neste normativo. A nível nacional, foi constituída a Associação Nacional para o Registo de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (ANREEE), licenciada pela APA, com competência para assegurar, organizar e manter o registo obrigatório de produtores de EEE bem como executar todas as atividades conexas, designadamente a classificação de EEE, a verificação das respetivas quantidades, a prestação de informação às entidades públicas e a informação ao público. Os produtores de EEE devem comunicar a esta entidade, o tipo e a quantidade de EEE colocados no mercado, bem como o sistema de gestão de resíduos a que aderiu. As entidades gestoras de REEE atualmente licenciadas são a Amb3e e ERP Portugal.

Portugal faz parte do conjunto de países que optou por um sistema de gestão de REEE concorrencial, isto é, existe uma entidade que gere a informação sobre o tipo e quantidade de REEE referente a cada produtor, a ANREEE, e por sua vez cada produtor é responsável por contratar um dos serviços de gestão existentes que recolham e tratem os resíduos a si alocados. Este sistema está esquematizado na Figura 2-1 indicando o fluxo de informação e materiais que resume o funcionamento da gestão de REEE em Portugal. Este sistema promove a competição entre sistemas de transporte e tratamento, tornando os custos inferiores. Segundo Carvalho (2008), Portugal ainda enfrenta dificuldades específicas na aplicação de responsabilidade individual do produtor, no cumprimento dos objetivos de gestão, sinergias entre entidades gestoras e no reporte da informação.

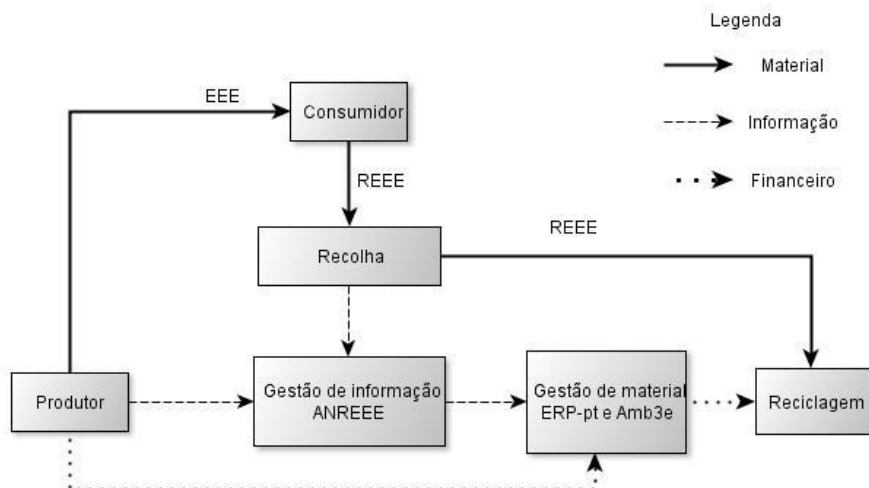


Figura 2-1: Esquema dos fluxos inerentes ao sistema de gestão de REEE em Portugal (adaptado de Carvalho (2008))

2.1.2. Fluxo de REEE no sistema de gestão

Os REEE são considerados pela União Europeia (UE) como um fluxo com tendência crescente em quantidade devido à expansão do mercado de EEE, à redução do período de ciclos de inovação e ao aumento da frequência de substituição dos mesmos (UE, 2012a). Em 2009, propunha-se uma taxa de crescimento de 3 a 5% na produção de EEE, o que levaria à duplicação, em relação a 2009, das quantidades de REEE em 2021 (Eionet, 2009). Segundo dados do Eurostat (Eurostat, 2012) as quantidades de REEE comercializadas têm aumentado nos últimos anos em todas as categorias, com exceção dos últimos dois anos onde se verificou uma diminuição na produção atribuída à crise económica e na aposta em equipamentos cada vez mais leves (WEEEFForum, 2010). Esta dinâmica pode ser observada na Figura 2-2 que representa a quantidade de EEE colocados no mercado português entre 2008 e 2011.

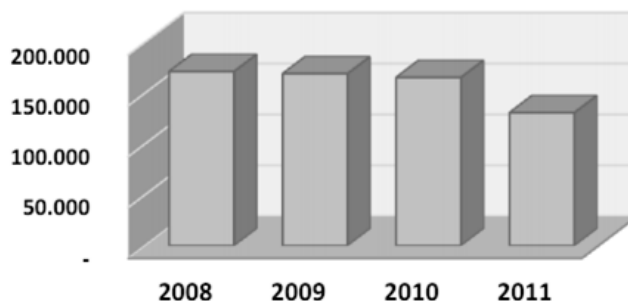


Figura 2-2 - Evolução das quantidades (em toneladas) de EEE colocadas no mercado português entre os anos de 2008 e 2011 (ANREEE, 2012b)

Considerando os diversos fins de utilização dos EEE verifica-se uma grande diversidade na composição do fluxo de resíduos quer em equipamentos quer em materiais e atualmente os resíduos são categorizados em dez tipos de acordo com a sua funcionalidade, segundo o Decreto-Lei n.º 230/2004 (MAOT, 2004). No entanto, como a valorização de um fluxo tão diversificado implica diferentes operações de desmantelamento e tratamento, as entidades gestoras aglomeram estas categorias em cinco fluxos operacionais para fins de tratamento (AMB3E, 2011; ERP Portugal, 2011). Esta diferença na catalogação de REEE contribui para as dificuldades no sistema de gestão de REEE em Portugal identificadas por Carvalho (2008). A Tabela 2-2 apresenta as diferentes categorias utilizadas na legislação portuguesa, pelas entidades gestoras e as categorias futuras a entrar em vigor em 2018. Consegue-se estabelecer um certo paralelismo entre os fluxos atuais das entidades gestoras e as futuras categorias, evidenciando a evolução da legislação na aproximação à realidade operacional.

Tabela 2-2 - Catalogação dos REEE de acordo com a legislação presente e futura e as entidades gestoras em Portugal.

Categorias segundo o Decreto-Lei n.º 230/2004 (MAOT, 2004)	Fluxo operacional da Amb3e (AMB3E, 2011)	Fluxo operacional da ERP (ERP Portugal, 2011)	Categorias segundo as alterações da Diretiva 2012/19/EU (UE, 2012a)
1- Grandes eletrodomésticos	A – Grandes equipamentos	Grandes eletrodomésticos	1- Equipamentos de regulação da temperatura
2- Pequenos eletrodomésticos	B – Equipamentos de arrefecimento e refrigeração	Arrefecimento	2- Ecrãs, monitores e equipamentos com ecrãs de superfície superior a 100 cm ²
3- Equipamentos informáticos e de telecomunicações	C – Equipamentos diversos	Outros	3- Lâmpadas
4- Equipamentos de consumo	D – Lâmpadas (D1- fluorescentes tubulares; D2- geometria diversa)	Lâmpadas	4- Equipamentos de grandes dimensões (com qualquer dimensão externa superior a 50 cm)
5- Equipamentos de iluminação	E – Monitores e televisores (CRT)	Monitores e televisores	5- Equipamentos de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm)
6- Ferramentas elétricas e eletrónicas			6- Equipamentos informáticos e de telecomunicações de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm)
7- Brinquedos e equipamento de desporto e lazer			
8- Aparelhos médicos			
9- Instrumentos de monitorização e controlo			
10- Distribuidores automáticos			

Em termos de equipamentos, na UE calculou-se que em 2005 na composição em peso do fluxo nas várias categorias 85% pertencia às atuais categorias de “(1) grandes eletrodomésticos”, “(4) equipamentos de consumo” e “(3) equipamentos informáticos e de telecomunicações” (por ordem decrescente) (Huisman et al., 2007). Noutra escala e mais recentemente, em Portugal, foram recolhidos em 2011 55779ton de REEE, das quais as categorias “(1) grandes eletrodomésticos”, “(3) equipamentos informáticos e de telecomunicações” e “(2) pequenos eletrodomésticos” são as líderes em peso (APA, 2013).

A recolha e tratamento de cada componente deste fluxo dependem das suas características de portabilidade e da presença de componentes com tratamentos específicos (como os CRT nos monitores ou os gases nos frigoríficos ou lâmpadas). Deste modo as empresas gestoras, no sentido de garantir a meta de recolha e uma economia de escala sustentável, disponibilizam quatro tipos de recolha de REEE discriminados na Tabela 2-3.

Tabela 2-3 - Rede de recolha de REEE de cada entidade gestora (AMB3E, 2011; ERP Portugal, 2011).

Amb3e	ERP PORTUGAL
Recolha de proximidade ao utilizador	
Ponto electrão	Depositrão
Recolha juntos dos distribuidores	
Atendendo às especificidades das instalações dos operadores da distribuição em território nacional, estes disponibilizam soluções técnicas, equipamentos de receção e armazenagem de REEE, com a volumetria e a mobilidade adaptadas às necessidades de utilização dos espaços por parte da distribuição.	
SMAUT – Sistemas Multimunicipais, Intermunicipais	
Pontos de recolha constituídos essencialmente por operadores dos SMAUT e câmaras municipais e em alguns casos por instalações de grandes produtores de REEE.	
Centros complementares	
Centros de receção - locais abertos ao público, com condições de infraestrutura e recursos humanos com capacidade para assegurar a receção dos REEE, tratar da sua gestão operacional e da gestão administrativa do processo.	Operadores privados - rede de acesso aos REEE abrangente em termos de tipologia de REEE e cobertura geográfica que complementa o alcance e eficiência do sistema de recolha dos SMAUT e dos Distribuidores.

O desmantelamento e pré-tratamento têm como função separar os materiais de interesse e preparar as cada material para a valorização. Substâncias perigosas (gases refrigerantes ou lâmpadas fluorescentes) ou valiosas (Placas de circuito impresso - PBC) devem ser retiradas antes de qualquer tratamento mecânico para possibilitar a reutilização, garantir uma remoção segura e diminuir as perdas de materiais valiosos (Schluep et al., 2009).

Por norma, a triagem e desmantelamento são operações feitas manualmente onde são retirados todos os materiais que apresentem facilidade de remoção, nomeadamente, cabos elétricos, borrachas, placas eletrónicas, metais ferrosos e não ferrosos, baterias, condensadores (Almeida, 2011). A diminuição de calibre e a libertação de materiais é realizada através de trituração mecânica para nas etapas seguintes ser possível a separação dos metais ferrosos, como o ferro e dos metais não ferrosos como o cobre, o alumínio e o aço inox, habitualmente concretizada através de técnicas eletromagnéticas, sendo por vezes acompanhada também por remoção manual (Marcelo, 2013; Schluep et al., 2009). Os materiais não metálicos são posteriormente separados entre si (Almeida, 2011; Marcelo, 2013).

Durante o tratamento há que garantir uma adequação do produto final às necessidades e requerimentos dos processos de valorização, o que nos REEE é um desafio devido à grande heterogeneidade do tipo e tamanho final de material e potencial contaminação (Schluep et al., 2009).

2.1.3. Polímeros nos REEE

A natureza dos REEE é o reflexo do desenvolvimento tecnológico e industrial e com a diversidade das características deste fluxo seria expectável que a sua composição variasse significativamente ao longo do tempo. Em termos de tipologia de material, a composição tem-se mantido constante com a mesma ordem de grandeza: Metais ferrosos e não ferrosos (± 50 a 60%), plásticos (± 20 a 30%) e vidro ($\pm 4\%$) (DEFRA, 2007; Eionet, 2009; Ongondo, Williams, & Cherrett, 2011). A variabilidade esperada encontra-se então dentro de cada categoria, principalmente nos polímeros utilizados nos EEE - poliestireno (PS), acrilonitrila butadieno estireno (ABS), polipropileno (PP), poliestireno de alto impacto (HIPS), policarbonato (PC), mistura de PC com ABS (PC/ABS), estireno acrilonitrila (styrene acrylonitrile – SAN), poliuretano (PU), poliamida (PA) e polietileno (PE) (Martinho, Pires, Saraiva, & Ribeiro, 2012; Vilaplana & Karlsson, 2008). Por exemplo, existem cinco tipos de plásticos nos frigoríficos, como ilustrado na Figura 2-3.

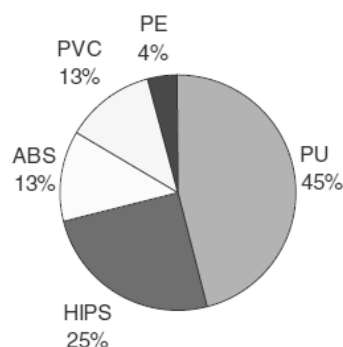


Figura 2-3 - Composição das componentes de plástico em frigoríficos (% peso) (adaptado de Murakami (2001) in Pascoe (2005)).

Em Portugal, Martinho et al. (2012) analisou recentemente a composição de resíduos de pequenos EEE procedendo a uma amostragem, desmantelamento manual, identificação de polímeros e

pesagem dos constituintes. A amostra era proveniente de uma instalação de reciclagem que recebe resíduos do sector doméstico e privado. Em termos de polímeros, os principais resultados indicam que os resíduos de pequenos eletrodomésticos são os que apresentam maior quantidade e diversidade de constituintes plásticos, sendo os PS, ABS e o PP os principais materiais de entre os 21 polímeros encontrados. Os autores também indicam, considerando o processo de desmantelamento e a potencial presença de contaminantes (como retardadores de chama e corantes), que os polímeros com maior potencialidade de reciclagem são o PS e PC/ABS. Almeida (2011), na sua tese de mestrado sobre de tecnologias de processamento de REEE, indica uma quantidade maioritária de polímeros presente nos fluxos E e B (Monitores e televisores; equipamentos de arrefecimento e refrigeração) e também significativa na categoria C (equipamentos diversos) (Almeida, 2011).

O destino dos polímeros provenientes de REEE é orientado pela hierarquia estabelecida pela Diretiva 2008/98/CE: preparação para a reutilização; reciclagem (mecânica e química); valorização energética; eliminação. A reutilização não é usual nos plásticos dos REEE devido à especificidade do design do produto, sendo mais comum em partes metálicas como os motores. A reciclagem é a opção mais interessante porque permite a valorização do material, poupando a utilização de material virgem. O material não qualificado para reciclagem, normalmente contaminado com outros tipos de plástico ou substâncias perigosas são encaminhados com cuidados acrescidos para valorização energética ou eliminação (Schlummer et al., 2007).

Após o pré-tratamento, quando os plásticos resultantes têm um elevado grau de pureza, a reciclagem mecânica é a melhor opção para a valorização de material. A reciclagem mecânica envolve um conjunto de processo físicos como a lavagem e fragmentação de modo a tornar o produto apto para substituir material virgem (APME, 2010; Vilaplana & Karlsson, 2008). Embora a reciclagem mecânica requeira grande pureza do material resultante da separação e pré-tratamento, estão a ser investigadas as propriedades de misturas de polímeros comuns nos REEE – como a mistura ABS e HIPS – no sentido de analisar a sua potencial aplicabilidade (Brennan, Isaac, & Arnold, 2002; Tarantili, Mitsakaki, & Petoussi, 2010).

Quando a qualidade do reciclado não cumpre os padrões de qualidade necessários, a reciclagem química – degradação dos polímeros, por exemplo através de pirólise ou gasificação, em produtos petroquímicos ou monómeros para a polimerização de novos plásticos ou químicos – é a segunda opção (Vilaplana & Karlsson, 2008). Este processo, também conhecido com *feedstock recycling*, é uma opção atrativa para conjuntos de plásticos diferentes pois o produto químico final é muito versátil na indústria química (APME, 2010). A utilização de *feedstock recycling* para a decomposição em monómeros está sob investigação (APME, 2010) pois embora complexa permite uma maior diversidade de aplicações como por exemplo a remoção de componentes tóxicos (Yang, Sun, Xiang, Hu, & Su, 2012) ou de recuperação dos compostos bromados (utilizados nos retardadores de chama) (Boerrigter, Oudhuis, & Tangeb, 2002).

A Figura 2-4 ilustra de forma simplificada o fluxo dos polímeros envolvidos na utilização de EEE. Numa perspetiva global estão indicadas as etapas de ação no sentido de reduzir o consumo de material virgem e fechar o ciclo de material.

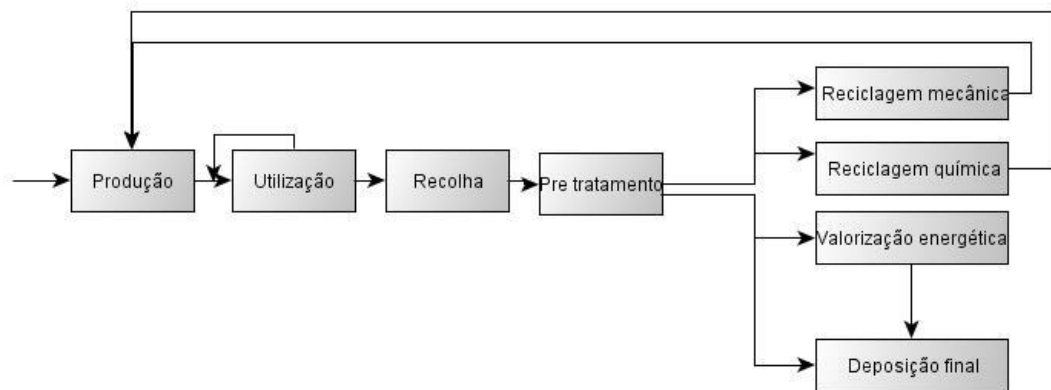


Figura 2-4 - Fluxo dos polímeros da cadeia de EEE

No sentido de diminuir o consumo de recursos virgens nos EEE, a prioridade está em apostar num *design* orientado para a minimização do consumo de material virgem e para a maximização da reutilização e recuperação eficiente como recomenda a Diretiva 2009/125/CE (UE, 2009). A partir do momento em que se tornam REEE as prioridades são as anteriormente mencionadas. Nas fases que envolvem o tratamento e valorização, uma boa rede de recolha é relevante pois é a base dos restantes processos (Schluep et al., 2009). Em termos de investigação é necessário desenvolver métodos de separação mais eficientes para inverter esta tendência e contribuir para o cumprimento das novas metas de reciclagem que se avizinham.

2.2. Separação de plásticos provenientes de REEE

2.2.1. Características gerais dos plásticos

A raiz da palavra “polímero” é grega; provém de *polumeres* – ter muitas partes. Um polímero é uma macromolécula orgânica formada por um conjunto de monómeros (pequenas moléculas) que se repetem e formam grandes cadeias (Billmeyer, 1984). O polímero é o produto puro resultante do processo de polimerização, e por norma são acrescentados aditivos, passando o novo material a denominar-se plástico.

Os plásticos podem ser caracterizados pela sua reação de polimerização – caso envolva alteração da fase física é um termoplástico, se envolver uma reação química é termoendurecível. Os termoplásticos são os plásticos mais comuns e são formados por cadeias poliméricas independentes, e quando a temperatura sobe as suas moléculas afastam-se umas das outras passando a mexer-se facilmente tornando-se maleáveis. Se a temperatura desce, as moléculas restabelecem um novo equilíbrio rígido, podendo este processo acontecer infinitas vezes, tornando possível a reciclagem mecânica (APME, 2010). Os plásticos termoendurecíveis são formados por cadeias com elevada densidade de interligação, criando ligações químicas adicionais numa apertada rede tridimensional. Estas ligações extra são a razão pela qual os termoendurecíveis não podem ser fundidos novamente – o aumento da temperatura provoca degradação química. Estas mesmas ligações conferem uma maior resistência mecânica e maior estabilidade dimensional (APME, 2010).

Os plásticos ABS, PS, HIPS e PP são encontrados em quantidades significativas nos REEE (Dimitrakakis, Janz, Bilitewski, & Gidaracos, 2009; Martinho et al., 2012; Schlummer et al., 2007) pelas apelativas propriedades de fabrico e utilização, sendo que a característica termoplástica permite a sua recuperação por reciclagem mecânica. São apresentados na Tabela 2-4 algumas das propriedades destes plásticos.

Tabela 2-4: Propriedades gerais dos plásticos ABS, PS, HIPS, PP

Propriedade	ABS	PS	HIPS	PP
Massa volúmica (g/cm^3) ¹	1,02-1,04	1,04-1,09	1,04-1,1	0,902-0,906
Índice refrativo (nd_{25}) ¹	-	1,59-1,60	-	1,49
Resistência à tração (psi) ¹	3500-6200	5000-12000	1500-7000	200-700
Constante dielétrica (1000 ciclos) ¹	2,4-4,5	2,4-2,65	2,4-4,5	2,2-2,6
Ângulo de contacto com a água ($^\circ$)	83,7 ²	86,3 ²	-	102,01 ⁴
Tensão crítica superficial (mNm^{-1})	42,7 ²	43 ²	43 ³	30,05 ⁴

1- (Billmeyer, 1984); 2- (Fraunholz, 1997); 3- (Pascoe, 2005); 4- (DiversifiedEnterprises, 2009)

Observa-se na Tabela 2-4 que o PP se diferencia dos restantes polímeros através da sua densidade inferior à da água e que, entre os restantes polímeros, as características que mais diferem de uns para os outros são a resistência à tração e a constante dielétrica.

No que diz respeito aos plásticos mais frequentes, o estireno é o monómero constituinte do poliestireno (PS), um termoplástico que pode ser convertido em produtos acabados ou ser utilizado na composição de outros plásticos (APME, 2010). Na sua forma original, o poliestireno é translúcido e extremamente processável; e quando é copolimerizado com o polímero polibutadieno sintético, ganha propriedades de alto impacto, passando a ser conhecido como HIPS (*high impact poly styrene*). O estireno é também um monómero constituinte do ABS (*Acrylonitrile 1,3-Butadiene Styrene*), um copolímero (constituído por vários polímeros), opaco na forma original e é um termoplástico com ótimas propriedades de utilização como resistência química e térmica, durabilidade mesmo a baixas temperaturas e fácil de ser processado. O polipropileno (PP) é constituído pelo monómero propileno. É um termoplástico rígido e opaco na sua forma original, com aplicações tão diversas que vão desde o embalamento à indústria automóvel.

Os estudos referidos anteriormente apresentam parte da problemática associada à reciclagem de plásticos provenientes de REEE – diversidade de misturas e contaminação (Schlummer et al., 2007; Taurino, Pozzi, & Zanasi, 2010) – o que por sua vez contribui para a colocação em aterro de mais de 40% dos resíduos de plástico na Europa (EuPR, 2012). A própria natureza dos REEE é um obstáculo à recuperação de material por ter fluxos complexos e poucas quantidades de mono-material (Al-Salem, Lettieri, & Baeyens, 2009). Neste sentido, a recuperação de polímeros provenientes de REEE assenta na eficiência de separação dos polímeros desejados dos contaminantes para proporcionar um aumento de qualidade e quantidade que assegure os REEE como fonte de reciclagem de polímeros.

2.2.2. Separação manual

Em Portugal, a fase inicial de triagem e desmantelamento de REEE é sempre manual (Almeida, 2011; Marcelo, 2013; Martinho et al., 2012; Ribeiro, 2009). Embora seja um processo com baixo rendimento económico devido ao envolvimento humano ainda é o mais eficaz na fase inicial da separação de componentes e desmantelamento de grandes equipamentos. Este processo é possível devido à identificação visual no âmbito do sistema de identificação de polímeros da Society of the Plastics Industry.

A triagem manual conduz a produtos com baixa contaminação, mas em contrapartida, pode conduzir a maior quantidade de rejeitado devido à dificuldade de identificação de certos materiais. A triagem manual pode categorizar-se de acordo com os materiais a retirar, a posição do operador e o movimento do tapete, dos seguintes modos (Piedade & Aguiar, 2010):

- Triagem positiva/negativa consiste em retirar do tapete os materiais alvo (triagem positiva) ou indesejados (triagem negativa).
- Triagem lateral/frontal refere-se à posição do operador em relação ao deslocamento dos materiais. Na triagem lateral o operador encontra-se ao lado do tapete e retira os materiais para um recipiente ao seu lado ou à sua frente. Na triagem frontal, o operador está colocado

no topo do tapete e recolhe os materiais antes de estes caírem. Este último tipo de triagem permite uma melhor visualização do material que chega e uma melhor postura na recolha, mas é efetuado mais como triagem de controlo.

- Triagem sequencial/em contínuo. No modo contínuo a velocidade de alimentação do material no tapete é constante e os operadores trabalham com o tapete em movimento. A triagem sequencial envolve cargas de materiais que são triadas pelos operadores a um ritmo variável e são substituídas quando os materiais-alvo tiverem sido retirados. Este tipo de triagem possibilita uma operação mais fácil (pois o material encontra-se parado), menos monótona (pois podem ser retirados vários materiais) e permite dispor de instalações mais compactas.

2.2.3.Separação ótica

A reação dos plásticos à radiação incidente é também uma forma de os identificar. As tecnologias mais utilizadas para identificar os materiais são os sensores óticos, de transmissão ou fluorescência de raios-X e de infravermelhos. A separação entre plásticos é realizada quando um sensor deteta determinado material e ativa um jacto de ar que o ejeta para fora do fluxo de materiais.

A cor dos plásticos é um fator relevante para a sua separação. Os sistemas de separação ótica utilizam luz visível para separar os materiais pela cor, mas num fluxo tão diversificado como os REEE, não há nenhuma relação específica entre cor e material. A identificação de plásticos negros pode ser feita por infravermelho por transformada de Fourier (FTIR, uma análise laboratorial lenta) mas não por equipamentos portáteis de leitores de infravermelhos cuja vantagem é a rapidez da análise (Chancerel & Rotter, 2009). Os aditivos como corantes ou retardadores de chama são passíveis de identificação por fluorescência de raios-X em plásticos coloridos e negros (Cui & Forssberg, 2007; Menad, Guignot, & van Houwelingen, 2012) e essa identificação é muito relevante visto que existe uma grande quantidade de plásticos com substâncias que impedem a sua reciclagem (Cui & Forssberg, 2007; Schlummer et al., 2007; Taurino et al., 2010).

Os métodos de identificação por infravermelhos e transmissão de raios-X, muito utilizados no tratamento de resíduos sólidos urbanos (Piedade & Aguiar, 2010), tem como condicionantes na sua aplicação eficaz ao fluxo de REEE a presença de plásticos escuros e o calibre necessário para identificação (entre 40 mm e 60 mm segundo Gent et al., 2011), visto que os REEE são fragmentados para aumentar a libertação de materiais (UNEP, 2007).

2.2.4.Separação pela densidade

Dodbiba & Fujita (2004) analisaram o progresso das diversas técnicas de separação de plásticos e indicam que as técnicas desenvolvidas para a separação de minérios podem ser muito úteis, como por exemplo as técnicas de separação gravítica cujo fator de separação é a densidade. Estas técnicas de separação pela densidade são muito utilizadas pelo seu baixo custo de investimento e dividem-se em dois tipos conforme o meio de separação – pode ser usado água ou ar como meio de separação ou um suspensóide (DMS – density media separation) com densidade superior à da água e de densidades intermédia do material a separar.

Na DMS o meio pode ser formado por soluções salinas ou suspensões de partículas muito finas e densas (Kelly & Spottiswood, 1982) e é das técnicas com maior precisão na separação por densidades (Gent et al., 2011). A separação de plásticos por esta técnica tem sido realizada em grande parte com ciclones (Gent et al., 2011), mas nos anos recentes, outros equipamentos têm sido desenvolvidas como o *Multidune* (La Marca et al., 2008).

Multidune, investigado pela equipa de La Marca (2008), é um aparelho de separação de plásticos ainda sob investigação que opera proporcionando um diferencial no movimento das partículas imersas num fluido num percurso irregular. Os resultados preliminares indicam uma possibilidade de separação, estando ainda em estudo os parâmetros operacionais que permitem a melhor separação (La Marca et al., 2008).

Embora com eficiência menor que o DMS, a separação por jigagem também tem sido utilizada na separação de resíduos, incluindo resíduos plásticos, pelo benefício custo-eficiência e granulometria ótima de utilização: 0.5 - 200mm. Jigagem é um processo de separação por estratificação – o leito de partículas é intermitentemente fluidizado através do movimento de um fluido no plano vertical. Por norma, o crivo onde as partículas estão apoiadas está fixo e submerso e impõe-se um movimento alternativo à água, com determinada amplitude e frequência, durante um determinado número de ciclos, criando um leito de jigagem (Kelly & Spottiswood, 1982).

Tsunekawa (2005) testou a separação de PET, PS e ABS provenientes de fotocopiadoras numa jiga de tipo TACUB, fazendo variar a amplitude de pulsação, a frequência e o número total de pulsações. Nas condições ótimas foram obtidas recuperações de 99,8% (PS), 99.3% (ABS) e 98.6% (PET) (Tsunekawa et al., 2005). Na sequência da investigação deste trabalho surgiram modificações na jiga de TACUB e nos parâmetros do processo para a otimização de recuperações. Para plásticos com calibre inferior (0.5-3mm) obtiveram-se teores superiores a 99% de uma mistura de PE e PVC (Hori, Tsunekawa, Hiroyoshi, & Ito, 2009). Tsunekawa et al (2012) desenvolveu ainda uma jiga RETAC com método de extração diferente onde obteve teores de PC e PVC superiores a 99% (Tsunekawa et al., 2012).

2.2.5.Separação pelas características superficiais

Separação electrostática

Quando dois materiais diferentes entram em contacto, ficam carregados electrostaticamente à superfície. Triboeletricidade é a denominação em sentido lato dada a este fenómeno e a separação por este método envolve o carregamento da superfície dos materiais com cargas de sinal oposto e posterior sujeição a um campo elétrico, no qual a diferente trajetória das partículas resulta na sua separação.

Os principais desenvolvimentos desta técnica de separação incidiram na otimização do carregamento das partículas através do aumento do contacto entre elas, utilizando-se, por exemplo, tribo-ciclones em vez de calhas vibratórias (Dodbiba & Fujita, 2004) e na morfologia do campo elétrico onde a

separação acontece (Wu, Li, & Xu, 2012). As séries triboelétricas indicam as diferenças entre as propriedades dos plásticos e a possibilidade de separação. Estas séries são meramente indicativas, já que os aditivos comerciais podem alterar as propriedades superficiais, não existindo uma série triboelétrica definida para os plásticos PE, PET e PP (Wu et al., 2012).

A separação por triboeletricidade é uma técnica promissora na separação de resíduos plásticos, mas ainda é necessário algum desenvolvimento para uma aplicação a nível industrial. As variáveis com influência reconhecida no processo são muitas e referem-se às características das partículas (granulometria, massa, aerodinâmica), às variáveis operacionais (material do equipamento, tempo de carga, velocidade de rotação/frequência de vibração) e ao meio ambiente (temperatura, humidade) (Wu et al., 2012). Para além destes fatores, ainda é necessário considerar que esta técnica depende das características superficiais das partículas e num processo como o tratamento de REEE a contaminação superficial é inerente aos materiais envolvidos, acrescentando um variável difícil de prever e controlar (Shent, Pugh, & Forssberg, 1999).

Flutuação por espumas

A molhabilidade é uma característica da superfície dos materiais que pode ser caracterizada pelo ângulo de contacto com a água. Para além das diferenças inerentes aos materiais esta característica é possível de ser e assim possibilitar a separação seletiva. Isto proporciona à separação por flutuação por espumas uma flexibilidade e utilidade na separação de misturas de plásticos (Shent et al., 1999).

Sobre a flutuação por espumas de plásticos, esta iniciou-se com Saitoh et al. em 1976 com o estudo da separação de plásticos utilizando meios com características seletivas para alterar a superfície dos plásticos de hidrofóbico para hidrofílico. Nos anos seguintes, a flutuação por espumas avançou no sentido de explorar os diferentes reagentes (Fraunholz, 1997), introduzir várias etapas no processo (Shibata et al. 1996) e diversificar os processos que alteram a superfície dos plásticos.

2.2.6. Separação pela forma

Influência da forma na separação

Nas técnicas de separação que envolvem deslocação de partículas, como separação gravítica e a flutuação por espumas, a forma e o tamanho são características que influenciam a eficiência da separação em diferentes graus, conforme o balanço de forças resultantes (Beunder, 2000; Ferrara, Bevilacqua, De Lorenzi, & Zanin, 2000). Estudos de Ferrara et al. (2000) com um ciclone cilíndrico (Tri-Flo) e partículas de formas variadas e conhecidas de ABS indicam melhores separações para partículas mais grosseiras e compactas que para mais finas e alongadas. Pascoe e Hou (1999), utilizando o ciclone cilíndrico LARCODEMS, também estudaram e verificaram a influência da espessura das partículas plásticas na eficiência de separação (Pascoe & Hou, 1999). No entanto, Gent et al. (2009) utilizaram o mesmo tipo de equipamento (LARCODEMS) para ensaios de separação de uma mistura de resíduos plásticos e não constatou nenhuma influência da forma ou espessura na eficiência da separação.

Cui e Forssberg (2007), no seu estudo de caracterização de resíduos fragmentados de monitores de televisão realizaram uma análise quantitativa da forma às partículas resultantes. Os resultados demonstraram uma grande diferença entre a forma das partículas que não pertencem à classe de metais ferrosos, o que vai condicionar a sua separação (Cui & Forssberg, 2007).

Separação pela forma

Embora alguns investigadores (Menad et al., 2012; Sekito, Matsuto, & Tanaka, 2006) afirmem que a separação mecânica é dificultada pela forma heterogénea do material devido ao processo de trituração, outros autores (Beunder, Van Olst, & Rem, 2002; Nakajima, Nakazawa, Sato, & Kudo, 2001) utilizaram essa heterogeneidade como fator de separação. Nakajima et al. (2001) tiraram proveito desta forma heterogénea para separar PET e PVC; utilizando a diferença de resistência à trituração – as partículas de PET dobradas e torcidas eram elevadas por um jacto de ar, enquanto as partículas de PVC (menos aerodinâmicas) eram recolhidas no fundo com uma taxa de recuperação de 100%. No entanto, a utilização de ar na separação de plásticos está condicionada pelas pequenas diferenças na densidade dos plásticos (Nakajima et al., 2001).

Por sua vez Beunder (2002) estudou a deslocação por rolamento de partículas num separador cónico e comparou os resultados de separação para amostras de resíduos de construção e de recolha seletiva de vidro. O separador utilizado consistiu num cone rotativo (10-20rpm) com diâmetros superior e inferior de 2 e 0,8m respetivamente. Os resíduos eram alimentados na parte superior junto à periferia do cone com uma velocidade tangencial igual à da superfície. A recolha é efetuada no fundo do cone em secções correspondentes à velocidade de rolamento das partículas (as que reboavam mais eram menos afetadas pelo movimento do cone e eram recolhidas na primeira secção); e as partículas que aderiam à tela eram removidas antes do final da revolução com uma desincrustador. Em termos de resultados, a madeira era facilmente separável da pedra e resíduos de construção idênticamente arredondados; a separação do vidro não foi bem-sucedida devido à incrustação e consequentes danos na tela que revestia o cone (Beunder et al., 2002).

Também Dias (2011) realizou uma análise da forma de partículas provenientes do rejeitado pesado do tratamento mecânico e biológico, seguido de um estudo de separação com um equipamento de concentração gravítica denominado Recglass de concentração gravítica. Nos componentes analisados (vidro, pedras, metais, plásticos e outros) Dias (2011) observou que as características morfológicas variavam de material para material mas não variavam com o calibre. Em termos da forma dos componentes, as partículas de pedras e tijolo estavam mais próximas da forma circular, enquanto as partículas de vidro exibiam formas mais angulares. Os ensaios de separação com o equipamento de separação gravítico Recglass foram realizados com misturas binárias de composição de 14% em pedras e 20% em vidro. Este método de separação mostrou-se eficiente podendo remover até 60 a 65% das pedras dependendo dos calibre estudados e do pré-processamento da amostra.

2.3. *Análise de imagem na determinação da forma das partículas*

As capacidades quantitativas, reproduzíveis e não destrutivas, em conjunto com o desenvolvimento da qualidade de aquisição de imagem, fazem da análise de imagem (AI) uma técnica apelativa para a caracterização de grandes quantidades de partículas em tempo competitivo quando comparando com outras técnicas (Al-Rousan, Masad, Tutumluer, & Pan, 2007; Instruments, 2012; Lira & Pina, 2009). A utilização desta técnica na determinação da forma das partículas é largamente utilizada na indústria alimentar e farmacêutica, mas as áreas de processamento de minérios e de reciclagem também beneficiam desta técnica principalmente para controlo de qualidade de separação. Com as técnicas de AI, podem desenvolver-se equipamentos de separação baseados na identificação da forma de partículas, tendo portanto um papel a importante no futuro da reciclagem de materiais (Beunder, 2000).

A aplicação de AI no tratamento de resíduos ainda não está muito disseminada. As suas utilizações estão a ser estudadas no âmbito de caracterização de resíduos em geral por Wagland et al.(2012) no âmbito de caracterização de fluxos específicos por Dias et al. (2012). Wagland et al. (2012) dispôs uma amostra de resíduos sólidos urbanos (RSU) de modo a não haver sobreposição de material e fotografou. Com base nessa fotografia aplicou um técnica de análise de imagem com o objetivo de identificação através do *software Erdas Imagine v9.3* e comparou os resultados da composição resultante com os resultados de uma caracterização prévia. Com resultados promissores, esta técnica apresenta uma boa correlação com a análise manual, estando limitada pela sobrestimação de papel e plásticos fílmicos. Dias et al. (2012) aplicou uma técnica de caracterização da forma de sedimentos arenosos desenvolvida por (Pina & Lira, 2009) à caracterização do rejeitado pesado de uma estação de tratamento mecânico e biológico com vista à separação do vidro de embalagem dos restantes contaminantes, conseguindo remover as até 60% de pedras (principal contaminante).

2.3.1. Técnica de análise de imagem

Com uma aplicação tão vasta, não existe uma única técnica de análise de imagem de aplicação universal para a caracterização de partículas; dependendo de fatores como o tamanho das partículas ou a rapidez de resultados desejada, existem abordagens que melhor se adequam ao âmbito do estudo. Dentro das diversas técnicas atualmente utilizadas na indústria e no meio académico, existem uma que se adapta melhor à análise de partículas com calibre na ordem dos 1-10mm e que permite obter quase automaticamente dados sobre a forma – análise de imagem automática (*automated imaging*) (Instruments, 2012).

A técnica de análise de imagem automática é uma técnica direta de alta resolução que permite a captura de imagem de partículas individuais a partir de uma amostra dispersa e a análise das suas características. Independentemente do âmbito de estudo ou do equipamento existem quatro etapas para a aquisição de resultados: exposição da amostra; aquisição de imagem, o seu processamento e extração de informação. A natureza desta técnica requer que a exposição da amostra seja estática ou

dinâmica mas é necessário garantir uma boa dispersão de partículas para a sua identificação individual. Exposições estáticas usam frequentemente uma superfície plana transparente (Instruments, 2012). Na captação da imagem é utilizada normalmente uma câmara digital com uma ampliação adequada que garanta o número de pixels suficientes (Kröner & Carbó, 2013). Os parâmetros envolvidos no processamento da imagem dependem sempre dos requisitos do âmbito do estudo e do tipo de software utilizado.

2.3.2. Quantificação da forma das partículas

A análise da informação é realizada através de modelos matemáticos mais ou menos complexos e a sua solidez é um fator a ter em conta na escolha do método de análise (Al-Rousan et al., 2007). Existem muitos indicadores de forma das partículas, quer em 3-D, quer em 2-D; sendo este último o modo mais frequente (Kröner & Carbó, 2013). A diversidade de indicadores existente advém de não haver nenhum indicador que distinga claramente entre todas as formas possíveis, sendo os mais comuns os que comparam com uma forma de referência e/ou que representem um rácio de duas dimensões da partícula (Pourghahramani & Forssberg, 2004).

Partindo dos três atributos essenciais em qualquer descrição de uma partícula – volume, área e distância entre dois pontos relevantes – há três características que são frequentemente utilizadas na diferenciação de partículas (Al-Rousan et al., 2007; Instruments, 2012; Kröner & Carbó, 2013; Pourghahramani & Forssberg, 2004):

- ❖ Aproximação a uma esfera ou círculo;
- ❖ Relação entre eixos principais;
- ❖ Irregularidade superficial ou periférica.

A aproximação à esfera ou círculo avalia quão perto a forma da partícula (ou a sua projeção em 2 dimensões) está da forma esférica/circular. Os diversos índices são um rácio entre a superfície, área ou perímetro do objeto com os de uma esfera/círculo com características equivalentes. Dependendo da característica usada e/ou do autor, estes índices adquirem diversas denominações, por exemplo, a expressão $\frac{P^2}{4\pi A}$ ou o seu inverso; que compara a superfície A do objeto com a superfície de um disco com igual perímetro P ; é denominada de *roundness* (Al-Rousan et al., 2007) ou *form factor* (Pourghahramani & Forssberg, 2004).

A relação entre os eixos principais é largamente utilizada e é comumente denominada de *aspect ratio* ou *elongation* (Pourghahramani & Forssberg, 2004). Embora seja um conceito simples, a sua forma de cálculo não está uniformizada; questões como: “o denominador deve ser o eixo menor ou maior? Os eixos a utilizar devem ser os de Ferret ou da elipse de Legendre?” impedem que este atributo seja comparável entre estudos diferentes (Kröner & Carbó, 2013).

Por sua vez, a irregularidade da superfície não tem denominações ou cálculos tão variados como os atributos anteriores. É também uma comparação a uma forma de referência, mas em vez de se comparar a uma forma geométrica fixa é utilizado o polígono convexo envolvente (*convex hull*). Em

termos mais leigos é visualizado como a forma de um elástico que envolve a partícula. Este rácio pode ser calculado entre os perímetros – *convex perimeter* - ou as áreas – *solidity* - do objeto e do polígono envolvente (Kröner & Carbó, 2013; Pourghahramani & Forsberg, 2004).

2.4. *Síntese da situação de referência*

A gestão de REEE, já implementada há alguns anos em Portugal irá ser confrontada com desafios mais exigentes que advêm da crescente diversidade e quantidade de REEE e da mudança do contexto legal com a abrangência de mais equipamentos e metas de recolha e reciclagem mais ambiciosas.

Os plásticos são, em peso, o segundo constituinte principal dos REEE, sendo que os mais comuns nos pequenos REEE são ABS, PS, HIPS e PP.

Em termos de separação de polímeros provenientes de REEE, a separação manual é das mais eficientes e é sempre utilizada como primeiro processo de triagem. A separação ótica também é muito utilizada mas as suas limitações ao calibre e coloração das partículas analisadas dificultam a aplicabilidade à separação de plásticos provenientes de pequenos REEE. A separação por densidades permite separar o PP dos restantes, mas embora muito disseminada e com baixo custo de operação, não é eficaz em polímeros com densidades muito aproximadas, como é o caso do ABS/HIPS/PS. A utilização da triboeletricidade é uma técnica de aplicação limitada devido à necessidade de controlar diversas variáveis, nomeadamente, a isenção de humidade na atmosfera de separação. A flutuação por espumas está a ser bastante investigada e é uma técnica promissora para material de calibre reduzido.

A forma das partículas é um fator reconhecido e investigado como influenciador da eficiência de várias técnicas de separação. No entanto, a separação pela forma é um campo em desenvolvimento, tendo sido realizados poucos estudos com este âmbito e, tanto quanto se julga saber, nenhum aplicado aos REEE.

Neste contexto, a análise da forma de plásticos provenientes de pequenos REEE é uma área a explorar de modo a colmatar o conhecimento em termos da sua caracterização e potencial de separação. A separação através da forma está na fase inicial de investigação com estudos que abordam diferentes estratégias.

A técnica de análise de imagem é extensivamente aplicada na caracterização de partículas, proporcionando indicadores que permitem a quantificação das características morfológicas.

3. Caracterização de plásticos de REEE

A caracterização de plásticos provenientes de REEE foi abordada pela avaliação de duas propriedades – a granulometria e a forma das partículas. Ao longo deste capítulo descreve-se o processo de análise destas características: as amostras utilizadas, os indicadores e metodologia selecionados e finalmente a análise dos resultados obtidos.

3.1. *Metodologia*

3.1.1. **Recolha de amostras**

As primeiras amostras, cujo conteúdo pretendidos era ABS e HIPS, foram cedidas no seguimento da visita às instalações da Renascimento. Os técnicos da empresa selecionaram e recolheram algumas peças de polímeros provenientes de REEE após o seu desmantelamento manual e antes da fragmentação. Algumas peças foram excluídas de qualquer processamento posterior, quer por não estarem devidamente identificadas com o código visual de material, outras por serem constituídas por misturas de polímeros (e.g. ABS+PC). Com utilidade para o trabalho foram recolhidos dois lotes: um contendo peças em HIPS (caixas de computadores) e outro em ABS (caixas de computador, estruturas de impressora, caixas de inventário e estrutura de bomba de líquidos); ambos com material nas cores preto e outras (branco, azul, cinzento); este material foi denominado de amostra 1 (A1).

O segundo conjunto de amostras foi recolhido em diversos fluxos operacionais do grupo Ambigroup, conforme a disponibilidade de material – ABS, PS e HIPS de várias cores. As amostras foram denominadas de amostra 2a e b respetivamente (A2a e A2b). Esta recolha foi efetuada de acordo com os fluxos de plásticos existentes nesta instalação. Os lotes recebidos estavam divididos pela cor mas a categoria de plásticos de pequeno REEE, de cor mista, foi um fluxo que se considerou importante manter separado dos restantes.

Uma amostra foi recolhida na fase inicial do processamento – os polímeros já estavam separados do corpo original do REEE e mantinham ainda a sua forma intacta (A2a); outra amostra foi recolhida na fase final do processamento (A2b), já fragmentada num moinho de lâminas e representava o produto final a ser enviado para posterior tratamento noutra instalação.

A recolha de várias amostras teve como objetivo primordial conseguir um conjunto de materiais que permitisse posteriormente relacionar a forma das partículas com o tipo de plástico, a granulometria e a fragmentação.

Com a exceção da A2b que já se encontrava fragmentada, as amostras foram fragmentadas no laboratório do CERENA separadamente de acordo não só com o tipo de plástico, mas também pela cor por duas razões – a investigação da adição de corantes como fator de influência na forma das partículas (dentro do mesmo tipo de plástico) e, nos ensaios de separação de materiais, considerou-

se utilizar a cor como indicativo do material para suprimir a necessidade de outro método de identificação para além do visual.

A Tabela 3-1 e Tabela 3-2 sumarizam as características das amostras recolhidas em ambas instalações, indicando o produto original, a cor dominante e a quantidade recolhida.

Tabela 3-1: Características das amostras recolhida nas instalações da Renascimento

Amostra	Plástico	Cor	Origem	Quantidade(kg)
A1	ABS	Preto	Caixa de computador, impressora	1.326
		Misto	Triturador de papel, regador, arquivador	0.852
	HIPS	Preto	Monitor de computador	1.055
		Branco		0.765

Tabela 3-2: Características das amostras recolhidas nas instalações do grupo Ambigroup

Amostra	Plástico	Cor	Origem	Quantidade (kg)
A2b (já fragmentada)	ABS	Branco/cinza	Impressoras	2.620
		Preto	Monitores	3.113
		Misto	Peq. Eletrodomésticos	4.000
	PS	Branco	Gavetas de frigorífico	1.845
		Preto	Monitores	3.800
		Cristal (transparente e branco)	Gavetas de frigorífico	2.775
		Misto	Peq. Eletrodomésticos	3.044
A2a (não fragmentada)	ABS	Cinza	<i>Router</i>	0.228
		Preto	Monitor, Maquina Café	0.997
	PS	Preto	Monitores	0.228
		Cristal (transparente e branco)	Gavetas de frigorífico	1.039
	HIPS	Branco*	Teclado	0,522

* Quando a recolha de material das instalações da Ambigroup para fragmentação no laboratório não havia disponibilidade de resíduos de HIPS de outra cor sem ser branco.

3.1.2. Equipamento

O equipamento utilizado em cada etapa está identificado na Tabela 3-3 onde estão indicadas as respectivas características.

Tabela 3-3: Características das técnicas e material utilizado em cada etapa do estudo

Função	Técnica	Equipamentos	Outras características
Redução de calibre	Trituração	Guilhotina manual	
		Moinho de lâminas Retsch RM 2000	Crivo de saída com malha quadrada de 10 mm de lado
Divisão da amostra	Divisão em partes iguais	Divisor Jones	
Análise de granulometria	Crivagem mecânica	Bateria de crivos de malha quadrada demarca <i>Prüfsieb</i>	Série de crivos DIN 11.2mm 8mm 5.6mm
		Agitador <i>FRITSCH analysette3 SPARTAN</i>	4mm 2.8mm 2mm
Pesagem		Balança digital <i>AND HF6000G</i>	Precisão +-0.01
Determinação da forma	Análise de imagem	Scanner Hp Scanjet 4850	Resolução dpi=300
		PC (<i>personal computer</i>)	Software Matlab com Toolkit: image analysis

3.1.3. Metodologia

3.1.3.1. Cominuição

As amostras destinadas à redução de calibre foram as A1 e A2b. As peças foram inicialmente fragmentadas com o auxílio de uma guilhotina manual no sentido de se adaptarem ao calibre de alimentação do triturador e posteriormente trituradas para se obterem partículas com diâmetro inferior a 10mm com um moinho de lâminas Retsch RM 2000. As imagens seguintes exemplificam o processo de redução de calibre para uma peça de HIPS branco (onde a régua de 50cm é um indicador da escala e as partículas na imagem inferior estão contidas na área de uma folha A4).



Figura 3-1: Etapas da diminuição de calibre - peça original (superior esquerda), após fragmentação manual (superior direita) e após trituração com o moinho de lâminas Retsch RM 2000 (inferior).

3.1.3.2. Divisão

A quantidade de material obtido excedia a necessária aos passos seguintes. Por esta razão, e para garantir a representatividade da amostra foi utilizado o método de separação pelo divisor *Jones* até se obterem porções de material entre 100g e 200g.

3.1.3.3. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada não só para caracterizar os polímeros em termos de distribuição granulométrica após fragmentação, mas também para classificação granulométrica para posterior estudo da forma por classe de calibre.

O conjunto de crivos foi selecionado com aberturas de malha crescente em progressão geométrica, o que garante a constância dos desvios relativos máximos. A abertura mínima foi definida com base nas limitações do processo de separação a usar posteriormente e a abertura máxima determinada pela malha do crivo de saída do moinho de lâminas (10 mm²). A razão de progressão usada foi 2^{1/2} obtendo-se as seguintes frações granulométricas: -2mm, +2-2.8mm, +2.8-4mm, +4-5.6mm, +5.6-8mm, +8-11.2mm.

A amostra foi crivada a seco, em bateria de crivos mecanicamente agitados com uma amplitude e duração que permitissem às partículas de calibre inferior à malha do crivo a possibilidade de passarem ao infra crivo. Verificou-se que algumas partículas de infra calibre ficavam retidas na borda do crivo (onde a malha quadrada intersectava o limite circular do crivo) e para garantir uma

separação correta foi sempre efetuada uma crivagem manual após a crivagem mecânica. No final, o peso de cada fração foi medido numa balança analítica.

3.1.3.4. *Análise de imagem*

Os métodos e materiais de análise de imagem foram selecionados de modo a se adequarem tanto aos objetivos como às necessidades específicas do presente trabalho, nomeadamente a acessibilidade e custos. O método de análise de imagem compreende várias etapas visando a obtenção e preparação da imagem e posterior análise para obtenção dos índices quantitativos. A utilização de um *scanner* para a obtenção da imagem digital elimina alguns aspetos que poderiam ser causa de tendências indesejáveis como a distância diferenciada entre o objeto e a câmara ou a não homogeneidade na iluminação da amostra (Lira & Pina, 2009). Colocaram-se as partículas de cada material e fração granulométrica sobre o scanner para se obter uma imagem a cores com resolução de 300 dpi, com o cuidado de garantir a não sobreposição entre partículas e a minimização de poeiras. O número de partículas analisado varia aproximadamente entre 200 e 3000, conforme a fração granulométrica.

O *software* utilizado para análise de imagem foi o Matlab com um toolkit de análise de imagem e o algoritmo foi o desenvolvido por Pina and Lira (2009). Um dos requisitos deste algoritmo de análise de imagem é que o seu *input* seja uma imagem binária, pelo que se procedeu à binarização da imagem inicial. Simplificadamente, o procedimento de binarização consiste na transposição das cores da imagem inicial para uma escala de cinzentos e posteriormente para preto e branco através de um corte num limite pré-estabelecido na escala de cinzentos. A transformação para a escala de cinza é feita de acordo com a expressão da equação [1]. A equação [1] representa a relação entre a imagem cinzenta em pixel (Im_{cinza}) e a composição de cor vermelho (R), verde (G) e azul (B) na imagem original. Genericamente, a imagem em escala de cinza é composta por 30% da intensidade da cor vermelha (0,3086R), 60% da cor verde (0,6094G) e 82% da cor azul (0,8200B).

$$Im_{cinza} = 0,3086R + 0,6094G + 0,8200B \quad [1]$$

Após a binarização procede-se a uma correção da imagem. A presença de poeira na superfície do scanner causa por vezes a conexão de partículas adjacentes com conseqüente alteração do seu número e perímetro. A correção da imagem passou por remover através de um algoritmo, as partículas mais finas de poeira, e manualmente desconectar partículas adjacentes e algumas das imperfeições no contorno das partículas. A Figura 3-2 demonstra as etapas desde a captação da imagem até à sua correção. A etapa final consiste na extração das características morfométricas das partículas, tendo sido adaptado ao calibre do material em estudo.

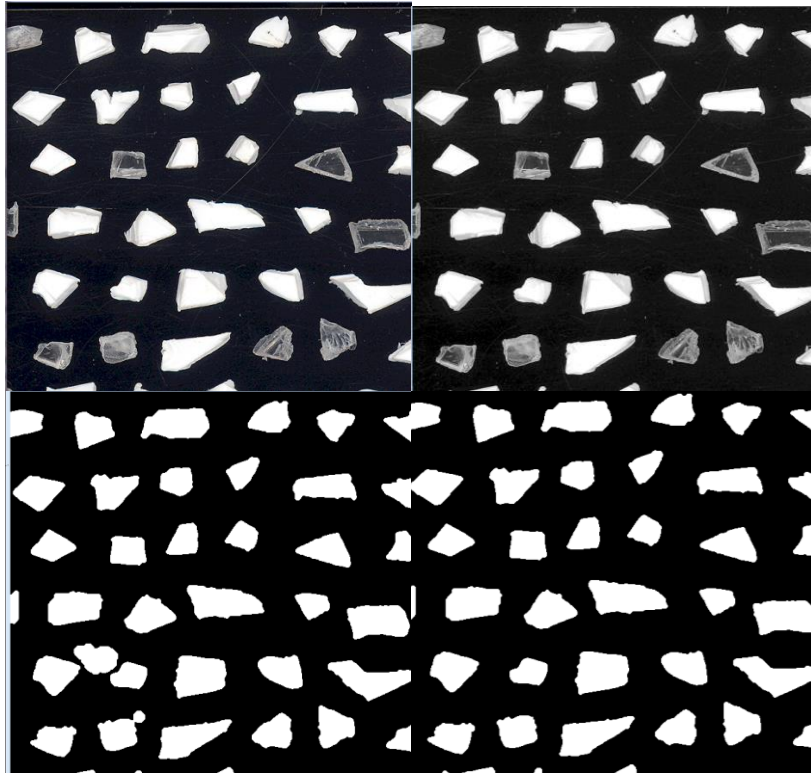


Figura 3-2: Processo de tratamento da imagem: (superior esquerda) imagem original; (superior direita) imagem em escala de cinzentos; (inferior esquerda) imagem binária com imperfeições; (inferior direita) imagem binária corrigida.

De entre os diversos índices caracterizadores de uma partícula foram selecionados três que permitissem em conjunto descrever e revelar as diferenças na forma das partículas, no que respeita à sua circularidade, ao seu alongamento e regularidade superficial. O índice de circularidade (IC), equivalente ao *roundness* ou *circularity* na literatura (Pourghahramani & Forssberg, 2004) traduz a aproximação da forma da partícula a um círculo. O índice de forma (IF) traduz o alongamento da partícula, (por vezes denominado de *aspect ratio*), na sua forma de cálculo mais simplificada. A solidez (SL) representa a uniformidade do contorno, também denominada como *solidity* (Kröner & Carbó, 2013).

A informação obtida com o algoritmo de análise de imagem corresponde aos eixos de maior e menor comprimento (L e l respetivamente), à área (A) e perímetro (p) de cada partícula e à área do polígono convexo envolvente (A_p); permitindo calcular a solidez, o índice de forma e de circularidade através das equações [2] – Índice de circularidade, [3] – índice de forma e [4] – Índice de forma:

$$IC = \frac{4\pi A}{p^2} \quad [2]$$

$$IF = \frac{l}{L} \quad [3]$$

$$SL = \frac{A}{A_p} \quad [4]$$

Como pode ser verificado todos os índices variam entre 0 e 1. O IC é maior quanto maior for a aproximação à forma circular; o IF aproxima-se de 1 quanto menor for o alongamento e o SL atinge o seu máximo numa partícula compacta, i.e. sem concavidades no periferia. Estes índices não são alterados pela variação do tamanho da partícula mas sim pela variação das suas características morfométricas, que altera a área, o perímetro e os eixos maior e o menor; duas formas geometricamente semelhantes com tamanhos diferentes têm os mesmos índices de forma e circularidade, e duas formas com a mesma área poderão ter índices diferentes.

Por exemplo, uma partícula perfeitamente circular terá todos os índices com os valores máximos (1); uma partícula perfeitamente quadrangular terá um IF igual a 1 ($l=L$), mas um IC igual a $\frac{\pi}{4}$ (0,79); uma partícula elipsoide (com relação de eixos 2:1) terá um IC e um IF iguais a 0,80 e 0,50 respetivamente; e uma partícula retangular (com relação de lados 2:1) terá um IC de 0,70 e um IF de 0,50. Para todas as partículas exemplificadas o SL corresponde ao máximo, pois o polígono envolvente corresponde à própria forma. Estes exemplos estão demonstrados na imagem seguinte para se ter uma ideia visual da relação entre o IC e o IF para as várias formas geométricas simples (com SL=1).

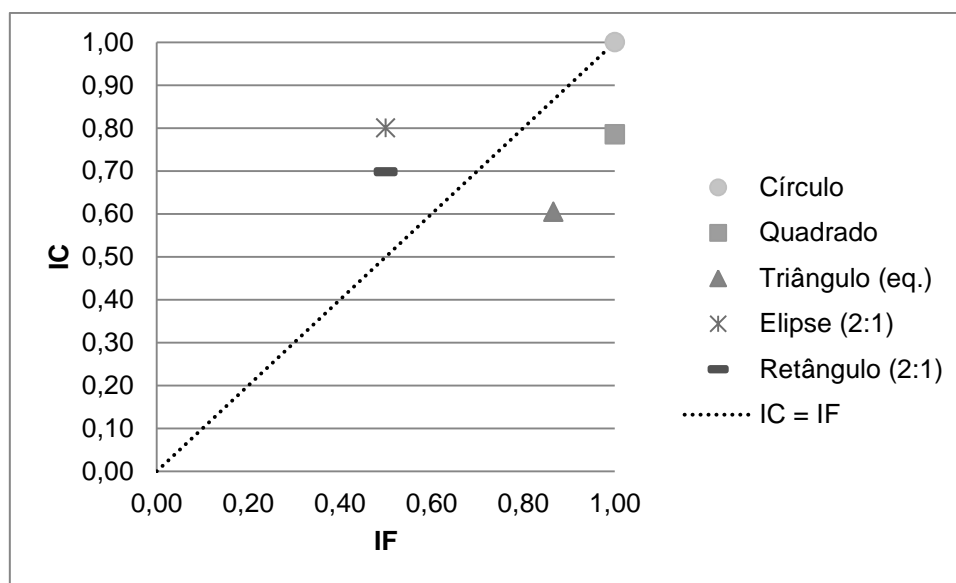


Figura 3-3: Índices de circularidade e de forma para figuras geométricas conhecidas

Os índices SL, IC e IF foram calculados individualmente para cada partícula pertencente a cada material, fração granulométrica, cor ou proveniência e são representados através da respetiva média aritmética (μ). A significância estatística deste valor será analisada pelo desvio padrão (σ) e pelo coeficiente de dispersão (CD; equação [5]) que mede o grau de concentração de valores em torno do valor médio. Para valores inferiores a 0,5 quanto menor o valor de CD, mais representativo é o valor médio (Afonso & Nunes, 2011). A equação [5] indica a relação do CD com a média e o desvio padrão.

$$CD = \frac{\sigma}{\mu} \quad [5]$$

Pode dizer-se que duas partículas são morfologicamente diferentes quando a diferença relativa entre um dos seus índices é superior a um certo limite, i.e., quando existir uma diferença significativa. A determinação desse limite pode partir de parâmetros experimentais ou teóricos, mas em qualquer dos casos, a separação pela forma não é uma área ainda muito desenvolvida e portanto não há na literatura nenhum valor que possa ser considerado como uma diferença significativa. Com o objetivo posterior de testar a separação com base na diferença da forma foi selecionado o valor de 5% e o cálculo desse valor, para todos os índices e todos os calibres, foi realizado através da equação [6] – método de cálculo desvio relativo entre o índice de duas amostras. Esta equação representa o quociente entre o módulo da diferença entre os dois valores (M e m) e o maior valor (M), transformado em percentagem.

$$\Delta = \frac{|M-m|}{M} \times 100 \quad [6]$$


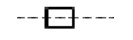



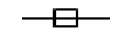










3.2. Resultados e discussão

A totalidade dos resultados obtidos na forma de tabela pode ser consultada nos Anexos A e B; neste capítulo apresentar-se-ão os resultados relevantes.

3.2.1. Análise granulométrica

O primeiro resultado diz respeito à distribuição granulométrica de todos os materiais fragmentados no laboratório – ABS, HIPS e PS, de diversas cores, provenientes de diferentes REEE. A legenda da Figura 3-4 e da Figura 3-5 está ilustrada com mais detalhe na Tabela 3-4. Nestas figuras o ícone representa o material (▲ – HIPS; ■ – ABS; ● – PS), o preenchimento do ícone indica a coloração e o tipo de linha indica a origem do material.

Tabela 3-4 - Legenda detalhada da Figura 3-4 e Figura 3-5.

Legenda	Material	Cor	REEE original	Amostra
	ABS	Preto	Caixa de computador, impressora	A1
		Não preto	Triturador de papel, regador, arquivador	
	HIPS	Preto	Monitor de computador	
		Não preto		
	ABS	Preto	Monitor, Máquina Café	A2a
		Não preto	Router	
	PS	Preto	Monitor de computador	
		Cristal	Gavetas de frigorífico	
	HIPS	Não preto	Teclado	
	ABS	Não preto	Impressoras	A2b
		Preto	Monitores	
		Misto	Peq. eletr.	
	PS	Não preto	Gavetas de frigorífico	
		Preto	Monitores	
		Cristal (transparente e branco)	Gavetas de frigorífico	
		Misto	Peq. eletr.	

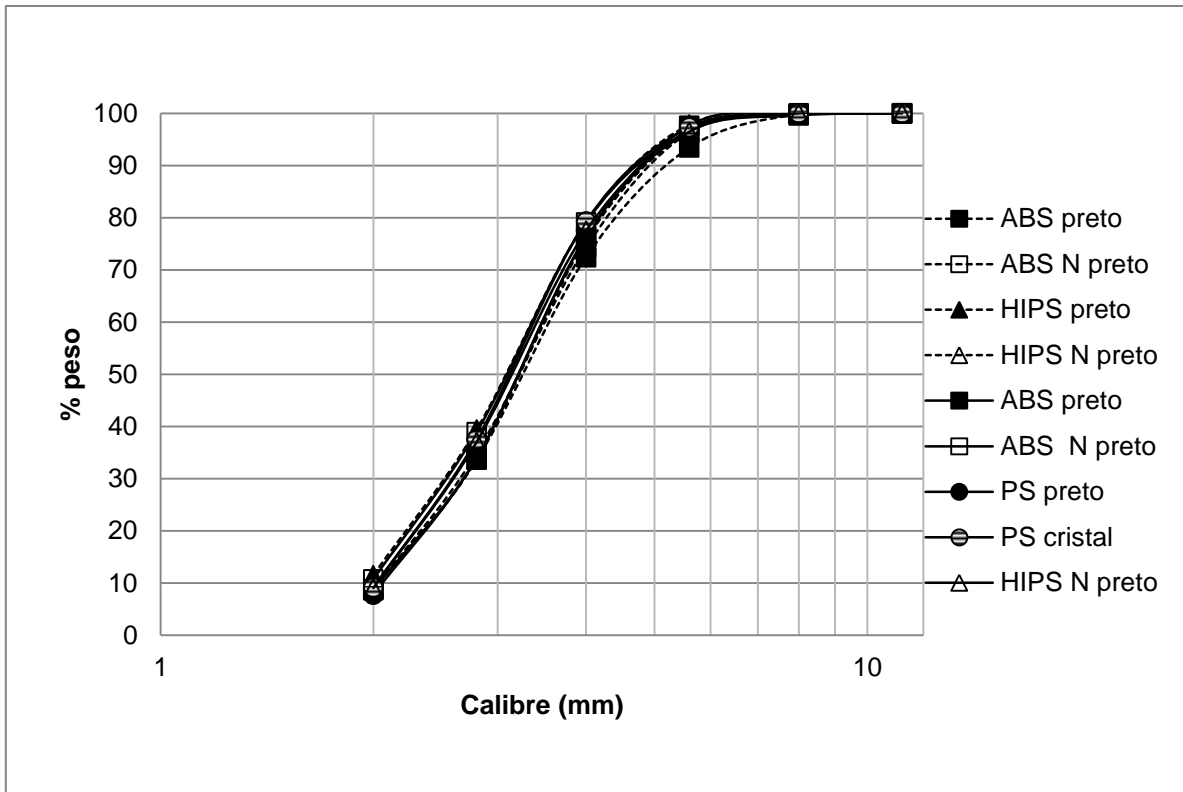


Figura 3-4 - Distribuição granulométrica dos materiais ABS, PS e HIPS fragmentados no laboratório.

Pode observar-se na Figura 3-4 que nenhum dos materiais se destaca quanto à distribuição granulométrica e também a coloração não é um fator de diferenciação quanto à granulometria; i.e., os três plásticos independentemente do seu tipo e origem fragmentam-se de forma idêntica. Aproximadamente 75% em peso do material tem calibre infra 4mm, a quantidade (em peso) em cada classe granulométrica está sempre na mesma ordem de grandeza e a classe dominante é a +2.8mm – 4mm.

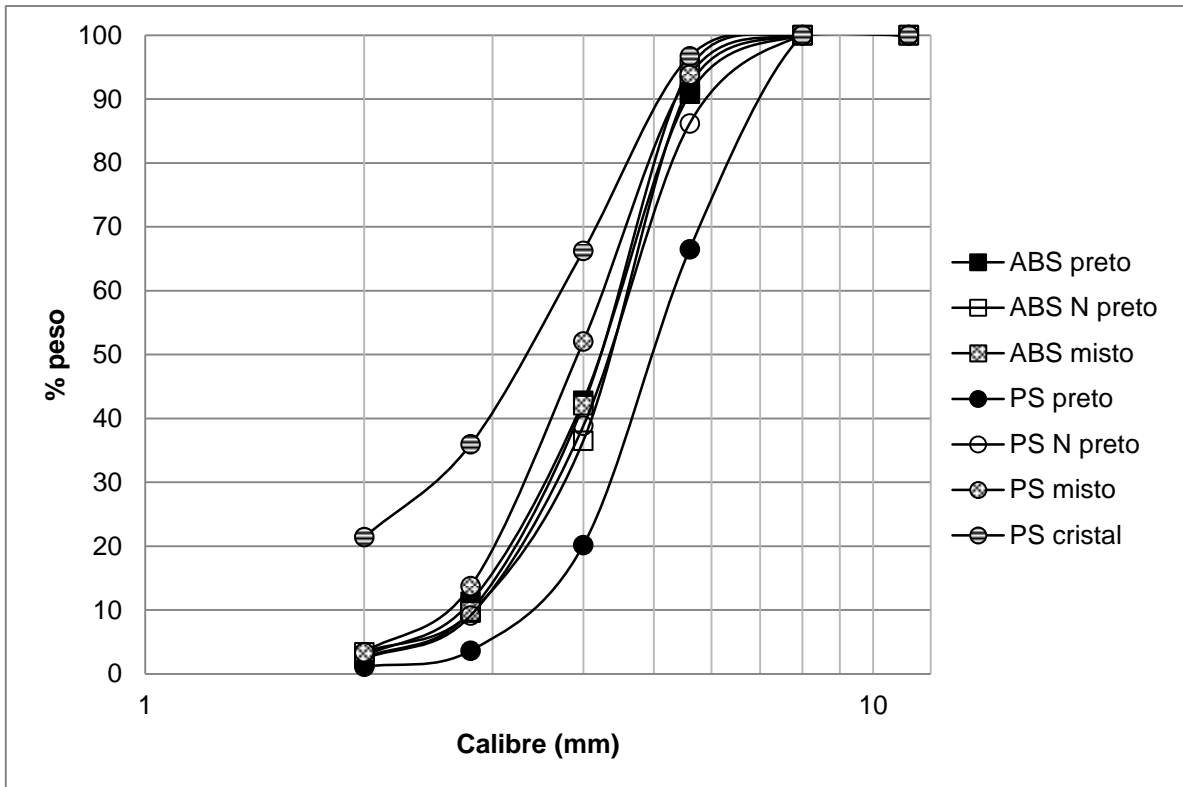


Figura 3-5: Distribuição granulométrica dos materiais ABS, PS e HIPS fragmentados em meio industrial.

Nos materiais processados em meio industrial (Figura 3-5) a distribuição granulométrica apresenta um comportamento ligeiramente diferente; o ABS e o PS apresentam distribuições diferentes entre si e diferentes dos materiais anteriores. Na generalidade, estes materiais apresentam uma constituição mais grosseira; embora não se registre material na classe superior +8mm-11.2mm; existe menor quantidade de material nas classes fina (-2.8mm) e a classe dominante é a +4mm-5.6mm. Enquanto o ABS apresenta um comportamento uniforme independente da cor, a distribuição do PS varia significativamente – o PS “cristal” e o “misto” têm a maioria do material abaixo dos 4mm, enquanto o PS preto tem 80% das partículas acima desse calibre.

3.2.2. Análise da forma

Os índices SL, IC e IF foram calculados individualmente para cada material, fração granulométrica e cor e representadas através da respetiva média aritmética, desvio padrão e coeficiente de dispersão das partículas constituintes da amostra e podem ser consultados no Anexo 6.2. A fração granulométrica superior a 8mm apresentou em todas as amostras um número insuficiente de partículas para obter resultados representativos e portanto foi excluída da análise.

A título demonstrativo a Figura 3-6 apresenta uma das imagens processadas – ABS preto de calibre +5,6-8mm proveniente de monitores de computador – com as partículas numeradas para se fazer o paralelismo com a Tabela 3-5 onde são apresentados tanto o output do *software* como os valores de SL, IC e IF calculados. Pode-se identificar as partículas identificadas com os números #10 e #4 ou #7 com respetivamente maior e menor SL. A partícula #6 destaca-se por ter um elevado IC e IF,

enquanto que a partícula #4 se destaca pelo baixo SL e IC, observando-se efetivamente uma elevada heterogeneidade na forma. As partículas numeradas de #2, #14 e #25 apresentam os menores valores de IF, sendo as mais alongadas.

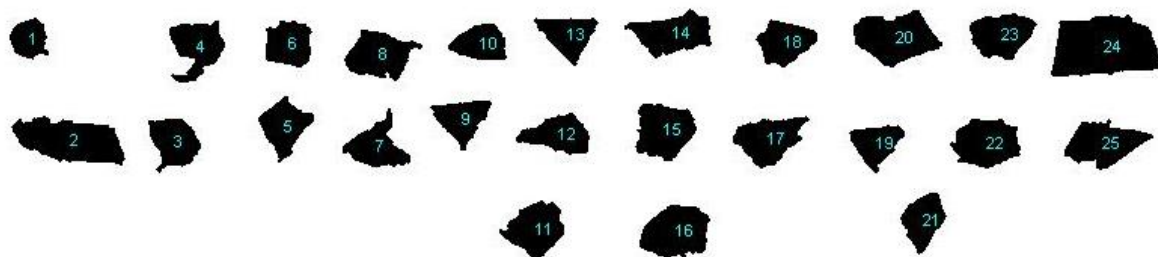


Figura 3-6: Resultado da análise de imagem ao material ABS preto de calibre +5,6-8mm

Tabela 3-5: Resultado numérico da análise de imagem às partículas numeradas (#) de ABS preto de calibre +5,6-8mm, com a média (μ), desvio padrão (σ) e o coeficiente de dispersão (CD) dos índices calculados.

#	Área	Área Envelope	Perímetro	Eixo Menor	Eixo Maior	μ	σ	CD
						0,90	0,68	0,72
						0,05	0,10	0,16
						0,05	0,15	0,22
#	Área	Área Envelope	Perímetro	Eixo Menor	Eixo Maior	SL	IC	IF
1	4519	4892	268,93	74,27	79,72	0,92	0,79	0,93
2	14614	16162	581,53	81,62	234,36	0,90	0,54	0,35
3	7268	8314	363,72	90,61	108,88	0,87	0,69	0,83
4	8217	10691	473,31	104,36	123,07	0,77	0,46	0,85
5	7402	8556	372,40	93,37	111,13	0,87	0,67	0,84
6	6927	7460	326,00	93,77	96,79	0,93	0,82	0,97
7	7354	9526	434,97	98,92	119,18	0,77	0,49	0,83
8	9522	10735	437,80	93,60	137,10	0,89	0,62	0,68
9	6455	7133	360,35	87,86	109,59	0,90	0,62	0,80
10	6162	6379	311,99	73,21	112,74	0,97	0,80	0,65
11	9288	10158	403,75	102,84	120,49	0,91	0,72	0,85
12	7346	8244	385,69	73,10	142,11	0,89	0,62	0,51
13	6585	7223	362,84	87,37	114,31	0,91	0,63	0,76
14	9643	11461	464,16	79,29	167,73	0,84	0,56	0,47
15	10064	10915	411,16	111,48	120,15	0,92	0,75	0,93
16	11108	11834	425,91	102,12	141,09	0,94	0,77	0,72
17	9123	10286	432,48	89,98	141,33	0,89	0,61	0,64
18	7382	7873	343,51	85,08	115,31	0,94	0,79	0,74
19	5863	6386	324,32	81,49	103,96	0,92	0,70	0,78
20	12593	13925	473,45	99,09	169,88	0,90	0,71	0,58
21	6604	7013	328,71	77,32	113,84	0,94	0,77	0,68
22	9884	10817	409,09	95,07	134,23	0,91	0,74	0,71
23	8576	9234	373,34	88,16	128,56	0,93	0,77	0,69
24	21328	22781	624,73	125,32	228,04	0,94	0,69	0,55
25	9850	11251	468,64	84,21	159,51	0,88	0,56	0,53

A análise da forma foi abordada a partir de várias vertentes, sendo que cada vertente compreende uma divisão do presente subcapítulo. Em primeiro lugar apresenta-se uma perspectiva morfológica global das partículas de cada material, considerando separadamente cada coloração e cada amostra (A1, A2a e A2b). Em segundo lugar, compara-se a forma das partículas com o âmbito de comparar os materiais entre si (com o mesmo processo de fragmentação). De seguida, apresenta-se a influência do processo de fragmentação na forma das partículas. Por fim, apresenta-se um exercício de demonstração da relação entre os índices em si.

3.2.2.1. Análise morfológica das partículas para cada material em função do calibre, coloração e proveniência do material

Da Figura 3-7 à Figura 3-12 apresentam-se para cada material os valores médios obtidos para os três índices estudados, oferecendo uma perspectiva morfológica global para cada material. As classes granulométricas estão indicadas pelo seu limite máximo, cada ícone representa um índice e cada tipo de preenchimento do ícone representa a coloração do material.

ABS

No geral, pode observar-se na Figura 3-7 o ABS “preto” (ABS preto) e “não preto” (ABS N preto) fragmentado no laboratório não apresenta entre si diferenças relevantes em nenhum dos índices. Existe uma relação entre o calibre e os índices de circularidade e de forma. O IC decresce com o aumento do calibre, enquanto o IF aumenta com do calibre. O SL é praticamente constante e o material de ambas colorações apresentam valores de SL idênticos.

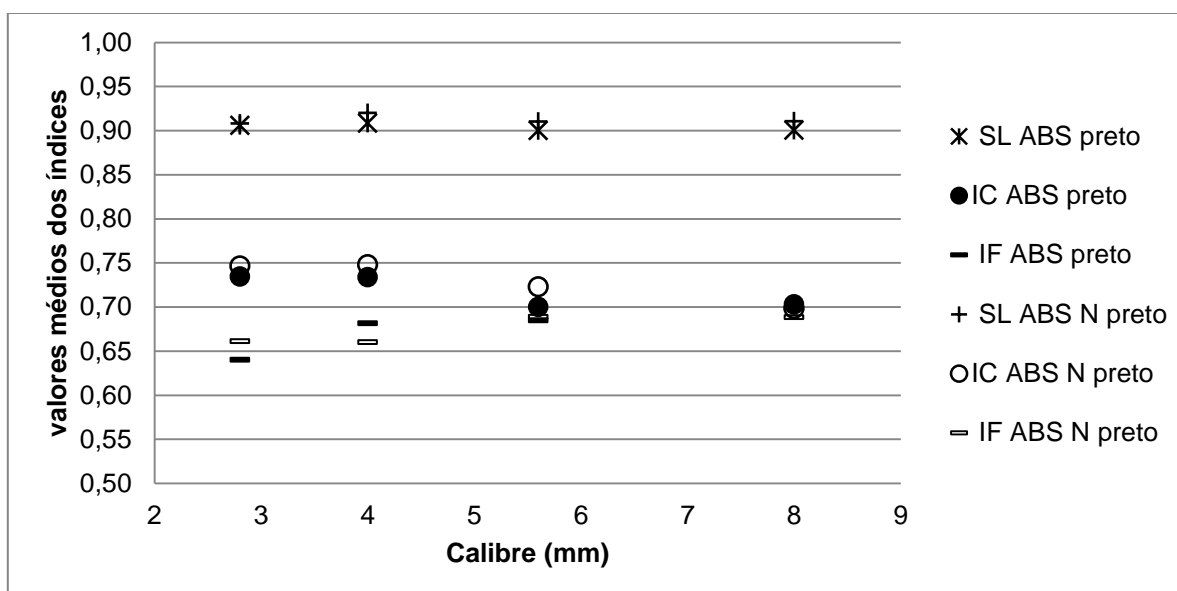


Figura 3-7- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do ABS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria, da amostra A1.

O ABS “preto” e “não preto” fragmentados no laboratório, representado na Figura 3-8, provêm de diferentes REEE do material apresentado na Figura 3-7 (como pode ser confirmado na Tabela 3-4).

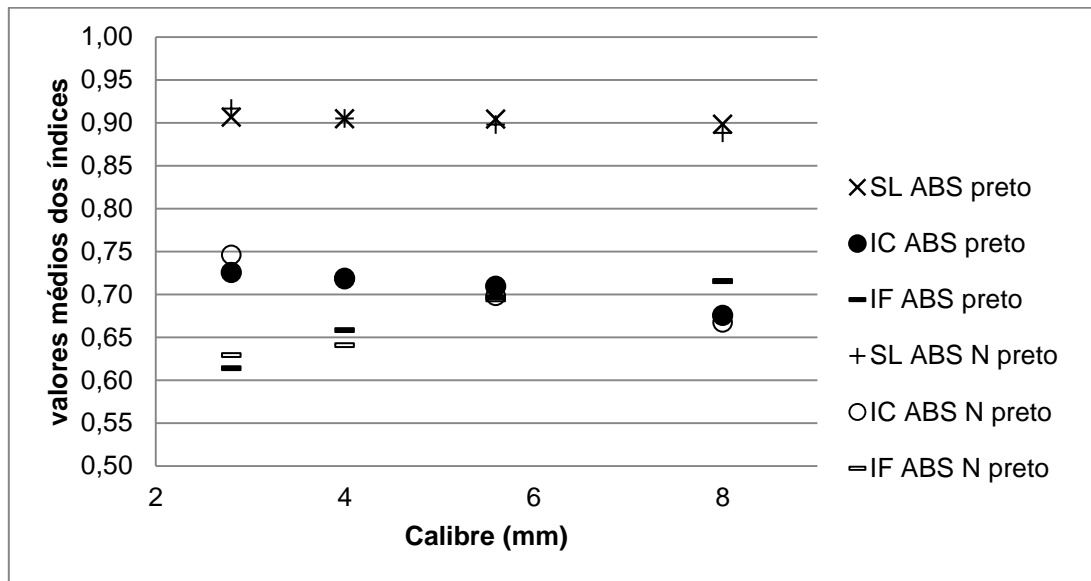


Figura 3-8- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do ABS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria da amostra A2a

À semelhança dos seus homônimos, os índices apresentados na Figura 3-8 não apresentam entre si diferenças relevantes em nenhum dos índices. O material de ambas colorações apresenta a mesma relação entre o calibre e os índices de circularidade e de forma, no entanto, os intervalos de valores dos índices IC e IF são maiores. Comparando com a Figura 3-7 o comportamento dos índices não é alterado quando são consideradas partículas provenientes de diferentes REEE fragmentados com o mesmo equipamento.

Como se pode ver na Figura 3-9 para os materiais ABS “preto”, “não preto” e “misto” fragmentados em meio industrial o SL é da ordem de 0,93, mantendo-se aproximadamente constante independentemente do calibre, sem nenhuma diferença significativa entre os tipos de ABS. O índice de circularidade também não apresenta nenhuma diferença significativa mas apresenta uma relação com o calibre. O IF apresenta o mesmo tipo de relação com o calibre mas num intervalo de valores maior. O IF é o único índice a apresentar uma única diferença significativa (~6%) entre tipos de material na fração granulométrica de +2,8-4mm entre o ABS “preto” e “não preto”.

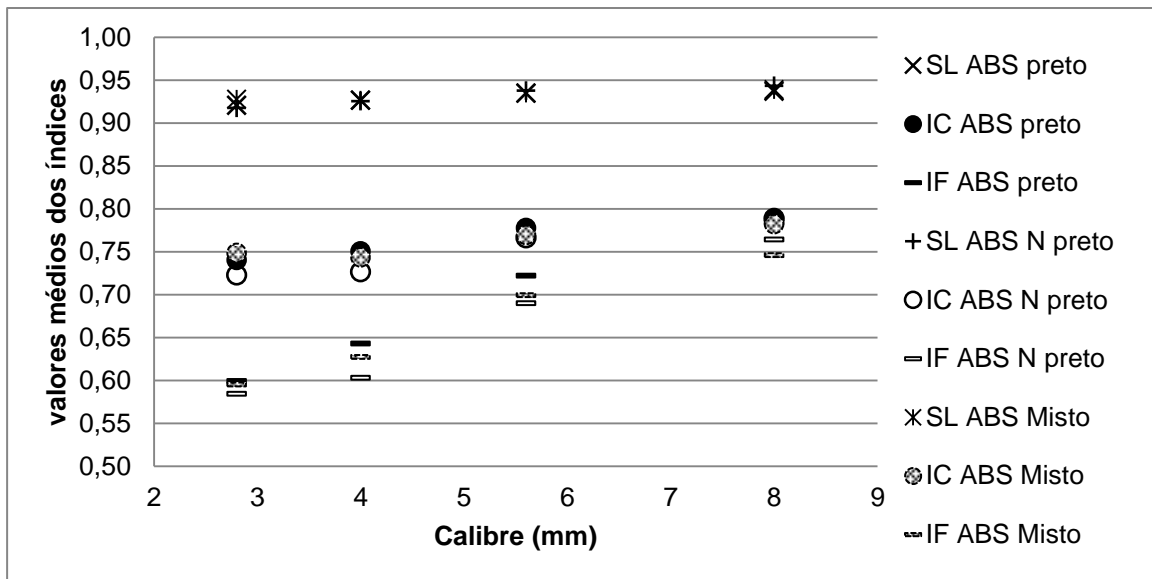


Figura 3-9- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do ABS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria da amostra A2b

Tendo em conta uma exceção (IF na classe granulométrica +2,8-4mm) pode considerar-se que os diferentes tipos de ABS fragmentados em meio industrial têm uma morfometria idêntica, dentro das restantes classes granulométricas. Para o calibre de +2,8-4mm, as partículas de ABS “não preto” são significativamente mais alongadas que as de ABS “preto”.

HIPS

Os índices obtidos para os materiais HIPS “preto” e o “não preto” fragmentado no laboratório estão ilustrados na Figura 3-10. Tal como no caso do ABS, também não apresenta entre si diferenças relevantes em nenhum dos índices.

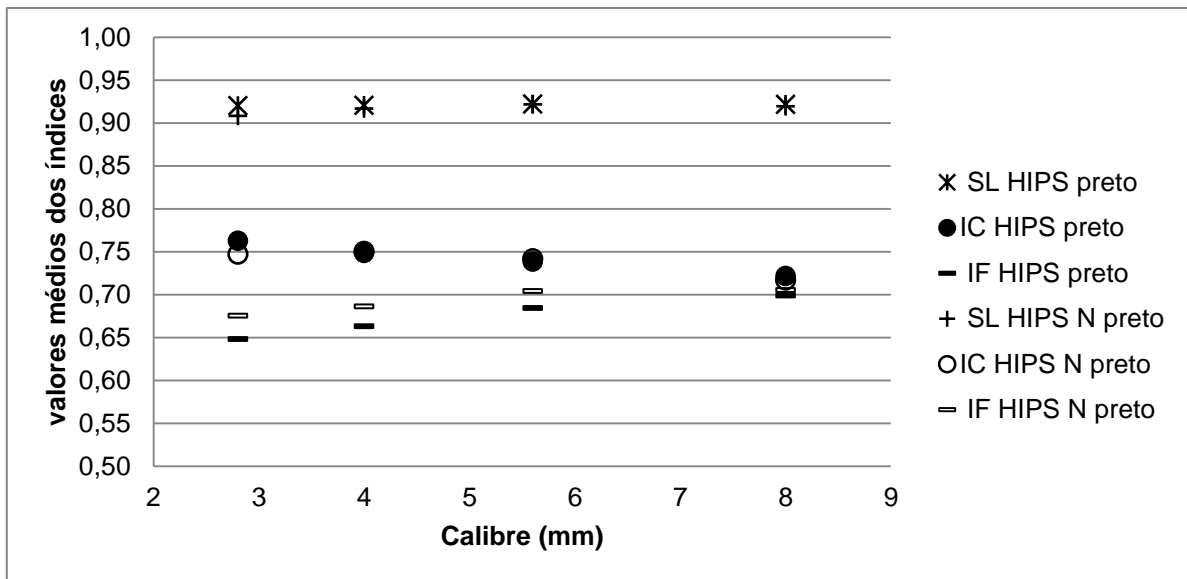


Figura 3-10- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do HIPS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria da amostra A1.

Para o material HIPS proveniente de um teclado das instalações do grupo Ambigroup está apresentado sob a forma de tabela (Tabela 3-6), visto não haver outra coloração para comparar.

Tabela 3-6- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do HIPS fragmentado no laboratório em função do calibre, da amostra A2a.

Calibre (mm)	Média SL	Média IC	Média IF
+2-2.8	0,93	0,76	0,63
+2.8-4	0,93	0,75	0,66
+4-5.6	0,93	0,74	0,67
+5.6-8	0,93	0,72	0,71

É possível observar na Tabela 3-6 que sobre o material HIPS, proveniente de um teclado e fragmentado no laboratório, o índice de solidez é constante para toda a gama granulométrica. O IC é inversamente proporcional ao calibre, variando entre 0,76 e 0,72. O IF aumenta à medida que o calibre aumenta desde 0,63 até a 0,71.

PS

Os índices referentes ao material PS, proveniente de monitores e gavetas de frigorífico, fragmentado em laboratório, estão ilustrados na Figura 3-11 em função do calibre.

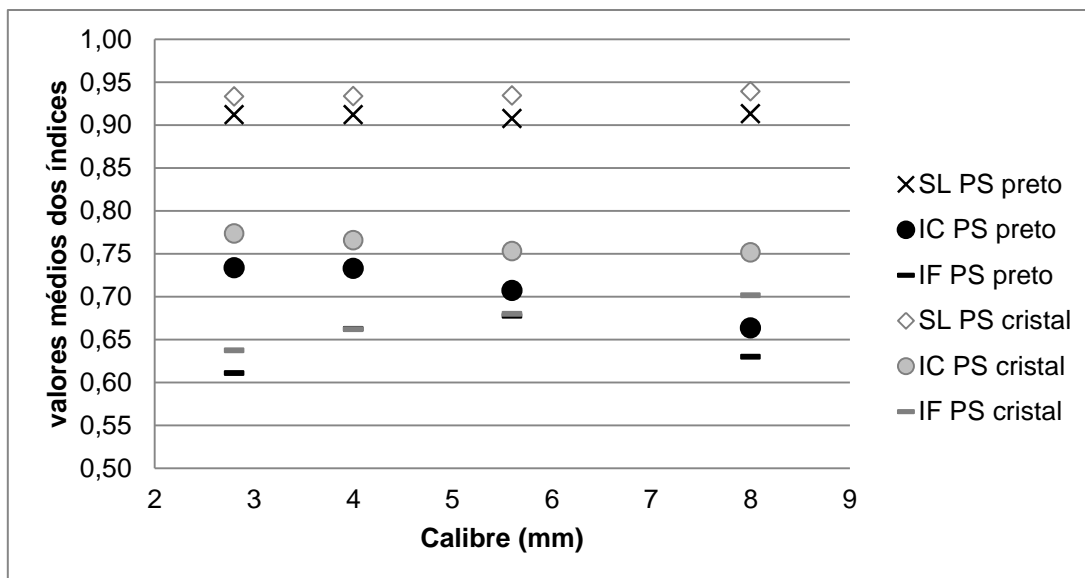


Figura 3-11- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do PS, conforme a cor, fragmentado no laboratório em função da granulometria da amostra A2a

À semelhança dos materiais anteriores fragmentados no laboratório, existe uma relação dos índices de circularidade e de forma com o calibre. O IC reduz com o aumento do calibre, mas é menos pronunciada no caso do PS “cristal”, levando a diferenças significativas entre o IC do PS do tipo “cristal” e “preto” em todos os calibres exceto no de -2,8+4mm. O IF diminui com o aumento do calibre, com a exceção do valor exibido pelas partículas da classe granulométrica maior, onde a diferença do IF entre os dois plásticos é significativa. O SL é praticamente constante e embora não apresente diferença significativa entre os tipos de PS, a sua diferença é maior que nos materiais anteriores.

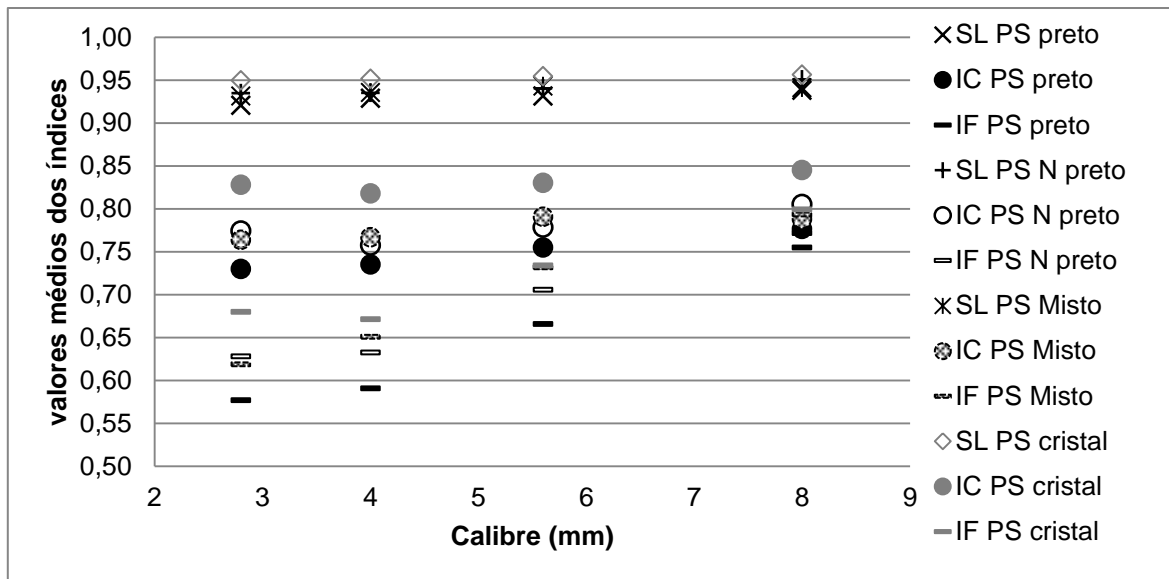


Figura 3-12- Média dos índices (SI,IC,IF) obtidos para partículas do PS, conforme a cor, fragmentado em meio industrial em função da granulometria da amostra A2b

Na Figura 3-12, em termos absolutos, a maior diferença entre índices encontra-se entre o PS “preto” e o PS “cristal”. O PS de tipo “preto” tem valores mais baixos em todos os índices para qualquer calibre. A diferença entre os IC e IF entre os tipos “preto” e “cristal” é em média 10%, no material fragmentado em meio industrial. Para o material fragmentado em laboratório, o IC é o índice que revela maiores diferenças entre tipos de PS sendo essa diferença na ordem dos 6%. Esta diferença entre tipos de PS indica que, ao contrário do observado com os materiais fragmentados no laboratório, a coloração é uma característica que afeta a forma das partículas de PS.

Analisou-se também o desvio padrão (DP) e o coeficiente de dispersão (CD) relativos a cada componente para cada fração granulométrica. Os resultados são muito idênticos, de material para material, em função do calibre por isso optou-se por exibir a título ilustrativo apenas os DP e os CD para dois tipos de PS “preto”, ambos provenientes de monitores, fragmentados em meios diferentes (laboratório e industrial) - Figura 3-13 e Figura 3-14 respectivamente. Os restantes resultados podem ser consultados no Anexo B.

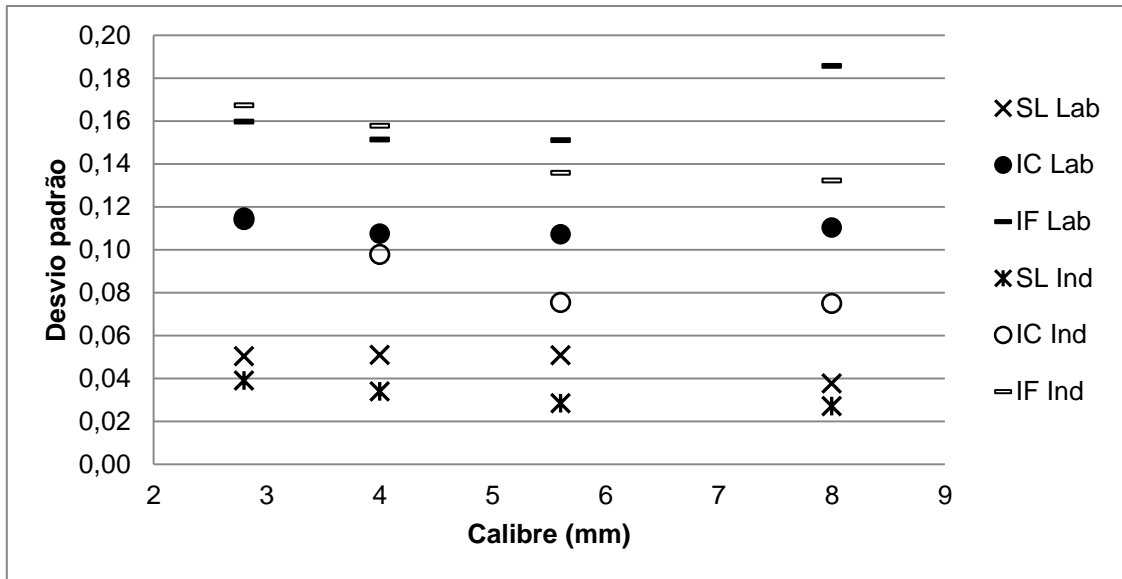


Figura 3-13 - Desvio padrão do SL, IC e IF do PS "preto" fragmentado em locais diferentes em função do calibre.

O desvio padrão tem na generalidade, para todos os índices e materiais uma tendência decrescente com o calibre, i.e., quanto maior o calibre menor a variação dos índices, indicando que a heterogeneidade das partículas decresce com o aumento do calibre. O DP é sempre maior para o IF e muito menor para o SL, indicando que o alongamento das partículas (IF) é a característica morfológica com maior variabilidade ao contrário da homogeneidade das arestas (SL). O DP também tende a ser menor no material proveniente de fragmentação industrial, indicando que esse processo confere menos variabilidade morfológica. Na Figura 3-13 observa-se uma das exceções, no IF do PS "preto" fragmentado no laboratório.

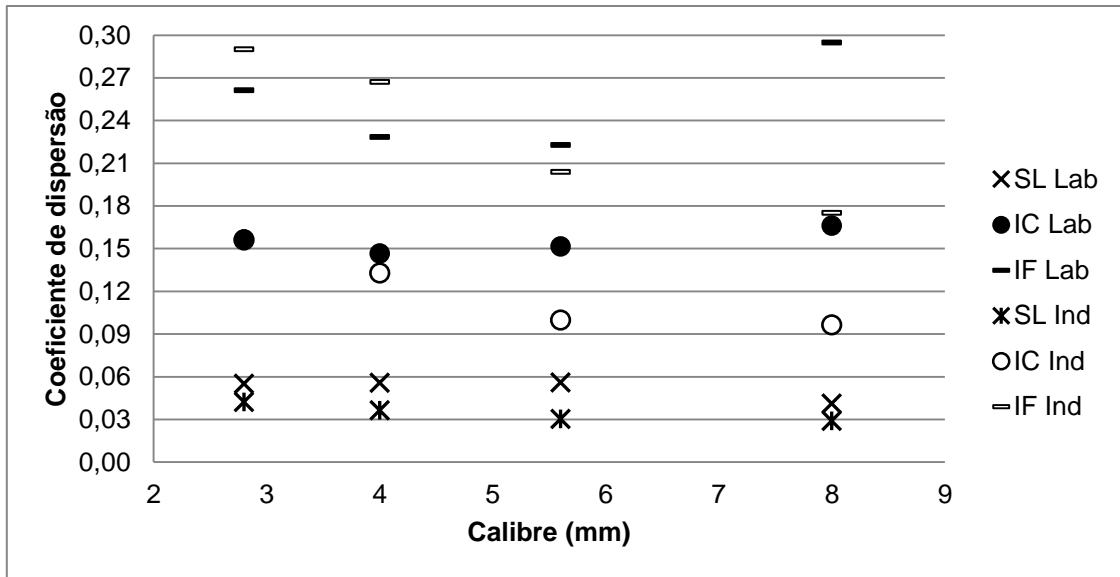


Figura 3-14- Coeficiente de dispersão do SL, IC e IF do PS "preto" fragmentado em locais diferentes em função do calibre.

O coeficiente de dispersão nunca é superior a 0,5 indicando uma boa representatividade dos valores médios, especialmente do índice da solidez.

3.2.2.2. Análise dos índices morfológicos na comparação de materiais

Embora o processo de fragmentação para os materiais da amostra A1 e A2a seja o mesmo (em laboratório), a proveniência do material (REEE que os originaram) poderia influenciar a forma dos plásticos resultantes (amostras A1 e A2a descritas sumariamente na Tabela 3-4). Deste modo, comparou-se o ABS proveniente do conjunto de REEE da amostra A1 (Caixa de computador, impressora, triturador de papel, regador e arquivador) com o ABS proveniente do conjunto de REEE da amostra A2a (Monitor, máquina de café e router), ilustrando os índices SL, IC e IF na Figura 3-15. Os valores ilustrados na Figura 3-15 foram obtidos através da média de todas as partículas pertencentes a cada classe granulométrica de ABS de cada amostra.

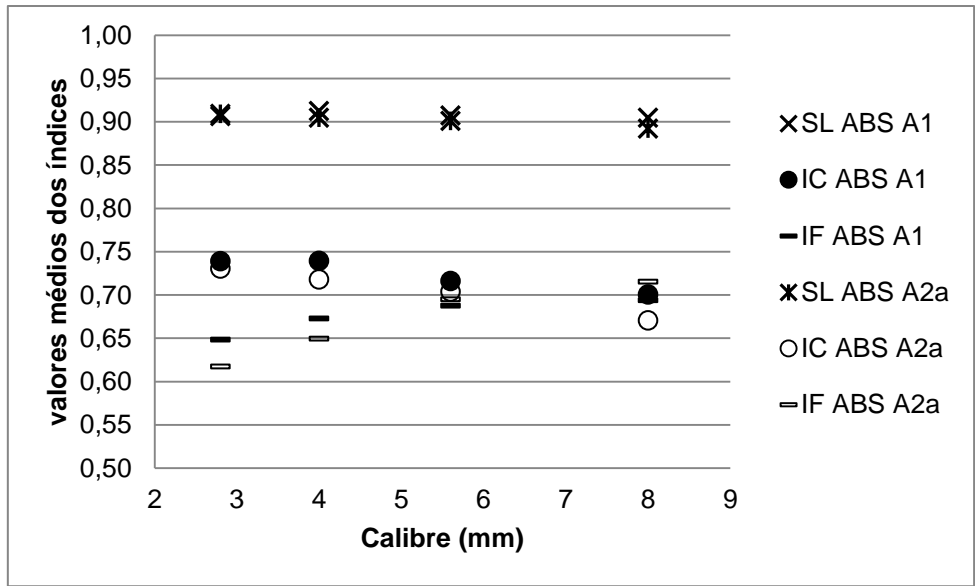


Figura 3-15- Média dos índices (SI,IC,IF) para o ABS das amostras A1 e A2a em função da classe granulométricas.

Foi também comparado o HIPS proveniente do conjunto REEE da amostra A1 (Monitor de computador) com o HIPS proveniente do conjunto REEE da amostra A2a (Teclado), também fragmentados em laboratório e ilustrados na Figura 3-16. Do mesmo modo que na figura anterior, os valores ilustrados na Figura 3-16 foram obtidos através da média de todas as partículas pertencentes a cada classe granulométrica de HIPS de cada amostra.

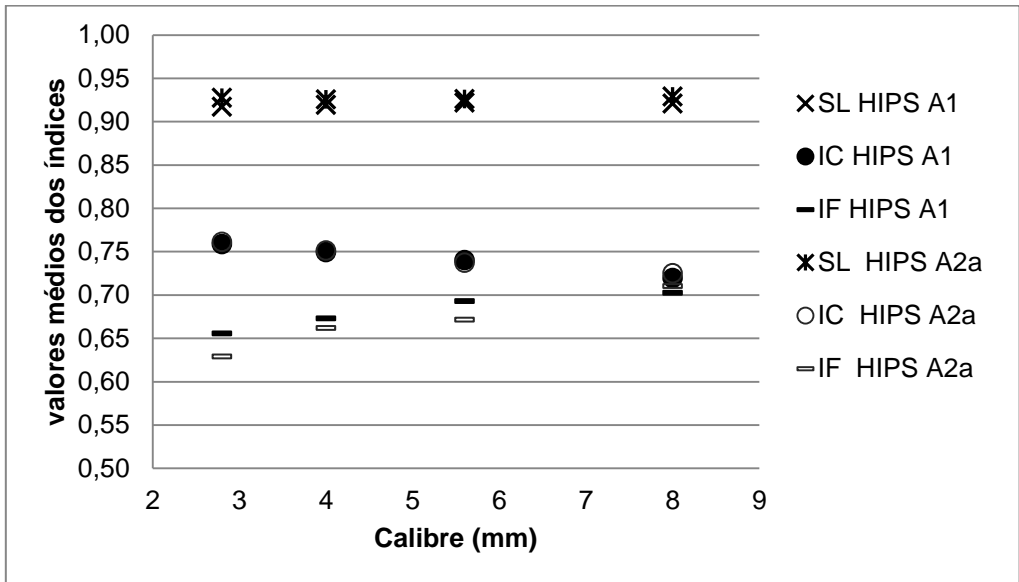


Figura 3-16-Média dos índices (SI,IC,IF) para o HIPS das amostras A1 e A2a em função da classe granulométricas.

Na Figura 3-15 e na Figura 3-16 observa-se que os índices SL, IC e IF têm intervalos de valores idênticos e o mesmo comportamento, independentemente dos REEE originais. O IF é o índice que apresenta maior diferença entre amostras, mas esta diferença nunca ultrapassa o limite de significância de 5%. Estes resultados indicam que independentemente do conjunto de REEE que lhe deu origem e da coloração, os materiais ABS ou HIPS fragmentados em laboratório apresentam as mesmas características morfométricas.

Considerando que não existem diferenças significativas entre cada índice dos diversos tipos de ABS fragmentados em laboratório pode considera-se o ABS como um todo, ou seja, deixa de ser relevante fazer a distinção por cor ou por REEE que o originou. O mesmo pode ser dito para o HIPS, fragmentado no laboratório. Deste modo, foi realizada a comparação entre estes dois materiais utilizando todo o material fragmentado no laboratório, em função do calibre. O resultado dessa comparação é visível na Figura 3-17 onde se apresentam os valores médios referentes a ambos os materiais, para cada índice em função do calibre.

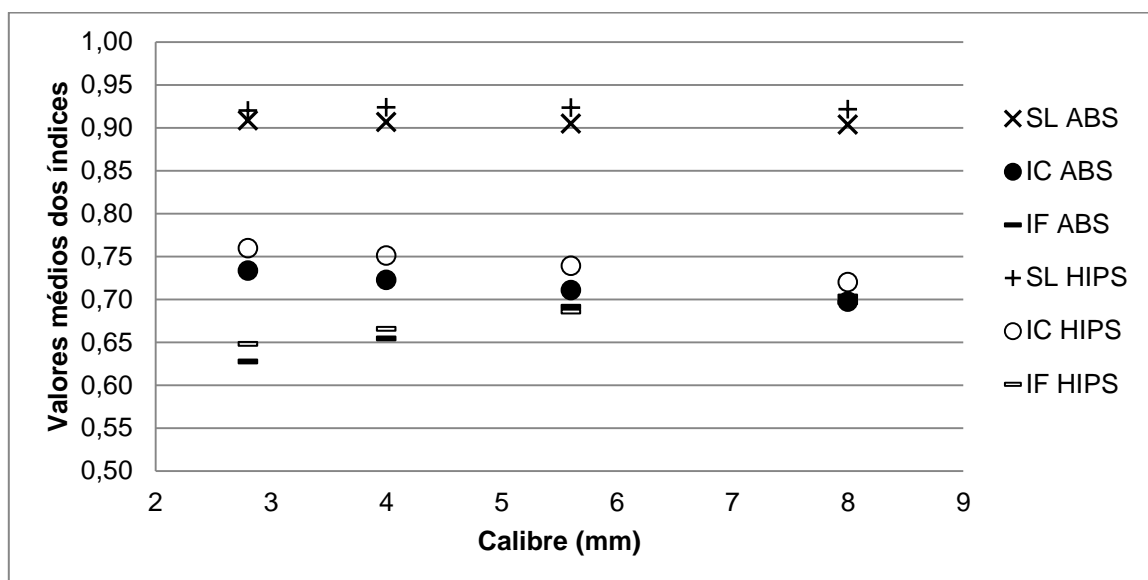


Figura 3-17- Média dos índices (SL,IC,IF) obtidos para todas as partículas de ABS e HIPS, fragmentados no laboratório em função da granulometria.

De acordo com o comportamento observado anteriormente, para ambos os materiais, a solidez não varia com o calibre e para ambos os materiais; à medida que o calibre da partícula aumenta o IC decresce e o IF cresce. Para ambos os materiais e para cada calibre, todos os índices apresentam valores idênticos; i.e. com um desvio relativo muito baixo.

Tabela 3-7-Os desvios relativos para cada índice (SL,IC e IF) entre ABS e HIPS, fragmentados em laboratório, em função do calibre

Calibre (mm)	Δ SL (%)	Δ IC (%)	Δ IF (%)
+2-2,8	1,27	3,42	3,17
+4-5,6	1,87	3,77	1,67
+5,6-8	2,04	3,86	0,80
+8-11,2	1,93	3,12	0,96

Os valores apresentados na Tabela 3-7 são todos inferiores a 5% e esta diferença indica que as partículas de ABS e HIPS, quando fragmentados em laboratório, dentro de cada classe de calibre, não apresentam diferenças relevantes entre si.

Considerando todos os materiais fragmentados em meio industrial, o conjunto com maior diferença morfológica é o par PS “preto” e PS “cristal”, não havendo no entanto interesse em separar o mesmo material pela forma quando se pode separar pela cor. Comparou-se então o PS “cristal”, que se destacava em todos os índices, com os vários tipos de ABS, indicando na Tabela 3-8 os desvios relativos entre os índices SL, IC e IF, entre materiais diferentes (ABS e PS), com os valores superiores a 5% realçados a negrito.

Tabela 3-8: Os desvios relativos para cada índice (SL,IC e IF) entre PS “cristal” os diferentes tipos de ABS, fragmentados em laboratório, em função do calibre.

Calibre (mm)	Δ SL (%)	Δ IC(%)	Δ IF(%)	Material
+2-2.8	3,40	12,72	14,05	PS cristal / ABS não preto
+2.8-4	2,72	11,19	10,18	
+4-5.6	1,75	7,73	5,97	
+5.6-8	1,37	6,69	4,35	
+2-2.8	3,07	10,62	11,89	PS cristal / ABS preto
+2.8-4	2,60	8,28	4,22	
+4-5.6	2,05	6,34	1,62	
+5.6-8	2,04	6,75	1,91	
+2-2.8	2,35	9,61	12,49	PS cristal / ABS misto
+2.8-4	2,61	9,12	6,52	
+4-5.6	2,06	7,32	4,69	
+5.6-8	1,85	7,45	6,64	

Como pode ser observado na Tabela 3-8, o índice de circularidade é o que apresenta desvios significantes em todos os calibres, sendo que o par que exibe a maior diferença entre índices é o PS “cristal” e o ABS “não preto”.

3.2.2.3. *Análise dos índices morfológicos e da influência do processo de fragmentação*

Constata-se que no geral, as partículas apresentam uma elevada solidez, i.e., baixa irregularidade nas arestas; observando-se ainda que este valor é ligeiramente mais elevado nos materiais fragmentados em meio industrial. Estes dados indicam que para todas as partículas apresentam uma elevada regularidade das arestas.

O índice de forma (IF), embora com comportamento uniforme, é o índice com maior desvio padrão. Apesar desta variabilidade, a sua relação com o calibre é compreensível; pois durante a crivagem observou-se que as partículas mais alongadas passavam pela malha do crivo, enquanto que outras com a mesma área mas menos alongadas ficavam retidas. O IF, no geral, apresenta uma tendência crescente com o calibre, independente do processo de fragmentação. Não há nenhum comportamento específico do IF relacionado com o material ou a sua cor/tipo de REEE, sendo que no geral este varia entre os 0,6 e 0,65 nas classes granulométricas mais finas e entre 0,7 a 0,75 nas mais grosseiras.

O índice de circularidade foi o único fator para o qual se conseguiram dados de comparação com outros estudos. Cui and Forssberg (2007), no seu estudo de caracterização de partículas resultantes da fragmentação de resíduos de monitores de TV utilizaram um sistema de análise de imagem associado ao equipamento produzido por Kronton Elektronik GmbH. Os principais componentes plásticos foram identificados como HIPS, ABS, PC e POM. Foram analisadas 147 partículas plásticas, onde o valor do índice de circularidade (FCIRCLE) varia entre 0,26 e 0,91, estando concentrado no intervalo de 0,6 a 0,9. O valor médio é de 0,68 com um desvio padrão associado de 0,13. Embora a técnica de análise de imagem não seja a mesma considerou-se que os resultados são comparáveis, pois os fundamentos por detrás deste tipo de técnica são os mesmos. Embora a granulometria seja bastante diferente resultante do tipo de equipamento de fragmentação, o valor médio com um desvio padrão do IC obtidos por Cui e Forssberg (2007) para as amostras de ABS e HIPS são da mesma ordem de grandeza do índice de circularidade obtido no presente trabalho.

O índice de circularidade é o principal fator diferenciador dos materiais analisados como observado na Tabela 3-8. Observam-se comportamentos distintos na sua relação com o calibre, associados ao método de fragmentação – no material processado no laboratório (amostra A2a) este tem tendência decrescente com o calibre, enquanto que no material processado industrialmente (amostra A2b) o ABS tem tendência maioritariamente crescente.

Em termos matemáticos, esta diferença de comportamento pode ser explicada se colocarmos a hipótese de que as partículas fragmentadas no laboratório apresentam irregularidades morfológicas que causem um aumento do perímetro e da área nos calibres mais elevados. O facto de no cálculo do IC, o perímetro estar elevado a uma potência de 2 (ver equação [3]) faz com que as suas variações tenham mais impacto no valor global. Esta hipótese é sustentada pela observação de imagens do mesmo material processado em equipamentos diferentes. A figura seguinte (Figura 3-18) ilustra o mesmo material (ABS “preto”) de calibre +4-5,6mm processado nas diferentes instalações.

As imagens apresentadas são as binarizadas e corrigidas antes de serem analisadas pelo *software*; na imagem original o fundo é preto e as partículas são brancas, mas as cores foram invertidas para melhor observação. Na imagem correspondente ao material processado no CERENA observa-se uma maior quantidade de partículas com apêndices ou deformações convexas, sustentando a hipótese apresentada.

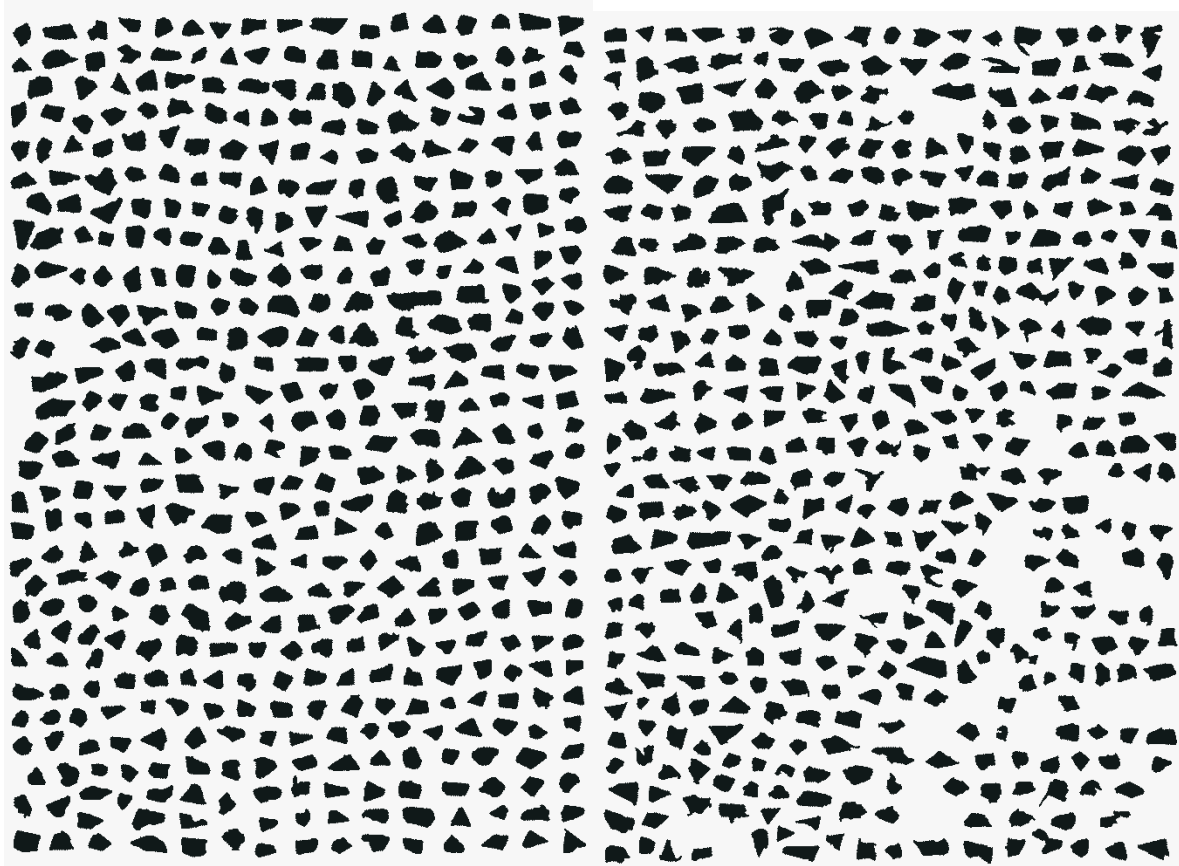


Figura 3-18: Partículas de ABS preto de calibre +4-5,6mm processadas em meio industrial (esquerda) e no laboratório (direita)

Estas características deviam refletir-se também no índice de solidez (SL), pois as áreas da partícula e do polígono convexo envolvente podem ser significativamente diferentes para estas partículas.

Para testar a relação comportamental entres os índices SL e IC, analisou-se o plástico ABS, cuja coloração não influencia os índices SL e IC em nenhum processo de fragmentação, como observado anteriormente. A Figura 3-19 e a Figura 3-20 apresentam a variação dos índices SL e IC, respetivamente, em função do calibre e do local de fragmentação. A Figura 3-19 apresenta uma escala diferente de modo a ser perceptível o comportamento do índice SL.

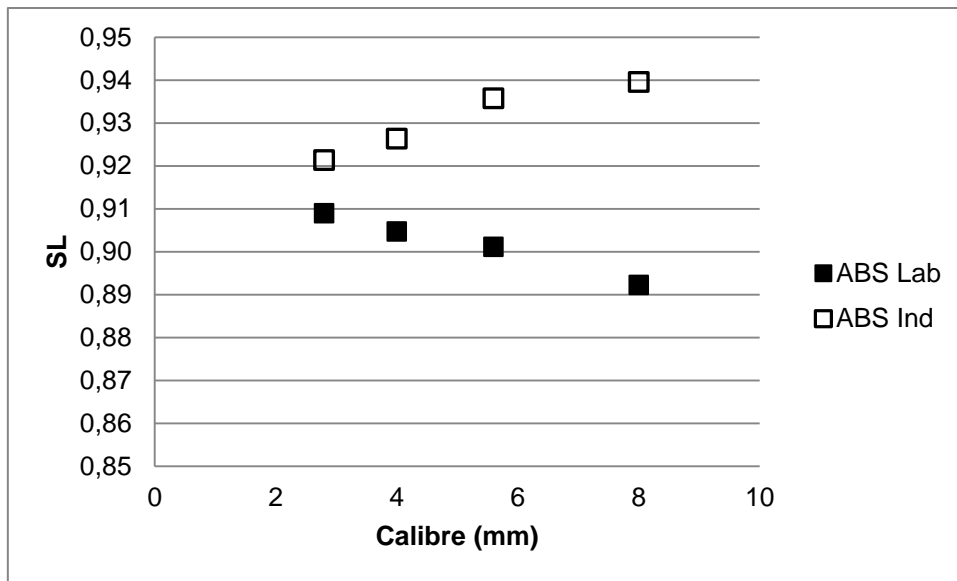


Figura 3-19- SL do ABS em função do calibre e do processo de fragmentação

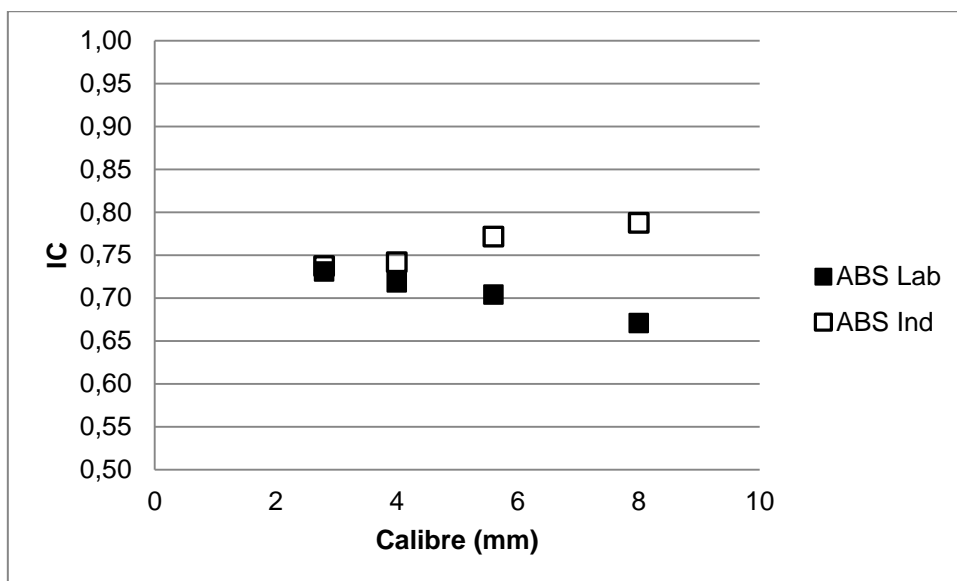


Figura 3-20-IC do ABS em função do calibre e do processo de fragmentação

Nas figuras anteriores é possível observar, como proposto, uma concordância do comportamento dos dois índices em função do processo de fragmentação - Decréscimo no SL e IC do material ABS, quando este é processado no laboratório, e um crescimento dos mesmos índices quando este é processado em meio industrial.

3.2.2.4. Relação entre índices

O índice de forma, como verificado anteriormente, não apresenta qualquer relação com o tipo de material ou processo de fragmentação. As irregularidades convexas encontradas nas partículas provenientes de fragmentação no laboratório influenciam claramente o índice de circularidade, e por fazerem variar a área do polígono convexo, também se espera que influenciem a solidez. Deste modo foi decidido estudar o impacto do número de partículas com baixo SL, i.e., com grandes irregularidades convexas, em ambos os tipos de fragmentação. Foi portanto analisado o comportamento do IC do ABS para partículas com elevada solidez. A mediana de SL está situada entre no intervalo [0,91; 0,95] para ambos os materiais e ambas as instalações, ou seja, metade das partículas têm SL superiores a 0,95. Decidiu-se portanto estabelecer o limite de $SL=0,95$ para a comparação de modo a excluir as partículas com irregularidades convexas e observar o comportamento do IC. O resultado é visível na Figura 3-21 onde estão apresentados os IC para cada processo de fragmentação, antes e depois da exclusão de partículas com $SL<0,95$.

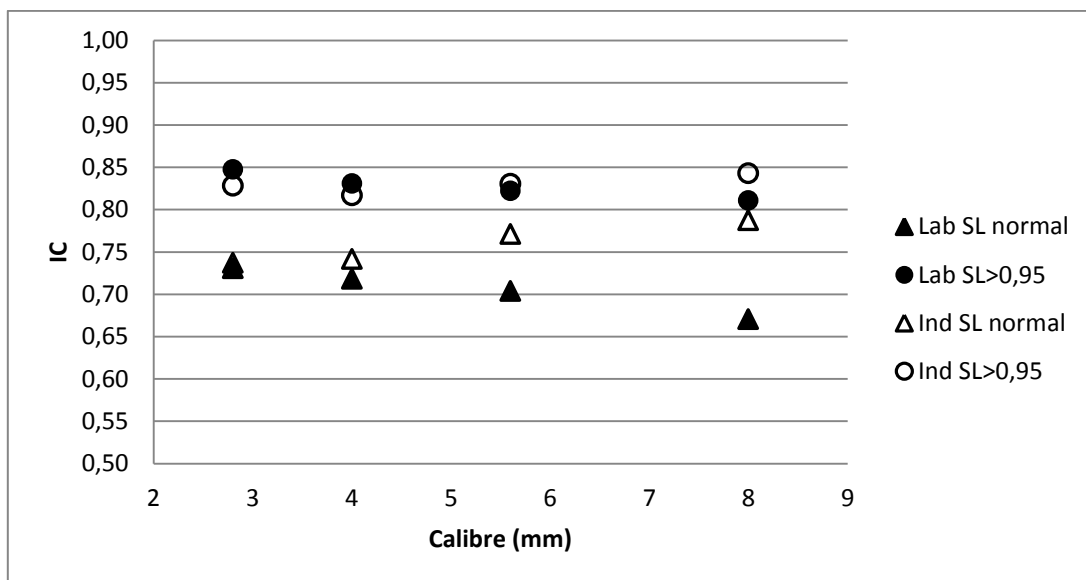


Figura 3-21: Variação do IC do ABS para cada meio de fragmentação, em função do calibre e da solidez (SL)

A Figura 3-21 permite verificar que a amostra, sem as partículas de baixo SL, têm índices de circularidade mais elevados e praticamente constantes ao longo do calibre. Pode inferir-se portanto que as partículas com arestas praticamente coincidentes com o envelope convexo ($SL>0,95$) são mais circulares – maior IC com menor o intervalo de variação.

3.3. *Síntese da caracterização de plásticos*

Em termos granulométricos, o material fragmentado em laboratório não apresentava diferenças significativas entre si na sua distribuição granulométrica, mostrando que estes plásticos se fragmentam de forma idêntica no equipamento utilizado. No que se refere ao material fragmentado em meio industrial, o PS do tipo “cristal” e do tipo “preto” apresentam curvas diferentes das restantes, sendo que o PS “cristal” tem calibre mais fino e o PS “preto” mais grosseiro.

Em termos de índices de morfologia para todos os materiais, independentemente da coloração, calibre e processo de fragmentação, a solidez é muito elevada (entre 0,9 e 0,95) e o índice de forma é sempre inferior ao índice de circularidade. Os valores de IC variam entre 0,60 e 0,85, na mesma gama de valores que os obtidos por Cui and Forssberg (2007), e têm desvios padrão e coeficientes de dispersão que indicam boa homogeneidade. O índice IC apresenta valores semelhantes aos apresentados noutros estudos. O índice de forma varia entre 0,58 e 0,80, também com boa homogeneidade.

Os índices analisados variam com o calibre do material. O IF apresenta uma relação crescente com o calibre, indicando que as partículas mais alongadas (menor IF) se encontram nos calibres inferiores. A relação do IC com o calibre difere conforme o processo de fragmentação. A fragmentação em laboratório provoca a formação de irregularidades convexas que diminuem a circularidade das partículas nos calibres maiores. Esta diminuição também se observa no SL, embora de forma quase imperceptível, podendo dizer-se que é praticamente constante se a escala de análise for a mesma dos restantes índices. No caso da fragmentação em meio industrial, o IC é mais elevado e tem uma relação crescente com o calibre, indicando que este processo conduz a partículas mais circulares e que estas se encontram na maior fração granulométrica.

Em termos de comparação do tipo de plástico, as partículas dentro de cada classe granulométrica de ABS e HIPS, quando fragmentados em laboratório, não apresentam diferenças relevantes entre si. As partículas de ABS fragmentado em meio industrial dentro de cada fração granulométrica, também não variam muito a sua forma com uma exceção – IF entre ABS “preto” e “não preto” com diferença de 6% na classe granulométrica +2,8-4mm. Nas partículas de PS observam-se índices com valores significativamente diferentes conforme a coloração, sendo que as principais diferenças se referem ao PS de tipo “cristal” e “preto”. Entre diferentes tipos de plástico o par PS “cristal” e ABS “não preto” são os que têm maiores diferenças nos índices, mais concretamente, no índice de circularidade, na ordem dos 9%. De todos os plásticos fragmentados em meio industrial, o PS de tipo “cristal” é o que apresenta os 3 índices maiores, revelando maior harmonia nas arestas, maior circularidade e menor alongamento.

4. Separabilidade

A relação da separabilidade com o índice de circularidade vai ser abordada ao longo deste capítulo através da seleção de amostras adequadas, do desenvolvimento de um plano experimental e da análise dos respetivos resultados. Faz-se notar que este estudo, por limitação temporal e de disponibilidade de equipamento, tem um carácter meramente exploratório e a validade dos resultados obtidos é limitada.

4.1. Metodologia

4.1.1. Seleção de amostras

Os plásticos utilizados nesta etapa foram selecionados de acordo com três critérios: ter sido processado industrialmente; a diferença morfológica significativa e os materiais serem facilmente identificáveis pela cor, para facilidade de análise dos resultados.

Em termos de aplicabilidade no contexto real, do material fragmentado em meio industrial, o par ABS “misto” e PS “misto” seria o ideal pois representa plásticos vindo exclusivamente do fluxo de pequenos eletrodomésticos; no entanto, este par não apresenta diferenças na forma suficientes para justificar a sua utilização no estudo da separabilidade. O par PS “cristal” e ABS “não preto” fragmentados em meio industrial seria o melhor par para testar a separabilidade em função da diferença da forma das partículas, mas visualmente não são diferenciados inequivocamente. Optou-se por não modificar a cor da superfície das partículas para testar as amostras como provêm do meio industrial, sem alterar as propriedades superficiais com corantes.

Os polímeros que correspondiam aos requisitos propostos, com diferenças na ordem de 8% no índice de circularidade e cujas cores permitem fácil identificação visual são o PS cristal (translúcido com algumas partículas brancas) e ABS preto (maioritariamente preto com algumas partículas cinzentas) provenientes e triturados no grupo Ambigroup (amostra A2b).

Embora tenha sido observado que o PS do tipo “cristal” é fácil e eficientemente separado no processo de pré-tratamento do fluxo de equipamentos de refrigeração, foi selecionado este material porque o objetivo desta seção é testar a separabilidade de materiais através da sua forma e este material apresentava a maior diferença em relação aos restantes. O par PS “cristal” e ABS “preto” são os melhores candidatos e as características destes materiais estão expostas na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Média, desvio padrão, coeficiente de dispersão dos índices (SI,IC,IF) para o par com melhor potencial de separação

	ABS preto								
	Valor médio			Desvio padrão			Coeficiente de dispersão		
Calibre	SL	IC	IF	SL	IC	IF	SL	IC	IF
+2mm-2.8mm	0,92	0,74	0,60	0,04	0,11	0,16	0,04	0,14	0,27
+2.8mm-4mm	0,93	0,75	0,64	0,03	0,09	0,15	0,04	0,12	0,23
+4mm-5.6mm	0,93	0,78	0,72	0,03	0,08	0,13	0,03	0,10	0,17
+5.6mm-8mm	0,94	0,79	0,78	0,03	0,08	0,10	0,03	0,10	0,13
	PS cristal								
	Valor médio			Desvio padrão			Coeficiente de dispersão		
Calibre	SL	IC	IF	SL	IC	IF	SL	IC	IF
+2mm-2.8mm	0,95	0,83	0,68	0,02	0,08	0,14	0,02	0,09	0,21
+2.8mm-4mm	0,95	0,82	0,67	0,02	0,07	0,13	0,02	0,09	0,20
+4mm-5.6mm	0,95	0,83	0,73	0,02	0,06	0,12	0,02	0,07	0,16
+5.6mm-8mm	0,96	0,85	0,80	0,01	0,05	0,09	0,02	0,06	0,11

Para as diferentes etapas do procedimento experimental foram utilizadas diferentes amostras, conforme o objetivo específico de cada etapa e portanto a descrição da amostra utilizada será efetuada em cada secção.

4.1.2.Equipamento

Na seleção do equipamento de separação a utilizar foram considerados dois fatores, enumerados por ordem de importância: a disponibilidade do equipamento no laboratório do CERENA e a utilização da característica forma como fator de diferenciação. Com a exceção do equipamento desenvolvido por Beunder et al. (2002) não foram identificados equipamentos que separassem materiais exclusivamente através da forma. Num equipamento de separação gravítica a seco, a densidade, o calibre e a forma das partículas são os fatores com mais influência na eficiência da separação. No caso dos polímeros estudados, a densidade é aproximadamente igual e considerando-se frações granulométricas com intervalo de calibre apertado analisar-se-á se a forma é um fator diferenciador na separação desses polímeros.

A atuação da gravidade tem como consequência separar as partículas com mais apetência para rolar ou deslizar das menos aptas. Foi portanto selecionado o equipamento Recglass – uma tela com um ligeiro declive e movimento contínuo contrário à inclinação – para a realização dos ensaios de separação, visto que este equipamento está a ser testado no desenvolvimento de soluções de recuperação de vidro através da forma das partículas (Dias & Carvalho, 2012).

A totalidade do equipamento de separação engloba, para além do Recglass, a estrutura de suporte, o mecanismo de alimentação e recolha dos produtos. O Recglass é constituído pela tela contínua, pelas correias que imprimem movimento à tela e pelo motor que é a fonte do movimento. Um

esquema e a fotografia estão apresentados na Figura 4-1, indicando a recolha dos produtos superior e inferior e a alimentação (A).

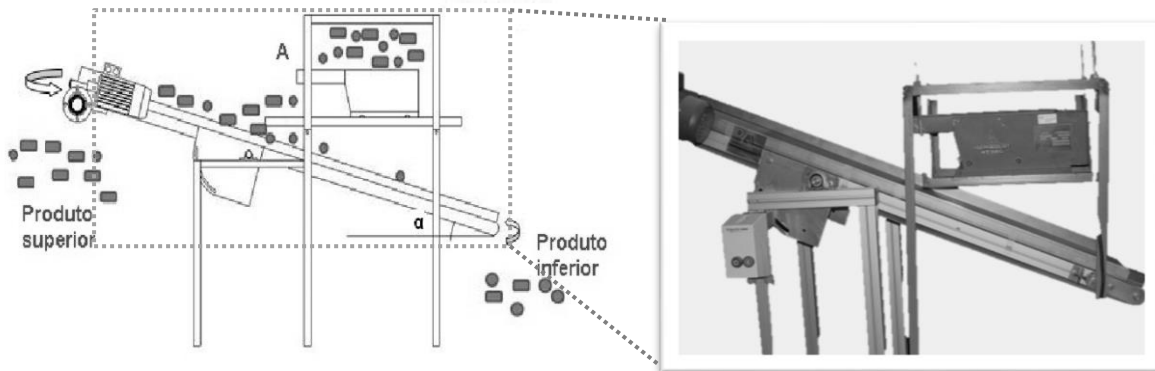


Figura 4-1: Esquema (à esquerda) e fotografia (à direita) do equipamento de concentração gravítica utilizado (adaptado de Dias and Carvalho (2012))

A tela (157x0.54cm) move-se no sentido contrário ao declive com velocidade regulável entre 0,02 – 0,13m/s. A inclinação da tela também é variável e o eixo de rotação encontra-se aproximadamente a meio da tela. O mecanismo de alimentação é um alimentador vibratório, independente, com velocidade de alimentação regulável, que pode ser colocado em qualquer posição em relação à tela. A recolha dos produtos é feita com recipientes no topo e no fundo da tela. As variáveis operacionais estão sumariadas na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Variáveis operacionais possíveis de controlar no Recglass.

Tela	Ângulo com a horizontal
	Velocidade da tela
	Material da tela
Alimentação	Velocidade de alimentação
	Posição do alimentador
	Altura de alimentação (em relação à tela)

4.1.3.Plano experimental

Os testes à separação dos polímeros foram realizados em 3 etapas – ensaios preliminares qualitativos, com amostras mono material, para determinar os intervalos de parâmetros a testar na fase seguinte (36 ensaios); regulação dos parâmetros operacionais que conduziram aos melhores resultados com amostras de composição mista (42 ensaios); ensaios de separação de amostras de composição mista (9 ensaios). Para cada conjunto de parâmetros foram realizados 3 ensaios para assegurar a reprodutibilidade dos resultados.

4.1.3.1. *Ensaio preliminares*

A análise qualitativa preliminar serviu para determinar *a priori* quais os intervalos dos parâmetros operacionais a testar na etapa seguinte. Como este conjunto de ensaios não tinha como objetivo a separação em si mas a observação do comportamento do material, foram utilizadas amostras mono-material de todas as classes granulométricas. Em termos de condições operacionais foram selecionadas as que mostraram maior influência nos resultados: ângulo com a horizontal; a velocidade da tela e a altura do alimentador, cada uma testada em três níveis. No que respeita à tela, só estava disponível um exemplar, não sendo possível estudar a influência do material da tela. Das várias velocidades de alimentação foi selecionada apenas uma que garantia a não sobreposição de partículas na tela.

4.1.3.2. *Regulação dos parâmetros operacionais*

A seleção dos parâmetros operacionais que conduzem a melhores resultados de separação seria idealmente realizada com a proporção relativa que os dois polímeros ocorrem nos REEE. Não foi possível obter os dados necessários para determinar essa composição e embora Martinho et al. (2012) tenham realizado um estudo sobre a composição de polímeros de REEE numa instalação portuguesa, considerou-se que não seria real no presente estudo assumir a mesma composição, pois os plásticos selecionados não pertencem ao mesmo fluxo operado na instalação. Por esta razão não foi utilizada uma amostra binária representativa da composição de polímeros de REEE nas instalações da Ambigroup.

A composição da mistura binária utilizada nos testes de seleção das melhores condições operacionais foi obtida aleatoriamente através da junção das quantidades de ABS e PS de calibre +4-5,6mm resultantes da crivagem da mesma quantidade de material. A composição resultante foi PS:ABS 36%:64%.

A realização de um plano fatorial completo envolvia a realização das 27 combinações possíveis (3 parâmetros variáveis a 3 níveis), ou de blocos de combinações, como o descrito em Montgomery (2001), para cada fração granulométrica e composição da alimentação (Montgomery, 2001).

Por questões de limite de acesso ao equipamento o processo de seleção e avaliação das melhores variáveis foi simplificado aplicando um fator eliminatório, como ilustrado na Figura 4-2, resultando no teste de apenas 7 combinações, das 27 possíveis, para cada fração granulométrica, repetindo cada combinação 3 vezes por questões de reprodutibilidade.

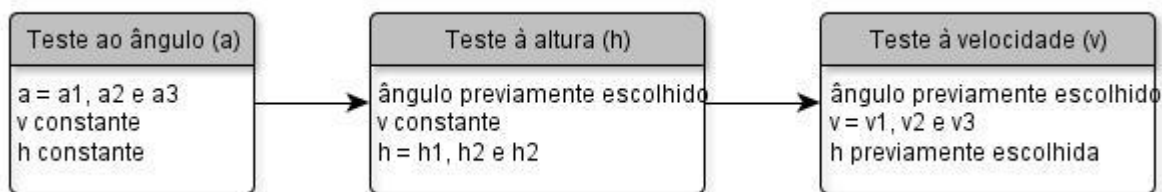


Figura 4-2: Metodologia de avaliação dos parâmetros ótimos de separação de polímeros

4.1.3.3. Ensaios de separação

Uma vez afinados os parâmetros para o material em estudo procederam-se aos ensaios de separação, testando as variáveis respeitantes à amostra – composição da mistura binária de alimentação e calibre, visíveis na Tabela 4-3.

As frações granulométricas utilizadas foram +4-5,6mm e +5,6-8mm. Foram seleccionadas duas composições de alimentação. A primeira representa a quantidade de ABS e PS que se obtém misturando os produtos resultantes da crivagem da mesma quantidade de material da fração +5.6-8mm. A segunda composição é igualitária, para ambas as frações granulométricas – com a mesma quantidade de cada material na alimentação.

Tabela 4-3-Varáveis da alimentação a testar nos ensaios de separação

Calibre	Composição de alimentação
+4-5.6mm	PS:ABS 50%:50%
+5.6-8mm	PS:ABS 27%:73%
	PS:ABS 50%:50%

4.1.4. Análise dos resultados

A Figura 4-3 demonstra o que acontece à amostra composta por dois materiais quando colocada no equipamento de separação. Havendo separação por efeito da diferença de forma, espera-se uma maior concentração do material mais circular no produto inferior e do menos circular no produto superior. De acordo com o IC dos materiais, o PS é mais circular que o ABS e portanto é expectável que haja uma concentração de PS no produto inferior e de ABS no produto superior; deste modo, os resultados de recuperação e teor de PS são sempre referentes ao produto inferior e os de ABS referentes ao obtido no produto superior.

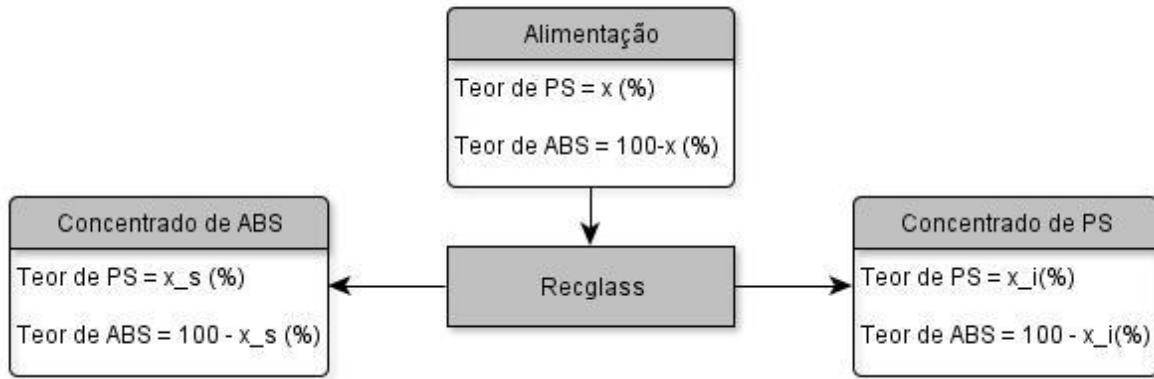


Figura 4-3: Esquema do processo de concentração gravítica com as características da alimentação e dos produtos

Para cada produto foram calculados os valores das recuperações (η) – quantidade de material recuperado em relação ao que havia na alimentação – equação [7]; e a taxa de concentração (C) – quociente entre o teor de um material no produto em relação ao de alimentação – equação [8]. O limite mínimo de qualquer taxa de concentração é 1; pois o teor do concentrado é no mínimo o seu teor na alimentação.

Nas equações [7] e [8] A, S e I são as massas totais da alimentação, produto superior (concentrado de ABS) e produto inferior (concentrado PS) respetivamente; e x representa o teor de PS na alimentação, x_i o teor de PS no produto inferior e x_s o teor de PS no produto superior.

$$\eta_{PS} = \frac{I \times x_i}{A \times x} ; \eta_{ABS} = \frac{S \times (100 - x_s)}{A \times (100 - x)} \quad [7]$$

A avaliação dos resultados foi feita com base nos seguintes critérios, por ordem de importância:

- 1- Diferença na recuperação de ambos os materiais - a diferença de recuperações refere-se à diferença dos valores de recuperação de ABS ou PS no mesmo produto (superior ou inferior) como explícito na equação [9]. O objetivo é obter uma diferença de recuperação de 100%, i.e, no produto superior a recuperação ideal de ABS seria 100% e de PS 0%, enquanto que no produto inferior seria o contrário.
- 2- Taxa de concentração de um material num produto de separação (equação [8]).

$$C_{PS} = \frac{x_i}{x} ; C_{ABS} = \frac{100 - x_s}{100 - x} \quad [8]$$

$$\Delta = \left| \frac{S \times x_s}{A \times x} - \frac{S \times (100 - x_s)}{A \times (100 - x)} \right| \quad [9]$$

4.2. Resultados e discussão

A totalidade dos resultados obtidos na forma de tabela pode ser consultada no Anexo C neste capítulo apresentar-se-ão os resultados relevantes e a sua discussão.

4.2.1. Ensaio preliminares

4.2.1.1. Parâmetros operacionais

Observou-se que quando o Recglass era operado com a tela pouco inclinada (16°), independentemente do material, a maioria das partículas era transportada para o produto superior, demonstrado na Figura 4-4 onde se apresenta os produtos superior e inferior de um dos ensaios preliminares (a régua de 30cm indica a escala). Usando ângulos maiores ($>26^\circ$) a maior parte do material deslocava-se para o produto inferior. Deste modo, selecionou-se um ângulo intermédio (21°) e variações de aproximadamente 20% - 17° , 21° e 25° - como níveis do ângulo de inclinação da tela com a horizontal a testar na fase seguinte.



Figura 4-4- PS "cristal" com calibre +4-5,6mm no produto superior (à direita) e inferior (à esquerda) dos ensaios no Recglass com ângulo com a horizontal de 15° , velocidade 0,075m/s e altura de alimentação de 16cm.

No que se refere a testar a variação da velocidade da tela não foi possível observar imediatamente nenhuma relação direta com as recuperações de materiais nos dois produtos, portanto decidiu-se testar os quartis de 25, 50 e 75% na escala de velocidades possível - 0,048m/s, 0,075m/s e 0,103 m/s.

A variação da altura do alimentador estava limitada à altura mínima (14cm) devido ao estilo de suporte do alimentador. Nos ensaios preliminares verificou-se que para alturas maiores que 16cm o ressalto das partículas era demasiado grande fazendo com que saltassem muitas partículas para fora da tela. Assim, os níveis das alturas de alimentação a testar foram a máxima (16cm), a mínima (14cm) e a intermédia (15cm).

4.2.1.2. Comportamento do material

Considerando o comportamento das amostras, a observação mais premente foi a de as frações granulométricas infra 4mm demonstrarem uma elevada adesão à tela, não sendo recolhidas em nenhum dos produtos sem a ajuda de um raspador. Qualquer adaptação do equipamento estava fora do âmbito e dos meios deste estudo, portanto na etapa seguinte realizaram-se ensaios apenas com as frações +4-5,6mm e +5,6-8mm.

4.2.2.Regulação dos parâmetros operacionais

Pode observar-se na Figura 4-6 as recuperações de cada material, em função do ângulo com a horizontal nos ensaios realizados.

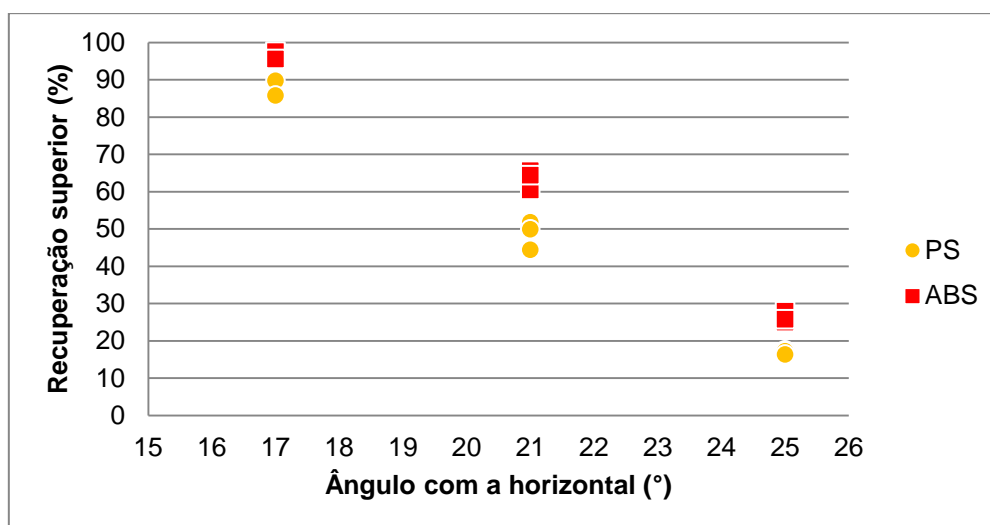


Figura 4-5: Recuperações dos plásticos PS e ABS em função do ângulo com a horizontal (granulometria +4-5,6mm, composição PS:ABS 36%:64%, altura de alimentação de 16 cm e velocidade da tela de 0,075 m/s).

Na Figura 4-5 observa-se que o ângulo 17° conduz a maior recuperação no produto superior. Atentando à diferença de recuperações esta é, em média, superior no ângulo 21°.

Observou-se um ligeiro aumento do teor em ABS (em relação ao teor na alimentação) no produto superior e portanto a sua taxa de concentração foi calculada a partir do seu teor no produto superior. Pelo contrário, registou-se um ligeiro aumento de teor de PS no produto inferior (em relação ao teor na alimentação), sendo neste produto que se deu uma concentração de PS. Estas taxas de concentração estão representadas para cada material em função do ângulo com a horizontal na Figura 4-6.

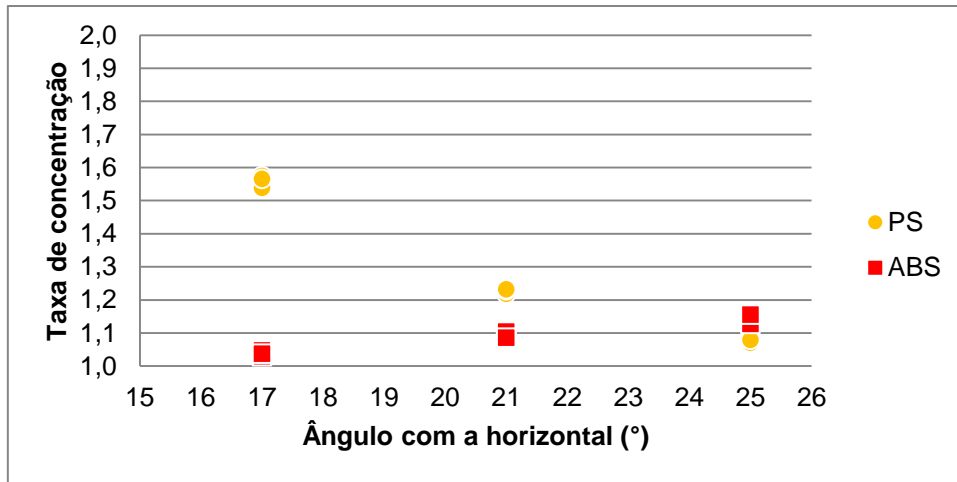


Figura 4-6: Taxa de concentração de PS e ABS obtidos em função do ângulo com a horizontal (com granulometria +4-5,6mm e composição PS:ABS 36%:64%, altura de alimentação de 16 cm e velocidade da tela de 0,075 m/s).

Embora os ângulos 17° e 25° conduzam a maiores taxas de concentração de ABS (C_{ABS}) e PS (C_{PS}) respectivamente, o objetivo principal é separar e depois garantir um teor elevado. Deste modo, o ângulo 21° é o mais favorável pois demonstra maior diferença na recuperação de cada material.

Após a seleção do ângulo, testou-se a altura de alimentação cujos resultados estão apresentados na Figura 4-7 e Figura 4-8. A Figura 4-7 apresenta as recuperações de cada material em função da altura de alimentação; a Figura 4-8 representa as taxas de concentração para cada material em função da altura de alimentação.

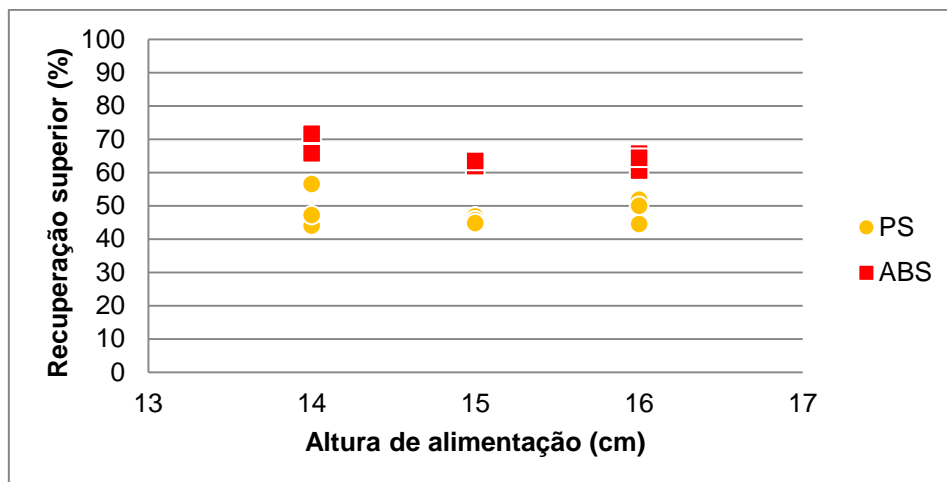


Figura 4-7- Recuperações dos plásticos PS e ABS em função da altura de alimentação (com granulometria +4-5,6mm, composição PS:ABS 36%:64%, ângulo com a horizontal de 21° e velocidade da tela de 0,075 m/s).

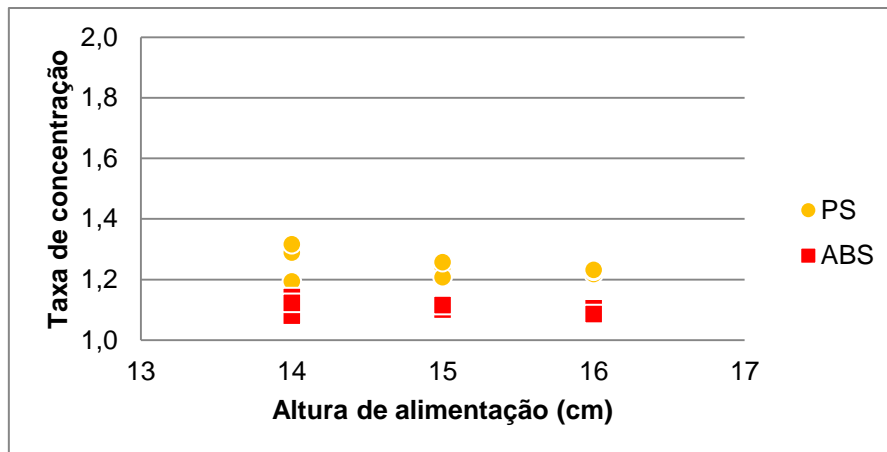


Figura 4-8- Taxa de concentração de PS e ABS obtidos em função da altura de alimentação (com granulometria +4-5,6mm, composição PS:ABS 36%:64%, ângulo com a horizontal de 21° e velocidade da tela de 0,075 m/s).

Pode ser observado que nem as recuperações nem a taxa de concentração variam significativamente em função da altura de alimentação, no entanto a altura de 14 cm demonstrou recuperações e taxas de concentração, em média, ligeiramente melhores que as restantes e operacionalmente era a mais favorável pois diminuía o número de ressaltos indesejáveis; portanto foi selecionada essa altura para os restantes ensaios.

Os resultados dos ensaios com diferentes velocidades de tela estão apresentados na Figura 4-9 e na Figura 4-10. A Figura 4-9 apresenta as recuperações de cada material em função da velocidade da tela; a Figura 4-10 representa as taxas de concentração para cada material em função da velocidade da tela.

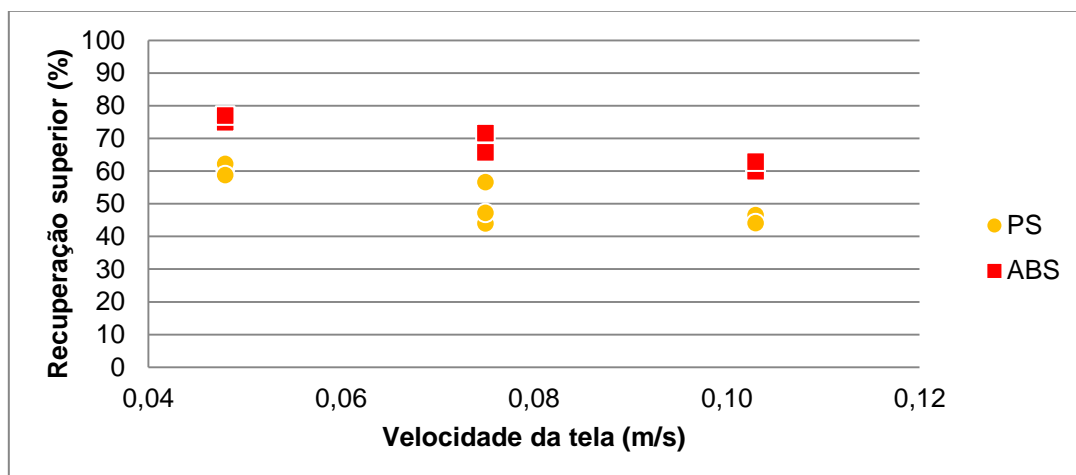


Figura 4-9- Recuperações dos plásticos PS e ABS em função da velocidade da tela (granulometria +4-5,6mm, composição PS:ABS 36%:64%, ângulo com a horizontal 21°, altura de alimentação de 16 cm).

A velocidade da tela aparenta influenciar ligeiramente a quantidade de material recuperado em cada produto. Observa-se que com o aumento da velocidade, a recuperação de ambos os materiais apresenta uma tendência ligeiramente decrescente no produto superior. No entanto a média das diferenças de recuperação não varia muito, como pode ser observado na Tabela 4-4.

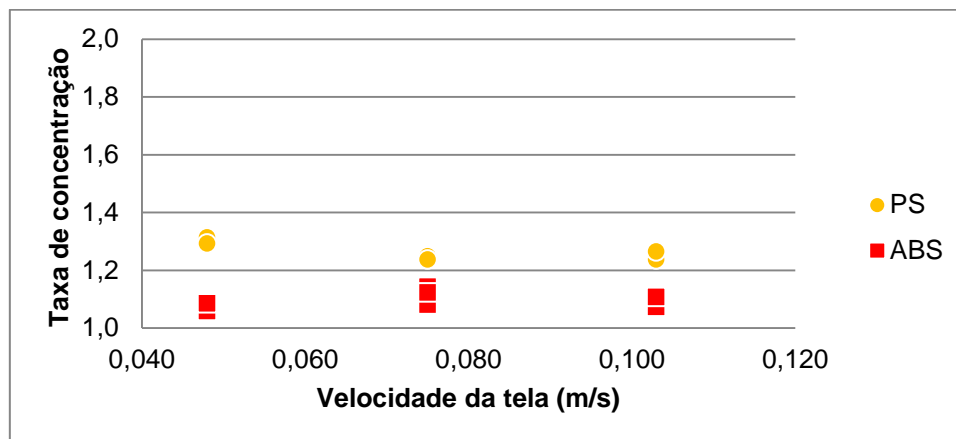


Figura 4-10- Taxa de concentração de PS e ABS obtidos em função da velocidade da tela (granulometria +4-5,6mm, composição PS:ABS 36%:64%, ângulo com a horizontal 21°, altura de alimentação de 16 cm).

A taxa de concentração de cada material não é afetada do mesmo modo com a variação da velocidade; enquanto a taxa de concentração do PS decresce ligeiramente com o aumento da velocidade, a taxa de concentração do ABS não apresenta nenhuma monotonia definida. Sendo necessário selecionar uma velocidade, optou-se pela velocidade de tela de 0,075m/s, pela diferença das recuperações ser ligeiramente maior.

A Tabela 4-4 resume os ensaios realizados apresentando para cada conjunto de parâmetros as diferenças de recuperação; as taxas de concentração ($C_{ABS/PS}$) e os valores médios (μ), os respectivos desvios padrão (σ) e coeficiente de dispersão (CD) das recuperações de cada material. Para a etapa seguinte foram selecionados os parâmetros que conduziram ao melhor valor de diferença de recuperação, realçados na Tabela 4-4.

Tabela 4-4: Resultados dos ensaios de separação da fração +4-5,6mm da amostra com composição PS:ABS 36%:64%

Parâmetros			η ABS			η PS			$\Delta\eta$	C_{PS}	C_{ABS}
α (°)	h (cm)	v (m/s)	μ (%)	σ	CD	μ (%)	σ	CD			
17	16	0,075	96,72	0,01	0,009	87,02	0,02	0,022	0,10	1,56	1,04
25	16	0,075	26,20	0,01	0,048	16,98	0,00	0,029	0,09	1,08	1,15
21	16	0,075	63,45	0,02	0,034	48,71	0,03	0,064	0,15	1,23	1,09
21	15	0,075	62,66	0,01	0,011	45,70	0,01	0,019	0,17	1,23	1,11
21	14	0,075	67,55	0,03	0,041	49,19	0,05	0,108	0,18	1,27	1,12
21	14	0,103	61,06	0,01	0,021	45,08	0,01	0,023	0,16	1,25	1,09
21	14	0,048	75,82	0,01	0,011	60,59	0,01	0,024	0,15	1,31	1,07

Em termos estatísticos, observa-se que para todos os parâmetros estudados o desvio padrão é baixo e que o coeficiente de dispersão é inferior a 0,5 indicando boa homogeneidade dos valores médios.

4.2.3. Ensaio de separação

Após a afinação dos parâmetros operacionais, foram realizados os ensaios com as diferentes frações granulométricas e diferentes composições de alimentação, com os seguintes parâmetros operacionais: ângulo de inclinação com a horizontal = 21°, altura de alimentação = 14cm e velocidade da tela = 0,075m/s.

As figuras seguintes indicam a recuperação e o teor para cada calibre variando o teor da alimentação do material. Nas figuras, cada ícone representa um plástico e cada cor uma composição de alimentação. Os ícones não preenchidos são as condições da alimentação e os ícones preenchidos são os respectivos resultados.

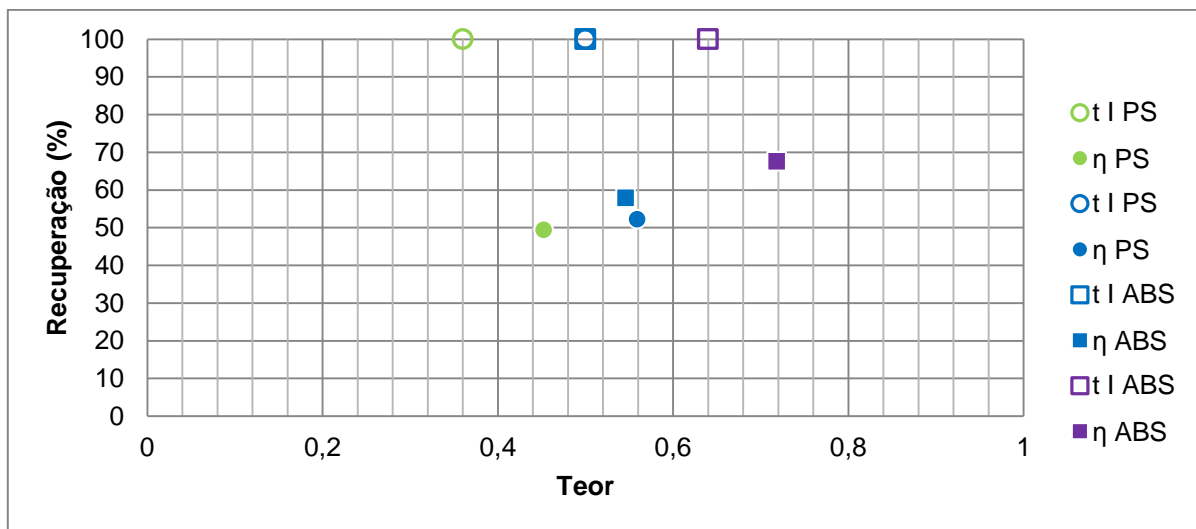


Figura 4-11: Recuperação e teor de PS e ABS da mistura binária com granulometria +4-5,6mm.

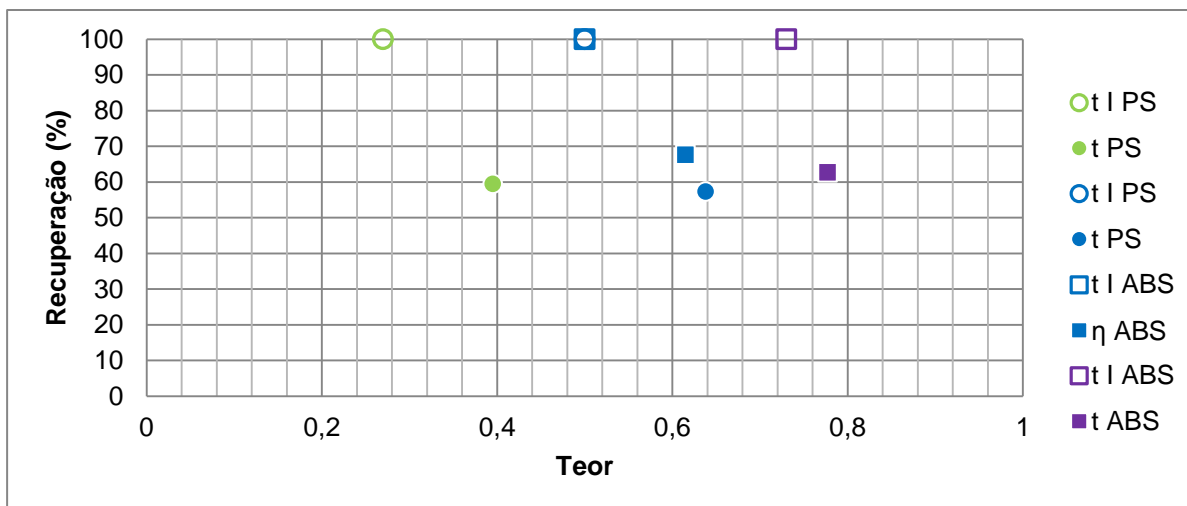


Figura 4-12: Recuperação e teor de PS e ABS da mistura binária com granulometria +5,6-8mm (à direita).

A Figura 4-11e a Figura 4-12 indicam padrões de comportamento comuns a ambos os materiais. Tanto para o PS e ABS, o teor no concentrado aumenta com o aumento do calibre, para a mesma composição de alimentação. O aumento do teor na alimentação conduz a maiores recuperações na fração granulométrica +4-5,6mm e a menores recuperações na fração granulométrica +5,6-8mm. Nas condições testadas, a recuperação de ABS é superior à de PS em ambos os calibres, para teores de ABS superiores ou iguais aos de PS na alimentação.

Na Tabela 4-5 encontram-se resumidos os valores médios, os desvios padrão e os coeficientes de dispersão para cada um dos parâmetros testados nos ensaios de separação.

Tabela 4-5-Média (μ), desvios padrões (σ) e coeficientes de dispersão (CD) da recuperação (η) e teor (t) dos materiais ABS e PS.

Calibre	Composição de alimentação		η ABS	t ABS	η PS	t PS
+4-5,6mm	PS:ABS 36%:64%	μ	67,55	0,72	49,39	0,45
		σ	0,03	0,02	0,05	0,02
		CD	0,00	0,03	0,00	0,05
+5,6-8mm	PS:ABS 27%:73%	μ	62,72	0,78	59,49	0,40
		σ	0,05	0,01	0,01	0,03
		CD	0,001	0,02	0,00	0,08
+4-5,6mm	PS:ABS 50%:50%	μ	57,86	0,55	52,20	0,56
		σ	0,03	0,02	0,02	0,01
		CD	0,00	0,03	0,00	0,01
+5,6-8mm	PS:ABS 50%:50%	μ	67,67	0,62	57,33	0,64
		σ	0,02	0,02	0,04	0,01
		CD	0,00	0,04	0,00	0,01

Na tabela anterior, observa-se que os desvios padrão têm baixos valores e estão centrados no valor médio pois o coeficiente de dispersão é bem inferior a 0,5. Estes dados sugerem que os valores médios encontrados são representativos dos resultados das condições experimentais realizadas.

Em termos complementares, a diferença de recuperações ($\Delta\eta$) e a taxa de concentração ($C_{ABS/PS}$) estão indicadas na Tabela 4-6, para cada calibre e composição estudados. Para as condições estudadas, a taxa de concentração de ABS é sempre inferior à de PS. Por sua vez, a taxa de concentração do PS é maior com menores teores na alimentação na mesma gama de calibres.

Tabela 4-6- Diferenças de recuperação e taxas de concentração numa mistura binária com diferentes granulometrias e composições de alimentação

Calibre	Composição de alimentação	$\Delta\eta$	C_{ABS}	C_{PS}
+4-5.6mm	PS:ABS 36%:64%	27,18	1,12	1,27
+5.6-8mm	PS:ABS 27%:73%	20,15	1,07	1,44
+4-5.6mm	PS:ABS 50%:50%	16,90	1,09	1,12
+5.6-8mm	PS:ABS 50%:50%	37,44	1,23	1,28

Dias (2011) realizou ensaios de separação com a mesma técnica de concentração gravítica utilizada neste estudo. As maiores diferenças de recuperação foram obtidas para o ângulo 21° (Dias, 2011) tal como no presente trabalho, assim como também verificou a pouca influência da altura da alimentação nos resultados. A velocidade da tela teve um efeito mais notório no presente estudo que em Dias (2011). Embora não alterasse significativamente as diferenças de recuperação em cada produto, a variação da velocidade alterava o contacto entre as partículas na tela. O aumento da velocidade da tela aparentemente diminuía o número de colisões permitindo mais tempo de rolamento das partículas, aumentando o seu deslocamento para o produto inferior.

Dias (2011) partiu de uma média de diferenças de IC entre o produto desejado (vidro de embalagem, VE) e o contaminante (pedras) na ordem dos 20% nos calibres comparáveis (+4-5,6mm e +5,6-8mm). Com esta ordem de diferença relativa de IC, a gama recuperações de VE obtida por Dias (2011) foi na ordem dos 60 a 80 por cento, mais elevada que o intervalo de 50 a 67 por cento obtidos no presente estudo. Considerando que, assim como entre o ABS e o PS, a densidade do vidro e das pedras é praticamente igual (Dias, 2011), e os intervalos de calibres avaliados em ambos os estudos são os mesmos, a diferença de recuperações pode ser estar relacionada com a diferença no índice de circularidade. Os índices de circularidade de cada material para os calibres analisados estão na Tabela 4-1. No entanto, é importante referir que fatores como a tela utilizada por Dias (2011) e a sua relação com as características do material a separar, também são fatores passíveis de afetar a recuperação de materiais.

É de notar que as condições operacionais mais favoráveis foram encontradas nos ensaios de afinação foram conduzidas com a fração granulométrica +4-5,6mm. Como se trata de uma técnica gravítica, o tamanho da partícula é um fator determinante pois a sua variação também faz variar as forças atuantes nas partículas, podendo alterar a dinâmica do processo. Deste modo, as condições

operacionais selecionadas podem não ser as melhores para o calibre +5,6-8mm, realçando-se novamente a necessidade da realização de um plano fatorial completo para este intervalo de calibre.

4.3. Síntese da separabilidade de polímeros

Considerando o carácter exploratório da separabilidade de plásticos provenientes de REEE, observou-se uma concentração de ABS no produto superior e uma concentração de PS no produto inferior. Dependendo do teor de alimentação e do calibre, conseguiram-se recuperações entre 50 a 60 % para o PS e entre 60% e 70% para o ABS.

A separação da mistura binária de ABS “preto” e PS “cristal” só foi possível para os calibres entre 4mm e 8mm, pois as partículas de calibre inferior aderiam demasiado à tela do Recglass.

Na avaliação dos parâmetros operacionais que conduziam a melhores resultados de separação, o ângulo com a horizontal foi onde se observou maior influência e a altura de alimentação praticamente não influenciou. Estas observações estão concordantes com outro estudo de separação realizado com o mesmo equipamento por Dias (2011). Sobre a velocidade da tela, embora se tenha registado variações nas quantidades recuperadas, em termos de separação de materiais, não se observou nenhuma influência relevante. As relações entre os parâmetros operacionais e a separação da mistura não têm muita validade estatística pois é necessário realizar um plano fatorial completo.

As melhores condições operacionais, para a fração +4-5,6mm e composição de alimentação PS:ABS 36%:64% são o ângulo com a horizontal de 21°, altura de alimentação de 14cm e velocidade de 0,075m/s. Nestas condições os melhores resultados em todos os aspetos (exceto na taxa de concentração de PS) foram obtidos para uma composição equitativa na alimentação e calibre +5,6-8mm.

Há que realçar que, não tendo sido realizado um estudo exaustivo e estatisticamente sólido, a validade das conclusões apresentadas é limitada.

5. Conclusões e trabalho futuro

No presente trabalho investigou-se a existência de diferença na forma das partículas provenientes de diferentes plásticos de REEE com densidades idênticas – ABS/HIPS e ABS/PS – e a potencial separação por um processo gravítico através desta propriedade.

A questão chave da diferença na forma entre plásticos de igual densidade foi abordada com uma metodologia de análise de imagem. Esta metodologia considerou-se adequada ao objeto de estudo, pois embora seja uma análise a duas dimensões, os produtos analisados apresentavam pouca relevância na terceira dimensão (partículas muito achatadas). Era também adequada ao objetivo pois explorava as três principais vertentes morfológicas – a aproximação à circularidade (IC), a harmonia da fronteira (SL) e o rácio entre principais direções (IF). No entanto, recomenda-se que nos próximos trabalhos com o algoritmo se realizem testes de afinação de modo a comparar os resultados obtidos com valores de referência, podendo revelar-se ser necessárias algumas adaptações.

No panorama da totalidade das partículas analisadas foram observados índices de solidez (SL) elevados e praticamente constantes na sua escala de variação (0 a 1), na ordem dos 0,93. Isto indica as partículas analisadas exibiam arestas homogêneas, sem relações perceptíveis com o calibre ou o tipo de plástico. O alongamento da partícula, representado pelo índice de forma (IF), por sua vez apresentava os valores mais baixos (0,58 – 0,80) na mesma escala, o que significa que as partículas têm um alongamento considerável. Esta característica revelou uma relação decrescente com a diminuição do calibre da partícula – as partículas com calibre inferior são mais alongadas que as de calibre superior. A aproximação à circularidade, medida pelo IC foi a característica com maior intervalo de valores (entre 0,60 e 0,85), indicando uma grande heterogeneidade nesta característica das partículas. Observou-se que a circularidade é dependente do tipo de material e do processo de fragmentação, sendo maior nos nas partículas fragmentados em condições industriais.

Para avaliar o grau de influência do processo de fragmentação na forma das partículas foram comparados os índices morfológicos de partículas resultantes de fragmentação em meio industrial e laboratorial. Foi possível observar que a fragmentação no laboratório conduziu à formação de partículas com arestas muito irregulares, sob a forma de “flagelos” que são em parte responsáveis por diminuir o IC à medida que o calibre aumenta. Estas irregularidades convexas não são exclusivamente responsáveis por este comportamento; um menor IC nos calibres superiores é também indicação da variação da proporção de formas obtidas – com maior IC e menor IF que nos calibres inferiores. Pelo contrário, o material fragmentado no meio industrial estudado conduz a partículas mais homogêneas de aresta e mais circulares.

Para além do processo de fragmentação e do calibre, também se analisou a relação entre a forma das partículas e os equipamentos que as originaram. Foi observado que neste aspeto, o par ABS e HIPS fragmentados no laboratório, independentemente da coloração e do REEE que os originou, não apresenta diferenças significativas em nenhum índice. Considerando que os índices cobrem as

principais vertentes morfológicas, pode afirmar-se que para as amostras estudadas não possuem uma morfologia significativamente diferente.

Este estudo mostrou que para alguns plásticos com igual densidade, para os quais ainda não existe uma solução industrial generalizada, nomeadamente os conjuntos PS/ABS, a forma um é um potencial fator de diferenciação. Nas partículas provenientes de diferentes plásticos fragmentados em meio industrial, observaram-se diferenças significativas (>5%) na circularidade; mas as maiores diferenças foram encontradas dentro do mesmo polímero, com diferentes colorações – PS transparente denominado “cristal” e os restantes. O facto da forma do PS “cristal” (de coloração transparente e branca, proveniente de gavetas de frigoríficos) se revelar significativamente diferente de PS de outra cor, não contribui muito para a separação de polímeros pois em contexto industrial com uma mistura complexa como por exemplo o fluxo de pequenos eletrodomésticos, é impossível estabelecer uma relação entre a cor e o material.

Na segunda parte deste trabalho realizou-se um estudo com carácter meramente exploratório para investigar se a diferença encontrada, ainda que reduzida, na circularidade entre os plásticos PS e ABS poderia ser um fator de separação. Este teste foi realizado com recurso ao equipamento de concentração gravítica Recglass, onde a forma das partículas é considerada a propriedade chave na separação.

Os materiais utilizados nos ensaios de separação não são os mais representativos dos encontrados nos REEE de pequeno calibre, mais concretamente o PS do tipo “cristal”. A diferença entre PS “cristal” e o ABS “não preto” é interessante do ponto de vista de experimentação de separação através da forma, mas em contexto real, esta separação provavelmente não seria necessária pois o PS “cristal” é separado a partir de um fluxo específico e muito controlado – equipamentos de refrigeração; sendo separado com grande eficiência, manualmente, logo à entrada de todo o processo. No entanto, a escolha dos materiais a utilizar nos ensaios de separação foi condicionada pela necessidade de identificação visual inequívoca, que não seria possível utilizando os materiais ABS e PS do tipo “misto”.

O plano experimental foi realizado em três etapas – uma preliminar de avaliação da interação Recglass-plásticos; uma de afinação de alguns parâmetros operacionais e por fim os testes de separabilidade. A realização de um plano fatorial completo foi condicionada pela disponibilidade do material, o que levou à sua simplificação. É portanto sugerido a realização de um plano fatorial consistente que permita uma análise estatística sólida das relações entre os parâmetros operacionais.

Os resultados obtidos nestes ensaios revelaram concentrações de ABS e PS em produtos diferentes, embora a níveis pouco relevantes. Embora com validade limitada, observa-se indícios de que se deve avançar para um aprofundamento do estudo desta temática, recorrendo a maior quantidade e diversidade (outros operadores e outros equipamentos) de testes para se garantir a reprodutibilidade dos resultados. Com as limitações observadas não foi possível formar uma conclusão fundamentada no tipo de impacto que esta técnica de separação teria no tratamento e gestão dos REEE.

6. Referências

- Afonso, A., & Nunes, C. (2011). *Probabilidades e estatística - aplicações e soluções em SPSS*. (Escolar Editora, Ed.). Lisboa.
- Al-Rousan, T., Masad, E., Tutumluer, E., & Pan, T. (2007). Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics. *Construction and Building Materials*, 21(5), 978–990. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.03.005
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. *Waste management (New York, N.Y.)*, 29(10), 2625–43. doi:10.1016/j.wasman.2009.06.004
- Almeida, D. B. R. (2011). *Tecnologias de processamento de REEE*. Instituto Politécnico de Viseu - Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10400.19/1115>
- AMB3E. (2011). *Relatório e contas 2011*.
- ANREEE. (2012a). *Revisão Diretiva REEE 2012/19/UE - O que podemos esperar?* ANREEE.
- ANREEE. (2012b). *Dados de mercado EEE 2011* (pp. 1–10). Retrieved from <http://www.anreee.pt/estatisticas>
- APA. (2013). *REEE - Principais Resultados de Gestão 2011*. Lisboa.
- APME. (2010). The plastics portal. Retrieved May 22, 2013, from <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/zero-plastics-to-landfill.aspx>
- Beunder, E. M. (2000). *Influence of shape on particle behaviour in recycling techniques.pdf*. Delft University of Technology.
- Beunder, E. M., Van Olst, K. a., & Rem, P. C. (2002). Shape separation on a rotating cone. *International Journal of Mineral Processing*, 67(1-4), 145–160. doi:10.1016/S0301-7516(02)00036-4
- Billmeyer, F. W. (1984). *Textbook of polymer science* (3rd ed., p. 578). New York: John Wiley & sons, Inc.
- Boerrigter, H., Oudhuis, A. B. J., & Tangeb, L. (2002). BROMINE RECOVERY FROM THE PLASTICS FRACTION OF WASTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT (WEEE) WITH STAGED GASIFICATION. Petten.
- Brennan, L. B., Isaac, D. H., & Arnold, J. C. (2002). Recycling of acrylonitrile-butadiene-styrene and high-impact polystyrene from waste computer equipment. *Journal of Applied Polymer Science*, 86(3), 572–578. doi:10.1002/app.10833
- Carvalho, M. F. S. S. de. (2008). *Avaliação da situação nacional em matéria de gestão de REEE*. UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA.
- Chancerel, P., & Rotter, S. (2009). Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment. *Waste management (New York, N.Y.)*, 29(8), 2336–52. doi:10.1016/j.wasman.2009.04.003

- Cui, J., & Forssberg, E. (2007). Characterization of shredded television scrap and implications for materials recovery. *Waste management (New York, N. Y.)*, 27(3), 415–24. doi:10.1016/j.wasman.2006.02.003
- DEFRA. (2007). *Trial to establish waste electrical and electronic equipment (WEEE) protocols* (p. 104). London.
- Dias, N. (2011). *Caracterização e recuperação de vidro de embalagem contido no rejeitado de tratamento mecânico biológico*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Dias, N., & Carvalho, M. T. (2012). Novel Equipment to Separate Contaminants from Glass Cullet. *Proceedings of XIIIth international mineral processing symposium* (pp. 931–937). Bodrum: Department of Mining Engineering, Eskisehir Osmangazi University. doi:Özdogan, Bozkurt, Ipek, Bilir
- Dias, N., Teresa Carvalho, M., & Pina, P. (2012). Characterization of Mechanical Biological Treatment reject aiming at packaging glass recovery for recycling. *Minerals Engineering*, 29, 72–76. doi:10.1016/j.mineng.2011.10.004
- Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B., & Gidarakos, E. (2009). Determination of heavy metals and halogens in plastics from electric and electronic waste. *Waste management (New York, N. Y.)*, 29(10), 2700–6. doi:10.1016/j.wasman.2009.05.020
- DiversifiedEnterprises. (2009). Critical Surface Tension and Contact Angle with Water for Various Polymers. Retrieved June 7, 2013, from http://www.accudynetest.com/polytable_03.html?sortby=contact_angle
- Dodbiba, G., & Fujita, T. (2004). Progress in Separating Plastic Materials for Recycling. *Physical Separation in Science and Engineering*, 13(3-4), 165–182. doi:10.1080/14786470412331326350
- Eionet. (2009). Waste from electrical and electronic equipment (WEEE). 29/10/2009. Retrieved January 9, 2013, from <http://scp.eionet.europa.eu/themes/waste/#6>
- ERP Portugal. (2011). *Relatório Anual de Actividade 2010* (p. 70). Sintra.
- EuPR. (2012). *STRATEGY PAPER OF PLASTICS RECYCLERS EUROPE: HOW TO BOOST PLASTICS RECYCLING AND INCREASE RESOURCE EFFICIENCY ?* (pp. 1–20). Bruxelas.
- Eurostat. (2012). Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). 25/10/2012. Retrieved January 9, 2013, from http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/key_waste_streams/waste_electrical_electronic_equipment_weee
- Ferrara, G., Bevilacqua, P., De Lorenzi, L., & Zanin, M. (2000). The influence of particle shape on the dynamic dense medium separation of plastics. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 225–235. doi:10.1016/S0301-7516(99)00078-2
- Fraunholcz, N. (1997). *Plastics Flotation*. Delft University of Technology.
- Gent, M. R., Menendez, M., Toraño, J., & Torno, S. (2011). Optimization of the recovery of plastics for recycling by density media separation cyclones. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(4), 472–482. doi:10.1016/j.resconrec.2010.12.010
- Hori, K., Tsunekawa, M., Hiroyoshi, N., & Ito, M. (2009). Optimum water pulsation of jig separation for crushed plastic particles. *International Journal of Mineral Processing*, 92(3-4), 103–108. doi:10.1016/j.minpro.2009.01.001

- Huisman, J., Magalini, F., Kuehr, R., Maurer, C., Ogilvie, S., Poll, J., Delgado, C., et al. (2007). *2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)*. Bonn.
- Instruments, M. (2012). *A basic guide to Particle characterization*. Worcestershire: Malvern Instruments Limited. Retrieved from [http://www.malvern.com/malvern/kbase.nsf/allbyno/KB003174/\\$file/MRK1806-01.pdf](http://www.malvern.com/malvern/kbase.nsf/allbyno/KB003174/$file/MRK1806-01.pdf)
- Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1982). *Introduction to mineral processing* (1st ed., p. 491). New York: John Wiley & sons, Inc.
- Kröner, S., & Carbó, M. T. D. (2013). Determination of minimum pixel resolution for shape analysis: Proposal of a new data validation method for computerized images. *Powder Technology*, *245*, 297–313. doi:10.1016/j.powtec.2013.04.048
- La Marca, F., De Sena, G., Nardi, C., Cenedese, A., Massacci, P., & Moroni, M. (2008). The hydraulic separator Multidune: preliminary tests on fluid-dynamic features and plastic separation feasibility. *Waste management (New York, N. Y.)*, *28*(9), 1560–71. doi:10.1016/j.wasman.2007.05.026
- Lira, C., & Pina, P. (2009). Automated Grain Shape Measurements Applied to Beach Sands, *2009*(56), 1527–1531.
- MAOT. (2004). Decreto-Lei n.o 230/2004 de 10 de Dezembro. Lisboa: DIÁRIO DA REPÚBLICA—I SÉRIE-A.
- Marcelo, A. (2013). Comunicação privada. Seixal: Ambigtoup - Recielectric.
- Martinho, G., Pires, A., Saraiva, L., & Ribeiro, R. (2012). Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. *Waste management (New York, N. Y.)*, *32*(6), 1213–7. doi:10.1016/j.wasman.2012.02.010
- Menad, N., Guignot, S., & Van Houwelingen, J. a. (2012). New characterisation method of electrical and electronic equipment wastes (WEEE). *Waste management (New York, N. Y.)*. doi:10.1016/j.wasman.2012.04.007
- Montgomery, D. (2001). *Design and analysis of experiments*. (W. Anderson, S. Russell, & E. Aiello, Eds.) (5th ed.). John Wiley & sons, Inc.
- Nakajima, J., Nakazawa, H., Sato, H., & Kudo, Y. (2001). Study on the Air Separation of PVC and PET. *Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan*, *117*(2), 123–126.
- Ongondo, F. O., Williams, I. D., & Cherrett, T. J. (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste management (New York, N. Y.)*, *31*(4), 714–30. doi:10.1016/j.wasman.2010.10.023
- Pascoe, R. D. (2005). Investigation of hydrocyclones for the separation of shredded fridge plastics. *Waste management (New York, N. Y.)*.
- Pascoe, R. D., & Hou, Y. Y. (1999). Investigation of the importance of particle shape and surface wettability on the separation of plastics in a LARCODEMS separator. *Minerals Engineering*, *12*(4), 423–431. doi:10.1016/S0892-6875(99)00022-9
- Piedade, M., & Aguiar, P. (2010). *Série guias técnicos 15 - opções de gestão de resíduos urbanos. Guias técnicos* (pp. 59–70). Lisboa.
- Pina, P., & Lira, C. (2009). Sediment Image Analysis as a Method to Obtain Rapid and Robust Size Measurements. *Journal of Coastal Research*, *2009*(56), 1562–1566.

- Pourghahramani, P., & Forssberg, E. (2004). REVIEW OF APPLIED PARTICLE SHAPE DESCRIPTORS AND PRODUCED PARTICLE SHAPES IN GRINDING ENVIRONMENTS . PART I : PARTICLE SHAPE DESCRIPTORS. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review : An International Journal*, (May 2013), 145–166. doi:10.1080/08827500590912095
- Ribeiro, A. (2009). *CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉCTRICOS E ELECTRÓNICOS (REEE) POR CATEGORIAS LEGAIS: CASO DE ESTUDO Amb3E*. Universidade Nova de Lisboa.
- Schluep, M., Hagelüken, C., Kuehr, R., Magalini, F., Maurer, C., Meskers, C. E. M., Mueller, E., et al. (2009). *Recycling - from e-waste to resources* (p. 94). Berlin.
- Schlummer, M., Gruber, L., Mäurer, A., Wolz, G., & Van Eldik, R. (2007). Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management. *Chemosphere*, 67(9), 1866–76. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.05.077
- Sekito, T., Matsuto, T., & Tanaka, N. (2006). Application of a gas-solid fluidized bed separator for shredded municipal bulky solid waste separation. *Waste management (New York, N. Y.)*, 26(12), 1422–9. doi:10.1016/j.wasman.2005.10.015
- Shent, H., Pugh, R. J., & Forssberg, E. (1999). A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, 25(2), 85–109. doi:10.1016/S0921-3449(98)00017-2
- Tarantili, P. a., Mitsakaki, a. N., & Petoussi, M. a. (2010). Processing and properties of engineering plastics recycled from waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Polymer Degradation and Stability*, 95(3), 405–410. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.029
- Taurino, R., Pozzi, P., & Zanasi, T. (2010). Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling. *Waste management (New York, N. Y.)*, 30(12), 2601–7. doi:10.1016/j.wasman.2010.07.014
- Tsunekawa, M., Kobayashi, R., Hori, K., Okada, H., Abe, N., Hiroyoshi, N., & Ito, M. (2012). Newly developed discharge device for jig separation of plastics to recover higher grade bottom layer product. *International Journal of Mineral Processing*, 114-117, 27–29. doi:10.1016/j.minpro.2012.09.003
- Tsunekawa, M., Naoi, B., Ogawa, S., Hori, K., Hiroyoshi, N., Ito, M., & Hirajima, T. (2005). Jig separation of plastics from scrapped copy machines. *International Journal of Mineral Processing*, 76(1-2), 67–74. doi:10.1016/j.minpro.2004.12.001
- UE. (2008). DIRECTIVA 2008/98/CE. Jornal Oficial da União Europeia.
- UE. (2009). DIRECTIVA 2009/125/CE. Jornal Oficial da União Europeia.
- UE. (2011). DIRECTIVA 2011/65/UE. Jornal Oficial da União Europeia.
- UE. (2012a). DIRETIVA 2012/19/UE. Jornal Oficial da União Europeia.
- UE. (2012b). Recast of the WEEE Directive. 28/09/2012. Retrieved January 9, 2013, from http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm
- UNEP. (2007). *E-WASTE Volume II: E-waste Management Manual*. Paris.
- Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2008). Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(4), 274–297. doi:10.1002/mame.200700393

- Wagland, S. T., Veltre, F., & Longhurst, P. J. (2012). Development of an image-based analysis method to determine the physical composition of a mixed waste material. *Waste management (New York, N. Y.)*, 32(2), 245–8. doi:10.1016/j.wasman.2011.09.019
- WEEForum. (2010). *2009 Key Figures* (p. 16). Retrieved from <http://www.weee-forum.org/services/quantitative-key-figures>
- Wu, G., Li, J., & Xu, Z. (2012). Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review. *Waste management (New York, N. Y.)*. doi:10.1016/j.wasman.2012.10.014
- Yang, X., Sun, L., Xiang, J., Hu, S., & Su, S. (2012). Pyrolysis and dehalogenation of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review. *Waste management (New York, N. Y.)*. doi:10.1016/j.wasman.2012.07.025

Anexos

6.1. Resultados experimentais da análise granulométrica

Tabela 0-1: Distribuição granulométrica do material ABS e HIPS provenientes da Renascimento (amostra A1).

Calibre (mm)	% cumulativa (peso)			
	ABS preto	ABS N preto	HIPS preto	HIPS N preto
2	8,76	8,71	11,52	9,03
2,8	33,62	34,85	39,44	33,65
4	72,44	74,33	79,19	75,79
5,6	93,43	96,41	97,84	96,60
8	99,85	99,81	100,00	99,96
11,2	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 0-2: Distribuição granulométrica do material ABS, PS e HIPS provenientes da Recieletric (amostra A2a).

Calibre (mm)	% cumulativa (peso)				
	ABS preto	ABS Não preto	PS preto	PS cristal	HIPS Não preto
2	8,633697	10,73171	7,774799	9,119746	9,05448718
2,8	33,94803	38,94309	33,95889	37,50991	37,0192308
4	76,36211	79,10569	76,40751	79,30214	77,4839744
5,6	97,65298	96,66667	96,78284	97,30373	96,474359
8	100	99,5935	99,7319	100	100
11,2	100	100	100	100	100

Tabela 0-3: Distribuição granulométrica do material ABS e PS provenientes da Recieletric (amostra A2b).

Calibre (mm)	% cumulativa (peso)						
	ABS Não preto	ABS preto	ABS misto	PS Não preto	PS preto	PS cristal	PS misto
2	3,38	2,74	2,47	2,35	1,10	21,40	3,38
2,8	9,59	11,29	9,80	9,12	3,63	35,93	13,73
4	36,51	42,78	42,07	38,84	20,17	66,25	52,06
5,6	92,07	90,83	94,74	86,19	66,50	96,68	93,77
8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
11,2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

6.2. Resultados experimentais da análise de imagem

Tabela 0-4: Média, desvio padrão (DP) e coeficiente de dispersão (CD) dos índices de solidez (SL), de circularidade (IC) e de forma (IF) para os materiais constituintes da amostra A1.

	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF
Calibre (mm)	ABS preto	ABS preto	ABS preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS	ABS	ABS	HIPS preto	HIPS preto	HIPS preto	HIPS N preto	HIPS N preto	HIPS N preto	HIPS	HIPS	HIPS
2,8	0,91	0,73	0,64	0,91	0,75	0,66	0,91	0,74	0,65	0,92	0,76	0,65	0,91	0,75	0,68	0,92	0,76	0,66
4	0,91	0,73	0,68	0,92	0,75	0,66	0,91	0,74	0,67	0,92	0,75	0,66	0,92	0,75	0,69	0,92	0,75	0,67
5,6	0,90	0,70	0,68	0,91	0,72	0,69	0,91	0,72	0,69	0,92	0,74	0,68	0,92	0,74	0,70	0,92	0,74	0,69
8	0,90	0,70	0,70	0,91	0,70	0,69	0,90	0,70	0,69	0,92	0,72	0,70	0,92	0,72	0,71	0,92	0,72	0,70
11,2	0,85	0,60	0,66	0,91	0,73	0,73							0,82					
	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF
	ABS preto	ABS preto	ABS preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS	ABS	ABS	HIPS preto	HIPS preto	HIPS preto	HIPS N preto	HIPS N preto	HIPS N preto	HIPS	HIPS	HIPS
2,8	0,06	0,12	0,15	0,05	0,11	0,15	0,05	0,12	0,15	0,04	0,11	0,16	0,04	0,10	0,15	0,04	0,11	0,15
4	0,05	0,11	0,15	0,05	0,11	0,15	0,05	0,11	0,15	0,05	0,11	0,15	0,04	0,11	0,15	0,05	0,11	0,15
5,6	0,06	0,12	0,16	0,05	0,11	0,15	0,05	0,11	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05	0,11	0,15	0,05	0,11	0,15
8	0,07	0,13	0,16	0,06	0,12	0,15	0,06	0,12	0,16	0,04	0,10	0,15	0,04	0,09	0,16	0,04	0,09	0,15
11,2																		
	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF
	ABS preto	ABS preto	ABS preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS	ABS	ABS	HIPS preto	HIPS preto	HIPS preto	HIPS N preto	HIPS N preto	HIPS N preto	HIPS	HIPS	HIPS
2,8	0,06	0,16	0,24	0,05	0,14	0,23	0,06	0,16	0,24	0,05	0,14	0,24	0,05	0,14	0,22	0,05	0,14	0,24
4	0,05	0,15	0,21	0,05	0,15	0,23	0,05	0,15	0,22	0,05	0,15	0,23	0,04	0,14	0,22	0,05	0,14	0,23
5,6	0,07	0,17	0,24	0,06	0,15	0,21	0,06	0,16	0,22	0,05	0,14	0,21	0,05	0,15	0,22	0,05	0,14	0,22
8	0,07	0,18	0,23	0,06	0,17	0,22	0,07	0,17	0,23	0,04	0,13	0,22	0,04	0,13	0,22	0,04	0,13	0,22
11,2																		

Tabela 0-5: Média, desvio padrão (DP) e coeficiente de dispersão (CD) dos índices de solidez (SL), de circularidade (IC) e de forma (IF) para os materiais constituintes da amostra A2a.

	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF
Calibre (mm)	ABS N preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS preto	ABS preto	ABS preto	ABS	ABS	ABS	HIPS N preto	HIPS N preto	HIPS N preto	PS preto	PS preto	PS preto	PS cristal	PS cristal	PS cristal	PS	PS	PS
2,8	0,92	0,75	0,63	0,91	0,73	0,61	0,91	0,73	0,62	0,93	0,76	0,63	0,91	0,73	0,61	0,93	0,77	0,64	0,92	0,75	0,62
4	0,90	0,72	0,64	0,90	0,72	0,66	0,90	0,72	0,65	0,93	0,75	0,66	0,91	0,73	0,66	0,93	0,77	0,66	0,92	0,75	0,66
5,6	0,90	0,70	0,69	0,90	0,71	0,70	0,90	0,70	0,70	0,93	0,74	0,67	0,91	0,71	0,68	0,93	0,75	0,68	0,92	0,73	0,68
8	0,89	0,67	0,72	0,90	0,68	0,72	0,89	0,67	0,72	0,93	0,72	0,71	0,91	0,66	0,63	0,94	0,75	0,70	0,93	0,71	0,67
11,2	0,94	0,77	0,69										0,96	0,76	0,51						
	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF
	ABS N preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS preto	ABS preto	ABS preto	ABS	ABS	ABS	HIPS branco	HIPS branco	HIPS branco	PS preto	PS preto	PS preto	PS cristal	PS cristal	PS cristal	PS	PS	PS
2,8	0,05	0,11	0,16	0,05	0,11	0,16	0,05	0,11	0,16	0,03	0,11	0,16	0,05	0,11	0,16	0,04	0,10	0,16	0,05	0,11	0,16
4	0,06	0,12	0,16	0,05	0,11	0,15	0,05	0,11	0,16	0,04	0,10	0,15	0,05	0,11	0,15	0,04	0,09	0,15	0,04	0,10	0,15
5,6	0,07	0,13	0,16	0,05	0,11	0,14	0,06	0,12	0,15	0,04	0,10	0,15	0,05	0,11	0,15	0,03	0,10	0,16	0,05	0,11	0,16
8	0,07	0,14	0,14	0,05	0,10	0,16	0,06	0,13	0,14	0,03	0,07	0,14	0,04	0,11	0,19	0,03	0,10	0,16	0,04	0,11	0,17
11,2		0,02	0,01											0,00	0,00						
	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF
	ABS N preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS preto	ABS preto	ABS preto	ABS	ABS	ABS	HIPS branco	HIPS branco	HIPS branco	PS preto	PS preto	PS preto	PS cristal	PS cristal	PS cristal	PS	PS	PS
2,8	0,05	0,15	0,26	0,06	0,16	0,26	0,06	0,16	0,26	0,03	0,14	0,25	0,06	0,16	0,26	0,04	0,13	0,24	0,05	0,15	0,25
4	0,06	0,16	0,26	0,06	0,15	0,23	0,06	0,16	0,24	0,04	0,13	0,22	0,06	0,15	0,23	0,04	0,12	0,23	0,05	0,14	0,23
5,6	0,08	0,19	0,22	0,06	0,16	0,21	0,07	0,17	0,21	0,04	0,14	0,23	0,06	0,15	0,22	0,04	0,13	0,24	0,05	0,14	0,23
8	0,08	0,22	0,19	0,05	0,15	0,22	0,07	0,19	0,20	0,03	0,10	0,19	0,04	0,17	0,29	0,04	0,13	0,22	0,04	0,15	0,26
11,2																					

Tabela 0-6: Média, desvio padrão (DP) e coeficiente de dispersão (CD) dos índices de solidez (SL), de circularidade (IC) e de forma (IF) para o ABS amostra A2b.

	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF
Calibre (mm)	ABS preto	ABS preto	ABS preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS N preto	ABS Misto	ABS Misto	ABS Misto	ABS	ABS	ABS
2,8	0,92	0,74	0,60	0,92	0,72	0,58	0,93	0,75	0,60	0,92	0,74	0,59
4	0,93	0,75	0,64	0,93	0,73	0,60	0,93	0,74	0,63	0,93	0,74	0,63
5,6	0,93	0,78	0,72	0,94	0,77	0,69	0,93	0,77	0,70	0,94	0,77	0,70
8	0,94	0,79	0,78	0,94	0,79	0,76	0,94	0,78	0,75	0,94	0,79	0,77
11,2												
	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF
	ABS preto	ABS preto	ABS preto	ABS branco	ABS branco	ABS branco	ABS Misto	ABS Misto	ABS Misto	ABS	ABS	ABS
2,8	0,041	0,106	0,163	0,042	0,104	0,163	0,034	0,106	0,171	0,040	0,106	0,165
4	0,033	0,089	0,148	0,037	0,093	0,154	0,031	0,086	0,153	0,033	0,090	0,152
5,6	0,029	0,077	0,126	0,029	0,078	0,135	0,027	0,076	0,133	0,028	0,077	0,132
8	0,029	0,081	0,102	0,026	0,075	0,111	0,026	0,076	0,111	0,028	0,078	0,107
11,2												
	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF
	ABS preto	ABS preto	ABS preto	ABS branco	ABS branco	ABS branco	ABS Misto	ABS Misto	ABS Misto	ABS	ABS	ABS
2,8	0,04	0,14	0,27	0,05	0,14	0,28	0,04	0,14	0,29	0,04	0,14	0,28
4	0,04	0,12	0,23	0,04	0,13	0,26	0,03	0,12	0,24	0,04	0,12	0,24
5,6	0,03	0,10	0,17	0,03	0,10	0,20	0,03	0,10	0,19	0,03	0,10	0,19
8	0,03	0,10	0,13	0,03	0,09	0,15	0,03	0,10	0,15	0,03	0,10	0,14
11,2												

Tabela 0-7: Média, desvio padrão (DP) e coeficiente de dispersão (CD) dos índices de solidez (SL), de circularidade (IC) e de forma (IF) para o PS amostra A2b.

	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF	Média SL	Média IC	Média IF
Calibre (mm)	PS preto	PS preto	PS preto	PS N preto	PS N preto	PS N preto	PS Misto	PS Misto	PS Misto	PS cristal	PS cristal	PS cristal	PS	PS	PS
2,8	0,92	0,73	0,58	0,93	0,77	0,63	0,93	0,76	0,62	0,95	0,83	0,68	0,94	0,80	0,65
4	0,93	0,74	0,59	0,94	0,76	0,63	0,94	0,77	0,65	0,95	0,82	0,67	0,94	0,78	0,65
5,6	0,93	0,75	0,67	0,94	0,78	0,71	0,94	0,79	0,73	0,95	0,83	0,73	0,94	0,79	0,71
8	0,94	0,78	0,76	0,95	0,81	0,77	0,94	0,79	0,79	0,96	0,85	0,80	0,94	0,79	0,77
11,2															
	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF	DP SL	DP IC	DP IF
	PS preto	PS preto	PS preto	PS branco	PS branco	PS branco	PS Misto	PS Misto	PS Misto	PS cristal	PS cristal	PS cristal	PS	PS	PS
2,8	0,04	0,11	0,17	0,03	0,09	0,16	0,03	0,10	0,16	0,02	0,08	0,14	0,03	0,09	0,15
4	0,03	0,10	0,16	0,03	0,09	0,15	0,03	0,08	0,14	0,02	0,07	0,13	0,03	0,09	0,15
5,6	0,03	0,08	0,14	0,02	0,07	0,13	0,02	0,07	0,12	0,02	0,06	0,12	0,02	0,07	0,13
8	0,03	0,07	0,13	0,02	0,06	0,12	0,02	0,06	0,10	0,01	0,05	0,09	0,02	0,07	0,12
11,2															
	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF	CD SL	CD IC	CD IF
	PS preto	PS preto	PS preto	PS branco	PS branco	PS branco	PS Misto	PS Misto	PS Misto	PS cristal	PS cristal	PS cristal	PS	PS	PS
2,8	0,04	0,16	0,29	0,03	0,12	0,25	0,03	0,13	0,26	0,02	0,09	0,21	0,03	0,12	0,24
4	0,04	0,13	0,27	0,03	0,11	0,24	0,03	0,10	0,22	0,02	0,09	0,20	0,03	0,11	0,22
5,6	0,03	0,10	0,20	0,02	0,09	0,19	0,02	0,09	0,17	0,02	0,07	0,16	0,03	0,09	0,18
8	0,03	0,10	0,18	0,02	0,08	0,15	0,02	0,08	0,13	0,02	0,06	0,11	0,03	0,09	0,16
11,2															

6.3. Resultados experimentais da separabilidade

Tabela 0-8: Ensaios de afinação dos parâmetros - variação do ângulo

FRACÇÃO	Ensaio	α	%PS_A	%ABS_A	%PS_S	%PS_I	%PS_I/%A	%ABS_S	%ABS_I	%ABS_S/%A	η PS S	η PS I	η ABS S	η ABS I
	4		0,36	0,64	0,332	0,553	1,5389	0,67356	0,4519	1,0476	0,86	0,11	0,97	0,05
+4-5,6	v=6	17			0,341	0,566	1,5749	0,66243	0,4474	1,0303	0,90	0,08	0,98	0,04
	h=16 cm				0,335	0,563	1,5657	0,66743	0,4464	1,038	0,86	0,12	0,96	0,05
	Ensaio	α	%PS_A	%ABS_A	%PS_S	%PS_I		%ABS_S	%ABS_I		η PS S	η PS I	η ABS S	η ABS I
	1		0,36	0,64	0,31	0,44	1,2181	0,70	0,56	1,0822	0,52	0,48	0,66	0,35
+4-5,6	v=6	21			0,29	0,44	1,2286	0,71	0,56	1,1047	0,44	0,56	0,60	0,39
	h=16 cm				0,30	0,44	1,2323	0,70	0,56	1,0863	0,50	0,50	0,64	0,35
	Ensaio	α	%PS_A	%ABS_A	%PS_S	%PS_I		%ABS_S	%ABS_I		η PS S	η PS I	η ABS S	η ABS I
	8		0,36	0,64	0,26	0,39	1,089	0,74	0,61	1,1586	0,17	0,83	0,28	0,72
+4-5,6	v=6	25			0,28	0,38	1,0702	0,72	0,62	1,1279	0,17	0,83	0,25	0,75
	h=16 cm				0,26	0,39	1,0787	0,74	0,61	1,1553	0,16	0,83	0,26	0,74

Tabela 0-9: Ensaios de afinação dos parâmetros - variação da altura de alimentação

FRACÇÃO	Ensaio	α	%PS_A	%ABS_A	%PS_S	%PS_I	%PS_I/%A	%ABS_S	%ABS_I	%ABS_S/%A	η PS S	η PS I	η ABS S	η ABS I
	1		0,36	0,644224	0,31	0,46	1,288	0,70	0,54	1,0808419	0,56	0,44	0,72	0,28
+4-5,6	v=6	21			0,27	0,43	1,193	0,74	0,59	1,1423688	0,44	0,51	0,65	0,39
	h=14 cm				0,29	0,47	1,317	0,72	0,54	1,122908	0,47	0,54	0,66	0,34
	Ensaio	α	%PS_A	%ABS_A	%PS_S	%PS_I		%ABS_S	%ABS_I		η PS S	η PS I	η ABS S	η ABS I
	3		0,36	0,64	0,29	0,44	1,241	0,71	0,56	1,0981182	0,47	0,52	0,63	0,36
+4-5,6	v=6	21			0,29	0,43	1,207	0,71	0,57	1,1011072	0,46	0,52	0,62	0,38
	h=15 cm				0,28	0,45	1,257	0,72	0,55	1,115802	0,45	0,53	0,63	0,36

Tabela 0-10: Ensaio de afinação dos parâmetros - variação da velocidade da tela

FRAÇÃO	Ensaio	v	%PS_A	%ABS_A	%PS_S	%PS_I	%PS_I/%A	%ABS_S	%ABS_I	%ABS_S/%A	η PS S	η PS I	η ABS S	η ABS I
	5		0,36	0,65	0,307	0,470	1,31778407	0,694	0,535	1,06825552	0,61	0,39	0,76	0,24
+4-5,6	α=21	3			0,313	0,469	1,31363407	0,687	0,531	1,05795098	0,62	0,39	0,75	0,24
	h=14 cm				0,295	0,461	1,29243998	0,705	0,539	1,08539272	0,59	0,38	0,77	0,25
FRAÇÃO	Ensaio	v	%PS_A	%ABS_A	%PS_S	%PS_I	%PS_I/%A	%ABS_S	%ABS_I	%ABS_S/%A	η PS S	η PS I	η ABS S	η ABS I
	7		0,36	0,65	0,291	0,452	1,24763794	0,709	0,548	1,08799604	0,45	0,56	0,61	0,38
+4-5,6	α=21	9			0,301	0,448	1,23689274	0,699	0,552	1,07297806	0,46	0,56	0,60	0,38
	h=14 cm				0,280	0,459	1,26461479	0,721	0,544	1,10741789	0,44	0,56	0,63	0,37

Tabela 0-11: Ensaio de separação - Fração +4-5,6mm composição PS:ABS 50%:50%

FRAÇÃO	Ensaio	h	%PS_A	%ABS_A	%PS_S	%PS_I	%PS_I/%A	%ABS_S	%ABS_I	%ABS_S/%A	η PS S	η PS I	η ABS S	η ABS I
	1		0,50	0,50	0,44	0,57	1,13	0,56	0,43	1,11284	0,49	0,50	0,61	0,39
+4-5,6	α=21	14			0,47	0,55	1,10	0,53	0,45	1,05098	0,49	0,52	0,55	0,43
	v=6				0,44	0,56	1,12	0,56	0,44	1,11194	0,46	0,54	0,58	0,42

Tabela 0-12: Ensaio de separação - Fração +5,6-8mm composição PS:ABS 50%:50%

FRAÇÃO	Ensaio	h	%PS_A	%ABS_A	%PS_S	%PS_I	%PS_I/%A	%ABS_S	%ABS_I	%ABS_S/%A	η PS S	η PS I	η ABS S	η ABS I
	2		0,50	0,50	0,36	0,64	1,28	0,64	0,36	1,27536	0,38	0,62	0,29	0,66
+5,6-8	α=21	14			0,40	0,63	1,26	0,59	0,37	1,18261	0,47	0,54	0,22	0,68
	v=6				0,38	0,64	1,28	0,62	0,36	1,23214	0,43	0,57	0,26	0,69

Tabela 0-13:Ensaio de separação - Fração +4-5,6mm composição PS:ABS 27%:73%

FRAÇÃO	Ensaio	h	%PS_A	%ABS_A	%PS_S	%PS_I	%PS_I/%A	%ABS_S	%ABS_I	%ABS_S/%A	η PS S	η PS I	η ABS S	η ABS I
	2		0,27	0,73	0,23	0,39	1,435	0,78	0,62	1,071191	0,50	0,60	0,62	0,36
+5,6-8	v=6	21			0,22	0,43	1,562	0,79	0,58	1,0860829	0,51	0,59	0,68	0,30
	h=14 cm				0,25	0,36	1,331	0,77	0,64	1,0538015	0,50	0,59	0,58	0,40