

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente

Reciclagem de Plásticos: Identificação de contaminantes e estratégias de valorização dos resíduos industriais

Por

Misael Carapinha Letras

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente, Perfil de Engenharia Sanitária

Orientador científico Professora Doutora Ana Isabel Espinha da Silveira

Lisboa 2008

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Doutora Ana Silveira pela dedicação, esforço e empenho neste trabalho, pela busca contínua de soluções, pela promoção de troca de informações junto de diversas pessoas do meio científico e pelos conselhos transmitidos.

À Professora Doutora Maria da Graça Martinho da FCT/UNL e ao Monsieur Bernard Morvan do Cemagref de Rennes, agradeço a atenção, transmissão de experiência e opiniões na área da gestão de resíduos.

À Ambiente, Valorização de Materiais Plásticos, S.A., um agradecimento pela disponibilidade revelada durante a execução do trabalho prático, em especial aos operadores que participaram nas recolhas dos resíduos e ao Engenheiro Paulo Pires pela sempre atenta disponibilidade em prestar esclarecimentos sobre a indústria.

À Engenheira Ana Pires, agradeço a disponibilidade na transmissão de conhecimentos na área de materiais e da gestão de resíduos.

Um reconhecimento à Engenheira Maria José Correia pelo carinho, profissionalismo e empenho no trabalho laboratorial.

À Professora Doutora Ana Amaro do ISG agradeço a paciência e clareza no esclarecimento de dúvidas na área da Estatística.

Agradeço às colegas de curso Ana Pernes, Diana Farinha, Inês Gamito e Mafalda Martins pelo esforço e empenho em todo o trabalho que desenvolvemos juntas, os almoços, as discussões, as viagens, os maus cheiros, enfim, todos aqueles momentos.

Por fim, agradeço aos amigos, porque um amigo é alguém com quem se pode contar e nestes incluo os meus pais, avós, irmã e namorado.

A dissertação teve como primeiro objectivo a identificação e quantificação de contaminantes do processo de reciclagem mecânica de plásticos de polietileno de alta densidade (PEAD) e polietileno de baixa densidade (PEBD). Desta forma aplicou-se o método da análise de inertes, descrito na norma XP U44-164, da Associação Francesa de Normalização (AFNOR) e que é utilizado para classificar o composto. Os procedimentos experimentais foram aplicados na análise dos resíduos Pré-lavagem, Moinha e Final, produzidos durante o processo de reciclagem.

O método adoptado permitiu identificar de forma expedita os principais contaminantes plásticos, poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET) e policloreto de vinilo (PVC), e outros contaminantes, matéria orgânica, metais, vidros, pedras e areias.

Uma vez que, actualmente, estes resíduos são depositados em aterro, considerou-se importante estudar outras formas de valorização. Assim, o segundo objectivo deste trabalho corresponde à caracterização físico-química dos resíduos da reciclagem de plásticos, de forma a avaliar o seu potencial para valorização energética. As alternativas consideradas foram a incineração e a co-incineração, e os resultados comparados com as normas em vigor.

A comparação dos resultados obtidos com as especificações da EURITS, no caso das unidades de incineração dedicada, e da indústria cimenteira Secil, no caso da co-incineração permitiram concluir que os resíduos em questão têm potencial para valorização energética.

ABSTRACT

The dissertation had as first objective the identification and quantification of contaminants in the process of mechanical recycling of high density polyethylene (HDPE) and low density polyethylene (LDPE) plastics. In this way, it was applied the method of inert analysis, described in the standard XP U44-164, of the French Normalisation Association (AFNOR), which is used in the classification of compost.

The experimental procedures were applied in the analysis of residues Pré-lavagem, Moinha and Final, produced during the recycling process.

The method adopted allowed the expedite identification of the major plastic contaminants, polystyrene (PS), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET) and polyvinyl chloride (PVC), and others, organic matter, metals, glass, stones and sands.

Since, nowadays, this residues are being disposed in landfills, it was considered to be important the study of other forms of valorisation. Thus, the second objective of this work corresponds to the physic-chemical characterization of the plastics recycling residues, to evaluate the potential of energetic valorisation. The alternatives considered were incineration and co-incineration, and the results were compared with the current standards.

The comparison of the results obtained with the EURITS specifications, in the case of the dedicated incineration units, and the cement industry Secil, in the case of co-incineration, permitted to conclude that the residues in question have potential to be energetically valorised.

SIMBOLOGIA E NOTAÇÕES

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AFNOR	Association Française de Normalisation
Al	Alumínio
APME	Association of Plastics Manufacturers in Europe
As	Arsénio
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ba	Bário
Br	Bromo
CEN/TC 343	Comité Europeu de Normalização – Comité Técnico 343
Cd	Cádmio
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
Cl	Cloro
Co	Cobalto
Cr	Crómio
CSR	Combustível Sólido Recuperado
Cu	Cobre
DCEA, FCT/UNL	Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
DIN	Deutsches Institut für Norming
EEE	Equipamento Eléctrico e Electrónico
EN	European Norm
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
EURITS	European Union for Responsible Incineration and Treatment of Special Waste
F	Flúor
FTIR	Fourier Transformed Infra-Red
FTR	Fourier Transformed Raman
Hg	Mercúrio
HDPE	High Density Polyethylene
HIPS	High Impact Polystyrene
INR	Instituto dos Resíduos
ISO	International Organization for Standardization
K	Potássio

LDPE	Low Density Polyethylene
LER	Lista Europeia de Resíduos
LIBS	Laser-Induced Breakdown Spectroscopy
LIESA	Laser-Induced Atomic Emission Spectral Analysis
LIPS	Laser-Induced Plasma Spectroscopy
m/m	Massa/massa
MIR	Middle Infra-Red
Na	Sódio
Ni	Níquel
NIR	Near Infra-Red
PA	Poliamida
Pb	Chumbo
PBT	Polibutileno Tereftalato
PC	Policarbonato
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PDF	Paper Derived Fuel
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PERSU II	Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos II (2007-2016)
PESGRI	Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Industriais
PET	Polietileno Tereftalato
PMMA	Poli (metil metacrilato)
PNAPRI	Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais
POM	Poliacetal
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PSAI	Poliestireno de Alto Impacto
PSE	Poliestireno Expansível
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de Vinilo
PyIR	Pyrolysis Infra-Red
PyMS	Pyrolysis Mass Spectroscopy
RDF	Refuse Derived Fuel
RE	Resíduos de Embalagem
REEE	Resíduos de Equipamento Eléctrico e Electrónico
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

S	Enxofre
SAE	Society of Automobile Engineers
SAN	Estireno Acrilonitrila
Sb	Antimónio
Se	Selénio
SIGRE	Sistema Integrado de Gestão de Resíduos de Embalagem
Sn	Estanho
SPI	American Society of the Plastics Industry
SPV	Sociedade Ponto Verde
SRF	Solid Recovered Fuel
Tl	Tálio
TMB	Tratamento Mecânico e Biológico
UE	União Europeia
V	Vanádio
Zn	Zinco

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Simbologia e Notações.....	ix
1. Introdução	1
2. Objectivos.....	4
3. Organização do trabalho.....	5
Capítulo 1 – Revisão da Literatura.....	7
1.1. Plásticos: origem e aplicações.....	7
1.2. Consumo de Plásticos na Europa Ocidental.....	10
1.3. Gestão integrada dos plásticos.....	14
1.3.1. Plásticos e o Desenvolvimento Sustentável.....	14
1.3.2. Políticas de gestão de plásticos.....	17
1.4. Recuperação e Reciclagem de resíduos plásticos.....	22
1.4.1. Fileiras dos resíduos plásticos.....	22
1.4.2. Identificação e separação de resíduos plásticos.....	25
1.4.3. Reciclagem de resíduos plásticos.....	37
1.5. Reciclagem Mecânica.....	41
1.5.1. Moagem.....	42
1.5.2. Lavagem.....	42
1.5.3. Secagem.....	43
1.5.4. Extrusão.....	44
1.5.5. Critérios de qualidade dos plásticos reciclados.....	45
1.6. Gestão de resíduos da reciclagem de plásticos.....	47
1.6.1. Valorização energética: incineração e co-incineração.....	48
1.6.2. Deposição em aterro.....	52
Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo	55
2.1. Selecção do Caso de Estudo.....	55
2.2. Caso de Estudo: Ambiente, Recuperação de Materiais Plásticos, S.A.....	56
Capítulo 3 – Metodologia	61
3.1. Planeamento do trabalho.....	61

3.2. Selecção dos locais de amostragem	62
3.3. Selecção e recolha das amostras de resíduos.....	62
3.4. Tratamento das amostras de resíduos.....	64
3.5. Métodos analíticos para caracterização de contaminantes nos resíduos.....	65
3.6. Métodos analíticos para caracterização físico-química dos resíduos.....	66
3.7. Métodos estatísticos para o tratamento dos resultados	67
Capítulo 4 – Apresentação e discussão de resultados	71
4.1. Análise de contaminantes nos resíduos	71
4.1.1. Reprodutibilidade do método da análise de contaminantes nos resíduos.....	71
4.1.2. Verificação da influência dos materiais processados na composição dos resíduos.....	82
4.1.3. Contaminantes da indústria de reciclagem de plásticos.....	84
4.1.4. Resumo	87
4.2. Caracterização do Resíduo Pré-lavagem.....	90
4.2.1. Caracterização físico-química	90
4.2.2. Caracterização elementar	92
4.2.3. Metais	93
4.2.4. Verificação da conformidade com as normas.....	99
4.3. Caracterização do resíduo Moinha	102
4.3.1. Caracterização físico-química	102
4.3.2. Caracterização Elementar	104
4.3.3. Metais	105
4.3.4. Verificação da conformidade com as normas.....	109
4.4. Caracterização do resíduo Final.....	111
4.4.1. Caracterização físico-química	111
4.4.2. Caracterização elementar	113
4.4.3. Metais	114
4.4.4. Verificação da conformidade com as normas.....	119
Capítulo 5 – Considerações Finais	121
5.1. Considerações sobre a análise de contaminantes nos resíduos.....	121
5.2. Considerações sobre a valorização energética dos resíduos.....	123
Capítulo 6 – Conclusões e Trabalho Futuro	127
Referências Bibliográficas.....	131
Anexo A: Análise de Contaminantes nos Resíduos.....	137
Anexo B: Humidade	141
Anexo C: Cinzas e Sólidos Voláteis.....	145
Anexo D: Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI).....	147

Anexo E: Caracterização Elementar	149
Anexo F: Cloro e Enxofre	153
Anexo G: Outros Metais.....	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Polímeros: dos recursos primários aos produtos finais (Azapagic et al., 2003).	8
Figura 1.2. Consumo de plásticos na Europa Ocidental no ano de 2002 (Plastics Europe, 2004).	11
Figura 1.3. Consumo de plásticos por sector na Europa Ocidental no ano de 2003 (Plastics Europe, 2004).	12
Figura 1.4. Hierarquia da gestão de resíduos, em ordem decrescente de preferência (Azapagic et al. 2003).	14
Figura 1.5. Ciclo de vida dos materiais e produtos poliméricos (Azapagic et al., 2003).	16
Figura 1.6. Sistematização dos processos de recuperação e reciclagem de resíduos plásticos (Brandrup et al., 1995).	17
Figura 1.7. Resíduos plásticos totais recuperados por categoria, na Europa Ocidental em 2002 (Plastics Europe, 2004).	25
Figura 1.8. Simbologia utilizada para identificação de plásticos, de acordo com a Directiva n.º 94/62/CE.	26
Figura 1.9. Esquema dos métodos de identificação de plásticos (Brandrup et al., 1995).	27
Figura 1.10. Esquema de separação de resíduos plásticos por diferenças de densidade (Spinacé et al., 2005).	35
Figura 1.11. Diagrama do processo de separação de plásticos via «froth flotation» (Daniels, 1997).	36
Figura 1.12. Recuperação de plásticos em 2003 (x1000 toneladas/ano) (Plastics Europe, 2004).	39
Figura 2.1. Planta da indústria de reciclagem de plásticos (Ambiente, S.A.).	56
Figura 2.2. Plásticos provenientes dos RSU. À esquerda, filmes de PEAD/PEBD, à direita, embalagens rígidas de PEAD (Central de TMB da Amarsul em Setúbal, 2007).	57
Figura 2.3. Plásticos provenientes do ecoponto amarelo: filmes de PEAD/PEBD (Central de Triagem da Amarsul em Palmela, 2007).	57
Figura 2.4. Crivo de tambor rotativo “Trommel”, com malha de 100mm.	57
Figura 2.5. Triturador de corte: aspecto exterior e pormenor do eixo de corte.	58
Figura 2.6. Polietileno de alta e baixa densidade triturado.	58
Figura 2.7. Resíduo Pré-lavagem, removido na primeira lavagem.	59
Figura 2.8. Resíduo Moinha, removido na ETAR da indústria.	59
Figura 2.9. Resíduo Final, removido na última lavagem no tanque com pás rotativas.	59
Figura 2.10. Polietileno seco.	59
Figura 2.11. Granulado de PEAD/PEBD produzido por extrusão.	59

Figura 4.1. Contaminação média do resíduo Pré-lavagem.	85
Figura 4.2. Contaminação média do resíduo Moinha.	86
Figura 4.3. Contaminação média do resíduo Final.	87
Figura 4.4. Contaminação média dos resíduos.	88
Figura 4.5. Humidade do resíduo Pré-lavagem.	91
Figura 4.6. Teor de cinzas do resíduo Pré-lavagem.	91
Figura 4.7. Poder Calorífico Superior e Inferior do resíduo Pré-lavagem.	91
Figura 4.8. Composição físico-química, média, do resíduo Pré-lavagem.	92
Figura 4.9. Composição elementar média do resíduo Pré-lavagem.	93
Figura 4.10. Alumínio no resíduo Pré-lavagem.	95
Figura 4.11. Bário no resíduo Pré-lavagem.	95
Figura 4.12. Cádmio no resíduo Pré-lavagem.	95
Figura 4.13. Chumbo no resíduo Pré-lavagem.	96
Figura 4.14. Cobalto no resíduo Pré-lavagem.	96
Figura 4.15. Cobre no resíduo Pré-lavagem.	96
Figura 4.16. Crómio no resíduo Pré-lavagem.	97
Figura 4.17. Estanho no resíduo Pré-lavagem.	97
Figura 4.18. Níquel no resíduo Pré-lavagem.	97
Figura 4.19. Selénio no resíduo Pré-lavagem.	98
Figura 4.20. Sódio no resíduo Pré-lavagem.	98
Figura 4.21. Tálho no resíduo Pré-lavagem.	98
Figura 4.22. Zinco no resíduo Pré-lavagem.	99
Figura 4.23. Mercúrio no resíduo Pré-lavagem.	99
Figura 4.24. Humidade do resíduo Moinha.	103
Figura 4.25. Teor de cinzas do resíduo Moinha.	103
Figura 4.26. Poder Calorífico Superior e Inferior do resíduo Moinha.	103
Figura 4.27. Composição físico-química, média, do resíduo Moinha.	104
Figura 4.28. Composição elementar média do resíduo Moinha.	105
Figura 4.29. Cádmio no resíduo Moinha.	107
Figura 4.30. Cobalto no resíduo Moinha.	107
Figura 4.31. Cobre no resíduo Moinha.	107
Figura 4.32. Crómio no resíduo Moinha.	108
Figura 4.33. Selénio no resíduo Moinha.	108
Figura 4.34. Antimónio no resíduo Moinha.	108
Figura 4.35. Zinco no resíduo Moinha.	109
Figura 4.36. Humidade do resíduo Final.	112

Figura 4.37. Teor de cinzas do resíduo Final.	112
Figura 4.38. Poder Calorífico Superior e Inferior do resíduo Final.	112
Figura 4.39. Composição físico-química, média, do resíduo Final.	113
Figura 4.40. Composição elementar média do resíduo Final.	114
Figura 4.41. Alumínio no resíduo Final.	115
Figura 4.42. Bário no resíduo Final.	116
Figura 4.43. Cádmio no resíduo Final.	116
Figura 4.44. Cobalto no resíduo Final.	116
Figura 4.45. Cobre no resíduo Final.	117
Figura 4.46. Níquel no resíduo Final.	117
Figura 4.47. Potássio no resíduo Final.	117
Figura 4.48. Selênio no resíduo Final.	118
Figura 4.49. Antimônio no resíduo Final.	118
Figura 4.50. Tálcio no resíduo Final.	118
Figura 4.51. Zinco no resíduo Final.	119
Figura 4.52. Mercúrio no resíduo Final.	119
Figura 5.1 Contaminantes no resíduo Pré-lavagem (peso seco).	121
Figura 5.2. Contaminantes no resíduo Moinha (peso seco).	121
Figura 5.3. Contaminantes no resíduo Final (peso seco).	122
Figura 5.4. Contaminação global dos resíduos (peso seco).	122

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Aplicações dos termoplásticos (Adaptado de Gondal e Siddiqui, 2007).	9
Tabela 1.2. Consumo de plásticos por sector na Europa Ocidental no ano de 2003 (Plastics Europe, 2004).	12
Tabela 1.3. Objectivos de valorização e reciclagem para os resíduos de embalagens, em Portugal (INR, 2007).	19
Tabela 1.4. Tipologias de resíduos plásticos de acordo com origem e aplicação (Brandrup et al., 1995).	23
Tabela 1.5. Densidades específicas dos plásticos de acordo com 1) Brandrup et al., 1995, 2) Azapagic et al., 2003 e 3) Brandrup et al., 1999.	34
Tabela 1.6. Embalagens plásticas geridas para reciclagem e valorização, em Portugal entre 1998 e 2005 (Fonte: INR, 2007).	40
Tabela 1.7. Resíduos de embalagens de plástico reciclados: resultados da Sociedade Ponto Verde (SPV, 2008).	40
Tabela 1.8. Compatibilidade entre termoplásticos de acordo com 1)Brandrup et al., 1995e 2) Brognoli, 2006).	46
Tabela 1.9. Características físicas e composição química: critérios de admissibilidade (1) Gendebien et al., 2003, 2) ESA01, 2005.	51
Tabela 1.10. Concentração de metais: critérios de admissibilidade (1) Gendebien et al., 2003, 2) ESA01, 2005.	51
Tabela 1.11. Especificações CEN/TC 343 para SRF (CEN/TS 15359:2005).	52
Tabela 3.1. Cronograma do trabalho.....	61
Tabela 3.2. Datas das campanhas de recolha, material processado e quantidade recolhida.	63
Tabela 3.3. Fracções e materiais separados por aplicação da Norma XP U44-164.	65
Tabela 3.4. Métodos de análise para a caracterização físico-química dos resíduos.	66
Tabela 3.5. Interpretação dos valores de p num teste de hipóteses.	68
Tabela 4.1. Matéria orgânica no resíduo Pré-lavagem.	72
Tabela 4.2. Matéria orgânica no resíduo Moinha.	72
Tabela 4.3. Matéria orgânica no resíduo Final.	73
Tabela 4.4. Finos no resíduo Pré-lavagem.	73
Tabela 4.5. Finos no resíduo Moinha.	74
Tabela 4.6. Finos no resíduo Final.	74

Tabela 4.7. Fracção leves no resíduo Pré-lavagem.	75
Tabela 4.8. Fracção leves no resíduo Moinha.	76
Tabela 4.9. Fracção leves no resíduo Final.	76
Tabela 4.10. Fracção semi-pesados no resíduo Pré-lavagem.	77
Tabela 4.11. Fracção semi-pesados no resíduo Moinha.	78
Tabela 4.12. Fracção semi-pesados no resíduo Final.	78
Tabela 4.13. Fracção pesados no resíduo Pré-lavagem.	79
Tabela 4.14. Fracção pesados no resíduo Final.	80
Tabela 4.15. Metais no resíduo Pré-lavagem.	81
Tabela 4.16. Desvio padrão, médio, das fracções contaminantes.	81
Tabela 4.17. Pré-lavagem: coeficiente de correlação entre campanhas.	83
Tabela 4.18. Moinha: coeficiente de correlação entre campanhas.	83
Tabela 4.19. Final: coeficiente de correlação entre campanhas.	84
Tabela 4.20. Pré-lavagem: contaminação média, em % de peso seco.	85
Tabela 4.21. Moinha: contaminação média, em % de peso seco.	85
Tabela 4.22. Final: contaminação média, em % de peso seco.	86
Tabela 4.23. Contaminação média, em % de peso seco, dos três resíduos.	87
Tabela 4.24. Contaminação média, em % de peso seco, da linha de reciclagem.	89
Tabela 4.25. Caracterização físico-química média do resíduo Pré-lavagem.	90
Tabela 4.26. PCS e PCI do resíduo Pré-lavagem: teste de normalidade, média e intervalos de confiança.	90
Tabela 4.27. Composição elementar média do resíduo Pré-lavagem.	92
Tabela 4.28. Cloro e Enxofre do resíduo Pré-lavagem: média e intervalo de confiança.	93
Tabela 4.29. Metais do resíduo Pré-lavagem: teste de normalidade, média e intervalo de confiança. ..	94
Tabela 4.30. Comparação dos resultados médios do resíduo Pré-lavagem com as especificações CEN, Secil e EURITS.	100
Tabela 4.31. Comparação dos resultados máximos do resíduo Pré-lavagem com as especificações CEN, Secil e EURITS.	101
Tabela 4.32. Caracterização físico-química média do resíduo Moinha.	102
Tabela 4.33. PCS e PCI do resíduo Moinha: teste de normalidade, média e intervalos de confiança. ..	102
Tabela 4.34. Composição elementar média do resíduo Moinha.	104
Tabela 4.35. Cloro e Enxofre do resíduo Moinha: média e intervalo de confiança.	105
Tabela 4.36. Metais do resíduo Moinha: teste de normalidade, média e intervalo de confiança.	106
Tabela 4.37. Comparação dos resultados médios do resíduo Moinha com as especificações CEN, Secil e EURITS.	110

Tabela 4.38. Comparação dos resultados máximos do resíduo Moinha com as especificações CEN, Secil e EURITS.	110
Tabela 4.39. Caracterização físico-química média do resíduo Final.	111
Tabela 4.40. PCS e PCI do resíduo Final: teste de normalidade, média e intervalos de confiança.	111
Tabela 4.41. Composição elementar média do resíduo Final.	113
Tabela 4.42. Cloro e Enxofre do resíduo Final: média e intervalo de confiança.	114
Tabela 4.43. Metais do resíduo Pré-lavagem: teste de normalidade, média e intervalo de confiança.	115
Tabela 4.44. Comparação dos resultados médios do resíduo Final com as especificações CEN, Secil e EURITS.	120
Tabela 4.45. Comparação dos resultados máximos do resíduo Final com as especificações CEN, Secil e EURITS.	120
Tabela 5.1. Incineração: conformidade com a norma EURITS.	124
Tabela 5.2. Co-incineração: conformidade com as especificações da indústria cimenteira Secil.	125
Tabela 5.3. Combustível sólido recuperado: conformidade com a norma CEN.	126

1. INTRODUÇÃO

A pior consequência do desenvolvimento industrial e da produção de materiais, de forma a responder às necessidades crescentes da população mundial, é a deterioração do ambiente devido à poluição de recursos preciosos como o ar, o solo e a água (Gondal e Siddiqui., 2007).

A reciclagem dos plásticos tornou-se um tema importante nos anos recentes devido ao seu uso nos mais variados aspectos da vida moderna. Actualmente, os plásticos são aplicados em interiores de automóveis, garrafas de bebidas, embalagens de detergentes, material cirúrgico, sacos de compras, brinquedos e, até mesmo, pastilha elástica. Segundo Gondal e Siddiqui (2007), a Arábia Saudita é um dos maiores produtores de plástico no mundo, com uma capacidade total de produção de 6 milhões de toneladas por ano.

Estatísticas correntes para a Europa Ocidental estimam que o consumo total anual de produtos plásticos, em 2003, foi de 48,8 milhões de toneladas, correspondentes a 98kg per capita. A mesma quantidade uma década antes, isto é, em 1993, era de aproximadamente 64kg/capita. Cerca de 78% do peso total do consumo de plásticos corresponde a termoplásticos (Achilias *et al.*, 2007).

O principal sector consumidor de plásticos continua a ser o sector das embalagens que, em 2003, atingiu um consumo de 37% na Europa Ocidental.

Os plásticos, particularmente os plásticos de embalagens, têm ciclos de vida curtos e são rapidamente encaminhados para destino final, transformando-se em resíduos que é necessário gerir.

A gestão dos resíduos é realizada de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável que, tendo em conta a impossibilidade de evitar a produção de resíduos, procura encaminhá-los para as melhores opções de valorização.

A hierarquia de gestão de resíduos transposta para o direito nacional através do Decreto-lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, envolve as opções de redução, reutilização, reciclagem, incineração e deposição em aterro.

A redução do consumo de recursos e conseqüente redução da produção de resíduos pode ser atingida através de um consumo consciente e disciplinado dos produtos. Após a sua utilização podem ser reintroduzidos, por reutilização ou reciclagem, procurando-se conservar os recursos naturais e reduzir os danos ambientais. A incineração e a deposição em aterro sanitário são as últimas opções desejáveis, uma vez que correspondem a uma solução de fim de linha e implicam o consumo de recursos valiosos. No entanto, mesmo que se realizem plenamente as três primeiras opções, serão sempre gerados resíduos que têm efectivamente que ser eliminados por incineração ou depositados em aterro.

Sabendo que, actualmente, grande parte dos resíduos plásticos tem como destino final a deposição em aterro sanitário, contrariando os objectivos do desenvolvimento sustentável, é importante estudar alternativas a esta solução, nomeadamente a reciclagem.

Com a reciclagem dos resíduos de plástico pretende-se obter um produto competitivo, com qualidade próxima da do produto obtido com material virgem. Desta forma, é importante identificar as fontes contaminantes da reciclagem de plásticos.

Para que a reciclagem seja eficiente os passos mais importantes são a identificação e a separação dos plásticos (Gondal e Siddiqui, 2007).

A identificação dos plásticos ocorre primeiramente nas unidades de triagem dos centros de recepção de resíduos, através de técnicas expeditas. Em Portugal, a identificação é realizada com base na simbologia criada pela American Society of Plastics Industry (SPI) e que consta no artigo 8º da Directiva n.º 94/62/CE. Para fins de reciclagem, a correcta identificação dos plásticos é muito importante. Desta forma, existem diversas técnicas avançadas que permitem uma rápida identificação dos polímeros, como a espectroscopia.

A espectroscopia pode ser classificada em dois grandes grupos: o primeiro inclui os processos que analisam o polímero sem o alterar ou consumir e o segundo que inclui os processos que analisam o polímero não como uma molécula completa, mas decompondo a cadeia do polímero, por pirólise, em fragmentos (Brandrup *et al.*, 1995).

Após a identificação dos plásticos segue-se a sua separação. A etapa da separação é importante, pois através dela deve ser possível limitar as impurezas a níveis inferiores a 1% m/m. A presença de macrocontaminantes como vidro, papel, metal ou outros polímeros, mesmo em concentrações pequenas pode alterar as propriedades do polímero (Spinacé e Paoli., 2005).

A etapa da separação pode ser dividida em dois grupos: a separação dos resíduos plásticos nos centros de recepção de resíduos e a separação dos resíduos plásticos triturados nas indústrias de reciclagem. No primeiro caso, são separados os resíduos plásticos sob a forma de embalagens (inteiras) através de técnicas de separação automática ou por triagem manual. Os métodos automáticos permitem separar os plásticos de forma eficiente, contudo são dispendiosas, desta forma a separação manual é o método mais comum. No segundo caso, as técnicas aplicadas dependem da estrutura da indústria de reciclagem e dos equipamentos envolvidos. Diversas técnicas têm sido desenvolvidas, das quais se destacam a separação densimétrica, em tanques de flotação ou hidrociclones e a separação electrostática.

No âmbito deste trabalho, tendo em conta que a opção de reciclagem foi cumprida e sabendo que é inevitável a produção de resíduos no processo de reciclagem, considera-se importante a avaliação das opções subsequentes, estabelecidas na hierarquia de gestão de resíduos. As opções para a gestão dos resíduos da indústria de reciclagem de plásticos são: a valorização energética, apresentando-se duas alternativas, incineração dedicada e co-incineração em unidades com fornos industriais (cimenteiras), e a deposição em aterro.

2. OBJECTIVOS

Os objectivos propostos para o trabalho realizado foram os seguintes:

- 1) Identificação e quantificação dos contaminantes do processo de reciclagem mecânica de plásticos de polietileno de alta densidade (PEAD) e polietileno de baixa densidade (PEBD), provenientes da recolha indiferenciada, da recolha selectiva e do comércio e indústria. Para atingir este objectivo testou-se a aplicação do método da análise de inertes utilizado para classificação do composto.
- 2) Caracterização dos resíduos produzidos na indústria de reciclagem de plásticos, para avaliação do potencial para valorização energética e, conseqüente minimização da deposição em aterro. A caracterização foi realizada de acordo com as normas do CEN/TC 343 relativas a Combustível Sólido Recuperado (CSR) e os resultados foram comparados com os limites determinados pela norma CEN/TS 15359:2005, EURITS e cimenteira Secil, potencial utilizadora dos refugos da indústria.

A dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, estruturados da seguinte forma:

- No capítulo 1 é apresentada uma revisão da literatura a nível nacional e internacional em relação aos plásticos e seu consumo, à gestão dos resíduos plásticos e dos resíduos industriais resultantes do processo de reciclagem de plásticos;
- No capítulo 2 apresenta-se o caso de estudo, descrevendo-se o processo de reciclagem de plásticos usado pela Ambiente, Recuperação de Materiais Plásticos, S.A., onde foi desenvolvido parte do trabalho;
- No capítulo 3 são descritas as metodologias aplicadas na recolha de amostras, na análise de contaminantes nos resíduos da reciclagem de plásticos e na caracterização físico-química dos resíduos Pré-lavagem, Moinha e Final;
- No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos sobre a análise de contaminantes nos resíduos da reciclagem de plásticos. É feita a avaliação do potencial para valorização energética dos resíduos;
- No capítulo 5 apresentam-se as considerações finais relativas a cada um dos objectivos considerados;
- No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões resultantes deste trabalho e sugeridos temas a desenvolver em trabalho futuro.

1.1. PLÁSTICOS: ORIGEM E APLICAÇÕES

Os plásticos são polímeros, isto é, são macromoléculas orgânicas formadas por centenas ou milhares de segmentos ligados entre si, formando uma cadeia (Muccio, 1994). Nos meios industriais, o termo “plásticos” é definido como uma classe de polímeros orgânicos sintéticos que passam pelo estado plástico, ou seja, um estado moldável entre o líquido e o sólido, a uma temperatura superior à temperatura ambiente (Calapes, 1998). A maioria dos polímeros sintéticos é derivada de combustíveis fósseis, isto é, de nafta ou gás natural (Azapagic *et al.*, 2003).

Os materiais plásticos podem ser classificados de diferentes formas, no entanto, no âmbito deste trabalho é importante distinguir duas categorias: os termoendurecíveis e os termoplásticos.

Os termoendurecíveis são plásticos que endurecem durante o seu processo de fabrico e moldagem a quente. Solidificam formando um corpo sólido e estável, o que impede a sua posterior reutilização. Portanto não podem ser novamente transformados, isto é, amolecidos e moldados (Calapes, 1998). Como exemplos de termoendurecíveis podem citar-se a «baquelite», a resina ureia-formaldeído, as resinas epóxi, a borracha vulcanizada e alguns poliuretanos.

Os termoplásticos são polímeros de peso molecular muito elevado, rígidos ou flexíveis à temperatura ambiente, mas moles e elásticos a temperaturas elevadas. Assim, podem ser moldados plasticamente tantas vezes quantas necessárias, voltando ao estado sólido depois de arrefecidas (Calapes, 1998). Desta categoria fazem parte as principais seis famílias de plásticos: polietileno de baixa densidade

(PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno tereftalato (PET) e policloreto de vinilo (PVC).

A maioria dos polímeros utilizados actualmente, tais como plásticos, borrachas e fibras, são sintetizados a partir de monómeros químicos derivados de petróleo, na presença de um catalisador e de uma fonte de energia, tipicamente calor. Os monómeros são processados na forma de um fluido ou de uma solução ou emulsão, através de dois processos: condensação (*step growth*) e adição/polimerização (*chain growth*) (Azapagic *et al.*, 2003). Na Figura 1.1 apresenta-se o esquema de produção de polímeros.

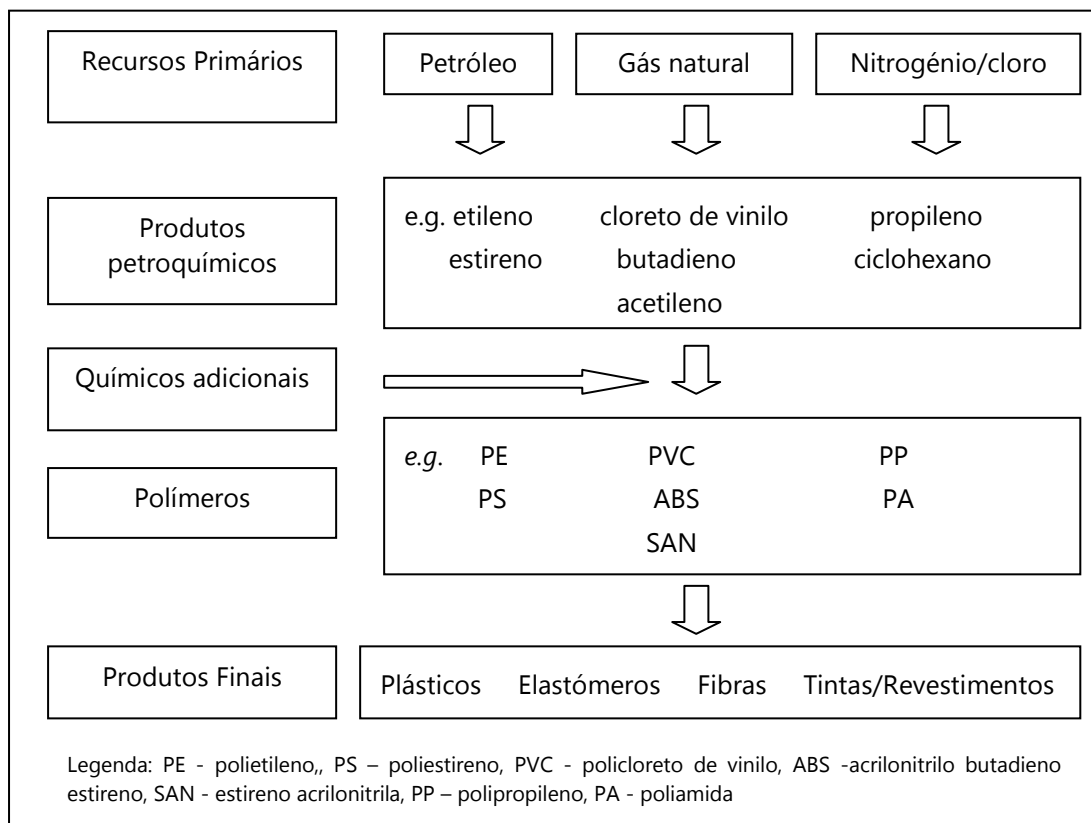


Figura 1.1. Polímeros: dos recursos primários aos produtos finais (Azapagic *et al.*, 2003).

A partir de petróleo, gás natural e nitrogénio/cloro é possível obter uma série de produtos petroquímicos, identificados na Figura 1.1, que na presença de químicos adicionais permitem obter polímeros, como por exemplo, polietileno, poliestireno, policloreto de vinilo e polipropileno, entre outros.

Durante as últimas décadas, o crescimento da população mundial, juntamente com a procura de bem-estar e melhoria das condições de vida conduziu ao aumento do consumo de polímeros, principalmente plásticos. Estes materiais são aplicados em sacos, brinquedos, contentores, canalizações, embalagens industriais, condutas de gás, baterias e peças para automóveis, componentes eléctricas, entre outras possíveis utilizações. Na Tabela 1.1 apresentam-se os usos comuns das principais seis famílias de termoplásticos.

Tabela 1.1. Aplicações dos termoplásticos (Adaptado de Gondal e Siddiqui, 2007).

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

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

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

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

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

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

1.2. CONSUMO DE PLÁSTICOS NA EUROPA OCIDENTAL

Estatísticas correntes para a Europa Ocidental estimam que o consumo total anual de produtos plásticos, em 2003, foi de 48,8 milhões de toneladas, correspondentes a 98kg per capita (Achilias *et al.*, 2007). A mesma quantidade uma década antes, isto é, em 1993, era de aproximadamente 64kg/capita.

Segundo Plastics Europe (2004), o consumo de plásticos virgens na Europa Ocidental foi de 37,5 milhões de toneladas, correspondentes a 96,6kg/capita em 2002 e aumentou para 38,1 milhões de toneladas, correspondentes a 98,1kg/capita em 2003.

Na Figura 1.2 é possível observar o consumo de plásticos (inclui materiais virgens e outros) nos países da Europa Ocidental durante o ano de 2002 e o consumo global nos anos 2002 e 2003.

De acordo com a Associação Portuguesa da Indústria de Plásticos (APIP, 2008), em 2002, em Portugal, foram consumidas cerca de 801 mil toneladas de materiais plásticos, correspondentes a 77,4kg per capita.

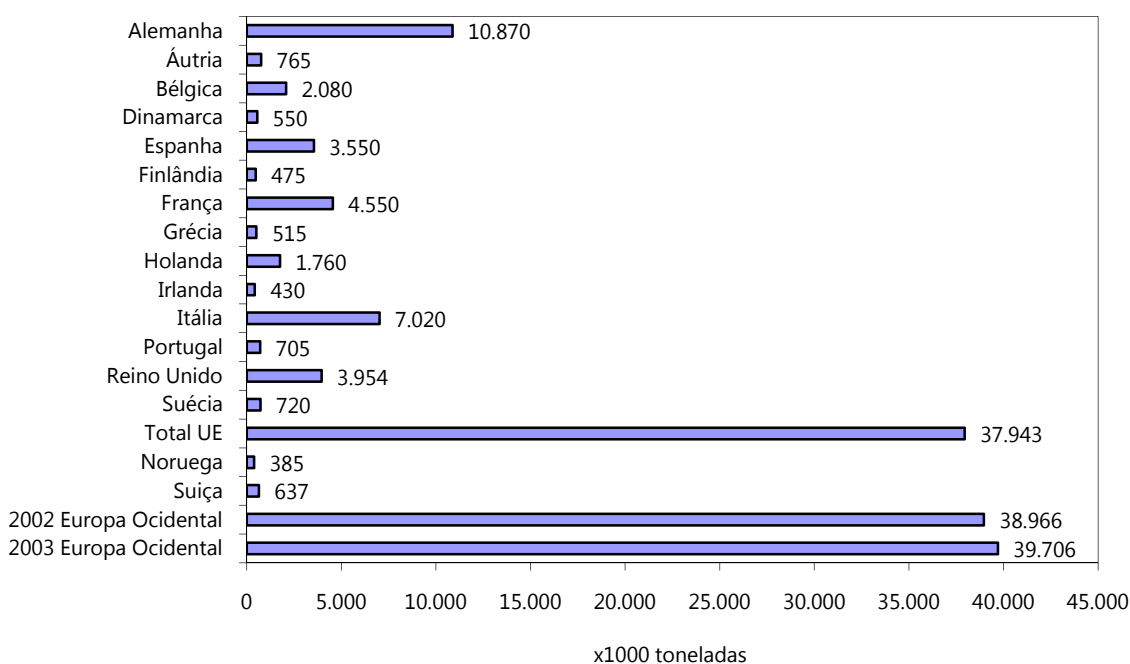


Figura 1.2. Consumo de plásticos na Europa Ocidental no ano de 2002 (Plastics Europe, 2004).

O relatório europeu relativo ao consumo de plásticos nos anos 2002-2003 (Plastics Europe, 2004) estima que em Portugal o consumo de plásticos durante o ano de 2002 foi de 705 mil toneladas.

Os principais sectores consumidores de plásticos na Europa Ocidental encontram-se representados na Tabela 1.2 e na Figura 1.3. São apresentadas as quantidades e as percentagens relativas de plásticos consumidas por sector, na Europa Ocidental, no ano de 2003.

Tabela 1.2. Consumo de plásticos por sector na Europa Ocidental no ano de 2003 (Plastics Europe, 2004).

Sector	Milhões de toneladas (Mt)	Percentagem (%)
Agricultura	0,74	1,9
Indústria automóvel	3,17	8,0
Construção civil	7,35	18,5
EEE	3,36	8,5
Embalagens	14,8	37,2
Outros plásticos	10,3	25,9
Total	39,7	100

Em 2003, foram consumidas cerca de 15 milhões de toneladas de plásticos para a produção de embalagens. Na construção civil consumiram-se 7,35 milhões de toneladas, seguindo-se os EEE e a indústria automóvel, com consumos muito aproximados, 3,36 milhões de toneladas e 3,17 milhões de toneladas, respectivamente.

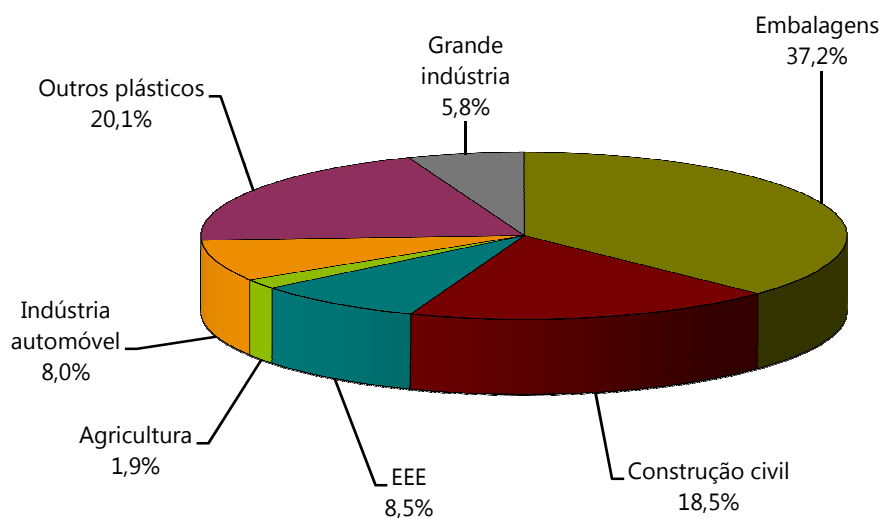


Figura 1.3. Consumo de plásticos por sector na Europa Ocidental no ano de 2003 (Plastics Europe, 2004).

De acordo com Plastics Europe (2004), o consumo de plásticos manteve-se elevado durante os anos de 2002 e 2003.

O sector das embalagens continua a ser o principal consumidor de plásticos, verificando-se a substituição de materiais tradicionais por plásticos que são mais leves, flexíveis e fáceis de produzir.

O sector da construção civil é o terceiro maior consumidor de plásticos que são utilizados em várias aplicações desde isolamentos a tubagens, caixilharias e aspecto interior. Estes materiais são preferidos pela sua durabilidade, elasticidade, resistência à corrosão, reduzida manutenção e acabamentos esteticamente agradáveis.

O consumo de plásticos no sector dos equipamentos eléctricos e electrónicos (EEE) registou, de acordo com Plastics Europe (2004), um aumento de 3,4% no ano 2003 em comparação com o ano de 2002. Este facto confirma que os plásticos são um material indispensável no fabrico de EEE, verificando-se um desenvolvimento das últimas gerações de plásticos.

As exigências da indústria automóvel constituem, actualmente, um desafio para os designers. As soluções exigem a combinação de materiais com alto desempenho, economicamente competitivos, com estilo aliado a conforto, segurança, com consumos energéticos eficientes e com baixo impacto ambiental. Esta situação conduziu ao desenvolvimento de uma nova geração de plásticos mais leves, reflectindo-se num crescimento da taxa de consumo, entre 2002 e 2003, de 5,7%.

No sector da agricultura não se registou um crescimento do consumo de plásticos, contudo, os plásticos continuam a ser aplicados em sistemas de irrigação e drenagem de colheitas, estufas, túneis e telas para mulching.

1.3. GESTÃO INTEGRADA DOS PLÁSTICOS

1.3.1. Plásticos e o Desenvolvimento Sustentável

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

A utilização dos recursos deve ser realizada de forma sustentável, isto é, de forma a satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações vindouras satisfazerem as suas próprias necessidades (Brundtland, 1987). Assim, tendo consciência que não é possível parar a produção de resíduos e que o consumo de recursos aumenta como consequência do estilo de vida actual, difícil de alterar, é importante a implementação de estratégias de gestão de resíduos e integração de recursos. A hierarquia de gestão de resíduos transposta para o direito nacional através do Decreto-lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, apresentada na Figura 1.4, envolve as opções de redução, reutilização, reciclagem, incineração e deposição em aterro.

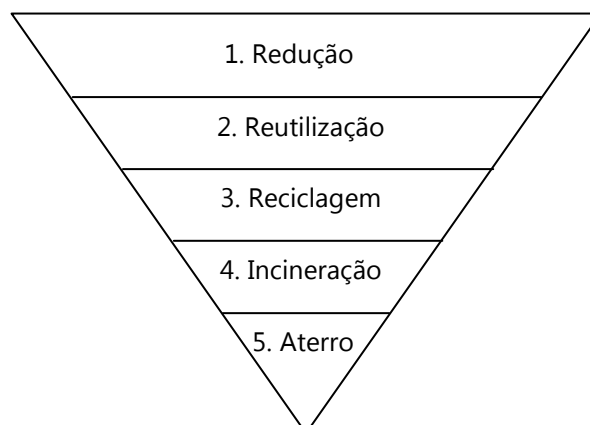


Figura 1.4. Hierarquia da gestão de resíduos, em ordem decrescente de preferência (Azapagic *et al.* 2003).

O diploma referido tem como objectivo contribuir para a prevenção e redução da produção ou nocividade dos resíduos, nomeadamente através da reutilização e da alteração dos processos produtivos, por via da adopção de tecnologias mais limpas, bem como da sensibilização dos agentes económicos e dos consumidores.

Azapagic *et al.* (2003) afirmam que a opção desejável nesta hierarquia é a redução do uso dos recursos, o que conduz à redução dos resíduos gerados. As duas opções seguintes têm como objectivo reintroduzir os resíduos como recursos através da reutilização e da reciclagem dos materiais, conduzindo à conservação dos recursos naturais e redução dos danos ambientais. As duas últimas opções na hierarquia são a incineração e a deposição em aterro. Uma vez que ambas implicam o consumo de recursos valiosos não são consideradas opções sustentáveis. Contudo, é importante referir que, mesmo que as três primeiras opções estejam completamente implementadas, é inevitável a produção de resíduos que têm que ser eliminados por incineração ou deposição em aterro.

O desenvolvimento sustentável deve combinar duas áreas importantes: o uso de recursos e a gestão de resíduos. Concentrando-nos nos materiais e produtos poliméricos, é importante compreender o que conduz e limita a sua produção, utilização, reutilização e reciclagem. Desta forma, na Figura 1.5 apresenta-se o trajecto dos polímeros, as suas utilizações e os respectivos estágios do seu ciclo de vida. É importante referir que em cada etapa do ciclo de vida dos polímeros há consumo de energia.

O ciclo de vida dos plásticos inicia-se nas explorações petrolíferas, nas quais são extraídos o petróleo e o gás natural, matérias-primas que após refinação permitem a produção de monómeros. Por polimerização, estes monómeros dão origem a materiais de cadeia longa, mais complexos, denominados por polímeros. Consoante os materiais combinados assim se obtêm diferentes polímeros que são aplicados com diferentes finalidades.

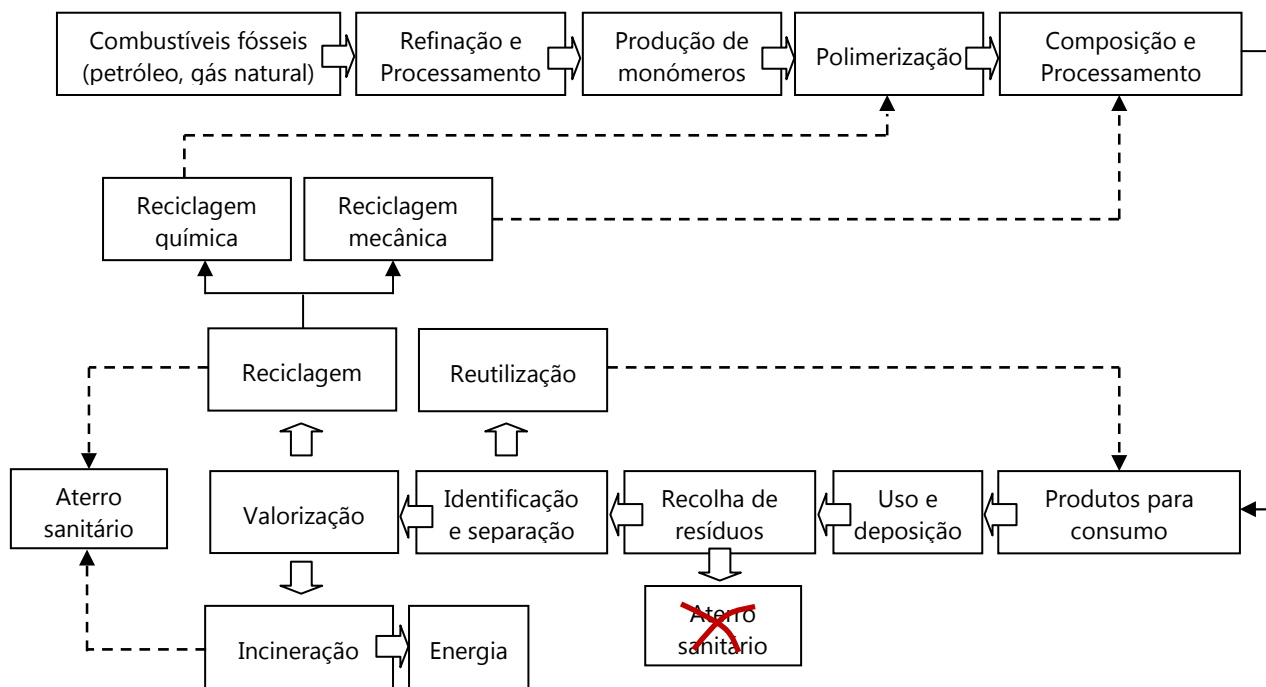


Figura 1.5. Ciclo de vida dos materiais e produtos poliméricos (adaptado de Azapagic *et al.*, 2003).

Depois de desempenharem a sua função, os polímeros são depositados em contentor e recolhidos pelos sistemas de recolha de resíduos. A opção desejável é o desvio destes materiais, sempre que possível, do aterro sanitário e consequente valorização. As opções de valorização passam pela reintrodução dos materiais nas indústrias produtoras de polímeros a partir de material virgem, reciclagem mecânica, reciclagem química e incineração com recuperação de energia.

A recuperação e reciclagem de resíduos plásticos, com referência às normalizações correntes da CEN e da DIN podem ser sistematizadas de acordo com a Figura 1.6.

A reciclagem material é uma forma de valorização dos resíduos na qual se recuperam e/ou regeneram diferentes matérias constituintes de forma a dar origem a novos produtos a afectar ao fim original ou a fim distinto.

A recuperação energética visa a produção de energia a partir da incineração controlada de resíduos plásticos.

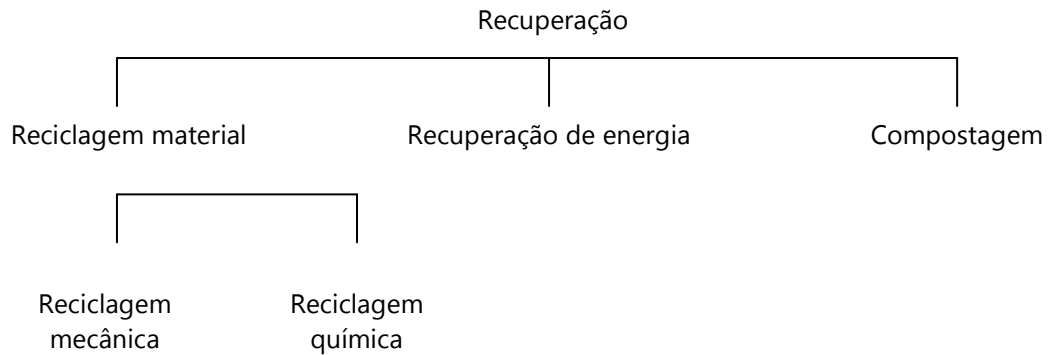


Figura 1.6. Sistematização dos processos de recuperação e reciclagem de resíduos plásticos (Brandrup *et al.*, 1995).

A compostagem corresponde à degradação biológica aeróbia dos resíduos orgânicos até à sua estabilização, produzindo uma substância húmica (composto), utilizável como corrector de solos.

As regulações, regras e normalizações que gerem os plásticos novos aplicam-se a todas as actividades de reciclagem de plásticos usados, abrangendo o ciclo de vida completo: produção, processamento, utilização, recuperação e deposição em aterro e os serviços de transporte e comércio relacionados.

1.3.2. Políticas de gestão de plásticos

A legislação sobre gestão de recursos e resíduos é uma das áreas chave das políticas de desenvolvimento ambiental na Europa. É dominada pela harmonização de leis e desenvolvimento de objectivos, que contribuem para um uso mais eficiente dos recursos e a reutilização de resíduos.

As principais directivas da UE relacionadas com produtos e materiais poliméricos são a Directiva de Embalagens e Resíduos de Embalagens, a Directiva dos Veículos em Fim de Vida e a Directiva relativa a Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos. O aterro sanitário é referido na Directiva Aterros, como destino final dos resíduos cujas formas de valorização foram esgotadas.

Directiva de Embalagens e Resíduos de Embalagens

A Directiva n.º 94/62/CE, do Parlamento e do Conselho, de 20 de Dezembro de 1994, que estabelece os princípios e as normas aplicáveis à gestão de embalagens e resíduos de embalagens foi transposta para o direito nacional através do DL n.º 366-A/97, de 20 de Dezembro. Este documento foi alterado pelo DL n.º 92/2006, de 25 de Maio que transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2004/12/CE, 11 de Fevereiro, que altera a Directiva n.º 94/62/CE.

A Directiva transposta para o direito nacional tem como objectivo harmonizar as medidas determinadas para prevenir a produção de resíduos de embalagens, promovendo a sua reutilização, reciclagem e outras formas de valorização e, conseqüentemente, reduzir a sua eliminação final. Pretende-se, ainda, assegurar um elevado nível de protecção do ambiente e garantir o funcionamento do mercado interno, evitando entraves ao comércio e distorções e restrições da concorrência na Comunidade.

O termo embalagens, de acordo com o DL n.º 366-A/97, refere-se a todos e quaisquer produtos feitos de materiais de qualquer natureza utilizados para conter, proteger, movimentar, manusear, entregar e apresentar mercadorias, tanto matérias-primas como produtos transformados, desde o produtor ao consumidor, incluindo todos os artigos «descartáveis» utilizados para os mesmos fins.

Segundo o mesmo diploma, entendem-se como resíduos de embalagem qualquer embalagem ou material de embalagem abrangido pela definição de resíduo adoptada na legislação em vigor aplicável nesta matéria, excluindo os resíduos de produção.

No DL n.º 178/2006, de 5 de Setembro, relativo ao regime geral da gestão de resíduos, entendem-se como resíduos quaisquer substâncias ou objectos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer.

Tendo em conta a representatividade dos fluxos de embalagens, e das embalagens de plástico, houve a necessidade de se criarem entidades gestoras destes resíduos. Assim, no âmbito nacional, foi licenciada pelos Ministros da Economia e do Ambiente, a 1 de Outubro de 1997, a Sociedade Ponto Verde, responsável pela gestão dos resíduos de embalagens urbanas e equiparadas, segundo um sistema integrado – Sistema Integrado de Gestão de Resíduos de Embalagem (SIGRE).

O SIGRE é um conjunto articulado de responsabilidades e processos, que segue uma lógica de circuito fechado. Visa promover a recolha selectiva dos resíduos sólidos urbanos, a triagem e a reciclagem, com finalidade última de contribuir para a diminuição do volume de resíduos depositados em aterro.

Neste sentido, foram estabelecidas metas de valorização de acordo com a Directiva n.º 94/62/CE, posteriormente alteradas pela Directiva n.º 2004/12/CE. Os objectivos de valorização e reciclagem para os resíduos de embalagens, em Portugal, são apresentados na Tabela 1.3. As metas determinadas pela Directiva n.º 94/62/CE são igualmente apresentadas, apenas para comparação com as metas actuais.

Tabela 1.3. Objectivos de valorização e reciclagem para os resíduos de embalagens, em Portugal (INR, 2007).

	Prazo	Valorização	Reciclagem					
			Global	Vidro	Papel	Metais	Plástico	Madeira
Directiva 94/62/CE	31.12.2005	50%	25%	15%	15%	15%	15%	-
Directiva 2004/12/CE	31.12.2011	60%	55-80%	60%	60%	50%	22,5%	15%

Até 31 de Dezembro de 2011 pretende-se atingir 22,5%, em peso, de reciclagem de embalagens de plástico, contando exclusivamente o material que for reciclado sob a forma de plásticos.

Directiva dos Veículos em Fim de vida

A Directiva n.º 2000/53/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de Setembro, relativa aos veículos em fim de vida foi transposta para o direito nacional através do DL n.º 196/2003, de 23 de Agosto. Este documento tem como objectivo a prevenção da produção de resíduos de veículos e promove a sua reutilização, reciclagem e outras formas de valorização dos veículos em fim de vida e dos seus componentes.

A Directiva estabelece várias metas de recuperação, reutilização e reciclagem, incluindo a recuperação e reutilização de 85% em peso de veículos até 2005, subindo para 95% em 2015.

Directiva relativa a Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (REEE)

A Directiva 2002/96/CE, do Conselho, de 27 de Janeiro de 2003, relativa aos REEE foi transposta para o direito nacional através do DL n.º 230/2004, de 10 de Dezembro, posteriormente alterado pelo DL n.º 174/2005, de 25 de Outubro. Estabelece o regime jurídico a que fica sujeita a gestão de REEE, com o objectivo prioritário de prevenir a sua produção e, subsequentemente, promover a reutilização, a reciclagem e outras formas de valorização.

As medidas deviam ser efectivas num prazo de cinco anos, com uma taxa mínima de recuperação média de 4kg por habitante e por ano, até ao final de 2005. Novas metas serão estabelecidas até 31 de Dezembro de 2008.

Tal como a Directiva dos veículos em fim de vida, pretende-se reduzir a quantidade e o carácter nocivo dos resíduos eléctricos e electrónicos a serem geridos, visando melhorar o comportamento ambiental de todos os operadores envolvidos no ciclo de vida destes equipamentos.

Directiva Aterros

A nível comunitário a deposição de resíduos em aterros é realizada através das medidas previstas na Directiva n.º 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de Abril. No território nacional a regulação da instalação, exploração, encerramento e manutenção pós encerramento de aterros destinados a resíduos está sujeita às medidas propostas no DL n.º 152/2002, de 23 de Maio.

O presente diploma pretende evitar ou reduzir tanto quanto possível os efeitos negativos sobre o ambiente, quer à escala local, em especial a poluição das águas de superfície, das águas subterrâneas, do solo e da atmosfera, quer à escala global, em particular o efeito de estufa. Visa ainda evitar ou reduzir quaisquer riscos para a saúde humana.

Associados aos efeitos globais, a presente Directiva tem como objectivo a redução dos resíduos urbanos biodegradáveis enviados para aterro, com intuito de reduzir a produção de gás metano. Até Janeiro de 2009 deve ser assegurada uma redução para 50% da quantidade total, em peso, dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995. Até Janeiro de 2016 deve ser assegurada uma redução para 35%.

No contexto dos polímeros, esta directiva só é aplicável a polímeros biodegradáveis.

1.4. RECUPERAÇÃO E RECICLAGEM DE RESÍDUOS PLÁSTICOS

Azapagic *et al.* (2003) classificam a actividade da reciclagem em dois grandes grupos: recuperação de resíduos plásticos (isto é, recolha e distribuição para as instalações de reciclagem) e identificação e separação de resíduos.

Estas actividades correspondem a uma parte do processo de reciclagem e são, normalmente da responsabilidade dos operadores de recolha de resíduos. Os resíduos recolhidos por estes sistemas são identificados e sujeitos a processos de triagem manual ou automatizada que permitem obter fracções diferenciadas de resíduos plásticos, com um determinado nível de pureza.

Considera-se importante referir que existem duas separações distintas na reciclagem de plásticos: a separação das fracções plásticas (embalagens), realizada nos centros de recepção de resíduos, e a separação de material triturado, realizada nas indústrias de reciclagem de plásticos.

1.4.1. Fileiras dos resíduos plásticos

Os sectores típicos de consumo de plásticos, em geral, embalagens e EEE, referidos no capítulo 1.2, não se aplicam às fileiras de resíduos plásticos. As embalagens são consumidas em diferentes áreas e não são recuperadas necessariamente nos resíduos domésticos. Por estas razões é importante olhar para as fileiras de resíduos e os seus constituintes em termos de material e forma (Brandrup *et al.*, 1995). Na Tabela 1.4 apresenta-se a classificação mais apropriada para plásticos, destacando-se, de seguida, as cinco principais categorias: agricultura, indústria automóvel, construção civil, distribuidores e RSU.

Tabela 1.4. Tipologias de resíduos plásticos de acordo com origem e aplicação (Brandrup *et al.*, 1995).

Origem dos resíduos plásticos		
Resíduos de plásticos pós-consumo	Agricultura Indústria automóvel Construção e demolição	
	Bens domésticos Monos Comércio/retalhistas Pequenas/médias indústrias	Resíduos Sólidos Urbanos
	Grossistas/Supermercados Grandes indústrias	Resíduos sólidos industriais e de distribuição
	Resíduos de processadores de plásticos e fabricantes de resinas	Processadores de resíduos plásticos Fabricantes de resíduos de resinas

A maioria dos resíduos plásticos provenientes da agricultura corresponde a filmes de PEBD utilizados em estufas, sacos de adubo e, em menor quantidade, em cercas para animais. São resíduos fáceis de recolher e enfardar, no entanto a presença de grandes quantidades de terra/fragmentos de plantas e outros contaminantes podem comprometer significativamente a sua qualidade (Azapagic *et al.*, 2003). As taxas de contaminação podem atingir os 80% (Brandrup *et al.*, 1995).

Na indústria automóvel tem-se verificado a substituição do metal por plásticos em diversas componentes automóveis. Ao contrário do sector das embalagens, o número de polímeros utilizado na indústria automóvel é relativamente pequeno. Os polímeros são utilizados na forma de PEAD em depósitos de combustível, PP ou ABS em pára-choques, espuma de PU em acentos, PVC em protecções do chão, etc. Têm-se verificado algumas dificuldades na reciclagem deste tipo de resíduos devido aos acabamentos de superfície nos polímeros (Azapagic *et al.*, 2003).

A indústria da construção faz largo uso de PVC em diversas aplicações (tubagens, pavimentos, caixilharia e cabos eléctricos), enquanto as resinas termo estáveis são usadas, juntamente com acrílicos ou PP, em acabamentos de cozinhas e casas de

banho. Inevitavelmente, quantidades significativas de resíduos de construção acabam por ser encaminhadas para os RSU (Azapagic *et al.*, 2003).

Os filmes de polietileno são utilizados quase exclusivamente em embalagens secundárias na indústria distribuidora. A natureza do negócio gera grandes quantidades de resíduos não contaminados e que podem, facilmente, ser utilizados para produzir um reciclado de elevada qualidade (Azapagic *et al.*, 2003).

Os RSU são constituídos por uma grande variedade de resíduos plásticos, nomeadamente embalagens primárias de alimentos, como filmes de invólucros de alimentos, garrafas de bebidas e frascos de produtos lácteos como manteiga e iogurtes; e embalagens de produtos de limpeza como garrafas de detergente e produtos higiénicos pessoais (Brandrup *et al.*, 1995). Esta categoria que inclui, também, os resíduos provenientes do comércio e retalhistas é uma das mais importantes na produção de resíduos plásticos, correspondendo, em 2002, a 66,3% (Figura 1.7) do peso total de resíduos plásticos recolhidos de todas as categorias (Plastics Europe, 2004). Contudo, os polímeros correspondem a cerca de 7% a 8% do peso total de RSU e apenas a 1% do total de resíduos. As embalagens constituem o maior contributo de polímeros nos RSU (cerca de 65%) (Azapagic *et al.*, 2003).

Na Figura 1.7 apresentam-se os resíduos plásticos pós-consumo por categoria, recuperados em 2002.

Em Portugal, os resíduos plásticos correspondem a cerca de 11% do total de resíduos sólidos urbanos (RSU), de acordo INR (2002), que caracteriza a situação nacional entre 1996 e 2001.

Em termos de fluxos específicos de resíduos e, em particular, da fileira das embalagens de plástico, segundo INR (2007), em 2002 foram recuperadas 325 mil

toneladas de resíduos de embalagens, a serem geridos pela SPV e encaminhadas para reciclagem e valorização energética.

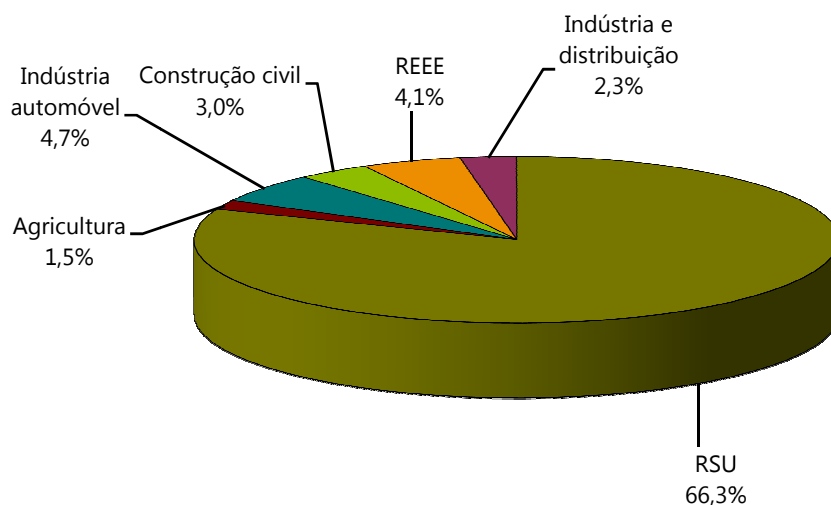


Figura 1.7. Resíduos plásticos totais recuperados por categoria, na Europa Ocidental em 2002 (Plastics Europe, 2004).

Azapagic *et al.* (2003) afirmam que, em 1995, em média, cada pessoa na Europa Ocidental produziu aproximadamente 24kg de plástico por ano, verificando-se que Portugal e a Grécia foram os países mais “gastadores” com 43kg/capita e 39kg/capita, respectivamente. A Holanda foi o país mais “sustentável” com um consumo de 19kg/capita.

1.4.2. Identificação e separação de resíduos plásticos

A reciclagem de plásticos exige uma separação dos plásticos por tipo de material, seja por razões técnicas ou por questões de saúde ou ambientais. Por exemplo, a reciclagem mecânica só é economicamente viável e tecnicamente fiável para um tipo de material, enquanto que nos incineradores é necessário separar o PVC dos restantes RSU de forma a evitar a formação de dioxinas (Azapagic *et al.*, 2003).

Identificação de resíduos plásticos

A identificação de plásticos nos centros de recepção de resíduos pode ser facilmente realizada, manualmente, através da identificação dos seis principais grupos de plásticos, através do sistema de códigos criado pela Decisão n.º 97/129/CE, de 28 de Janeiro, nos termos do artigo 8º da Directiva n.º 94/62/CE. Este sistema de identificação (figura 1.8) foi, inicialmente, criado em 1988 pela American Society of the Plastics Industry (SPI).

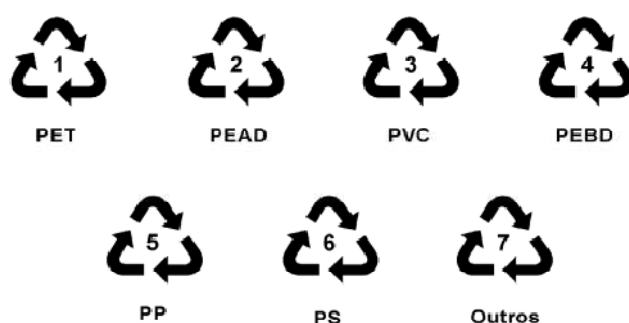


Figura 1.8. Simbologia utilizada para identificação de plásticos, de acordo com as recomendações da Directiva n.º 94/62/CE.

Determinados polímeros, como as garrafas de bebidas de PET podem ser facilmente identificados, no entanto alguns polímeros são muito semelhantes e difíceis de diferenciar, mesmo para um especialista ou engenheiro em polímeros. Assim, este sistema de classificação composto por uma série de sete números permite aos consumidores uma fácil identificação dos polímeros, bem como a sua identificação nos RSU (Azapagic *et al.*, 2003).

Para separar partes de materiais plásticos de engenharia, tais como componentes de veículos, são necessárias técnicas de identificação mais avançadas. O sistema tem de ser capaz de identificar e distinguir cerca de trinta plásticos e combinações (Brandrup *et al.*, 1995).

Em 1991, a American Society for Testing and Materials (ASTM), editou um sistema mais abrangente, baseado em abreviações recomendadas pela International Organization for Standardization (ISO) que inclui mais de 100 polímeros e combinações. Este sistema de identificação é muito importante na indústria automóvel, que tem sido muito pró-activa na exploração de formas de recuperação e reciclagem de plásticos. A Society of Automobile Engineers (SAE) criou um terceiro sistema, muito semelhante ao modelo da ISO, para identificar os polímeros utilizados nas componentes automóveis (Azapagic *et al.*, 2003).

Nos casos em que a identificação dos plásticos é mais complicada podem aplicar-se processos de identificação por espectroscopia. Na Figura 1.9 apresenta-se um esquema dos processos que podem ser utilizados para a identificação de plásticos.

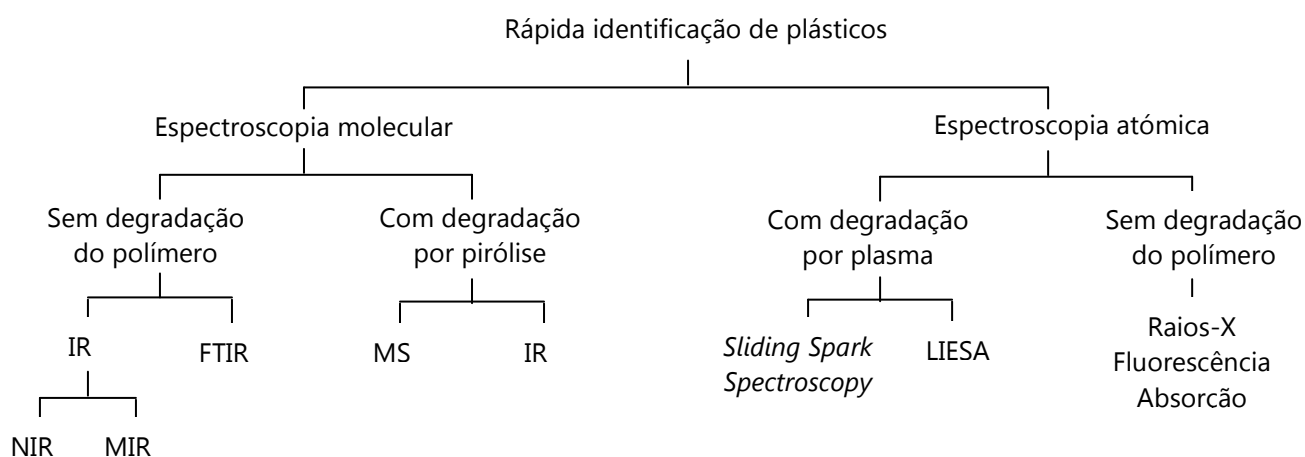


Figura 1.9. Esquema dos métodos de identificação de plásticos (Brandrup *et al.*, 1995).

É possível distinguir dois grupos básicos de identificação de plásticos por espectroscopia: o primeiro inclui os processos que analisam o polímero sem o alterar ou consumir e o segundo que inclui os processos que analisam o polímero não como uma molécula completa, mas decompondo a cadeia do polímero, por pirólise, em fragmentos.

No primeiro grupo (espectroscopia molecular) encontram-se os processos de espectroscopia de polímeros que são puramente ópticos, tais como a espectroscopia

Near Infra-Red (NIR), a espectroscopia *Middle Infra-Red* (MIR) e a espectroscopia Raman com transformação de Fourier (FTR – Fourier Transformed Raman) (Brandrup *et al.*, 1995). A espectroscopia de infra-vermelho é uma das técnicas mais importantes para identificar plásticos e tem tido um grande desenvolvimento (Anzano *et al.*, 2006). As eficiências da espectroscopia de FTIR (Fourier Transformed Infra-Red) e FTR permitem reconhecer a maioria dos polímeros, contudo foram verificadas algumas limitações na espectroscopia FTIR, incluindo uma elevada sensibilidade ao estado da superfície do polímero. A espectroscopia FTR é um método rápido e altamente selectivo, permitindo até identificar os enchimentos minerais presentes no plástico (Azapagic *et al.*, 2003).

No segundo grupo de identificação de plásticos por espectroscopia (espectroscopia atómica), a análise dos fragmentos permite identificar o polímero associado. Dependendo do processo utilizado para analisar os produtos da pirólise, os processos são classificados em espectroscopia pirolítica de massa (PyMS – Pyrolysis Mass Spectroscopy) e espectroscopia pirolítica de infra-vermelho (Py-IR – Pyrolysis Infra-Red). Um caso especial dos processos de pirólise é a decomposição do polímero em átomos ou fragmentos moleculares extremamente pequenos ou iões, cuja radiação emitida é analisada por espectroscopia. Estes processos incluem a análise espectral da emissão atómica por laser induzido (LIESA – Laser-Induced Atomic Emission Spectral Analysis) e a espectroscopia por queima e deslizamento (*Sliding Spark Spectroscopy*) (Brandrup *et al.*, 1995).

A espectroscopia de plasma com laser (LIPS – Laser-Induced Plasma Spectroscopy) tem sido aplicada em amostras de polímeros no sentido de se investigar a possibilidade de utilizar este método na identificação de diferentes materiais. Em alguns casos, a LIPS pode ser utilizada como complemento da espectroscopia de infra-vermelho, que também é aplicada na identificação de polímeros. Contudo, não podem ser aplicadas em amostras coloridas com cores escuras (Anzano *et al.*, 2006).

A espectroscopia de decomposição com laser (LIBS – Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) pode ser aplicada na identificação de diferentes famílias de plásticos, não sendo necessária qualquer preparação da amostra, através de uma análise rápida, simples e reprodutível (Gondal e Siddiqui., 2007). A tecnologia LIBS é baseada na análise das linhas de emissão atômica geradas pela incidência de radiações laser de alta energia, na superfície da amostra.

Separação dos resíduos plásticos nos centros de recepção de resíduos

A presença de macrocontaminantes como vidro, papel, metal ou outros polímeros, mesmo em concentrações pequenas pode alterar as propriedades do polímero. Dependendo da triagem, das necessidades do mercado ou do custo da mão-de-obra, a separação dos polímeros pode ser manual ou automatizada (Spinacé e Paoli, 2005).

De acordo com Azapagic *et al.* (2003) têm sido desenvolvidas técnicas para automatizar a separação de misturas de resíduos por tipo de polímero ou para remoção de contaminantes do fluxo de resíduos. Enquanto algumas técnicas têm evoluído para formas sofisticadas, outras ainda estão no início e requerem algum desenvolvimento antes de poderem ser aplicadas à escala real. A escolha da técnica apropriada depende de diversos factores:

- Complexidade da mistura de polímeros, isto é, número de polímeros presentes e recuperáveis;
- Forma física dos polímeros, isto é, material na forma de embalagem ou granulado;
- Qualidade, isto é, nível de contaminação aceitável no reciclado para uso futuro;
- Contaminantes não plásticos, isto é, a natureza e concentração de aditivos;
- Mercado, isto é, eventual uso do reciclado;

- Economia, isto é, a escala e o custo das operações de separação, e a justificação de métodos automáticos de detecção e separação mais dispendiosos.

As técnicas de separação automática permitem separar os plásticos de forma eficiente, contudo são dispendiosas, razão pela qual o método mais comum é a triagem manual.

Brandrup *et al.* (1995) afirmam que as taxas típicas de separação de embalagens por um operador variam entre 50kg/h e 200kg/h, dependendo do número de operações de selecção que são exigidas. Quando se trata de misturas de garrafas, em que se exige que o operador seleccione um tipo particular de garrafa, espera-se uma taxa de 150kg/h.

Em Portugal, segundo Silveira e Martinho (2004), as taxas de separação de embalagens, por um operador, numa estação de triagem, são de 58kg/h, atingindo-se uma eficiência de separação de 99%.

De acordo com Brandrup *et al.* (1995), a exactidão de separação pode ser da ordem dos 80% a 95%, por várias razões. Primeiro há que ter em conta o erro humano normal em qualquer processo de selecção manual, o qual depende das características do operador e da tarefa, tais como o treino, a velocidade de separação, o tipo de selecção, as condições do fluxo de resíduos, a fadiga, etc. Segundo, as características e a aparência das embalagens podem representar um problema, tais como o uso de diferentes polímeros em embalagens com o mesmo aspecto.

Na Licença da Sociedade Ponto Verde (SPV, 2008), são definidas as especificações técnicas de recepção de resíduos de embalagens, que devem ser garantidas em cada fardo a ser entregue às indústrias de reciclagem. Os fardos são produzidos a partir

dos materiais separados nas unidades de triagem de fluxos específicos de resíduos (embalagens).

Assim, os fardos de polietileno de alta densidade constituídos por todo o tipo de recipientes de PEAD, opacos e coloridos, que tenham servido para embalar produtos alimentares, de higiene, para lavagem de louça e roupa, amaciadores, álcool, etc. devem obedecer à seguinte composição:

PEAD	superior a 88%
Humidade	inferior a 10%
Outras matérias plásticas (PVC e PET)	inferior a 2%
Papel	inferior a 5%
Outras impurezas	inferior a 2%.

Os fardos são apresentados na forma de mistura de garrafas, frascos e outros recipientes, cuidadosamente esvaziados do seu conteúdo, de preferência enxaguados e espalmados. Devem apresentar uma densidade entre 200kg/m^3 e 300kg/m^3 e a tolerância máxima do total de impurezas (excluindo polipropileno) é de 12%.

Os fardos de resíduos de embalagens flexíveis constituídos por todo o tipo de embalagens flexíveis em polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno de alta densidade (PEAD) devem obedecer à seguinte composição:

PEBD/PEAD	superior a 85%
Filme estirável	inferior a 10%
Humidade	inferior a 10%
Outros filmes	inferior a 2%
Papel	inferior a 3%
Outras impurezas	inferior a 2%.

Os fardos são apresentados na forma de mistura de filmes, mangas e sacos diversos com dimensões superiores a uma folha A3 (420x297mm). Devem apresentar uma densidade entre 350kg/m³ e 400kg/m³ e a tolerância máxima do total de impurezas é de 15%.

Os fardos de polietileno tereftalato constituídos por todo o tipo de recipientes de PET, transparentes, coloridos ou não, que tenham servido para embalar água, refrigerantes e produtos de higiene, devem obedecer à seguinte composição:

PET	superior a 70%
Humidade	inferior a 10%
Papel (incluindo componentes de garrafas)	inferior a 6%
Garrafas de PVC	inferior a 0,5%
Garrafas de PE e PP	inferior a 0,25%
PE e PP (como componentes de garrafas)	inferior a 15%
Outras impurezas	inferior a 2%.

Os fardos são apresentados na forma de mistura de garrafas, frascos e outros recipientes, cuidadosamente esvaziados do seu conteúdo, de preferência enxaguados e espalmados, sem cápsula ou tampa. Devem apresentar uma densidade entre 150kg/m³ e 300kg/m³ e a tolerância máxima do total de impurezas é de 30%.

Os fardos de policloreto de vinilo constituídos por todo o tipo de garrafas e frascos transparentes de PVC que tenham servido para embalar água, vinho, vinagre e cosméticos, com uma pequena percentagem de garrafas opacas, tolerada como impureza, devem obedecer às seguintes características:

PVC	superior a 88%
Produtos de PVC opacos	inferior a 1%
Humidade	inferior a 10%

Outras matérias plásticas	inferior a 5%
Papel	inferior a 5%
PET	inferior a 2%
Outras impurezas	inferior a 2%.

Os fardos são apresentados na forma de garrafas e frascos transparentes, cuidadosamente esvaziados do seu conteúdo, de preferência enxaguados, espalmados e sem cápsula ou tampa. Devem apresentar uma densidade entre 180kg/m^3 e 300kg/m^3 e a tolerância máxima do total de impurezas é de 12%.

Separação dos resíduos plásticos triturados

O mercado exige materiais na forma pura, que é um objectivo difícil de atingir. Deste modo, para cumprir os elevados níveis de pureza é necessário remover contaminantes residuais nos plásticos e, em particular, em plásticos na forma triturada. Diversas técnicas têm sido desenvolvidas, das quais se destacam a separação densimétrica, em tanques de flotação ou hidrociclones, e a separação electrostática.

Wei e Realff (2005) afirmam que a separação dos plásticos é um problema que deve ser resolvido de forma económica e efectiva. É um problema que constitui um desafio por duas razões: primeiro, existem vários tipos de plásticos nos resíduos com densidades específicas sobrepostas, o que significa que é necessária uma separação com várias etapas envolvendo diferentes técnicas; segundo, alguns plásticos têm pouco valor, o que torna difícil estruturar um processo de reciclagem economicamente sustentável.

Brandrup *et al.* (1995) afirmam que os materiais plásticos apresentam uma gama de densidades suficientemente grande de forma a permitir o uso desta propriedade para

os separar (Tabela 1.5). A separação densimétrica tem sido aplicada para separar materiais que flutuam, como as poliolefinas, de materiais que decantam, como o PET e o PVC. O processo pode ser realizado num único tanque, contudo são necessárias pelo menos duas separações, isto é, dois tanques, para se atingir uma boa separação.

Tabela 1.5. Densidades específicas dos plásticos de acordo com 1) Brandrup *et al.*, 1995, 2) Azapagic *et al.*, 2003 e 3) Brandrup *et al.*, 1999.

Tipo de plástico	Densidade específica (kg/m ³)		
	1)	2)	3)
PEAD	960	960	940-970
PEBD	920	920	910-930
PP	910	900	900-910
PS	1130	1040	1040-1120
PVC	1390	1400	1390
PET	-	1380	1330-1460

Mais recentemente, foi desenvolvida uma técnica de separação de plásticos em hidrociclones, baseada em tecnologia desenvolvida na indústria de processamento de minérios e que permite a remoção de contaminantes pesados como pedras, metais e vidro. Esta técnica tem sido aplicada na separação de fracções leves, como o PE, de fracções pesadas, como o PET e o PVC (Brandrup *et al.*, 1995).

De um modo geral, as empresas de reciclagem de polímeros fazem a separação por diferenças de densidade (Spinacé e Paoli, 2005). A Figura 1.10 corresponde a um esquema de separação de uma mistura de resíduos plásticos, através das diferenças de densidade, utilizando tanques com água e/ou soluções alcoólicas ou salinas.

A separação densimétrica, em tanques de flotação ou ciclones, permite uma separação automatizada dos polímeros. Contudo, quando dois polímeros têm densidades específicas próximas, este procedimento torna-se mais difícil, é o caso do PEAD, do PEBD e do PP.

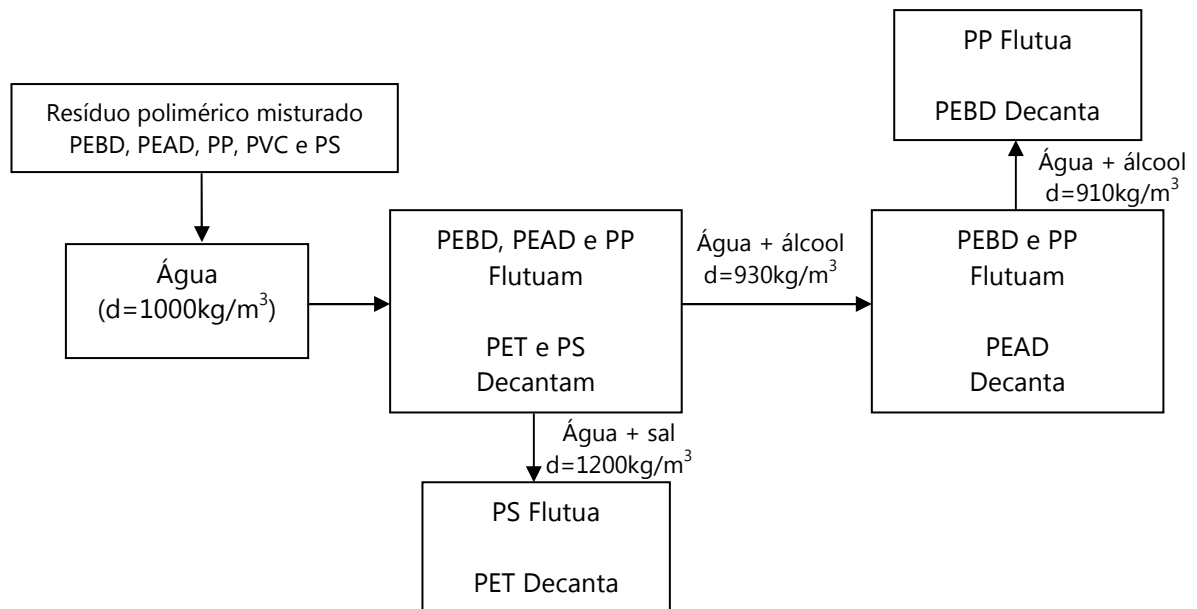


Figura 1.10. Esquema de separação de resíduos plásticos por diferenças de densidade (Spinacé e Paoli, 2005).

Daniels (1997) desenvolveu, no Laboratório Nacional de Argonne, uma tecnologia de «froth flotation» (flotação por espumas) que separa de forma eficiente polímeros com densidades equivalentes. A tecnologia foi, originalmente, desenvolvida para separar ABS de HIPS, uma mistura de plásticos que é facilmente encontrada em aplicações obsoletas. O processo foi aplicado com sucesso na recuperação de plásticos de resíduos triturados e peças de automóveis, resíduos plásticos industriais e consumíveis eletrónicos.

Depois de removidos os metais ferrosos e não ferrosos, o material triturado está pronto para ser separado. As etapas de separação, identificadas na Figura 1.11, incluem: 1) granulação; 2) primeira fase de separação densimétrica; 3) segunda fase de separação densimétrica e 4) «froth flotation».

O plástico granulado é separado, primeiro, num tanque com água e um surfactante, com densidade específica de 1000kg/m^3 , seguindo-se uma segunda separação, num tanque com uma solução salmoura de densidade específica 1100kg/m^3 . Os materiais com densidades superiores são rejeitados. Os plásticos, ABS e HIPS, com igual

densidade são separados, de acordo com as suas características hidrofílicas, no tanque de flotação, onde é adicionado um agente condicionador que altera a superfície de um dos plásticos fazendo com que o HIPS flutue e o ABS afunde.

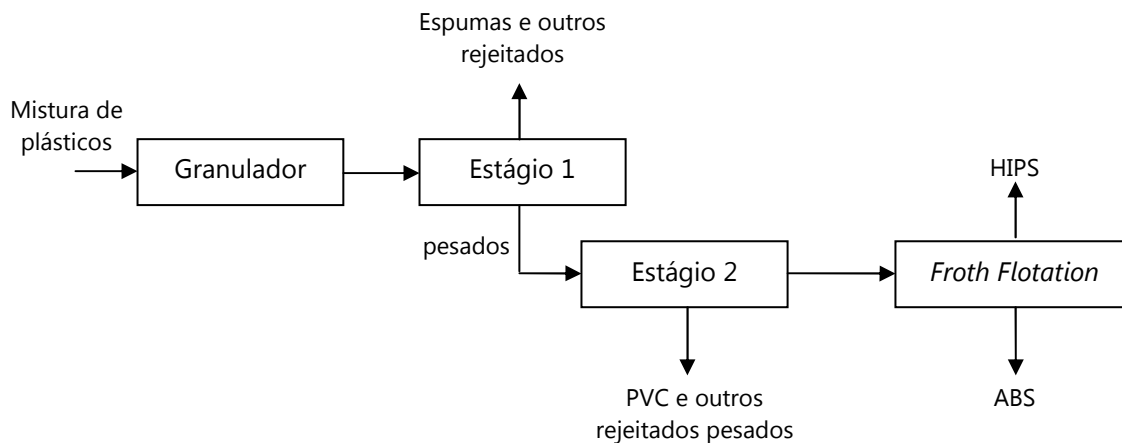


Figura 1.11. Diagrama do processo de separação de plásticos via «froth flotation» (Daniels, 1997).

Segundo Brandrup *et al.* (1995), trabalhos desenvolvidos pela Repise Technologies permitem concluir que a separação em hidrociclones é mais eficaz que a separação em tanques de flotação.

A separação electrostática é uma tecnologia promissora para a separação de misturas de plásticos devido ao seu baixo custo e facilidade de operação (Wei e Realff., 2005). A aplicação da técnica depende do desenvolvimento de carga estática nos materiais plásticos, que varia de acordo com o tipo de polímero. Se os flocos (triturado) puderem ser carregados de forma eficaz, então as diferenças de carga podem ser usadas para causar a separação das partículas que caem entre placas carregadas (Brandrup *et al.*, 1995).

Segundo Wei e Realff (2005), as partículas de plástico são carregadas por triboelectrificação. Existem vários métodos de agregação das partículas para gerar cargas triboelétricas, tais como, tambores rotativos, leitos fluidizados, tapetes vibratórios ou ciclones.

1.4.3. Reciclagem de resíduos plásticos

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

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

A terceira opção de reciclagem, a valorização energética permite gerar calor e/ou electricidade por incineração directa dos polímeros, por exemplo, em incineradores municipais dedicados (RSU) ou por substituição de outros combustíveis, como fornos a altas temperaturas em indústrias, em fornos de cimenteiras ou centrais termoeléctricas.

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

A reciclagem primária consiste na conversão dos resíduos poliméricos industriais em produtos com características equivalentes aos produtos originais, produzidos a partir de polímeros virgens. Por exemplo, a introdução de aparas no processamento.

A reciclagem secundária é a conversão dos resíduos poliméricos provenientes dos RSU por um processo ou uma combinação de processos em produtos que tenham menor exigência do que o produto obtido com polímero virgem. Este tipo de reciclagem utiliza polímero pós-consumo, como por exemplo o uso de embalagens de PP para obtenção de sacos do lixo.

Os processos de reciclagem primária e secundária são, também, designados por reciclagem mecânica ou física. O que as diferencia uma da outra é que na primária utiliza-se polímero pós-industrial e na secundária polímero pós-consumo.

A reciclagem terciária é o processo tecnológico de produção de consumíveis químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos. Este tipo de reciclagem é designado por reciclagem química.

A reciclagem quaternária é o processo tecnológico de recuperação de energia de resíduos poliméricos por incineração controlada. É, também, denominada reciclagem energética.

Achilias *et al.* (2007) classificam os processos de valorização de resíduos plásticos em quatro categorias: reciclagem primária, quando se refere à reciclagem de aparas na própria indústria produtora; reciclagem mecânica, quando o polímero é separado dos contaminantes associados e reprocessado por extrusão a quente; reciclagem química, que conduz à total despolimerização em monómeros, ou à degradação parcial em materiais secundários; e valorização energética, como um modo eficaz de reduzir o volume da matéria orgânica e produzir energia através da incineração.

Entre as tecnologias de reciclagem, a incineração tem uma forte oposição social e a reciclagem mecânica está limitada pois só pode ser processado um tipo de polímero. Assim, Achilias *et al.* (2007) afirmam que o método mais atractivo, de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável, é a reciclagem química.

Apesar de avanços significativos nos últimos anos, dados relativos ao ano de 2003 apontam para que 61% dos resíduos plásticos gerados na Europa Ocidental foram depositados em aterro. Os restantes 39% foram recuperados principalmente por três métodos: valorização energética (4,75 milhões de toneladas, 22%), reciclagem

mecânica (3,13 milhões de toneladas, 15%) e reciclagem química (0,35 milhões de toneladas, 2%) (Achilias *et al.*, 2007).

De acordo com o relatório da Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME) (Plastics Europe, 2004) apresentam-se, na Figura 1.12, os valores de reciclagem atingidos na Europa Ocidental em 2003.

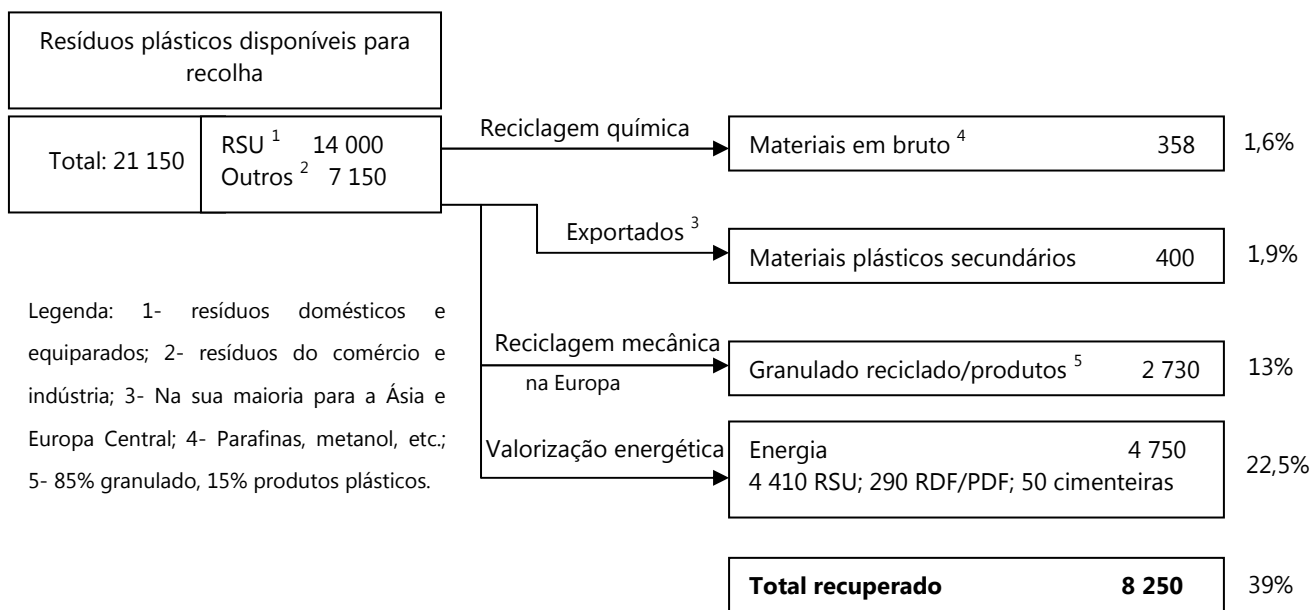


Figura 1.12. Recuperação de plásticos em 2003 (x1000 toneladas/ano) (Plastics Europe, 2004).

Embora se verifique uma grande variação entre os países da Europa Ocidental, foi realizado um bom progresso na recolha de material para reciclagem mecânica que cresceu 24% entre 2001 e 2003, enquanto que a valorização energética aumentou apenas 3,6%.

A recuperação total de resíduos de embalagens subiu de 49,4% em 2001 para 52,6% em 2002, devido à reciclagem mecânica.

Estudos exaustivos e trabalhos práticos sobre a aplicação da Directiva de embalagens e resíduos de embalagens em conjunto com estudos de eco-eficiência concluem que a reciclagem e a valorização energética aplicadas de forma independente não são

suficientes (Plastics Europe, 2004). É necessária a combinação de ambas as soluções de forma a atingir soluções eco-eficientes e efectivas na gestão de resíduos.

Em Portugal, os dados de valorização e reciclagem de embalagens plásticas, enviados à Comissão Europeia, relativos ao período entre 1998 e 2005 são apresentados na Tabela 1.6.

Tabela 1.6. Embalagens plásticas geridas para reciclagem e valorização, em Portugal entre 1998 e 2005 (Fonte: INR, 2007).

Ano	E a serem geridas (t)	RE's a serem geridos (t)	RE's reciclados (t)	RE's valoriz. energetic. (t)	Valorização Total (t)	Taxa reciclagem (%)	Taxa valorização (%)
1998	258.500	258.500	9.440	-	9.440	4	4
1999	267.500	267.500	10.068	-	10.068	4	4
2000	286.000	282.430	12.831	98.708	111.539	5	40
2001	303.400	299.760	28.532	97.246	125.778	10	42
2002	325.000	325.000	29.194	100.052	129.246	9	40
2003	-	330.000	29.872	101.346	131.218	9	40
2004	-	344.500	36.321	47.356	83.677	11	24
2005	-	355 670	56 335	45 941	102 276	16	29

Entre 1998 e 2005 verificou-se uma oscilação na taxa de reciclagem de embalagens plásticas que variou entre 4% e 16%. Estes valores cumprem os limites estabelecidos pelas directivas Europeias, uma vez que em 2005 o objectivo de valorização era de 15%.

Os resultados da Sociedade Ponto Verde em relação à quantidade de embalagens de plástico recicladas são apresentados na Tabela 1.7.

Tabela 1.7. Resíduos de embalagens de plástico reciclados: resultados da Sociedade Ponto Verde (SPV, 2008).

Ano	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Embalagens de plástico (toneladas)	280	1 003	4 236	10 870	15 151	20 534	26 018	32 114	24 860	33 396

Em Portugal, a reciclagem de plásticos é realizada na sua maioria por processos de incineração com aproveitamento energético, contudo no âmbito desta dissertação é estudada a reciclagem mecânica de plásticos. Desta forma, no capítulo 1.5 aborda-se apenas a reciclagem mecânica de plásticos, de entre os métodos actualmente disponíveis (reciclagem mecânica, reciclagem química e valorização energética).

1.5. RECICLAGEM MECÂNICA

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

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

Este método de reciclagem pode ser realizado por diferentes processos como a extrusão, injeção, termoformagem ou moldagem por compressão. Dependendo da origem do resíduo plástico pode incluir diferentes etapas como: a) triagem e separação dos tipos de plásticos; b) moagem; c) lavagem; d) aglutinação; e) secagem; f) processamento por extrusão e g) transformação do plástico num produto acabado (Brognoli, 2006).

A separação dos tipos de plásticos é realizada de acordo com os métodos descritos anteriormente no capítulo 1.4.2.

1.5.1. Moagem

As embalagens de plástico que conhecemos nas diversas formas (por exemplo, garrafas, caixas, filmes) são produzidas a partir de material granulado, razão pela qual os resíduos de plástico são facilmente convertidos em fragmentos que sejam, tanto quanto possível, semelhantes aos que lhe deram origem (Brandrup *et al.*, 1995).

Depois da separação, os plásticos são triturados em moinhos de facas rotativas ou moinhos de martelos. Esta etapa permite acomodar melhor o material no equipamento de processamento, como a extrusora ou a injectora. É importante que o material moído tenha dimensões uniformes para que a fusão também ocorra uniformemente. A presença de pó proveniente da moagem é inconveniente, pois este funde antes e não facilita o escoamento do material nos equipamentos de processo (Spinacé e Paoli, 2005).

1.5.2. Lavagem

A lavagem é entendida como a descolagem e separação de sujidade aderente aos resíduos plásticos reprocessados (Brandrup *et al.*, 1995). É uma operação molhada que pode ser organizada em três estágios: a) encharcamento/amaciamento; b) libertação da sujidade do plástico por circulação e c) separação da sujidade do plástico lavado. Os três estágios de operação não têm que ocorrer necessariamente num só equipamento.

1) Encharcamento/amaciamento

A separação de sujidade resistente requer longos banhos ou circulação intensiva. Normalmente ocorre em tanques com agitação mecânica, abertos ou fechados, ou em parafusos sem fim a baixa velocidade.

2) Libertação da sujidade por circulação

A libertação da sujidade das partículas de plástico é conseguida por intensiva circulação do triturado e da solução de lavagem. O equipamento utilizado neste estágio é uma máquina de lavar turbo ou por fricção.

3) Separação da sujidade do plástico lavado

Os sistemas de lavagem projectados para remover sujidade mineral por sedimentação da água de lavagem são aplicados nesta etapa da lavagem de plásticos. A operação decorre em tanques de sedimentação, hidrociclones, clarificadores estratificados ou concentradores. A separação da sujidade sólida pode também ocorrer por adição de agentes precipitantes ou floculantes.

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

As águas resultantes do processo de lavagem devem ser tratadas e, em alguns casos, são recirculadas de forma a reduzir os custos de operação.

1.5.3. Secagem

A secagem tem como objectivo a redução do teor em humidade do plástico lavado. A humidade adere primariamente à superfície do plástico, razão pela qual quanto maior for a superfície do material maior é o seu teor em humidade (Brandrup *et al.*, 1995).

Brognoli (2006) afirma que a secagem do material é importante, pois alguns polímeros, como os poliésteres ou as poliamidas, podem sofrer hidrólise durante o reprocessamento. O resíduo de detergente pode agir como catalisador na hidrólise e aumentar a degradação do plástico.

Os plásticos podem ser secos por processos mecânicos ou térmicos. Nos processos mecânicos a humidade é removida por força da gravidade ou inércia. Na secagem térmica são utilizados três mecanismos: condução térmica, convecção e radiação. Os equipamentos de secagem resumem-se a sistemas de transporte de ar quente, conduzido por centrifugação ou em contra-corrente.

A humidade residual tolerável é definida pela redução na qualidade durante o processo de fusão e, no caso do PEAD e do PEBD deve ser, no máximo, 1% (Brandrup *et al.*, 1995).

1.5.4. Extrusão

A extrusão é utilizada na composição e processamento de plásticos, isto é, permite a produção de produtos semi-acabados, como o granulado na indústria de reciclagem, ou produtos reciclados, como tubagens e sacos (Brandrup *et al.*, 1995). Na sequência das etapas referidas para a reciclagem mecânica, a extrusão aplica-se na produção de granulado.

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

1.5.5. Critérios de qualidade dos plásticos reciclados

Segundo Spinacé e Paoli (2004), é necessário limitar as impurezas a níveis inferiores a 1% m/m.

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

Uma das barreiras à reciclagem é a presença de aditivos, utilizados para modificar as propriedades dos polímeros, tais como, a cor, a estabilidade térmica ou a sua processabilidade. A existência de uma grande variedade de aditivos, alguns dos quais tóxicos e ambientalmente perigosos, tornam mais difícil a reciclagem de polímeros. Por exemplo, a maioria dos pigmentos e estabilizadores (metais pesados) ficam retidos nos resíduos resultantes da reciclagem química, tornando a sua deposição final mais dispendiosa. Muitos dos polímeros utilizados na construção civil e na indústria automóvel contêm retardantes de chama contendo cloro, bromo, fósforo ou trióxido de antimónio, que constituem ameaças para o ambiente, saúde e segurança (Azapagic *et al.*, 2003).

Outra peculiaridade dos plásticos é o facto de normalmente não serem compatíveis. Por outras palavras, durante o processo de reciclagem separam-se em duas fases fundidas e permanecem separados no estado sólido. Esta deterioração pode ser reduzida quando estão em causa pequenas quantidades de um polímero diferente do outro. No entanto, pode ser um problema quando os polímeros são provenientes de RSU, porque o nível de contaminação é elevado (Brandrup *et al.*, 1995). Na Tabela

1.8 apresentam-se as compatibilidades entre diferentes plásticos. A miscibilidade decresce de 1 a 6: o número 1 significa boa compatibilidade e o número 6 indica incompatibilidade.

Tabela 1.8. Compatibilidade entre termoplásticos de acordo com 1)Brandrup *et al.*, 1995e 2) Brognoli, 2006).

	PS	PSAI	SAN	ABS	PA	PC	PMMA	POM	PVC	PP	LDPE	HDPE	PBT
PS													
PSAI	1												
SAN	6	6											
ABS	6	6	1										
PA	5	4	6	6									
PC	6	5	2	2	6								
PMMA	4	4	1	1	6	1							
POM	6	6	6	5	6	6	5						
PVC	6	6	2	3	6	5	1	6					
PP	6	6	6	6	6	6	6	6	6				
LDPE	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6			
HDPE	6	6	6	6	6	6	5/6	6	6	6	1		
PBT	6	6	6	5	5	1	6	6	6	6	6	6	
PET	5	5	6	5	5	1	6	6	6	6	6	6	6

Legenda: PS – poliestireno, PSAI – poliestireno de alto impacto, SAN – estireno acrilonitrila, ABS – acrilonitrilo butadieno estireno, PA – poliamida, PC – policarbonato, PMMA – poli (metil metacrilato), POM – poliacetal, PVC – policloreto de vinilo, PP – polipropileno, LDPE – polietileno de baixa densidade, HDPE – polietileno de alta densidade, PBT – polibutileno tereftalato, PET – polietileno tereftalato.

A compatibilidade química dos plásticos é importante para a plastificação de um polímero rígido por um outro flexível. Geralmente, este processo exige que exista miscibilidade entre esses polímeros, isto é, um plastificante polimérico deve solubilizar-se no polímero rígido formando uma película completamente miscível (Brognoli, 2006).

O plástico reciclado tem de obedecer a um conjunto de critérios de qualidade e cada carga distribuída é acompanhada de um certificado de qualidade conforme a norma EN 10204-3.1 B. O conjunto de critérios inclui valores, determinados de acordo com as normas ISO 9000 e EN em vigor, para as seguintes características: índice de fluidez,

massa volúmica, estabilidade térmica, teor de negro de fumo, dispersão de negro de fumo, deformação longitudinal a quente, pressão hidrostática e deformação à ruptura.

1.6. GESTÃO DE RESÍDUOS DA RECICLAGEM DE PLÁSTICOS

Os resíduos industriais são, de acordo com o DL n.º 178/2006, de 5 de Setembro, os resíduos gerados em processos produtivos industriais, bem como os que resultem das actividades de produção e distribuição de electricidade, gás e água.

O DL n.º 178/2006, que transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2006/12/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril e a Directiva n.º 91/689/CE, do Conselho, de 12 de Dezembro, estabelece o regime geral da gestão de resíduos. Este diploma revê a situação nacional na área da gestão de resíduos e reflecte a evolução do direito e da ciência, no quadro europeu, que permitiram atingir a estabilidade suficiente para consagrar no ordenamento jurídico nacional um conjunto de princípios. Os princípios apresentados são os seguintes: princípio da auto suficiência, princípio da responsabilidade pela gestão, princípio da prevenção e redução, princípio da hierarquia das operações de gestão de resíduos, princípio da responsabilidade do cidadão, princípio da regulação da gestão de resíduos e princípio da equivalência.

Os princípios referidos, aplicados na gestão de resíduos, são igualmente válidos na gestão de resíduos industriais, da qual fazem parte o Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Industriais (PESGRI) e o Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais (PNAPRI), elaborados no contexto das Directivas Quadro anteriores à actualmente em vigor. Assim, dos princípios referidos destacam-se o princípio da prevenção e da redução e o princípio da hierarquia das operações de gestão de resíduos.

De acordo com o PNAPRI (2001) a palavra «prevenção» só começou a fazer parte dos textos da legislação que contemplam a gestão de resíduos há apenas alguns anos, mais concretamente, a partir do DL n.º 310/95, no seu artigo 3º. No DL n.º 239/97 (que revoga o anterior), no n.º 1 do artigo 4º do capítulo II, reconhece-se que “a gestão dos resíduos industriais visa, preferencialmente, a prevenção ou redução da produção ou nocividade dos resíduos, nomeadamente através da reutilização e da alteração dos processos produtivos por via da adopção de tecnologias mais limpas, bem como da sensibilização dos agentes económicos e dos consumidores”. No DL n.º 178/2006 a palavra «Prevenção» diz respeito às medidas destinadas a reduzir a quantidade e o carácter perigoso para o ambiente ou para a saúde, dos resíduos e materiais ou substâncias neles contidas.

O princípio da hierarquia considera que a gestão de resíduos deve assegurar que à utilização de um bem sucede uma nova utilização ou que, não sendo viável a sua reutilização, se procede à sua reciclagem ou ainda outras formas de valorização. A eliminação definitiva de resíduos, nomeadamente a sua deposição em aterro, constitui a última opção de gestão, justificando-se apenas quando seja técnica ou financeiramente inviável a prevenção, a reutilização, a reciclagem ou outras formas de valorização. Esta hierarquia de gestão de resíduos está também consagrada no Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Industriais (PESGRI 2001), publicado pelo DL n.º 89/2002, de 9 de Abril.

1.6.1. Valorização energética: incineração e co-incineração

A incineração e co-incineração de resíduos são regulamentadas pela Directiva 2000/76/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de Dezembro. A presente directiva tem por objectivo prevenir ou, na medida do possível, reduzir ao mínimo os efeitos negativos no ambiente, em especial a poluição resultante das emissões para a atmosfera, o solo e as águas superficiais e subterrâneas, bem como os riscos para a saúde humana resultantes da incineração e co-incineração de resíduos. Este objectivo

deve ser atingido através de condições de funcionamento rigorosas e de requisitos técnicos, do estabelecimento de valores-limite de emissão para as instalações de incineração e de co-incineração de resíduos na Comunidade, e também da observância dos requisitos da Directiva 75/442/CEE.

Uma instalação de incineração é, de acordo com a Directiva 2000/76/CE, qualquer unidade e equipamento técnico fixo ou móvel dedicado ao tratamento térmico de resíduos, com ou sem recuperação da energia térmica gerada pela combustão. Esta definição inclui a incineração de resíduos por oxidação e outros processos de tratamento térmico, como a pirólise, a gaseificação ou processos de plasma, na medida em que as substâncias resultantes do tratamento sejam subsequentemente incineradas.

De acordo com o mesmo documento, uma instalação de co-incineração é uma instalação fixa ou móvel que tem como principal finalidade a geração de energia ou a produção de materiais e que utiliza resíduos como combustível regular ou adicional, ou na qual os resíduos são sujeitos a tratamento térmico com vista à respectiva eliminação.

Se a co-incineração se der de forma a que o objectivo principal da instalação deixe de ser a geração de energia ou a produção de materiais, e passe a ser o tratamento térmico dos resíduos, a instalação será considerada instalação de incineração.

Segundo Brandrup *et al.* (1995), a incineração de resíduos tem sido aplicada desde 1895 com "finalidades históricas", tais como a redução do volume de resíduos transformando-os em resíduos higienicamente seguros, mas a tecnologia de incineração de resíduos, actualmente, tem muito mais para oferecer.

Embora a incineração de resíduos seja, em geral, mal aceite pela sociedade, nos anos 80 as tecnologias de incineração de resíduos já permitiam o processamento de

resíduos com baixas emissões, bom rendimento energético e alto desempenho. A razão pela qual existe resistência na aceitação da valorização energética de resíduos e, em particular, de resíduos plásticos em conjunto com RSU passa pelo receio de poluição ambiental e pelo receio de que esta operação de gestão comprometa o cumprimento das metas de reutilização e reciclagem estabelecidas.

Brandrup *et al.* (1995) afirmam que, actualmente, o desenvolvimento de tecnologias de incineração de resíduos, juntamente com sistemas de limpeza de gases altamente eficientes, permitem atingir eficiências de mais de 99% na remoção da maioria das substâncias perigosas que podem ser encontradas nos fluxos de resíduos. Isto é válido para os poluentes gasosos, para os metais pesados e para as dioxinas e furanos, com origem nos resíduos.

A utilização de resíduos como combustível auxiliar em unidades de co-incineração, em particular, em cimenteiras, requer o cumprimento de critérios de qualidade mais exigentes do que na incineração dedicada. À parte dos requisitos gerais, tais como a garantia de disponibilidade e os critérios económicos, os combustíveis têm de assegurar que o funcionamento dos fornos e a qualidade do clínquer não são comprometidos. Estes factores são de grande importância porque o processo de combustão envolve o contacto directo, térmico e material, entre o combustível e os produtos de combustão. Por outras palavras, quando se selecciona um combustível é necessário verificar a influência no processo industrial e na qualidade do cimento produzido.

Em geral, os requisitos técnicos para a admissão de combustíveis alternativos incluem: poder calorífico tão elevado quanto possível, baixa produção de cinzas com composição homogénea, preparação correcta para queima, formato transportável e doseáveis.

Considerando o âmbito nacional e europeu em matéria de incineração de resíduos, considerou-se importante apresentar, nas Tabelas 1.9 e 1.10, os critérios de admissibilidade de resíduos para incineração dedicada e de combustíveis alternativos. Assim, são apresentados os valores-limite estabelecidos pela European Union for Responsible Incineration and Treatment of Special Waste (EURITS) (incineração dedicada de combustível sólido recuperado) e pela cimenteira Secil (co-incineração de combustível derivado de resíduos na indústria do cimento).

Tabela 1.9. Características físicas e composição química: critérios de admissibilidade (1) Gendebien *et al.*, 2003, (2) ESA01, 2005.

Parâmetro	PCI	Humidade	Cinzas	N
Unidade	MJ/kg (peso húmido)	%	% (peso seco)	% (peso seco)
EURITS ⁽¹⁾ (incineração)	15	-	5	0,7
Secil ⁽²⁾ (co-incineração)	-	10	-	-

Tabela 1.10. Concentração de metais: critérios de admissibilidade (1) Gendebien *et al.*, 2003, (2) ESA01, 2005.

Parâmetro	Cl	S	F	Br	Al	Ba	Cd	Pb	Co	Cu	Cr	Sn	Ni	K	Se	Na	Sb	Ti	V	Zn	Hg
Unidade	% (peso seco)				ppm (peso seco)																
EURITS ⁽¹⁾ (incineração)	0,5	0,4	-	0,01	-	-	-	200	200	200	200	200	-	-	10	-	10	-	200	500	2 ⁽³⁾
Secil ⁽²⁾ (co-incineração)	1	2	0,2	0,05	25 000	2 000	50	200	20	150	100	50	100	5 000	5	5 000	300	30	100	1 500	5

Nota: ⁽³⁾ na norma da EURITS corresponde à soma de mercúrio e tálio

A nível comunitário foi criado pelo Comité Europeu de Normalização, uma comissão científica, o CEN/TC 343: Solid Recovered Fuels, responsável pelo desenvolvimento de normas europeias que definem os parâmetros de qualidade para combustíveis sólidos recuperados (CSR).

O CSR, em inglês SRF –Solid Recovered Fuel, trata-se, de acordo com a especificação CEN/TS 15357:2006, de um combustível sólido preparado a partir de resíduos não

perigosos, a ser utilizado para recuperação de energia em instalações de incineração ou co-incineração e que cumpre os requisitos de classificação e especificações preconizados na especificação técnica CEN/TS 15359:2006.

Esta norma define a qualidade do SRF com base em três parâmetros: o Poder Calorífico Inferior (PCI), o cloro (Cl) e o mercúrio (Hg). Os valores dos parâmetros referidos são apresentados na Tabela 1.11.

Tabela 1.11. Especificações CEN/TC 343 para SRF (CEN/TS 15359:2005).

Parâmetro	CEN/TC 343				
	1	2	3	4	5
PCI (MJ/kg peso húmido)	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
Cl (% peso seco)	≤0,2	≤0,6	≤1,0	≤1,5	≤3,0
Hg (mg/MJ mediana peso húmido)	<0,02	<0,03	<0,08	<0,15	<0,5

De acordo com esta classificação, o SRF é classificado em cinco classes de produto, correspondendo a classe 5 a um produto de menor qualidade e a classe 1 a um produto de melhor qualidade.

1.6.2. Deposição em aterro

Um aterro é, de acordo com o DL n.º 152/2002, de 23 de Maio, uma instalação de eliminação para a deposição de resíduos acima ou abaixo da superfície natural.

O presente diploma estabelece as características técnicas específicas para cada classe de aterros: a) aterros para resíduos inertes, b) aterros para resíduos não perigosos e c) aterros para resíduos perigosos, e os requisitos gerais que deverão ser observados na sua concepção, construção, exploração, encerramento e manutenção pós-encerramento.

Os resíduos da reciclagem de plásticos são resíduos não perigosos, cujos critérios e processos aplicáveis à sua admissão em aterros são definidos no DL n.º 152/2002, de 23 de Maio.

Nos aterros para resíduos não perigosos podem ser admitidos, sem verificação, os resíduos urbanos ou resíduos provenientes das habitações bem como outros resíduos que, pela sua natureza ou composição, sejam semelhantes aos resíduos provenientes das habitações. São admitidos, igualmente, os resíduos que constam da lista europeia de resíduos e não estão assinalados como perigosos.

Apesar de um resíduo poder ser genericamente associado à categoria *não perigosos*, dever-se-ão conhecer as suas propriedades gerais, a sua composição, lixiviabilidade e comportamento a longo prazo. Neste sentido, no Anexo III do DL n.º 152/2002, são definidos os critérios de admissão de resíduos em aterro que definem, por exemplo, 65% de humidade (determinada a 105°C) como limite máximo de admissibilidade de resíduos não perigosos.

Não podem ser admitidos resíduos que não tenham sido sujeitos a um tratamento prévio ou que apresentem um nível de contaminação que aumente o risco associado aos resíduos, suficiente para justificar a sua eliminação noutras instalações.

CAPÍTULO 2

– DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO –

AMBIENTE, RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS PLÁSTICOS, S.A.

2.1. SELECÇÃO DO CASO DE ESTUDO

A triagem manual dos plásticos conduz a erros na separação, pois existe uma certa dificuldade em distinguir determinados polímeros. Desta forma os materiais introduzidos na linha de reciclagem contêm contaminantes, que é importante identificar e quantificar.

A presença de contaminantes nos fardos de PEAD e PEBD condicionam a qualidade do produto final obtido. Preocupada com a qualidade do granulado que produz, a Ambiente, Recuperação de Materiais Plásticos, S.A. demonstrou interesse em participar no trabalho realizado no sentido de desenvolver uma metodologia de identificação e quantificação de contaminantes no processo de reciclagem mecânica de plásticos.

No processo de reciclagem, como nos demais processos, é inevitável a produção de resíduos. Estes resíduos têm, normalmente, como destino final a deposição em aterro, com custos elevados para o sector que os produz.

Segundo a legislação em vigor sobre a gestão de resíduos industriais não perigosos (PESGRI 2001), cabe ao produtor dar um melhor destino aos seus resíduos. Assim, tendo em conta a quantidade de resíduos produzidos, foi demonstrado, pela indústria em estudo, interesse em caracterizar os resíduos no sentido de se avaliar o seu potencial para valorização energética.

2.2. CASO DE ESTUDO: AMBIENTE, RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS PLÁSTICOS, S.A.

Os objectivos do presente trabalho foram postos em prática na indústria recicladora de plásticos Ambiente, Recuperação de Materiais Plásticos S.A., em Leiria.

Esta indústria produz um granulado de polímeros de polietileno de alta e baixa densidade através de um processo de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo. As fontes de matéria-prima são, de acordo com a Lista Europeia de Resíduos, correspondente à Decisão 2000/532/CE, da Comissão, de 3 de Maio, resíduos de embalagens de plástico (15 01 02), resíduos urbanos e resíduos similares de comércio, indústria e serviços incluindo as fracções recolhidas selectivamente de plásticos de pequena dimensão (20 01 03) e outros plásticos (20 01 04).

Na Figura 2.1 estão representadas as etapas de reciclagem da indústria em estudo.

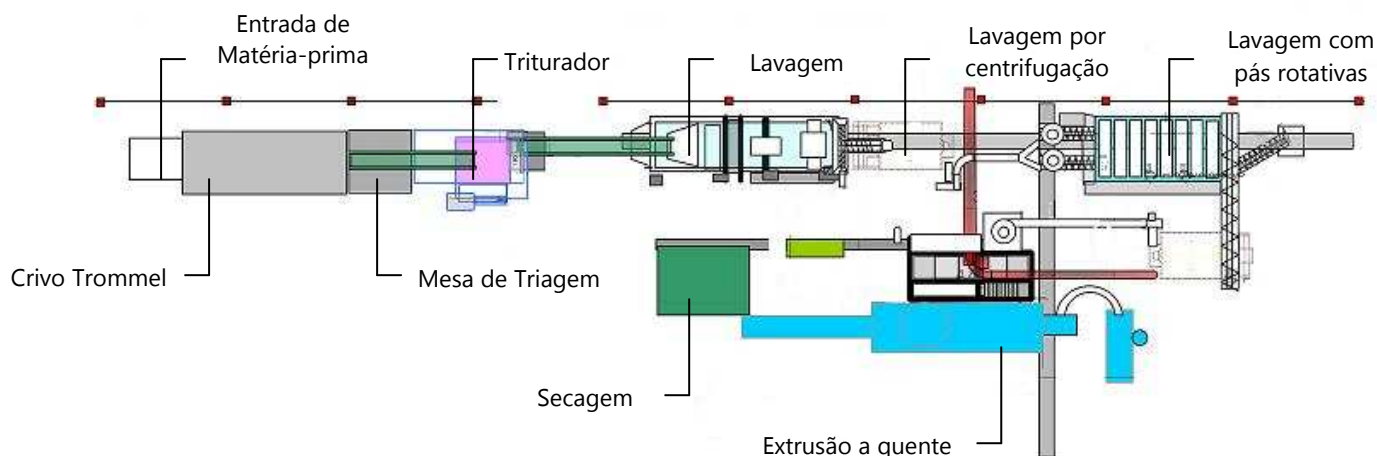


Figura 2.1. Planta da indústria de reciclagem de plásticos (Ambiente, S.A.).

A matéria-prima é introduzida na linha sob a forma de fardos. A indústria processa os seguintes materiais: filmes de PEAD/PEBD e embalagens rígidas de PEAD provenientes dos RSU (Figura 2.2), filmes de PEAD/PEBD e embalagens rígidas de PEAD provenientes do ecoponto amarelo (Figura 2.3) e filmes de comércio e

indústria. Os arames metálicos são removidos e colocados num contentor para reciclagem.



Figura 2.2. Plásticos provenientes dos RSU. À esquerda, filmes de PEAD/PEBD, à direita, embalagens rígidas de PEAD (Central de TMB da Amarsul em Setúbal, 2007).



Figura 2.3. Plásticos provenientes do ecoporto amarelo: filmes de PEAD/PEBD (Central de Triagem da Amarsul em Palmela, 2007).

Os fardos atravessam um crivo de tambor rotativo “Trommel” (Figura 2.4) que promove a desagregação dos filmes e embalagens de polietileno. O crivo possui uma malha de 100mm que possibilita a remoção de alguns materiais contaminantes com dimensão inferior a 100mm. À saída do crivo encontra-se uma mesa de triagem, onde os operadores removem manualmente os materiais que conseguem identificar como contaminantes (metais, algumas embalagens de PS e embalagens de PET).



Figura 2.4. Crivo de tambor rotativo “Trommel”, com malha de 100mm.

O polietileno já escolhido é moído, num triturador de corte (Figura 2.5) equipado com um crivo de malha de 20mm. O material triturado (Figura 2.6) é, de seguida, encaminhado para a lavagem.



Figura 2.5. Triturador de corte: aspecto exterior e pormenor do eixo de corte.



Figura 2.6. Polietileno de alta e baixa densidade triturado.

A primeira lavagem é realizada num tanque com água, ocorrendo a separação dos materiais com densidade inferior e superior a 1000kg/m^3 . O material com densidade superior a 1000kg/m^3 é o resíduo denominado Pré-lavagem (Figura 2.7), constituído por polímeros contaminantes. Este resíduo é encaminhado para uma prensa que extrai cerca de 20% da água. A matéria-prima, com densidade inferior a 1000kg/m^3 passa ao tratamento seguinte.

Segue-se uma segunda lavagem por centrifugação, com a circulação de água a uma velocidade elevada, sendo depois encaminhada para a ETAR da indústria. Do tratamento, nesta ETAR, resulta um resíduo denominado Moinha (Figura 2.8) e um efluente que é enviado para o sistema municipal de saneamento.

O polietileno resultante da lavagem por centrifugação sofre uma terceira lavagem num tanque com água (densidade de 1000kg/m^3), equipado com um sistema de pás

rotativo. O material com densidade superior a 1000kg/m^3 é o resíduo Final (Figura 2.9) e o polietileno, com densidade inferior, é encaminhado para o sistema de secagem.



Figura 2.7. Resíduo Pré-lavagem, removido na primeira lavagem.



Figura 2.8. Resíduo Moinha, removido na ETAR da indústria.



Figura 2.9. Resíduo Final, removido na última lavagem no tanque com pás rotativas.

Depois de seco (Figura 2.10), o polietileno é processado por extrusão a quente, produzindo-se um granulado (Figura 2.11) que, depois de embalado, está pronto para ser distribuído.



Figura 2.10. Polietileno seco.



Figura 2.11. Granulado de PEAD/PEBD produzido por extrusão.

De acordo com o esquema de processamento da indústria, os resíduos são produzidos na seguinte proporção: 50% de Pré-lavagem, 40% de Moinha e 10% de Final.

3.1. PLANEAMENTO DO TRABALHO

O trabalho foi desenvolvido entre Março de 2007 e Março de 2008, tendo-se realizado trabalho prático de campo e de laboratório entre Maio e Outubro do ano 2007, de acordo com o cronograma da Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Cronograma do trabalho.

Actividade	Calendarização												
	2007										2008		
	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
1. Pesquisa bibliográfica	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
2. Definição da metodologia	■	■											
3. Fase de testes da metodologia	■	■											
4. Recolha de amostras			■	■	■		■	■					
5. Análises laboratoriais			■	■	■		■	■					
6. Redacção do relatório									■	■	■		
7. Redacção da dissertação										■	■	■	■

A fase inicial de definição da metodologia de recolha e tratamento das amostras foi apoiada pela pesquisa bibliográfica de trabalhos, artigos científicos e normas, no âmbito da temática dos contaminantes da reciclagem dos plásticos e dos combustíveis derivados de resíduos.

As metodologias adoptadas para a recolha e tratamento das amostras foram ajustadas ao trabalho através da realização de testes. Uma vez determinados os procedimentos experimentais realizaram-se dez campanhas de recolha das amostras e, paralelamente, iniciaram-se os trabalhos práticos em laboratório, que se prolongaram até Outubro de 2007.

Os resultados obtidos em laboratório foram tratados estatisticamente e iniciaram-se as redacções do relatório, para a indústria de reciclagem de plásticos Ambiente S.A., e da dissertação de mestrado.

3.2. SELECÇÃO DOS LOCAIS DE AMOSTRAGEM

Na indústria de reciclagem mecânica de plásticos, Ambiente, Recuperação de Materiais Plásticos S.A., produzem-se resíduos em diferentes pontos do processo de reciclagem.

De acordo com a Figura 2.1, apresentada no capítulo 2.2, e tendo em conta as quantidades de resíduos produzidas, foram seleccionados para amostragem os pontos correspondentes à primeira lavagem, à lavagem por centrifugação e à lavagem com pás rotativas. Os resíduos produzidos à entrada da indústria, correspondentes aos arames metálicos dos fardos e aos materiais contaminantes, removidos por crivagem (com dimensão inferior a 100mm) e manualmente pelos operadores, por serem produzidos em quantidade reduzida, poderem ser reciclados ou reintroduzidos no processo, não foram considerados.

3.3. SELECÇÃO E RECOLHA DAS AMOSTRAS DE RESÍDUOS

O trabalho prático de recolha das amostras foi desenvolvido durante dez semanas, entre Maio e Julho de 2007, durante as quais foram recolhidas amostras, uma por semana, directamente na linha de processamento da indústria recicladora.

As amostras de resíduos foram recolhidas nos pontos determinados através de um processo de amostragem aleatória, uma vez que é um tipo de amostragem fácil de implementar e que garante a representatividade da amostra.

Na Tabela 3.2 apresentam-se as datas das recolhas, o material processado na indústria e as quantidades, em peso húmido, dos resíduos recolhidos.

Tabela 3.2. Datas das campanhas de recolha, material processado e quantidade recolhida.

Campanha	Data de Recolha	Material processado	Quantidade (kg peso húmido)		
			Pré-lavagem	Moinha	Final
1	10 Maio 07	70% filme compostagem + 20% filme comércio + 10% PEAD	10,8	7,90	5,52
2	17 Maio 07	100% PEAD	9,04	9,52	5,14
3	24 Maio 07	70% filme compostagem + 30% filme comércio	13,5	5,00	7,78
4	31 Maio 07	70% filme embalão + 30% filme comércio	9,98	7,82	7,22
5	06 Junho 07	70% filme embalão + 20% filme comércio + 10% PEAD	11,2	6,70	9,52
6	18 Junho 07	100% PEAD	-	-	-
7	21 Junho 07	2/3 filme compostagem + 1/3 filme comércio	12,4	8,56	8,00
8	28 Junho 07	70% filme compostagem + 20% filme comércio + 10% PEAD	15,3	12,6	5,80
9	05 Julho 07	70% filme compostagem + 20% filme comércio + 10% PEAD (+ blocos triturados)	7,00	6,08	9,72
10	12 Julho 07	70% filme embalão + 20% filme agricultura + 10% PEAD	-	-	-

Normalmente a indústria processa com uma composição de 70% de filme de PEAD/PEBD dos RSU ou do Embalão, 20% de embalagens de PEAD e 10% de filme do comércio, verificando-se, normalmente, uma variação na fracção 70%, que umas vezes corresponde a filme de compostagem, outras a filme do embalão. Pode funcionar também com a linha alimentada apenas por PEAD (100% PEAD).

Desta forma, as composições dos materiais processados podem ser agrupadas em: filme de compostagem, filme do embalão e PEAD. Na apresentação dos resultados relativos à análise de contaminantes nos resíduos, estes grupos são designados por compostagem, embalão e PEAD.

Na campanha 7 o material processado é apresentado na forma 2/3 de filme de compostagem e 1/3 de filme de comércio devido a uma avaria na passadeira onde normalmente são introduzidos os filmes de comércio e as embalagens de PEAD.

Na campanha 9 refere-se a introdução de blocos triturados, contudo, uma vez que esta componente é introduzida no sistema de secagem, espera-se que não afecte a composição dos resíduos Pré-lavagem, Moinha e Final.

Na indústria de reciclagem, a recolha das amostras, directamente na linha de processamento, foi realizada, por um operador, do seguinte modo:

- Efectuou-se a recolha do resíduo Pré-lavagem após prensagem;
- Efectuou-se a recolha do resíduo Moinha no contentor de recolha, associado à ETAR;
- Efectuou-se a recolha do resíduo Final no contentor de recepção colocado após o tanque de lavagem com sistema de pás rotativas.

3.4. TRATAMENTO DAS AMOSTRAS DE RESÍDUOS

No laboratório as amostras foram tratadas da seguinte forma:

- A amostra foi seca a $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, determinando-se a humidade de acordo com a norma CEN/TS 15414:2006;
- Após a homogeneização da amostra seca, recolheram-se três sub-amostras de 500g: duas para a análise de contaminantes e uma que foi triturada até uma granulometria de 8 mm;
- Desta amostra, depois de homogeneizada, retiraram-se sub-amostras que foram trituradas até uma granulometria de 1 mm para análise físico-química;
- Uma fracção da amostra foi seca a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para análise do Mercúrio, uma vez que se trata de um metal volátil a temperaturas superiores; esta amostra foi triturada até uma granulometria de 1 mm antes da análise.

3.5. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES NOS RESÍDUOS

Na análise de contaminantes nos resíduos aplicaram-se os procedimentos propostos na norma XP U44-164 da Associação Francesa de Normalização.

Em cada análise realizaram-se ensaios em duplicado (ensaio A e ensaio B).

O método separa uma amostra seca ($105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) com um peso médio de 500g, em 6 fracções: matéria orgânica, leves, semi-pesados, pesados, metais e finos. A matéria orgânica é digerida com hipoclorito de sódio, os finos correspondem às partículas com dimensão inferior a 2mm e os polímeros são separados de acordo com os seus pesos específicos, em banhos sucessivos: um primeiro em água com densidade de $1000\text{kg}/\text{m}^3$ e um segundo em solução de cloreto de cálcio saturado com densidade de $1350\text{kg}/\text{m}^3$.

Tendo em conta que cada polímero tem a sua densidade específica, admite-se que existe uma maior probabilidade de encontrar esse polímero numa dada fracção. Assim, encontram-se descritos na Tabela 3.3 os materiais identificados em cada fracção, de acordo com a bibliografia consultada.

Tabela 3.3. Fracções e materiais separados de acordo com a Norma XP U44-164.

Finos ($<2\text{mm}$)	Leves ($d < 1000\text{kg}/\text{m}^3$)	Semi-Pesados ($1000\text{kg}/\text{m}^3 < d < 1350\text{kg}/\text{m}^3$)	Pesados ($d > 1350\text{kg}/\text{m}^3$)	Metais
- Areias - Outros (plásticos, etc.)	- Polietileno (PE) - Polipropileno (PP) - Poliestireno expansível (PSE)	- Polietileno (PE) denso - Poliestireno (PS) - Fibras têxteis	- Vidros - Pedras - Polietileno tereftalato (PET) - Policloreto de vinilo (PVC)	- Ferrosos - Não ferrosos

A fracção finos é constituída por areias e outros materiais de dimensão menor que 2mm. A fracção leves inclui os materiais com densidade inferior a $1000\text{kg}/\text{m}^3$, na sua maioria polipropileno. Na fracção semi-pesados o poliestireno e as fibras têxteis são os contaminantes mais abundantes, com densidades entre $1000\text{kg}/\text{m}^3$ e $1350\text{kg}/\text{m}^3$.

A fracção pesados é formada por pedras, vidros, PET e PVC, com densidades superiores a 1350kg/m³. Na fracção dos metais são contabilizados os metais ferrosos e/ou não ferrosos.

3.6. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS RESÍDUOS

A caracterização físico-química dos resíduos foi efectuada de acordo com os métodos propostos pelas normas europeias do Comité Técnico CEN/TC 343: Solid Recovered Fuels.

Na Tabela 3.4 apresentam-se os métodos e equipamentos usados na análise dos resíduos.

Tabela 3.4. Métodos de análise para a caracterização físico-química dos resíduos.

Parâmetro	Método	Equipamento
Humidade	CEN/TS 15414:2006	Balança METTLER PJ 3600 DeltaRange e estufa CASSEL
Cinzas	CEN/TS 15403:2006	Balança METTLER PJ 3600 DeltaRange, estufa CASSEL e Carbolite
Poder Calorífico Superior (PCS) ⁽¹⁾	CEN/TS 15400:2006	Bomba calorimétrica ISCO Calorimat
Cloro e Enxofre	CEN/TS 15408:2006	Bomba calorimétrica ISCO Calorimat, cromatógrafo iónico DIONEX X300 com coluna Ion Pac AS14A 4mm
Análise Elementar (CNH) ⁽²⁾	-	Analizador Elementar Carlo Erba Strum DP200 CNHS
Metais Pesados	RAL (2003) com a digestão das amostras a quente segundo o método A, descrito na norma EN 13346:2000	ICP Ultima, Jobin Yvon Horbina
Mercúrio	Costley <i>et al.</i> (1999)	Leco, AMA-254

⁽¹⁾ O PCI é obtido por cálculo a partir dos valores de PCS, humidade e teor em hidrogénio.

⁽²⁾ O teor de oxigénio foi calculado por diferença a partir dos valores de carbono, hidrogénio e azoto.

3.7. MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA O TRATAMENTO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente. Na análise de contaminantes nos resíduos calcularam-se coeficientes de correlação entre campanhas, médias e desvios padrão. Para a análise físico-química, a análise elementar e os metais, foi avaliada a normalidade da distribuição dos resultados, por aplicação do teste Shapiro-Wilk recorrendo à ferramenta analítica SPSS 14.0 para Windows.

Calculou-se o coeficiente de correlação entre as séries de valores obtidas por aplicação da análise de inertes, que é uma espécie de covariância que não depende das unidades de medida (Pedrosa e Gama, 2004). A covariância entre duas variáveis aleatórias é uma medida da associação linear entre elas.

Calculou-se o desvio padrão dos ensaios em duplicado da análise de inertes, que é uma medida de dispersão usada com a média e mede a variabilidade dos valores à volta da média. Segundo Pedrosa e Gama (2004), o desvio padrão informa-nos sobre a dispersão dos valores observados relativamente à sua média. Um desvio padrão elevado significa que os valores registados estão afastados da média, enquanto que um desvio padrão reduzido significa que os valores registados se encontram muito próximos do valor médio. Na bibliografia consultada não existe um valor de referência que defina um bom valor para o desvio padrão.

De acordo com Pedrosa e Gama (2004), o Teorema do Limite Central (TLC) é um dos resultados mais importantes em Estatística e indica qual a distribuição de \bar{X} – aproximadamente normal – desde que a amostra seja suficientemente grande e a distribuição da população tenha variância finita. A definição de suficientemente grande depende, evidentemente, da distribuição da população e do grau de aproximação pretendido. Quanto mais assimétrica e afastada da normal for a população, maior terá de ser o tamanho da amostra. No entanto, desde que as observações sejam independentes, a aproximação normal para \bar{X} é, geralmente,

satisfatória para n maior ou igual a 30, seja qual for a forma da distribuição. Para n menor que 30, a aproximação é satisfatória se a distribuição da população não diferir excessivamente da distribuição normal.

O teste de hipóteses Shapiro-Wilk calcula um valor «p» que é a probabilidade de observar pelo menos um valor do teste estatístico que é tão inconsistente com a hipótese nula – “a amostra tem uma distribuição normal” – como o valor do teste estatístico calculado. Quanto mais pequeno for o p maior é a evidência contra a hipótese nula (Weiss, 1993).

Weiss (1993) diz que um teste estatístico diz-se significativo se o valor de p é suficientemente pequeno para garantir a rejeição da hipótese nula. Considera-se que $p = 0,05$ é a fronteira entre rejeitar e não rejeitar a hipótese nula, isto é, entre teste de hipótese significativa e não significativa. Weiss citando R. Fisher sugeriu, de acordo com a Tabela 3.5, uma divisão dos valores de p , de forma a tirar mais conclusões de um teste de hipótese, para além de rejeitar ou não rejeitar a hipótese nula.

Tabela 3.5. Interpretação dos valores de p num teste de hipóteses (Weiss, 1993).

Valor de p	Interpretação
$p > 0,10$	Não significativa
$0,05 < p \leq 0,10$	Moderadamente significativa
$0,01 < p \leq 0,05$	Significante
$p \leq 0,01$	Altamente significativa

Quanto mais pequeno for o valor de p , mais forte é a significância e menos válida é a hipótese nula.

Desta forma, em amostras cujo n é maior ou igual a 30, a distribuição dos resultados aproxima-se de uma distribuição normal e podem calcular-se intervalos de confiança (IC) para a média com um dado nível de confiança, optando-se neste caso por 95% de confiança.

Em amostras para n menor que 30 aplica-se o teste Shapiro-Wilk de forma a verificar a normalidade dos resultados. No caso de a distribuição não ser normal mas os valores de n serem aproximadamente 30 apresentam-se intervalos de confiança da média indicativos.

Quando n é muito menor que 30, mas o valor de p devolvido é próximo de 0,05, admite-se que o IC calculado tem também valor indicativo, uma vez que o valor é próximo do valor devolvido para uma distribuição normal.

CAPÍTULO 4

– APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS –

4.1. ANÁLISE DE CONTAMINANTES NOS RESÍDUOS

4.1.1. Reprodutibilidade do método da análise de contaminantes nos resíduos

Os resultados da análise de contaminantes nos resíduos são apresentados no Anexo A. Os valores dos ensaios em duplicado, A e B, são apresentados em percentagem de peso seco.

Optou-se por apresentar os resultados por fracção contaminante: matéria orgânica, finos, leves, semi-pesados, pesados e metais, resumidos nas Tabelas 4.2 a 4.15. Calcularam-se os parâmetros estatísticos média e desvio padrão.

Matéria Orgânica

A fracção da matéria orgânica é constituída por papel e restos de alimentos, que são eliminados pelo hipoclorito de sódio. Nas Tabelas 4.1 a 4.3 apresentam-se os resultados da análise dos três resíduos, realizada em duplicado.

O resíduo Pré-lavagem apresenta valores médios de matéria orgânica entre 15% e 43% (Tabela 4.1). Os valores dos desvios padrão calculados para as dez campanhas são, em geral, baixos. Regista-se um desvio padrão mais elevado, 5,16, na campanha 4.

Tabela 4.1. Matéria orgânica no resíduo Pré-lavagem.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	38,8	40,6	39,7	1,29
2	41,5	39,6	40,5	1,28
3	44,2	42,6	43,4	1,18
4	41,0	33,7	37,4	5,16
5	23,5	22,1	22,8	0,99
6	28,5	24,7	26,6	2,74
7	31,5	35,7	33,6	2,94
8	38,4	43,7	41,0	3,74
9	32,6	30,8	31,7	1,26
10	16,1	13,1	14,6	2,12

O resíduo Moinha apresenta valores médios de matéria orgânica entre 10% e 70% (Tabela 4.2). Os valores dos ensaios em duplicado estão próximos do valor médio, como se pode verificar pelos valores dos desvios padrão calculados para cada campanha. Novamente, verifica-se um desvio padrão mais elevado, 3,44, na campanha 4.

Tabela 4.2. Matéria orgânica no resíduo Moinha.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	20,0	21,0	20,5	0,74
2	15,3	14,1	14,7	0,85
3	52,3	53,7	53,0	0,96
4	36,3	31,5	33,9	3,44
5	26,4	26,6	26,5	0,11
6	10,1	10,5	10,3	0,27
7	43,0	43,1	43,0	0,06
8	70,5	68,6	69,5	1,31
9	32,2	34,8	33,5	1,90
10	11,7	12,0	11,9	0,19

O resíduo Final apresenta valores médios de matéria orgânica entre 3% e 19% (Tabela 4.3). Os desvios padrão calculados são baixos em todas as campanhas.

Tabela 4.3. Matéria orgânica no resíduo Final.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	18,4	17,0	17,7	1,00
2	17,5	19,5	18,5	1,39
3	15,1	16,2	15,6	0,80
4	18,6	18,4	18,5	0,20
5	14,5	-	-	-
6	-	-	-	-
7	16,5	15,0	15,8	1,04
8	16,1	14,0	15,0	1,46
9	17,6	16,4	17,0	0,83
10	4,13	1,91	3,02	1,57

Finos

A fracção dos finos corresponde a partículas como areias e outros plásticos, com dimensão inferior a 2mm. Estas partículas são de difícil recuperação devido à sua dimensão e, também, porque se encontram muitas vezes em suspensão. Nas Tabelas 4.4 a 4.6 apresentam-se os resultados da análise dos três resíduos, realizada em duplicado.

Segundo a Tabela 4.4, o resíduo Pré-lavagem apresenta valores médios de finos entre 2% e 30%. Os desvios padrão são, em geral, baixos.

Tabela 4.4. Finos no resíduo Pré-lavagem.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	23,4	25,1	24,3	1,19
2	2,57	2,13	2,35	0,31
3	10,9	11,1	11,0	0,16
4	10,5	10,2	10,3	0,16
5	3,83	5,15	4,49	0,93
6	9,50	12,7	11,1	2,26
7	11,3	10,7	11,0	0,43
8	10,6	11,6	11,1	0,76
9	1,46	2,67	2,06	0,85
10	27,8	33,2	30,5	3,79

O resíduo Moinha apresenta valores médios de finos entre 3% e 14% (Tabela 4.5). Os desvios padrão calculados são, na sua maioria, baixos. Verificam-se valores elevados nas campanhas 2 a 6 e, em particular, na campanha 2, com um desvio padrão de 5,29.

Tabela 4.5. Finos no resíduo Moinha.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média	Desvio padrão
1	1,83	0,77	1,30	0,75
2	7,51	15,0	11,3	5,29
3	9,46	6,69	8,07	1,96
4	12,0	7,92	9,96	2,88
5	4,15	2,56	3,36	1,12
6	6,67	8,49	7,58	1,29
7	3,97	3,35	3,66	0,44
8	5,37	5,08	5,23	0,21
9	7,13	7,57	7,35	0,31
10	13,8	14,5	14,1	0,52

O resíduo Final apresenta valores médios de finos entre 1% e 3% (Tabela 4.6). A variação dos dados dos ensaios em duplicado, por campanha, é baixa, como se pode verificar nos desvios padrão calculados.

Tabela 4.6. Finos no resíduo Final.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	1,09	1,97	1,53	0,62
2	2,83	3,35	3,09	0,37
3	0,99	1,04	1,02	0,04
4	1,59	0,96	1,27	0,44
5	1,69	-	-	-
6	-	-	-	-
7	2,86	3,42	3,14	0,40
8	1,53	1,39	1,46	0,10
9	1,26	2,27	1,76	0,71
10	-	-	-	-

Leves

A fracção dos leves corresponde essencialmente a plásticos de polipropileno (PP) e poliestireno expansível (PSE). Eventualmente pode existir na mistura uma pequena quantidade de polietileno (PE). Nas Tabelas 4.7 a 4.9 apresentam-se os resultados da análise dos três resíduos, realizada em duplicado.

Segundo a Tabela 4.7, o resíduo Pré-lavagem apresenta valores médios de leves entre 5% e 41%. Os desvios padrão são, na sua maioria baixos. Verificam-se valores ligeiramente elevados nas campanhas 3 e 10.

Tabela 4.7. Fracção leves no resíduo Pré-lavagem.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	5,10	5,17	5,13	0,05
2	41,5	39,6	40,5	0,07
3	7,40	9,20	8,30	1,28
4	4,41	4,65	4,53	0,17
5	9,69	8,88	9,29	0,57
6	8,80	8,11	8,46	0,48
7	6,22	5,31	5,77	0,64
8	4,33	4,93	4,63	0,42
9	32,1	32,9	32,5	0,54
10	36,0	31,5	33,7	3,17

O resíduo Moinha apresenta valores médios de leves entre 23% e 80% (Tabela 4.8). As campanhas 2 e 9 apresentam desvios padrão ligeiramente mais elevados e regista-se um desvio padrão muito elevado na campanha 4 (7,78).

Tabela 4.8. Fracção leves no resíduo Moinha.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	77,6	76,7	77,1	0,67
2	76,0	70,2	73,1	4,11
3	37,9	39,0	38,4	0,80
4	48,8	59,8	54,3	7,78
5	69,2	70,6	69,9	0,98
6	80,3	78,9	79,6	0,97
7	47,6	47,7	47,6	0,08
8	22,0	23,9	22,9	1,34
9	58,4	54,9	56,6	2,47
10	72,8	72,1	72,5	0,54

O resíduo Final apresenta valores médios de leves entre 3% e 86% (Tabela 4.9). Os valores calculados para o desvio padrão são, em geral, baixos. Verificam-se desvios padrão ligeiramente elevados nas campanhas 2, 3 e 10.

Tabela 4.9. Fracção leves no resíduo Final.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	4,16	3,48	3,82	0,48
2	21,7	18,4	20,1	2,32
3	12,2	8,47	10,4	2,66
4	10,6	9,71	10,2	0,63
5	10,2	-	-	-
6	-	-	-	-
7	4,15	2,79	3,47	0,96
8	11,0	12,5	11,7	1,01
9	5,23	3,16	4,19	1,46
10	84,5	87,6	86,0	2,19

Semi-pesados

A fracção dos semi-pesados corresponde essencialmente a plásticos de poliestireno (PS) e fibras têxteis. Eventualmente pode existir nesta fracção uma pequena quantidade de polietileno (PE) denso que, devido à sujidade do plástico tenha

afundado durante a separação densimétrica. Nas Tabelas 4.10 a 4.12 apresentam-se os resultados da análise dos três resíduos, realizada em duplicado.

Segundo a Tabela 4.10, o resíduo Pré-lavagem apresenta valores médios de semi-pesados entre 11% e 35%. Os desvios padrão apresentam valores ligeiramente elevados em todas as campanhas, excepto na campanha 9, onde se registou um desvio padrão de apenas 0,03.

Tabela 4.10. Fracção semi-pesados no resíduo Pré-lavagem.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	14,4	18,6	16,5	2,92
2	29,5	26,6	28,0	2,00
3	19,9	24,7	22,3	3,34
4	30,7	36,6	33,6	4,19
5	26,9	21,9	24,4	3,53
6	32,7	35,9	34,3	2,26
7	36,8	33,6	35,2	2,26
8	37,8	32,6	35,2	3,72
9	18,6	18,5	18,6	0,03
10	9,52	12,3	10,9	1,97

De acordo com a Tabela 4.11, a fracção de semi-pesados no resíduo Moinha variou em média entre 0% e 6%. Apesar de ser uma fracção com pouca importância relativa no conjunto dos contaminantes do processo de reciclagem, os valores do desvio padrão são, em geral, baixos.

Tabela 4.11. Fracção semi-pesados no resíduo Moinha.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	0,61	1,58	1,09	0,69
2	0,91	0,57	0,74	0,24
3	0,40	0,69	0,55	0,20
4	2,94	0,88	1,91	1,46
5	0,24	0,29	0,27	0,03
6	2,93	2,10	2,52	0,59
7	5,52	5,95	5,73	0,30
8	2,22	2,46	2,34	0,17
9	2,33	2,71	2,52	0,27
10	1,67	1,43	1,55	0,17

O resíduo Final apresenta valores médios de semi-pesados entre 7% e 66% (Tabela 4.12). As campanhas 1, 4, 9 e 10 apresentam valores de desvio padrão ligeiramente elevados e registou-se um desvio padrão de 5,94 na campanha 7.

Tabela 4.12. Fracção semi-pesados no resíduo Final.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	57,2	60,3	58,7	2,16
2	46,2	46,1	46,2	0,07
3	49,3	48,4	48,9	0,60
4	42,8	47,1	44,9	3,00
5	52,5	-	-	-
6	-	-	-	-
7	48,0	56,4	52,2	5,94
8	46,6	45,7	46,1	0,63
9	62,9	68,1	65,5	3,67
10	8,96	5,83	7,40	2,21

Pesados

A fracção dos pesados corresponde a plásticos de polietileno tereftalato (PET), policloreto de vinilo (PVC), vidros e pedras. Nas Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam-se os resultados da análise dos resíduos Pré-lavagem e Final, realizada em duplicado.

A fracção dos contaminantes pesados foi sujeita a uma separação, num crivo de 6,3mm, com o objectivo de separar os vidros e as pedras, presentes na amostra, com dimensão inferior e superior a 6,3mm.

No resíduo Moinha não foi identificada esta fracção uma vez que o material que constitui este resíduo tem dimensões reduzidas. Este resíduo resulta de uma lavagem por centrifugação, o que leva à diminuição das dimensões do material que é introduzido na lavagem.

Segundo a Tabela 4.13, o resíduo Pré-lavagem apresenta valores médios de pesados entre 4% e 21%. Os valores do desvio padrão são mais elevados nas campanhas 1 a 5. A fracção dos contaminantes pesados do resíduo Pré-lavagem apresenta, em média, 30% de pedras e vidros dos quais 18% têm dimensão inferior a 6,3mm e 12% têm dimensão superior a 6,3mm. Os restantes cerca de 70% correspondem a plásticos de PET e PVC (com dimensões superiores a 6,3mm).

Tabela 4.13. Fracção pesados no resíduo Pré-lavagem.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	12,6	8,33	10,4	2,99
2	20,1	22,4	21,2	1,66
3	13,8	10,7	12,2	2,18
4	4,52	10,2	7,33	3,98
5	20,2	14,9	17,6	3,75
6	16,7	17,7	17,2	0,70
7	9,08	8,53	8,80	0,39
8	6,18	5,51	5,84	0,47
9	6,36	5,30	5,83	0,75
10	3,80	4,83	4,32	0,72

Segundo a Tabela 4.14, o resíduo Final apresenta valores médios de pesados entre 4% e 26%. Os valores do desvio padrão são superiores a 1,00 em todas as campanhas, excepto na campanha 2 (0,62). Durante a análise deste resíduo não foram identificadas pedras ou vidros. Desta forma, esta fracção corresponde apenas a

plásticos contaminantes, dos quais 26% tem dimensões inferiores a 6,3mm e 74% tem dimensões superiores a 6,3mm.

Tabela 4.14. Fracção pesados no resíduo Final.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	19,1	17,3	18,2	1,31
2	11,7	12,6	12,1	0,62
3	22,5	25,9	24,2	2,41
4	26,4	23,9	25,1	1,73
5	21,1	-	-	-
6	-	-	-	-
7	28,5	22,4	25,5	4,34
8	24,8	26,5	25,7	1,18
9	13,0	10,1	11,5	2,08
10	2,44	4,70	3,57	1,59

Metais

A fracção dos metais corresponde a materiais metálicos, ferrosos e não ferrosos, que devido às suas características (densidade) são removidos na primeira lavagem e, portanto, só foram identificados no resíduo Pré-lavagem. Na Tabela 4.15 apresentam-se os resultados da análise do resíduo Pré-lavagem, realizada em duplicado.

Segundo a Tabela 4.15, o resíduo Pré-lavagem apresenta valores médios de metais entre 2% e 21%. Na campanha 5 o valor médio calculado para a fracção dos metais é de 21%, superior aos restantes valores médios calculados, e o desvio padrão calculado foi de 7,87. Esta campanha apresenta valores de metais mais elevados que as restantes, podendo considerar-se um caso excepcional, uma vez que os metais são removidos na sua maioria nos centros de triagem ou no início do processo da indústria de reciclagem de plásticos.

Tabela 4.15. Metais no resíduo Pré-lavagem.

Campanha	Ensaio A (% peso seco)	Ensaio B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	5,67	2,19	3,93	2,46
2	1,86	4,49	3,17	1,87
3	3,78	1,76	2,77	1,43
4	8,95	4,69	6,82	3,02
5	15,4	26,5	21,0	7,87
6	3,80	0,99	2,39	1,99
7	5,07	6,18	5,62	0,78
8	2,73	1,70	2,21	0,73
9	8,93	9,85	9,39	0,65
10	6,89	5,19	6,04	1,21

Resumo

Na Tabela 4.16 apresentam-se os valores médios dos desvios padrão por resíduo e por fracção contaminante.

Os valores médios calculados para os desvio padrão, permitem concluir que o método da análise de inertes é mais adequado para determinadas fracções em determinados resíduos. Isto é, revela-se mais preciso na determinação da matéria orgânica no resíduo Moinha, no entanto nos resíduos Pré-lavagem e Final é menos preciso. O contrário acontece na fracção leves no resíduo Pré-lavagem ou na fracção finos no resíduo Final.

Tabela 4.16. Desvio padrão, médio, das fracções contaminantes.

	Pré-lavagem	Moinha	Final
Matéria Orgânica	2,27	0,98	1,04
Finos	1,08	1,48	0,38
Leves	0,74	1,97	1,46
Semi-pesados	2,62	0,41	2,29
Pesados	1,76	-	1,91
Metais	2,20	-	-

Apesar destas variações, os desvios padrão revelam que a variação dos resultados da análise de contaminantes nos resíduos é baixa, logo conclui-se que o método é reprodutível para a caracterização de contaminantes nos resíduos do processo de reciclagem de plásticos.

4.1.2. Influência dos materiais processados na composição dos resíduos

A recolha de amostras foi efectuada pontualmente durante dez semanas, estando essa recolha sujeita ao tipo de material processado no dia da campanha. De forma a averiguar a influência dos materiais na composição dos resíduos calcularam-se coeficientes de correlação entre as campanhas.

Os coeficientes de correlação resultam da comparação dos valores de cada fracção de uma campanha com os valores de cada fracção de outra campanha, ou seja, são comparados os valores médios de matéria orgânica da campanha 1 com os valores médios de matéria orgânica da campanha 2 e assim sucessivamente para cada campanha.

Assim, apresentam-se nas Tabelas 4.17 a 4.19 os coeficientes de correlação entre campanhas, para os resíduos Pré-lavagem, Moinha e Final. Os coeficientes assinalados a sombreado colorido correspondem às campanhas cujo material processado é do mesmo tipo, isto é, são ambos materiais da compostagem, do embalão ou 100% PEAD.

O resíduo Pré-lavagem (Tabela 4.17) apresenta coeficientes de correlação positivos e superiores a 0,5 entre a maioria das campanhas e, por vezes, são mais elevados entre campanhas com materiais diferentes do que entre campanhas com o mesmo material processado. A campanha 10 apresenta coeficientes de correlação negativos em relação às restantes campanhas, excepto para as campanhas 1 e 9.

Tabela 4.17. Pré-lavagem: coeficiente de correlação entre campanhas.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Comp.	PEAD	Comp.	Embal.	Embal.	PEAD	Comp.	Comp.	Comp.	Embal.
1	Comp.										
2	PEAD	0,7									
3	Comp.	0,9	0,9								
4	Embal.	0,7	0,9	0,9							
5	Embal.	0,1	0,7	0,5	0,6						
6	PEAD	0,6	0,9	0,8	0,9	0,6					
7	Comp.	0,7	0,9	0,9	1,0	0,6	0,9				
8	Comp.	0,8	0,9	0,9	1,0	0,6	0,9	1,0			
9	Comp.	0,2	0,4	0,5	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5		
10	Embal.	0,1	-0,4	-0,1	-0,2	-0,8	-0,3	-0,2	-0,1	0,3	

O resíduo Moinha (Tabela 4.18) tem coeficientes de correlação positivos e muito próximos de 1, entre as campanhas, excepto para as campanhas 8/6 e 10/8, que têm um coeficiente de correlação nulo.

Tabela 4.18. Moinha: coeficiente de correlação entre campanhas.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Comp.	PEAD	Comp.	Embal.	Embal.	PEAD	Comp.	Comp.	Comp.	Embal.
1	Comp.										
2	PEAD	1,0									
3	Comp.	0,6	0,5								
4	Embal.	0,9	0,9	0,8							
5	Embal.	1,0	1,0	0,7	1,0						
6	PEAD	1,0	1,0	0,4	0,9	1,0					
7	Comp.	0,8	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7				
8	Comp.	0,2	0,1	0,9	0,5	0,3	0,0	0,7			
9	Comp.	0,9	0,9	0,8	1,0	1,0	0,9	0,9	0,5		
10	Embal.	1,0	1,0	0,4	0,9	0,9	1,0	0,7	0,0	0,9	

O resíduo Final (Tabela 4.19) apresenta coeficientes de correlação positivos e próximos de 1 entre as campanhas, excepto na campanha 10 que apresenta coeficientes de correlação negativos para todas as campanhas.

Tabela 4.19. Final: coeficiente de correlação entre campanhas.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Comp.	PEAD	Comp.	Embal.	Embal.	PEAD	Comp.	Comp.	Comp.	Embal.
1	Comp.										
2	PEAD	0,9									
3	Comp.	1,0	0,9								
4	Embal.	1,0	0,9	1,0							
5	Embal.	0,9	0,8	1,0	1,0						
6	PEAD	-	-	-	-	-					
7	Comp.	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	-				
8	Comp.	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	-	1,0			
9	Comp.	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	-	0,9	0,9		
10	Embal.	-0,5	-0,1	-0,5	-0,6	-0,8	-	-0,6	-0,5	-0,4	

Assim, de acordo com as Tabelas 4.17 a 4.19, é possível afirmar que a composição do resíduo não varia de acordo com o material processado, excepto no caso da campanha 10, nos resíduos Pré-lavagem e Final. Nestas situações são apresentadas as composições médias dos resíduos para as campanhas 1 a 9 e para a campanha 10.

4.1.3. Contaminantes da indústria de reciclagem de plásticos

Na Tabela 4.20 apresentam-se os valores médios das fracções contaminantes presentes no resíduo Pré-lavagem, para o conjunto das campanhas 1 a 9 e para a campanha 10.

A composição média do resíduo, considerando as campanhas 1 a 9, em termos de contaminantes é de: 35% de matéria orgânica, essencialmente na forma de papel/cartão, 9% de PP e PSE, 28% de PS e fibras têxteis, 12% de PET, PVC, pedras e vidros, 6% de metais ferrosos/não ferrosos e 10% de finos.

Na campanha 10, foram identificados como contaminantes: 15% de matéria orgânica, 34% de PP e PSE, 11% de PS e fibras têxteis, 4% de PET, PVC, pedras e vidros, 6% de metais ferrosos/não ferrosos e 31% de finos.

Tabela 4.20. Pré-lavagem: contaminação média, em % de peso seco.

Campanha	Matéria Orgânica	Leves	Semi-Pesados	Pesados	Metais	Finos
1-9	35,2	9,25	27,6	11,8	6,37	9,74
10	14,6	33,7	10,9	4,32	6,04	30,5

A variação das percentagens de contaminantes entre as campanhas 1 a 9 e a campanha 10 pode ser observada na Figura 4.1.

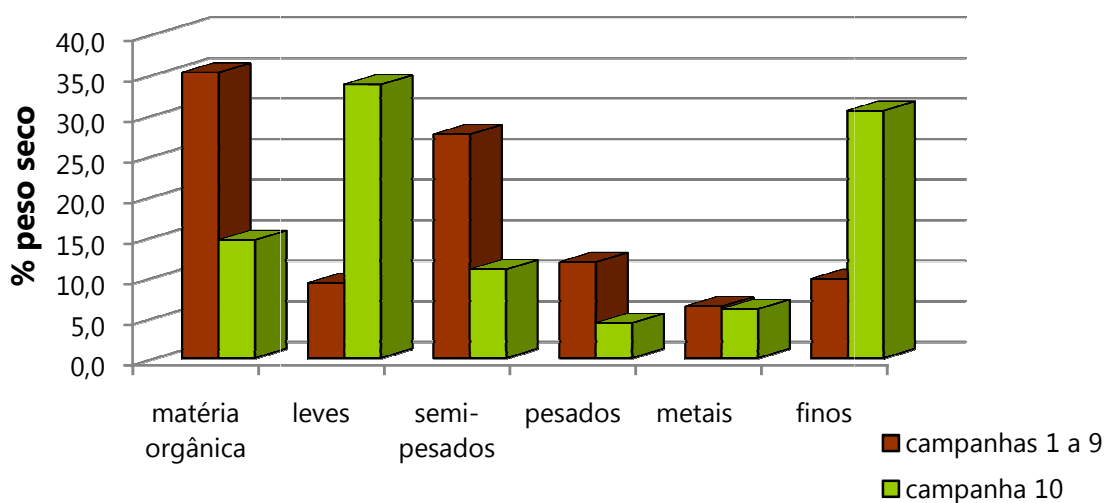


Figura 4.1. Contaminação média do resíduo Pré-lavagem.

Na Tabela 4.21 apresentam-se os valores médios das fracções contaminantes presentes no resíduo Moinha, para o conjunto das campanhas 1 a 10.

Em média foram identificados como contaminantes: 32% de matéria orgânica, essencialmente na forma de papel/cartão, 59% de PP e PSE, 2% de PS e 7% de finos.

Tabela 4.21. Moinha: contaminação média, em % de peso seco.

Campanha	Matéria Orgânica	Leves	Semi-Pesados	Pesados	Metais	Finos
1-10	31,7	59,2	1,92	0,19	-	7,19

A composição do resíduo Moinha em termos de contaminantes pode ser observada na Figura 4.2.

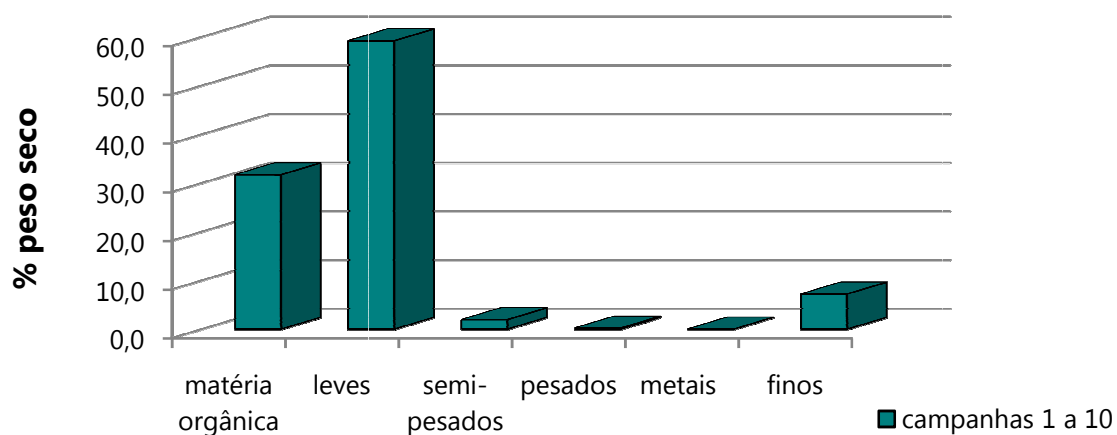


Figura 4.2. Contaminação média do resíduo Moinha.

Na Tabela 4.22 apresentam-se os valores médios das fracções contaminantes presentes no resíduo Final, para o conjunto das campanhas 1 a 9 e para a campanha 10.

A composição média do resíduo, considerando as campanhas 1 a 9, em termos de contaminantes é de: 18% de matéria orgânica, essencialmente na forma de papel/cartão, 9% de PP e PSE, 50% de PS e fibras têxteis, 21% de PET e PVC e 2% de finos.

Na campanha 10, foram identificados como contaminantes: 3% de matéria orgânica, 86% de PP e PSE, 7% de PS e fibras têxteis e 4% de PET e PVC.

Tabela 4.22. Final: contaminação média, em % de peso seco.

Campanha	Matéria Orgânica	Leves	Semi-Pesados	Pesados	Metais	Finos
1-9	17,6	9,15	50,2	21,0	-	2,12
10	3,02	86,0	7,40	3,57	-	-

A variação das percentagens de contaminantes entre as campanhas 1 a 9 e a campanha 10 pode ser observada na Figura 4.3.

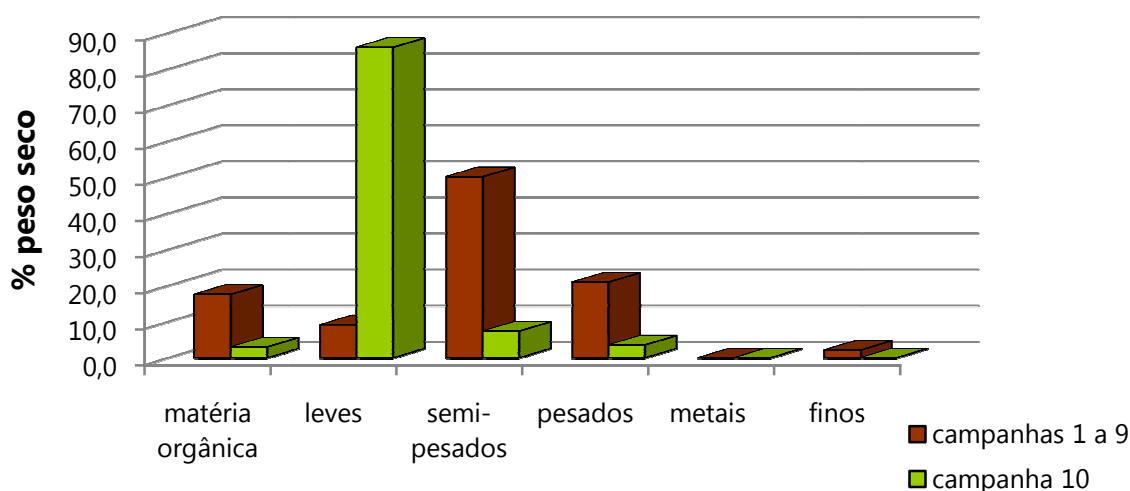


Figura 4.3. Contaminação média do resíduo Final.

4.1.4. Resumo

O processo de reciclagem da indústria estudada permite a reciclagem dos plásticos aplicando lavagens sucessivas, cujo objectivo é a lavagem dos resíduos plásticos e a separação densimétrica dos resíduos plásticos de PEAD/PEBD (matéria-prima) dos materiais contaminantes. Desta forma, é esperada uma composição, em termos de contaminantes, diferente entre resíduos.

A contaminação média dos resíduos é apresentada na Tabela 4.23.

Tabela 4.23. Contaminação média, em % de peso seco, dos três resíduos.

Resíduo	Campanha	Matéria Orgânica	Leves	Semi-Pesados	Pesados	Metais	Finos
Pré-lavagem	1-9	35,2	9,25	27,6	11,8	6,37	9,74
Moinha	1-10	31,7	59,2	1,92	0,19	-	7,19
Final	1-9	17,6	9,15	50,2	21,0	-	2,12

Na Figura 4.4 apresenta-se a contaminação dos três resíduos de acordo com as fracções consideradas: matéria orgânica, leves (PP e PSE), semi-pesados (PS e fibras

têxteis), pesados (PET, PVC, vidros e pedras), metais (ferrosos e não ferrosos) e finos (areias e outros com dimensão inferior a 2mm).

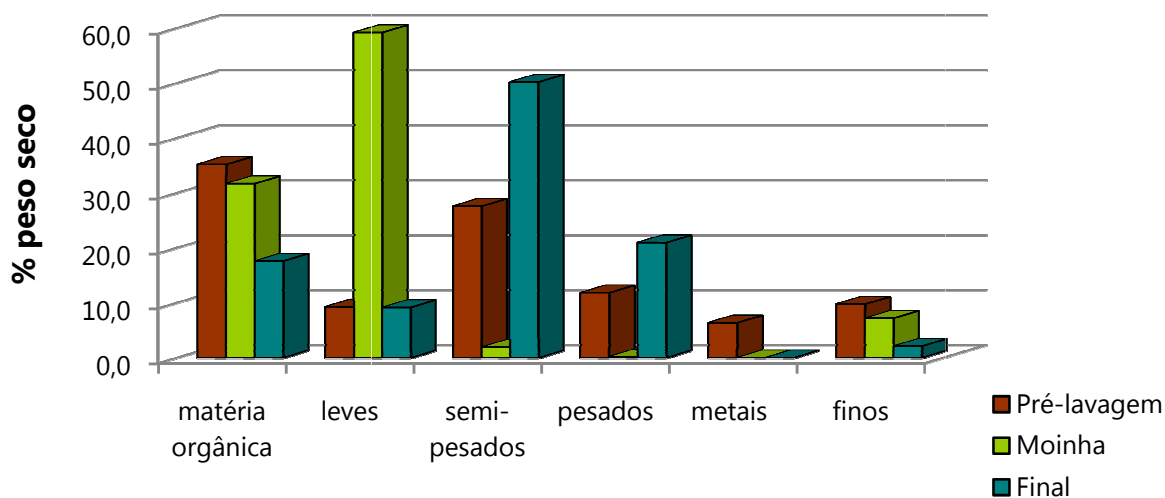


Figura 4.4. Contaminação média dos resíduos.

De acordo com a Figura 2.1, do capítulo 2 relativo à metodologia, o resíduo Pré-lavagem é recolhido no primeiro tanque de lavagem, o resíduo Moinha é recolhido na ETAR da indústria que recebe as águas de lavagem por centrifugação e o resíduo Final é recolhido após o tanque de lavagem com pás rotativas.

Assim, a composição dos resíduos em termos de contaminantes, apresentada na Figura 4.4, é a seguinte:

- Matéria orgânica - Pré-lavagem (35%), Moinha (32%) e Final (18%)
- PP e PSE (leves) - Moinha (59%), Pré-lavagem (9%) e Final (9%)
- PS e fibras têxteis (semi-pesados) - Final (50%), Pré-lavagem (27%) e Moinha (2%)
- PET, PVC, pedras e vidros (pesados) - Final (21%, apenas plásticos) Pré-lavagem (12%, incluindo pedras e vidros) e Moinha (0,2%, apenas plásticos)
- Metais - Pré-lavagem (6%)
- Areias e outros com dimensão inferior a 2mm (finos) - Pré-lavagem (10%), Moinha (7%) e Final (2%).

De acordo com o esquema de processamento da indústria, os resíduos são produzidos na proporção de 50% de Pré-lavagem, 40% de Moinha e 10% de Final. A partir destes valores, calculou-se a composição global de contaminantes da reciclagem de plásticos, de acordo com os pesos relativos de cada resíduo. Por exemplo, para determinar a composição global em termos de matéria orgânica considerou-se 50% dos 35% do resíduo Pré-lavagem, 40% dos 32% do resíduo Moinha e 10% dos 18% do resíduo Final.

A contaminação no conjunto dos três resíduos, apresentada na Tabela 4.24, é: 32% de matéria orgânica, 29% de PP e PSE, 20% de PS e fibras têxteis, 8% de PET, PVC, pedras e vidros, 3% de metais e 8% de finos.

Tabela 4.24. Contaminação média, em % de peso seco, da linha de reciclagem.

Matéria Orgânica	Leves	Semi-Pesados	Pesados	Metais	Finos
32,0	29,3	19,6	8,1	3,2	7,9

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO PRÉ-LAVAGEM

4.2.1. Caracterização físico-química

Os valores observados para os parâmetros físico-químicos encontram-se em anexo: humidade – anexo B, alínea B1, cinzas – anexo C, alínea C1; PCS e PCI – anexo D, alínea D1.

Na Tabela 4.25 apresentam-se os resultados referentes ao cálculo dos valores médios da humidade e cinzas do resíduo Pré-lavagem. A humidade do resíduo é de 52% e o teor em cinzas de 27%.

Tabela 4.25. Caracterização físico-química média do resíduo Pré-lavagem.

Parâmetro	Tamanho da amostra	Média	Intervalo da média (95% confiança)
Humidade (%)	133	52,2	[50,6; 53,9]
Cinzas (% peso seco)	46	27,1	[24,2; 30,1]

Na Tabela 4.26 apresentam-se os resultados dos testes estatísticos efectuados para o PCS e PCI do resíduo Pré-lavagem. A série de valores do PCS não segue uma distribuição normal, enquanto que a série de valores do PCI apresenta uma distribuição aproximadamente normal. O PCI do resíduo é, em média, 6,22 MJ/kg de peso húmido.

Tabela 4.26. PCS e PCI do resíduo Pré-lavagem: teste de normalidade, média e intervalos de confiança.

Parâmetro	Shapiro-Wilk			Normal	Média	Intervalo da média
	Estatística do teste	Graus de liberdade	p			
PCS (MJ/kg peso seco)	0,928	34	0,027	Não	18,2	[16,9; 19,4]
PCI (MJ/kg peso húmido)	0,967	34	0,381	Sim	6,22	[5,26; 7,17]

Nas Figuras 4.5 a 4.7 apresentam-se todos os valores de humidade, cinzas, PCS e PCI obtidos, bem como os limites das normas aplicáveis.

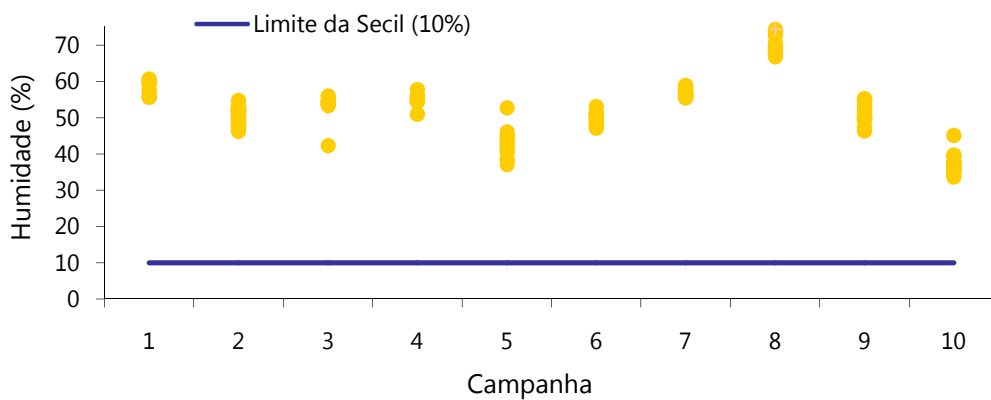


Figura 4.5. Humidade do resíduo Pré-lavagem.

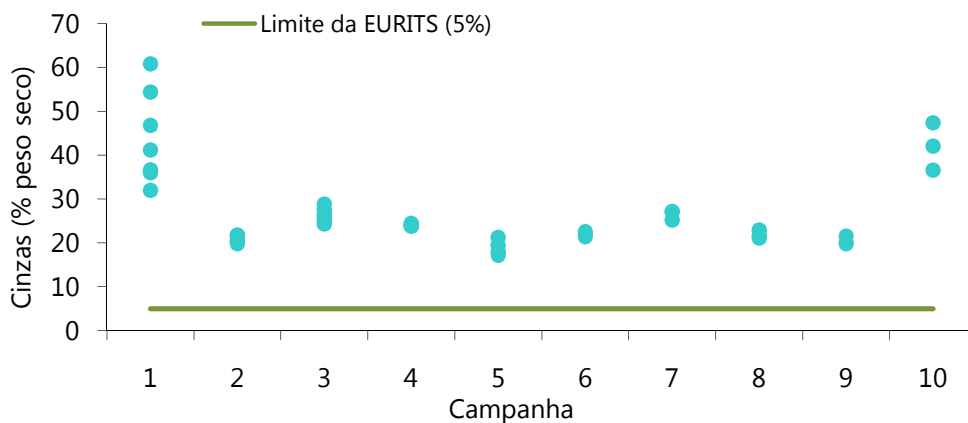


Figura 4.6. Teor de cinzas do resíduo Pré-lavagem.

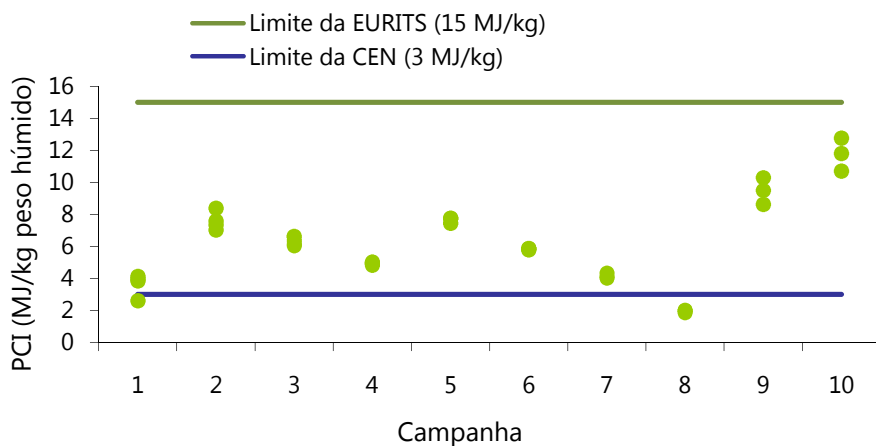


Figura 4.7. Poder Calorífico Superior e Inferior do resíduo Pré-lavagem.

Na Figura 4.8 apresenta-se a composição físico-química média do resíduo Pré-lavagem, que é composto por 52% de humidade, 35% de sólidos voláteis e 13% de cinzas.

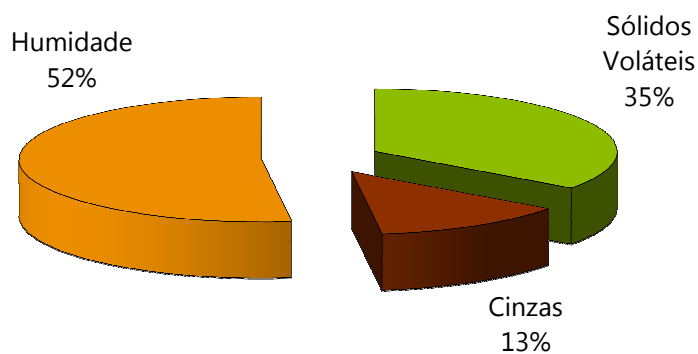


Figura 4.8. Composição físico-química, média, do resíduo Pré-lavagem.

4.2.2. Caracterização elementar

Os valores observados para os parâmetros carbono, hidrogénio, azoto e oxigénio encontram-se no anexo E, alínea E1.

Na Tabela 4.27 apresentam-se os valores das médias e dos intervalos da média, com 95% de confiança, da composição elementar do resíduo Pré-lavagem, calculados para o conjunto das dez campanhas.

Tabela 4.27. Composição elementar média do resíduo Pré-lavagem.

Parâmetro	Tamanho da amostra	Média	Intervalo da média (95% confiança)
Carbono (% peso seco)	52	41,6	[40,0; 43,2]
Hidrogénio (% peso seco)	53	5,56	[5,22; 5,89]
Azoto (% peso seco)	52	0,54	[0,30; 0,79]
Oxigénio (% peso seco)	53	52,3	[50,2; 54,4]

Na Figura 4.9 apresenta-se a composição elementar média do resíduo Pré-lavagem: 42% de carbono, 6% de hidrogénio, 0,5% de azoto e 52% de oxigénio.

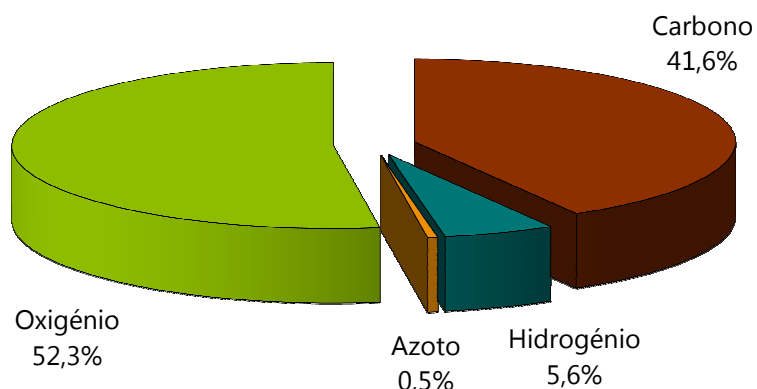


Figura 4.9. Composição elementar média do resíduo Pré-lavagem.

4.2.3. Metais

Os valores observados para os metais encontram-se em anexo: cloro e o enxofre – anexo F, alínea F1; outros metais – anexo G, alínea G1.

Na Tabela 4.28 apresenta-se a concentração média em cloro (0,81% peso seco) e enxofre (0,138% peso seco) no resíduo Pré-lavagem.

Tabela 4.28. Cloro e Enxofre do resíduo Pré-lavagem: média e intervalo de confiança.

Parâmetro	Tamanho da amostra	Média	Intervalo da média (95% confiança)
Cl (% peso seco)	50	0,81	[0,51; 1,12]
S (% peso seco)	53	0,138	[0,133; 0,144]

Na Tabela 4.29 apresentam-se os resultados dos testes estatísticos efectuados para os metais do resíduo Pré-lavagem. Os metais que descrevem um comportamento aproximadamente normal são: potássio, antimónio, vanádio e tálio+mercúrio.

Os metais que não seguem uma distribuição normal estão representados nas Figuras 4.10 a 4.23, para possibilitar uma melhor compreensão do comportamento de cada um destes metais.

Tabela 4.29. Metais do resíduo Pré-lavagem: teste de normalidade, média e intervalo de confiança.

Parâmetro	Shapiro-Wilk			Normal	Média (peso seco)	Intervalo da média (peso seco)
	Estatística do teste	Gráus de liberdade	p			
Al (ppm)	0,868	25	0,004	Não	6046	[4932; 7159]
Ba (ppm)	0,630	25	0,000	Não	128	[52,9; 202]
Cd (ppm)	0,625	25	0,000	Não	2,26	[1,52; 2,99]
Pb (ppm)	0,828	25	0,001	Não	94,1	[67,7; 120,3]
Co (ppm)	0,688	25	0,000	Não	5,28	[3,16; 7,41]
Cu (ppm)	0,416	25	0,000	Não	784	[-15,2; 1584]
Cr (ppm)	0,873	25	0,005	Não	129	[89,5; 169]
Sn (ppm)	0,716	25	0,000	Não	36,8	[24,3; 49,3]
Ni (ppm)	0,634	25	0,000	Não	123	[49,7; 196]
K (ppm)	0,921	25	0,055	Sim	1021	[895; 1146]
Se (ppm)	0,643	25	0,000	Não	2,04	[0,65; 3,43]
Na (ppm)	0,913	24	0,042	Não	1314	[1092; 1537]
Sb (ppm)	0,934	25	0,108	Sim	6,05	[5,06; 7,03]
Tl (ppm)	0,902	25	0,021	Não	87,0	[74,4; 99,6]
V (ppm)	0,959	25	0,386	Sim	5,30	[4,55; 6,04]
Zn (ppm)	0,872	25	0,005	Não	344	[297; 391]
Hg (ppm) ^(a)	0,801	10	0,015	Não	4,25	[1,98; 6,52]
Tl + Hg (ppm)	0,882	10	0,137	Sim	90,6	[69,2; 112]

Nota: Todos os parâmetros estão expressos em peso seco; ^(a) o mercúrio está expresso em mg/MJ em peso húmido na classificação CEN

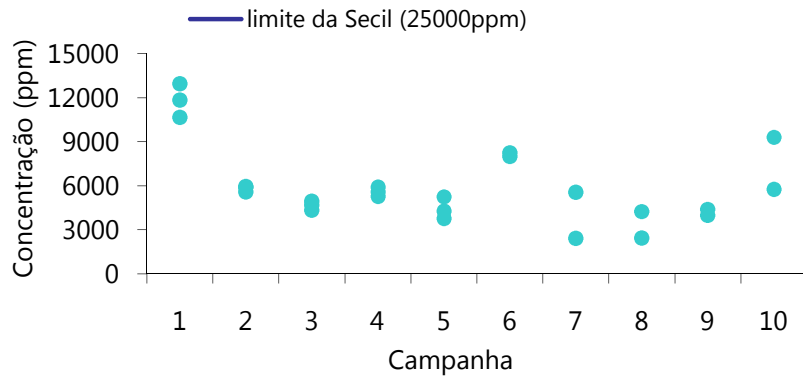


Figura 4.10. Alumínio no resíduo Pré-lavagem.

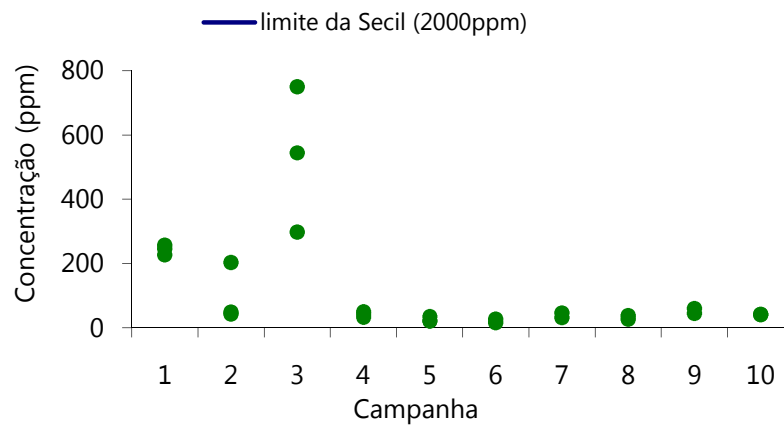


Figura 4.11. Bário no resíduo Pré-lavagem.

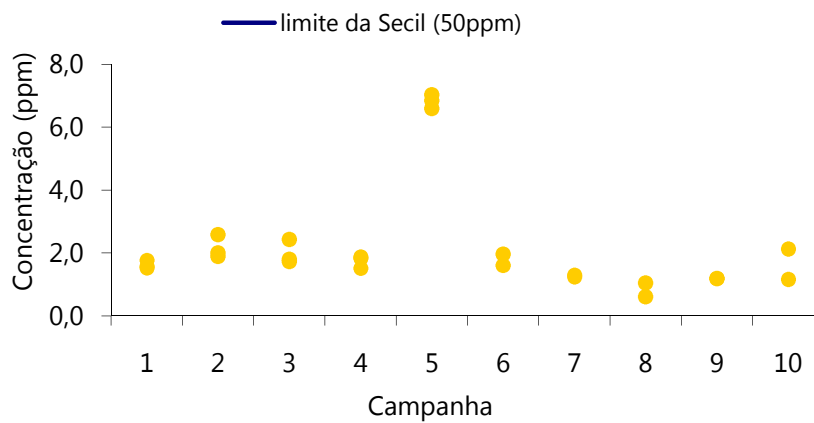


Figura 4.12. Cádmiu no resíduo Pré-lavagem.

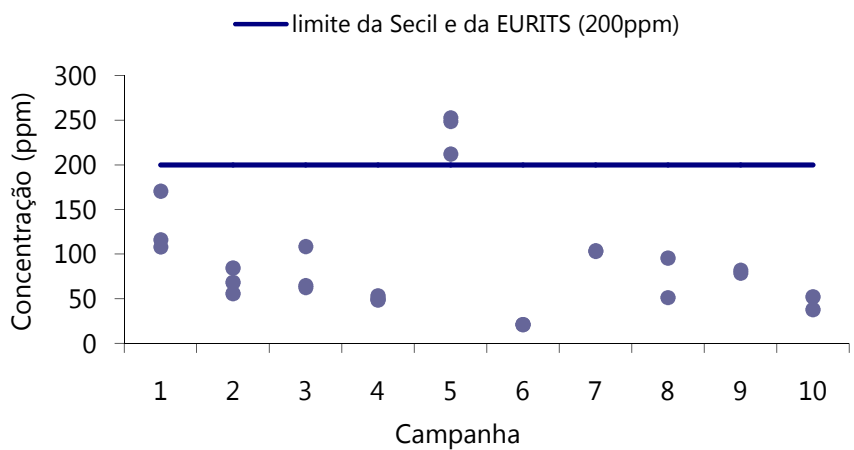


Figura 4.13. Chumbo no resíduo Pré-lavagem.

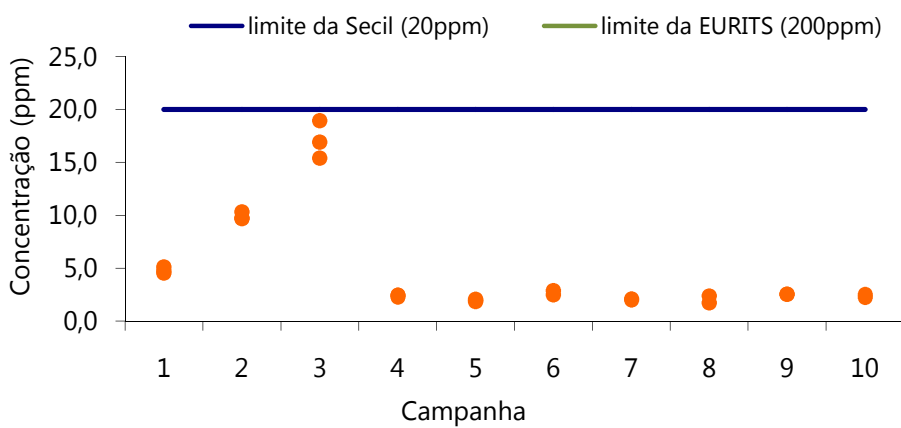


Figura 4.14. Cobalto no resíduo Pré-lavagem.

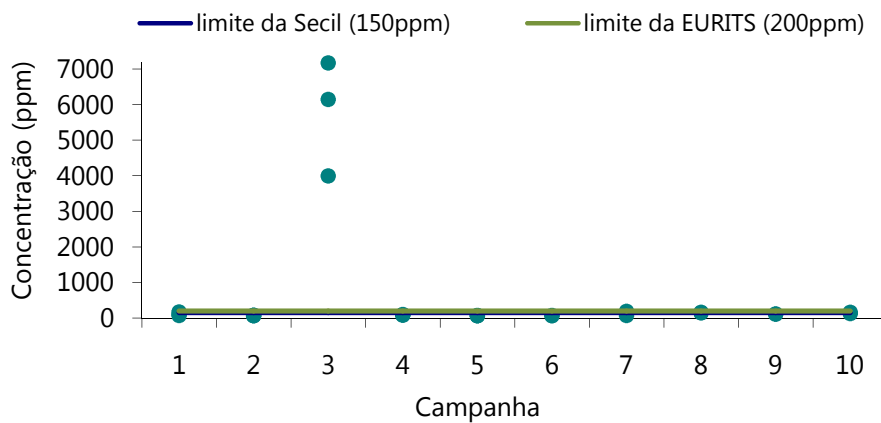


Figura 4.15. Cobre no resíduo Pré-lavagem.

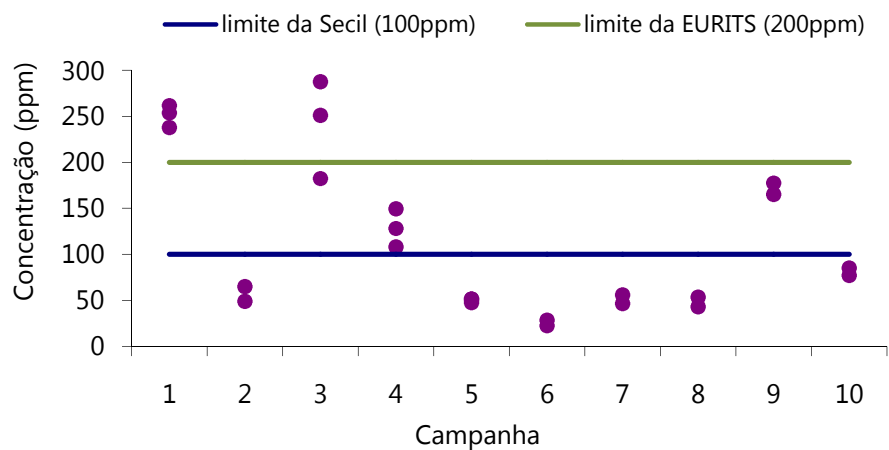


Figura 4.16. Crómio no resíduo Pré-lavagem.

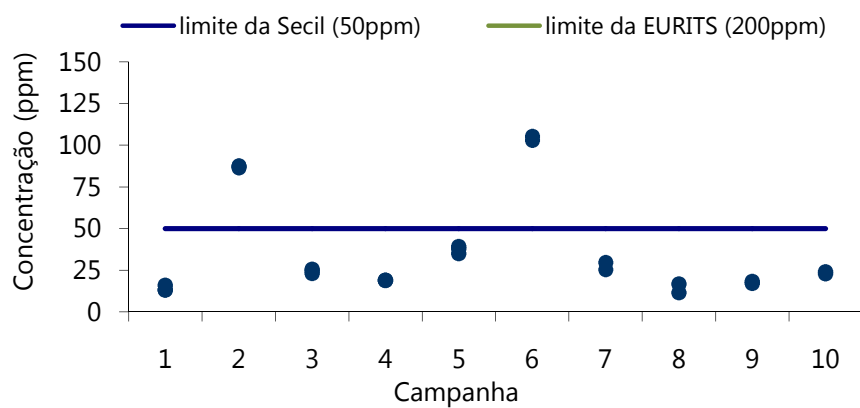


Figura 4.17. Estanho no resíduo Pré-lavagem.

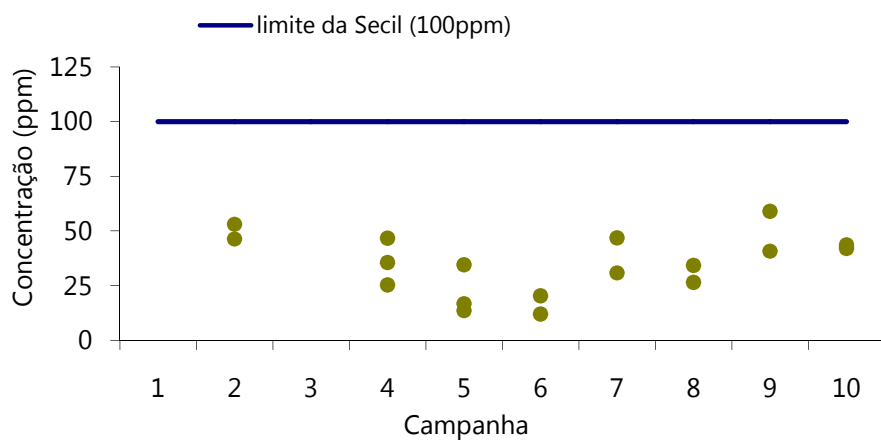


Figura 4.18. Níquel no resíduo Pré-lavagem.

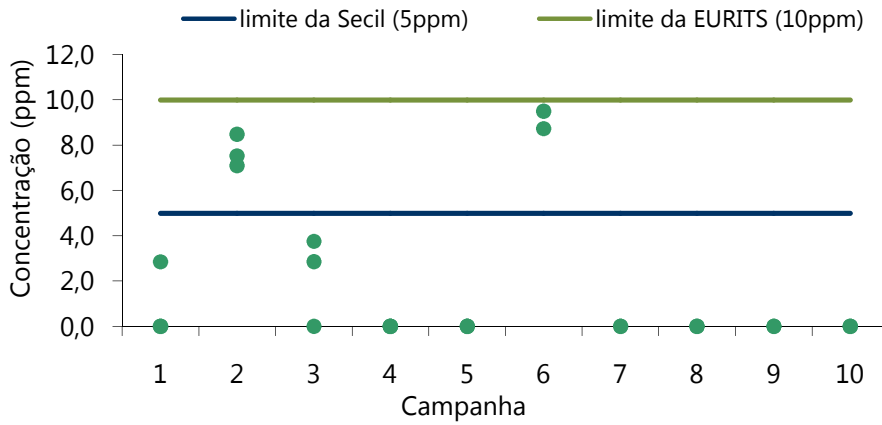


Figura 4.19. Selênio no resíduo Pré-lavagem.

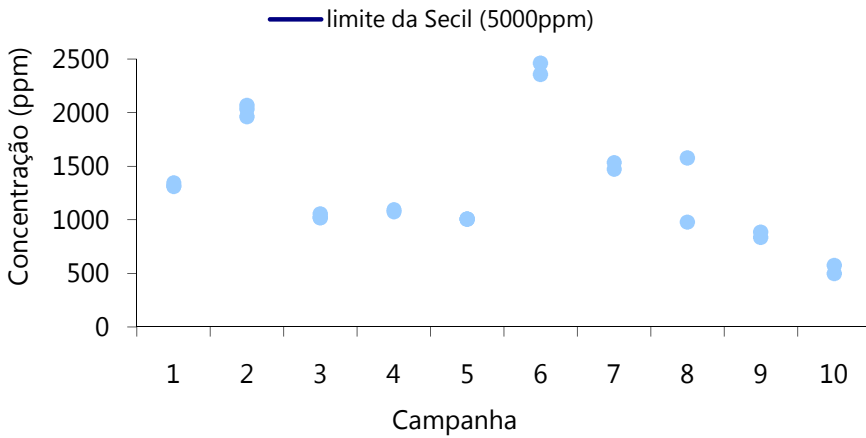


Figura 4.20. Sódio no resíduo Pré-lavagem.

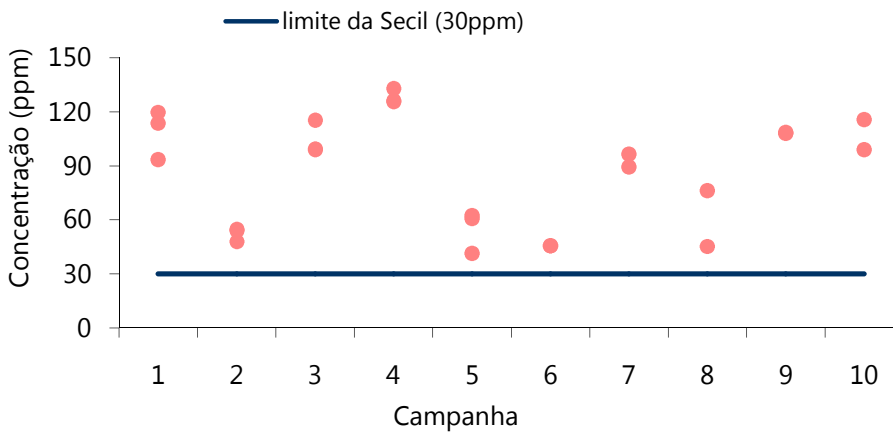


Figura 4.21. Tálcio no resíduo Pré-lavagem.

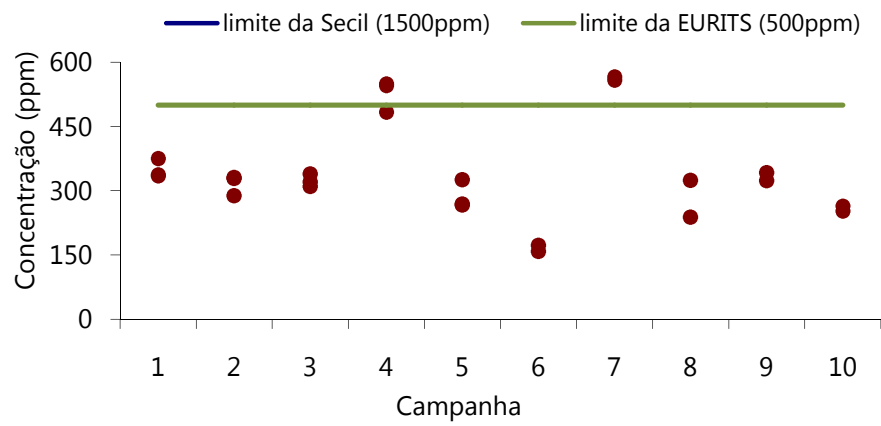


Figura 4.22. Zinco no resíduo Pré-lavagem.

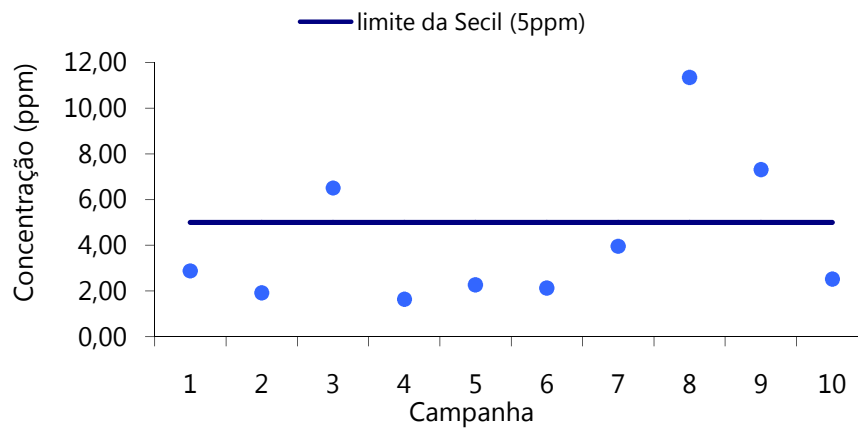


Figura 4.23. Mercúrio no resíduo Pré-lavagem.

4.2.4. Verificação da conformidade com as normas

Na Tabela 4.30 apresentam-se as médias de todos os parâmetros determinados que seguem uma distribuição normal, assim como a situação em que se encontram perante as normas de referência.

Tabela 4.30. Comparação dos resultados médios do resíduo Pré-lavagem com as especificações CEN, Secil e EURITS.

Parâmetro	Média	CEN ⁽¹⁾	Secil ⁽²⁾	EURITS ⁽³⁾
Humidade (%)	52,2	-	✘	-
Cinzas (% peso seco)	27,1	-	-	✘
PCI (MJ/kg peso húmido)	6,22	✓ Classe 5	-	✘
N (% peso seco)	0,54	-	-	✓
Cl (% peso seco)	0,81	✓ Classe 3	✓	✘
S (% peso seco)	0,190	-	✓	✓
K (ppm peso seco)	1 021	-	✓	-
Sb (ppm peso seco)	6,05	-	✓	✓
V (ppm peso seco)	5,30	-	✓	✓
Tl + Hg (ppm peso seco)	90,6	-	-	✘

Fonte: (1) CEN/TS 15359:2005, (2) ESA01, Secil, 2005 e (3) Gendebien *et al.*, 2005

✓ - Cumpre os limites da Norma; ✘ - Não cumpre os limites da Norma

Em relação aos parâmetros para os quais não foi possível associar uma distribuição normal, compararam-se os valores máximo obtidos com os limites impostos pelas normas, de acordo com a Tabela 4.31.

A concentração máxima registada para o mercúrio não cumpre o limite mínimo (<0,02 mg/MJ) especificado pela CEN.

Em termos de valores máximos, de acordo com as especificações da Secil, os parâmetros alumínio, bário, cádmio, cobalto, potássio, zinco e mercúrio têm concentrações abaixo dos limites especificados, no entanto verificam-se incumprimentos nos restantes parâmetros.

As especificações da EURITS são ultrapassadas nos parâmetros chumbo, cobre, crómio e zinco. Os restantes parâmetros estão de acordo com as especificações da norma.

Tabela 4.31. Comparação dos resultados máximos do resíduo Pré-lavagem com as especificações CEN, Secil e EURITS.

Parâmetro	Máximo	CEN ⁽¹⁾	Secil ⁽²⁾	EURITS ⁽³⁾
Al (ppm peso seco)	12 945	-	✓	-
Ba (ppm peso seco)	128	-	✓	-
Cd (ppm peso seco)	2,26	-	✓	-
Pb (ppm peso seco)	94,1	-	✗	✗
Co (ppm peso seco)	5,28	-	✓	✓
Cu (ppm peso seco)	784	-	✗	✗
Cr (ppm peso seco)	129	-	✗	✗
Sn (ppm peso seco)	36,8	-	✗	✓
Ni (ppm peso seco)	123	-	✗	-
Se (ppm peso seco)	2,04	-	✗	✓
Na (ppm peso seco)	1 314	-	✓	-
Tl (ppm peso seco)	87,0	-	✗	-
Zn (ppm peso seco)	344	-	✓	✗
Hg (ppm peso seco)	11,3	-	✓	-
Hg (mg/MJ mediana)	0,91	✗	-	-

Fonte: (1) CEN/TS 15359:2005, (2) ESA01, Secil, 2005 e (3) Gendebien *et al.*, 2005

Nota: ^(a) o parâmetro mercúrio está expresso em mg/MJ em peso húmido na classificação CEN e corresponde à mediana

✓ - Cumpre os limites da Norma; ✗ - Não cumpre os limites da Norma

4.3. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO MOINHA

4.3.1. Caracterização físico-química

Os valores observados para os parâmetros físico-químicos encontram-se em anexo: humidade – anexo B, alínea B2, cinzas – anexo C, alínea C2; PCS e PCI – anexo D, alínea D2.

Na Tabela 4.32 apresentam-se os resultados referentes ao cálculo dos valores médios da humidade e cinzas do resíduo Moinha. A humidade do resíduo é de 49% e o teor em cinzas de 7%.

Tabela 4.32. Caracterização físico-química média do resíduo Moinha.

Parâmetro	Tamanho da amostra	Média	Intervalo da média (95% confiança)
Humidade (%)	130	48,5	[46,5; 50,4]
Cinzas (% peso seco)	46	6,95	[6,05; 7,85]

Na Tabela 4.33 apresentam-se os resultados dos testes estatísticos efectuados para o PCS e PCI do resíduo Moinha. As séries de valores do PCS e do PCI não seguem uma distribuição normal.

Tabela 4.33. PCS e PCI do resíduo Moinha: teste de normalidade, média e intervalos de confiança.

Parâmetro	Shapiro-Wilk			Normal	Média	Intervalo da média
	Estatística do teste	Graus de liberdade	p			
PCS (MJ/kg peso seco)	0,9333	34	0,037	Não	34,4	[32,8; 36,1]
PCI (MJ/kg peso húmido)	0,903	34	0,006	Não	15,1	[13,1; 17,1]

Nas Figuras 4.24 a 4.26 apresentam-se todos os valores de humidade, cinzas, PCS e PCI obtidos, bem como os limites das normas aplicáveis.

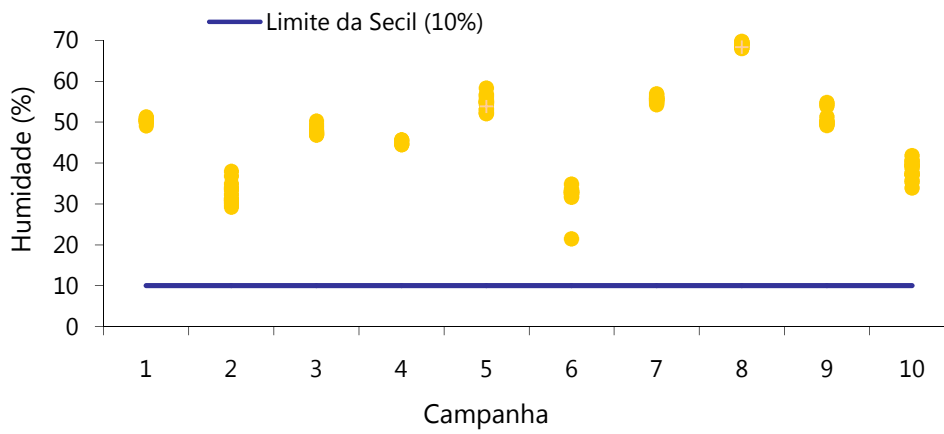


Figura 4.24. Humidade do resíduo Moinha.

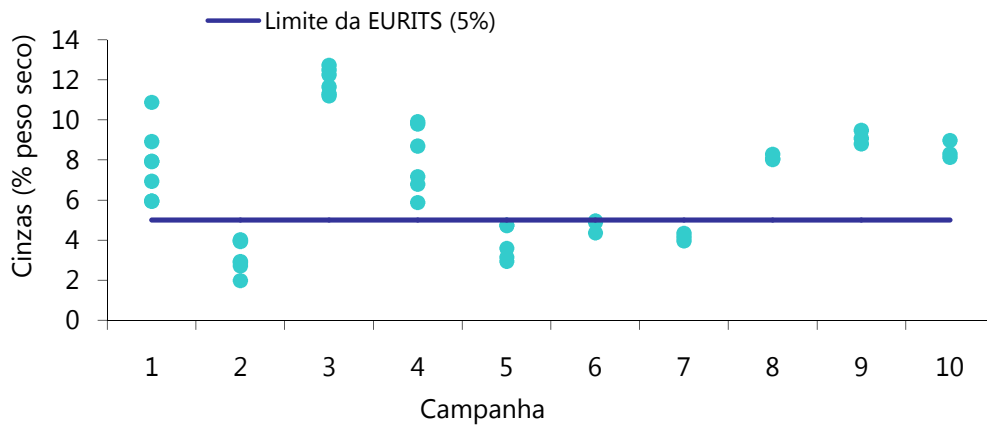


Figura 4.25. Teor de cinzas do resíduo Moinha.

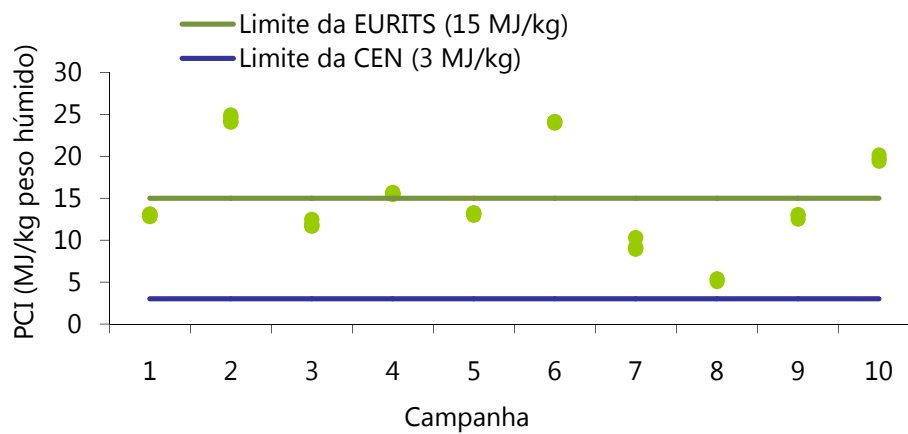


Figura 4.26. Poder Calorífico Superior e Inferior do resíduo Moinha.

Na Figura 4.27 apresenta-se a composição físico-química média do resíduo Moinha, que é composto por 49% de humidade, 47% de sólidos voláteis e 4% de cinzas.

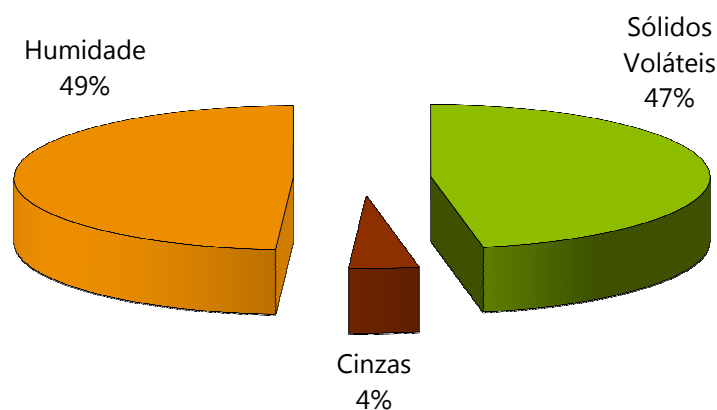


Figura 4.27. Composição físico-química, média, do resíduo Moinha.

4.3.2. Caracterização elementar

Os valores observados para os parâmetros carbono, hidrogénio, azoto e oxigénio encontram-se no anexo E, alínea E2.

Na Tabela 4.34 apresentam-se os valores das médias e dos intervalos da média, com 95% de confiança, da composição elementar do resíduo Moinha, calculados para o conjunto das dez campanhas.

Tabela 4.34. Composição elementar média do resíduo Moinha.

Parâmetro	Tamanho da amostra	Média	Intervalo da média (95% confiança)
Carbono (% peso seco)	51	64,0	[61,1; 66,8]
Hidrogénio (% peso seco)	51	10,3	[9,73; 10,9]
Azoto (% peso seco)	44	0,36	[0,23; 0,48]
Oxigénio (% peso seco)	51	25,4	[22,1; 28,8]

Na Figura 4.28 apresenta-se a composição elementar média do resíduo Moinha: 64% de carbono, 10% de hidrogénio, 0,4% de azoto e 25% de oxigénio.

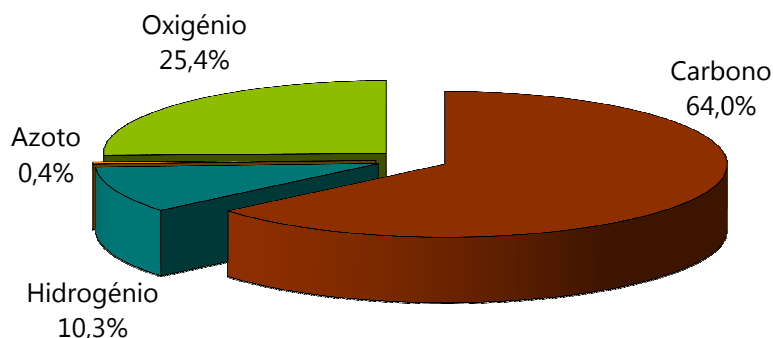


Figura 4.28. Composição elementar média do resíduo Moinha.

4.3.3. Metais

Os valores observados para os metais encontram-se em anexo: cloro e o enxofre – anexo F, alínea F2; outros metais – anexo G, alínea G2.

Na Tabela 4.35 apresenta-se a concentração média em cloro (0,15% peso seco) e enxofre (0,083% peso seco) no resíduo Moinha.

Tabela 4.35. Cloro e Enxofre do resíduo Moinha: média e intervalo de confiança.

Parâmetro	Tamanho da amostra	Média	Intervalo da média (95% confiança)
Cl (% peso seco)	55	0,15	[0,13; 0,17]
S (% peso seco)	57	0,083	[0,077; 0,089]

Na Tabela 4.36 apresentam-se os resultados dos testes estatísticos efectuados para os metais do resíduo Moinha. Os metais que descrevem um comportamento

aproximadamente normal são: alumínio, bário, chumbo, estanho, níquel, potássio, sódio, tálio, vanádio, mercúrio e tálio+mercúrio.

Os metais que não seguem uma distribuição normal estão representados nas Figuras 4.29 a 4.35, para possibilitar uma melhor compreensão do comportamento de cada um destes metais.

Tabela 4.36. Metais do resíduo Moinha: teste de normalidade, média e intervalo de confiança.

Parâmetro	Shapiro-Wilk			Normal	Média (peso seco)	Intervalo da média (peso seco)
	Estatística do teste	Graus de liberdade	p			
Al (ppm)	0,965	23	0,570	Sim	1307	[1118; 1497]
Ba (ppm)	0,929	22	0,119	Sim	27,3	[20,7; 33,8]
Cd (ppm)	0,687	23	0,000	Não	1,14	[0,68; 1,60]
Pb (ppm)	0,939	22	0,189	Sim	37,6	[29,0; 46,2]
Co (ppm)	0,890	22	0,019	Não	3,73	[2,35; 5,11]
Cu (ppm)	0,723	22	0,000	Não	44,9	[33,0; 56,8]
Cr (ppm)	0,797	23	0,000	Não	42,5	[29,5; 55,5]
Sn (ppm)	0,909	21	0,053	Sim	4,51	[3,31; 5,72]
Ni (ppm)	0,924	22	0,093	Sim	26,2	[19,3; 33,2]
K (ppm)	0,964	23	0,549	Sim	203	[161; 245]
Se (ppm)	0,547	23	0,000	Não	0,41	[0,06; 0,76]
Na (ppm)	0,974	23	0,791	Sim	667	[585; 749]
Sb (ppm)	0,602	23	0,000	Não	4,94	[3,01; 6,87]
Tl (ppm)	0,935	23	0,142	Sim	24,7	[19,1; 30,3]
V (ppm)	0,978	23	0,877	Sim	1,94	[1,58; 2,31]
Zn (ppm)	0,861	23	0,004	Não	300	[219; 382]
Hg (ppm) ^(a)	0,949	10	0,653	Sim	1,16	[0,65; 1,68]
Tl + Hg (ppm)	0,930	10	0,449	Sim	25,3	[16,6; 33,9]

Nota: Todos os parâmetros estão expressos em peso seco; ^(a) o mercúrio está expresso em mg/MJ em peso húmido na classificação CEN

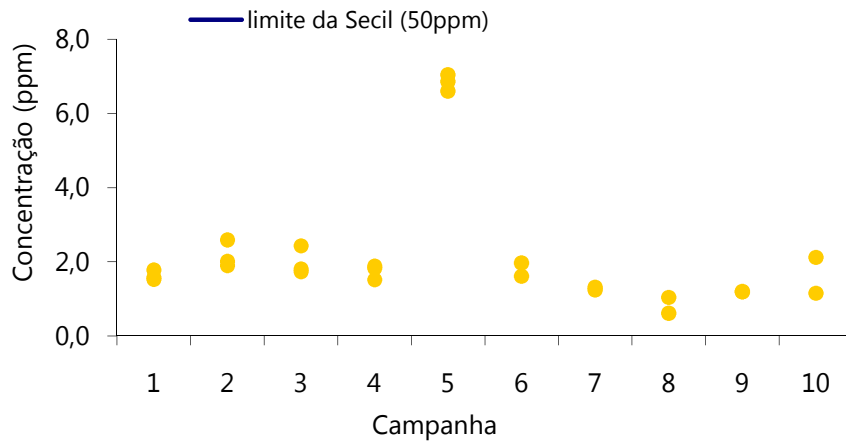


Figura 4.29. Cádmio no resíduo Moinha.

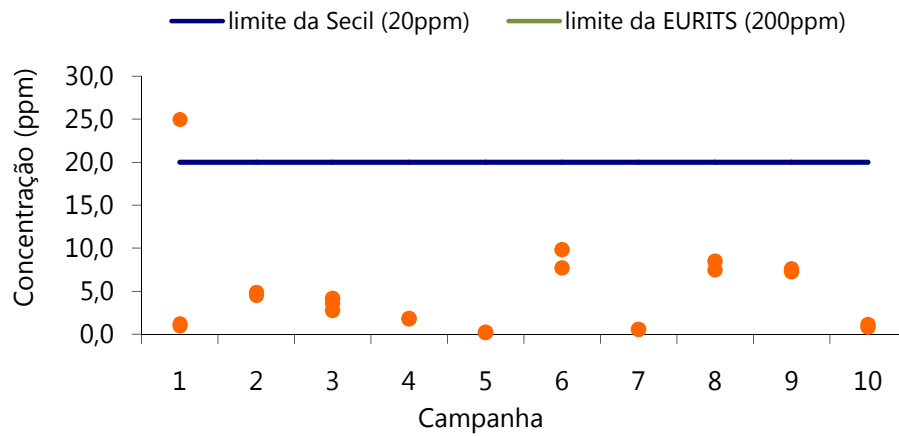


Figura 4.30. Cobalto no resíduo Moinha.

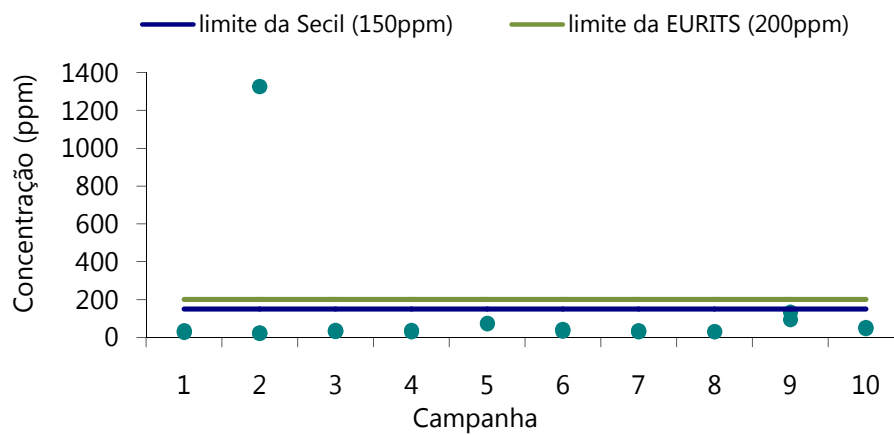


Figura 4.31. Cobre no resíduo Moinha.

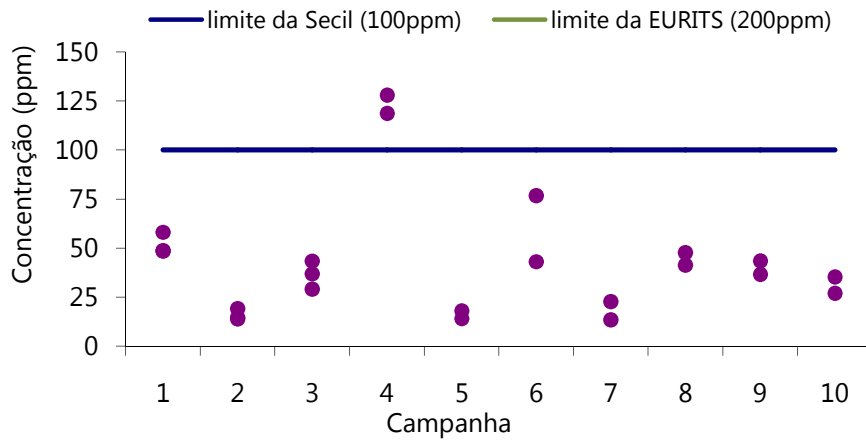


Figura 4.32. Crómio no resíduo Moinha.

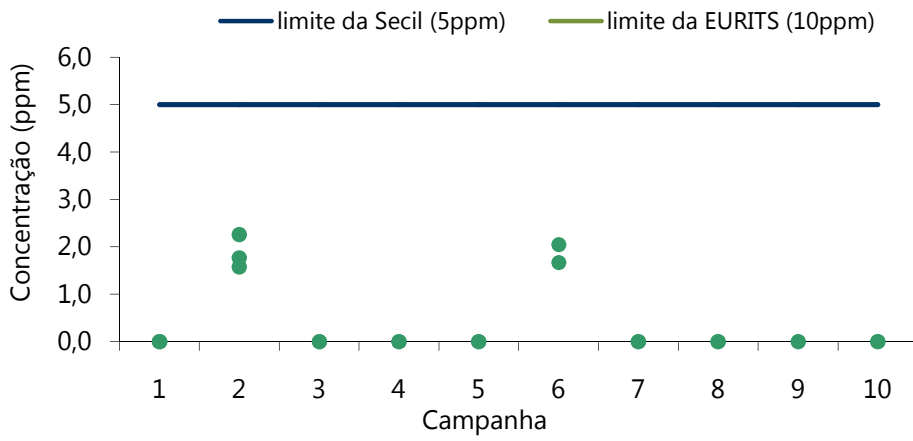


Figura 4.33. Selénio no resíduo Moinha.

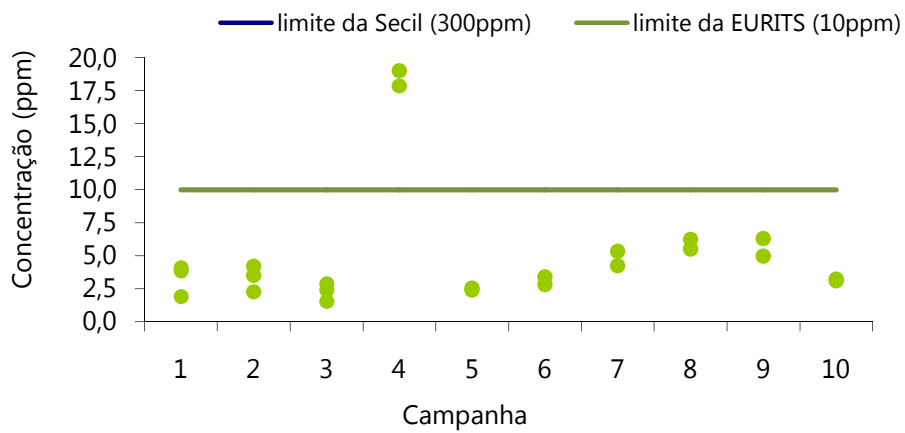


Figura 4.34. Antimónio no resíduo Moinha.

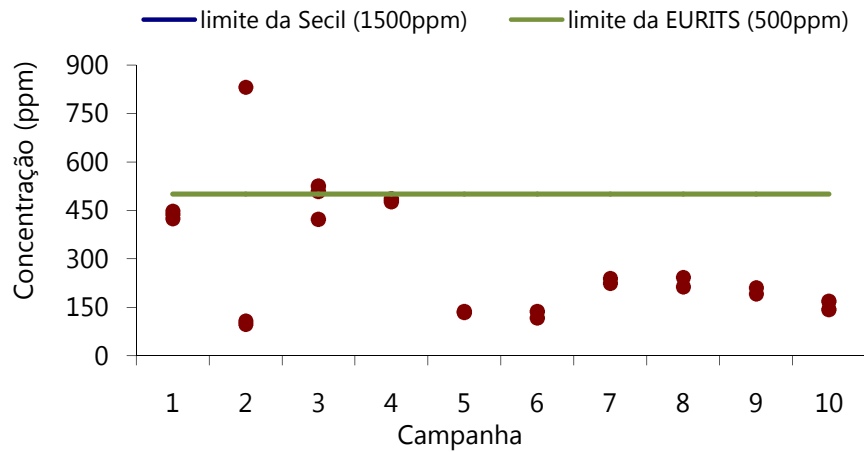


Figura 4.35. Zinco no resíduo Moinha

4.3.4. Verificação da conformidade com as normas

Na Tabela 4.37 apresentam-se as médias de todos os parâmetros determinados que seguem uma distribuição normal, assim como a situação em que se encontram perante as normas de referência.

Os valores médios dos parâmetros determinados estão de acordo com as especificações das normas, excepto a humidade, para a Secil, e as cinzas e o somatório de tálio e mercúrio, para a EURITS.

Em relação aos parâmetros para os quais não foi possível associar uma distribuição normal, compararam-se os valores máximo obtidos com os limites impostos pelas normas, de acordo com a Tabela 4.38.

As concentrações máximas do crómio, segundo a Secil, e do antimónio e do zinco, segundo a EURITS ultrapassam os limites especificados.

Tabela 4.37. Comparação dos resultados médios do resíduo Moinha com as especificações CEN, Secil e EURITS.

Parâmetro	Média	CEN ⁽¹⁾	Secil ⁽²⁾	EURITS ⁽³⁾
Humidade (%)	48,5	-	✘	-
Cinzas (% peso seco)	6,95	-	-	✘
N (% peso seco)	0,36	-	-	✓
Cl (% peso seco)	0,15	-	✓	✓
S (% peso seco)	0,083	-	✓	✓
Al (ppm peso seco)	1 307	-	✓	-
Ba (ppm peso seco)	27,3	-	✓	-
Pb (ppm peso seco)	37,6	-	✓	✓
Sn (ppm peso seco)	4,51	-	✓	✓
Ni (ppm peso seco)	26,2	-	✓	-
K (ppm peso seco)	203	-	✓	-
Na (ppm peso seco)	667	-	✓	-
Tl (ppm peso seco)	24,7	-	✓	-
V (ppm peso seco)	1,94	-	✓	✓
Hg (ppm peso seco)	1,16	-	✓	-
Hg (mg/MJ mediana) ^(a)	0,08	✓ Classe 4	-	-
Tl + Hg (ppm peso seco)	25,3	-	-	✘

Fonte: (1) CEN/TS 15359:2005, (2) ESA01, Secil, 2005 e (3) Gendebien *et al.*, 2005

Nota: ^(a) o parâmetro mercúrio está expresso em mg/MJ em peso húmido na classificação CEN e corresponde à mediana

✓ - Cumpre os limites da Norma; ✘ - Não cumpre os limites da Norma

Tabela 4.38. Comparação dos resultados máximos do resíduo Moinha com as especificações CEN, Secil e EURITS.

Parâmetro	Máximo	CEN ⁽¹⁾	Secil ⁽²⁾	EURITS ⁽³⁾
PCI (MJ/kg peso húmido)	24,9	✓ Classe 1	-	✓
Cd (ppm peso seco)	4,00	-	✓	-
Co (ppm peso seco)	9,80	-	✓	✓
Cu (ppm peso seco)	133	-	✓	✓
Cr (ppm peso seco)	128	-	✘	✓
Se (ppm peso seco)	2,30	-	✓	✓
Sb (ppm peso seco)	19,0	-	✓	✘
Zn (ppm peso seco)	832	-	✓	✘

Fonte: (1) CEN/TS 15359:2005, (2) ESA01, Secil, 2005 e (3) Gendebien *et al.*, 2005

✓ - Cumpre os limites da Norma; ✘ - Não cumpre os limites da Norma

4.4. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO FINAL

4.4.1. Caracterização físico-química

Os valores observados para os parâmetros físico-químicos encontram-se em anexo: humidade – anexo B, alínea B3, cinzas – anexo C, alínea C3; PCS e PCI – anexo D, alínea D3.

Na Tabela 4.39 apresentam-se os resultados referentes ao cálculo dos valores médios da humidade e cinzas do resíduo Final. A humidade do resíduo é de 49% e o teor em cinzas de 11%.

Tabela 4.39. Caracterização físico-química média do resíduo Final.

Parâmetro	Tamanho da amostra	Média	Intervalo da média (95% confiança)
Humidade (%)	130	48,8	[47,6; 49,7]
Cinzas (% peso seco)	47	10,7	[9,95; 11,5]

Na Tabela 4.40 apresentam-se os resultados dos testes estatísticos efectuados para o PCS e PCI do resíduo Final. As séries de valores do PCS e do PCI não seguem uma distribuição normal.

Tabela 4.40. PCS e PCI do resíduo Final: teste de normalidade, média e intervalos de confiança.

Parâmetro	Shapiro-Wilk			Normal	Média	Intervalo da média
	Estatística do teste	Gráus de liberdade	p			
PCS (MJ/kg peso seco)	0,710	34	0,000	Não	27,1	[25,0; 29,3]
PCI (MJ/kg peso húmido)	0,773	34	0,000	Não	11,0	[10,2; 11,9]

Nas Figuras 4.36 a 4.38 apresentam-se todos os valores de humidade, cinzas, PCS e PCI obtidos, bem como os limites das normas aplicáveis.

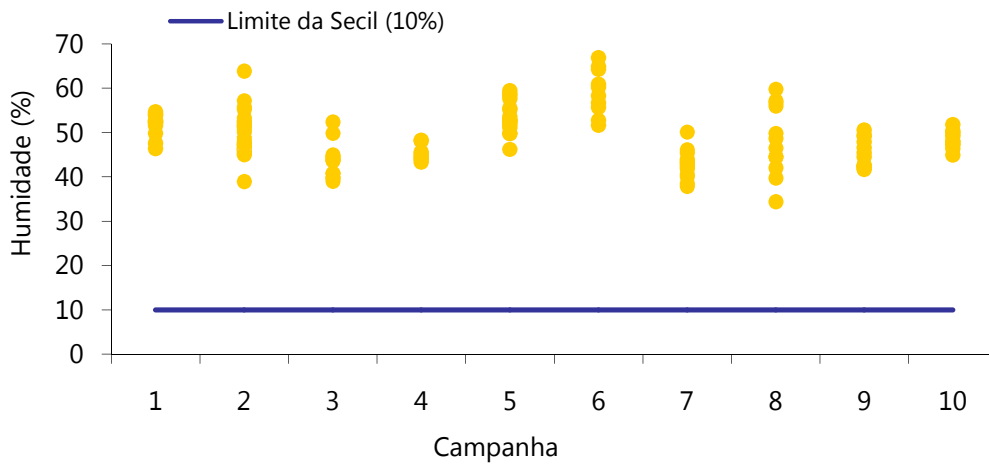


Figura 4.36. Humidade do resíduo Final.

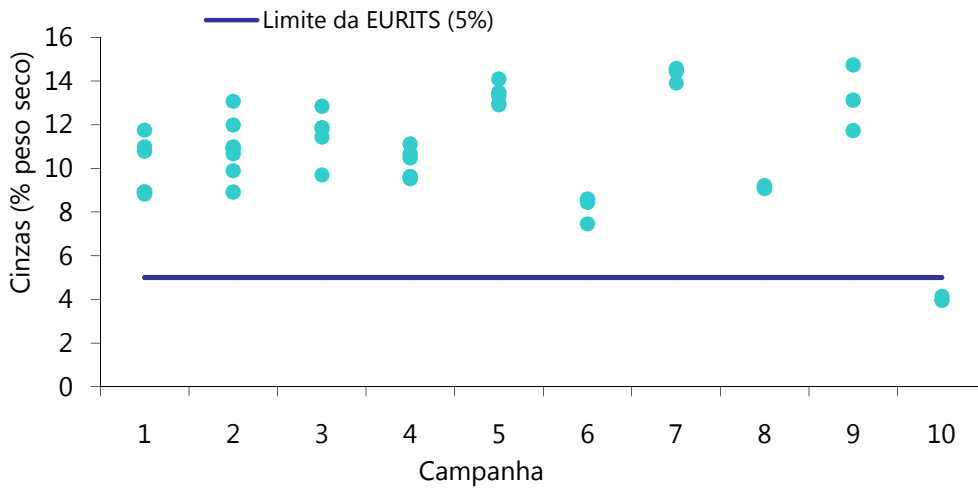


Figura 4.37. Teor de cinzas do resíduo Final.

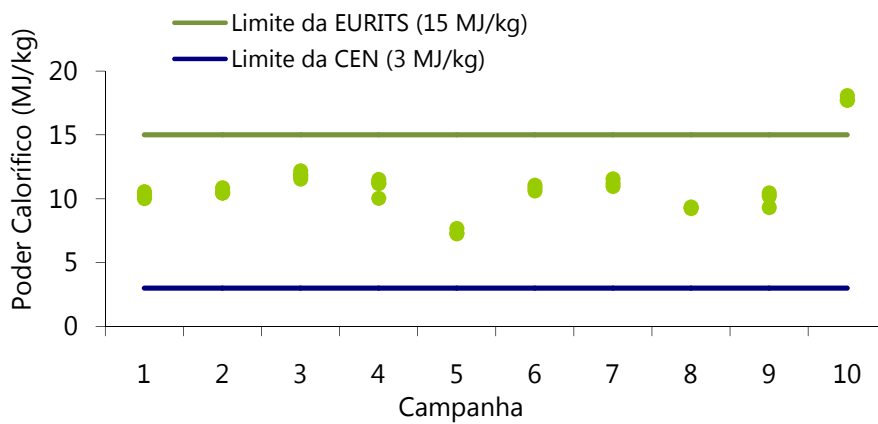


Figura 4.38. Poder Calorífico Superior e Inferior do resíduo Final.

Na Figura 4.39 apresenta-se a composição físico-química média do resíduo Final, que é composto por 49% de humidade, 45% de sólidos voláteis e 6% de cinzas.

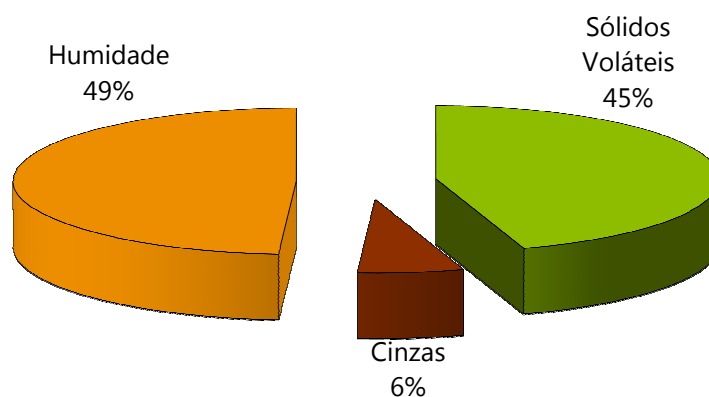


Figura 4.39. Composição físico-química, média, do resíduo Final.

4.4.2. Caracterização elementar

Os valores observados para os parâmetros carbono, hidrogénio, azoto e oxigénio encontram-se no anexo E, alínea E3.

Na Tabela 4.41 apresentam-se os valores das médias e dos intervalos da média, com 95% de confiança, da composição elementar do resíduo Final, calculados para o conjunto das dez campanhas.

Tabela 4.41. Composição elementar média do resíduo Final.

Parâmetro	Tamanho da amostra	Média	Intervalo da média (95% confiança)
Carbono (% peso seco)	52	57,0	[54,4; 59,7]
Hidrogénio (% peso seco)	52	7,70	[7,07; 8,33]
Azoto (% peso seco)	50	0,42	[0,34; 0,50]
Oxigénio (% peso seco)	52	34,8	[31,6; 38,1]

Na Figura 4.40 apresenta-se a composição elementar média do resíduo Final: 57% de carbono, 8% de hidrogénio, 0,4% de azoto e 35% de oxigénio.

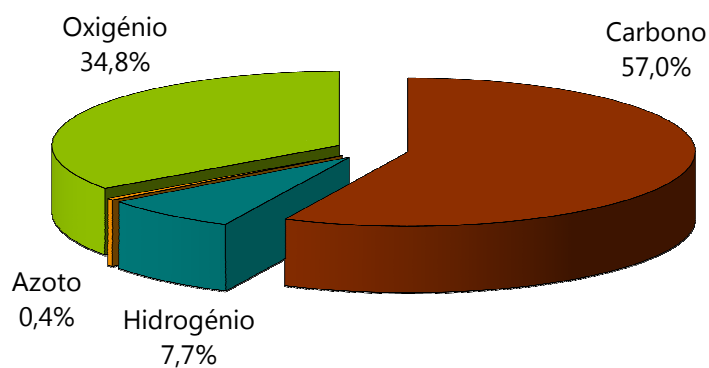


Figura 4.40. Composição elementar média do resíduo Final.

4.4.3. Metais

Os valores observados para os metais encontram-se em anexo: cloro e o enxofre – anexo F, alínea F3; outros metais – anexo G, alínea G3.

Na Tabela 4.42 apresenta-se a concentração média em cloro (4,9% peso seco) e enxofre (0,151% peso seco) no resíduo Final.

Tabela 4.42. Cloro e Enxofre do resíduo Final: média e intervalo de confiança.

Parâmetro	Tamanho da amostra	Média	Intervalo da média (95% confiança)
Cl (% peso seco)	47	4,93	[4,33; 5,55]
S (% peso seco)	43	0,151	[0,140; 0,162]

Na Tabela 4.43 apresentam-se os resultados dos testes estatísticos efectuados para os metais do resíduo Final. Os metais que descrevem um comportamento aproximadamente normal são: chumbo, crómio, estanho, sódio e vanádio.

Os metais que não seguem uma distribuição normal estão representados nas Figuras 4.41 a 4.52, para possibilitar uma melhor compreensão do comportamento de cada um destes metais.

Tabela 4.43. Metais do resíduo Final: teste de normalidade, média e intervalo de confiança.

Parâmetro	Shapiro-Wilk			Normal	Média (peso seco)	Intervalo da média (peso seco)
	Estatística do teste	Graus de liberdade	p			
Al (ppm)	0,796	25	0,000	Não	14578	[9347; 19809]
Ba (ppm)	0,743	25	0,000	Não	272	[121; 422]
Cd (ppm)	0,911	25	0,033	Não	2,15	[1,74; 2,56]
Pb (ppm)	0,950	25	0,256	Sim	62,1	[50,2; 74,0]
Co (ppm)	0,652	25	0,000	Não	60,0	[18,7; 101]
Cu (ppm)	0,780	24	0,000	Não	70,9	[45,0; 96,8]
Cr (ppm)	0,945	25	0,195	Sim	109	[81,2; 136]
Sn (ppm)	0,933	25	0,102	Sim	59,0	[47,8; 70,3]
Ni (ppm)	0,744	25	0,000	Não	278	[123; 434]
K (ppm)	0,862	25	0,003	Não	386	[332; 440]
Se (ppm)	0,742	25	0,000	Não	1,21	[0,52; 1,91]
Na (ppm)	0,941	25	0,155	Sim	790	[697; 883]
Sb (ppm)	0,909	25	0,028	Não	43,3	[32,9; 53,6]
Tl (ppm)	0,468	25	0,000	Não	187	[47,7; 327]
V (ppm)	0,954	25	0,307	Sim	2,84	[2,29; 3,40]
Zn (ppm)	0,920	25	0,050	Não	727	[608; 846]
Hg (ppm) ^(a)	0,680	10	0,001	Não	0,11	[0,07; 0,14]
Tl + Hg (ppm)	0,447	10	0,000	Não	171	[-58,4; 400]

Nota: Todos os parâmetros estão expressos em peso seco; ^(a) o mercúrio está expresso em mg/MJ em peso húmido na classificação CEN

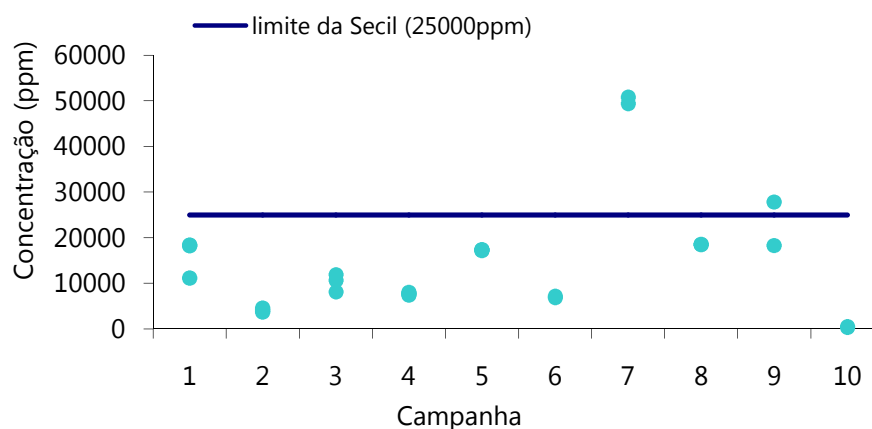


Figura 4.41. Alumínio no resíduo Final.

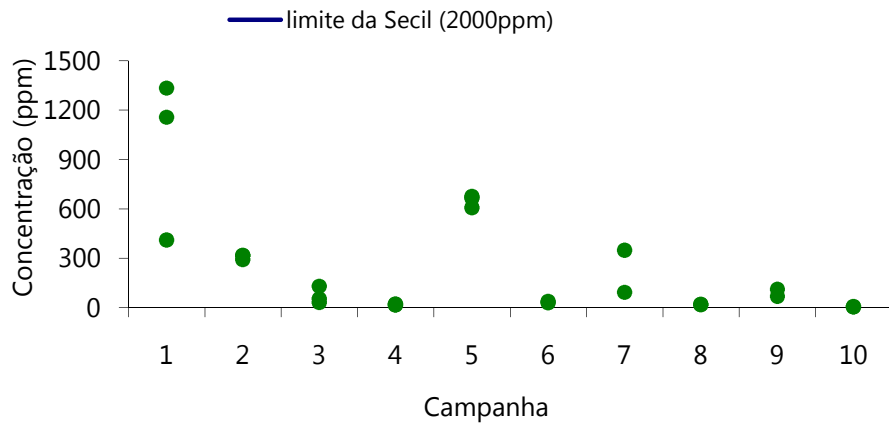


Figura 4.42. Bário no resíduo Final.

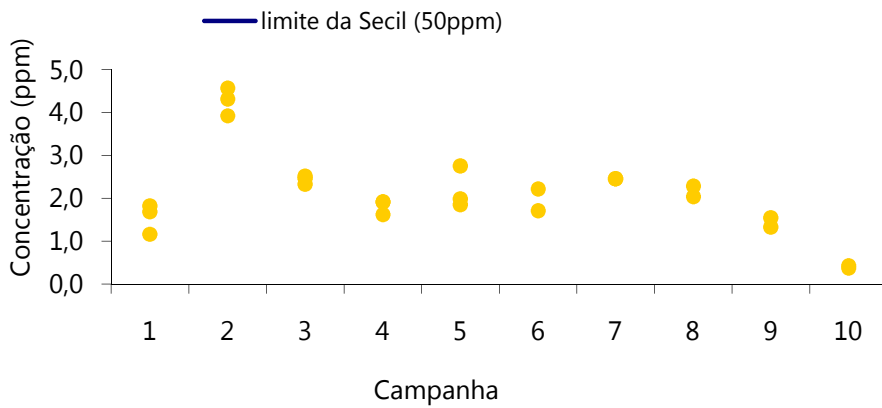


Figura 4.43. Cádmio no resíduo Final.

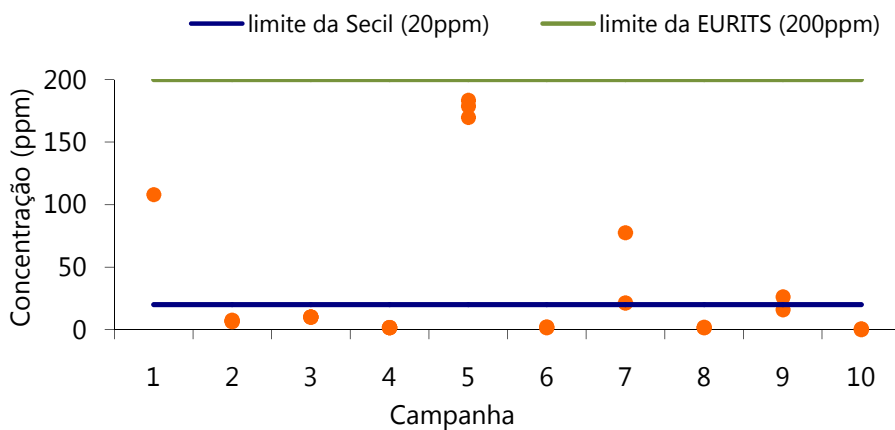


Figura 4.44. Cobalto no resíduo Final.

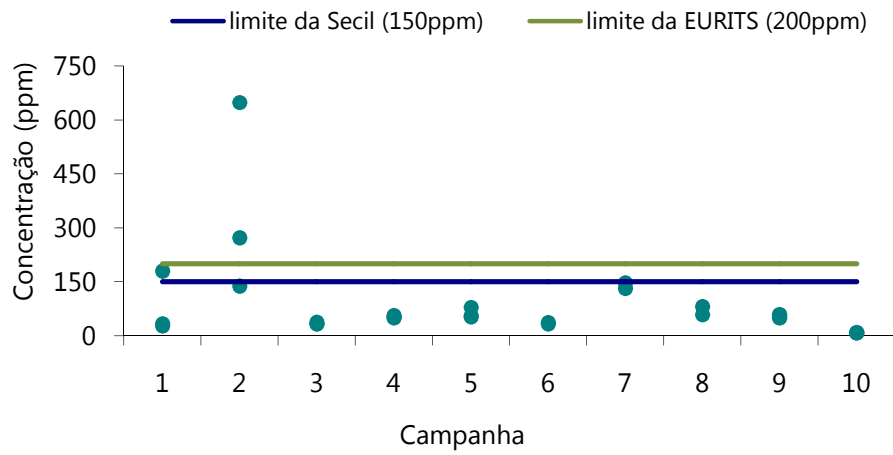


Figura 4.45. Cobre no resíduo Final.

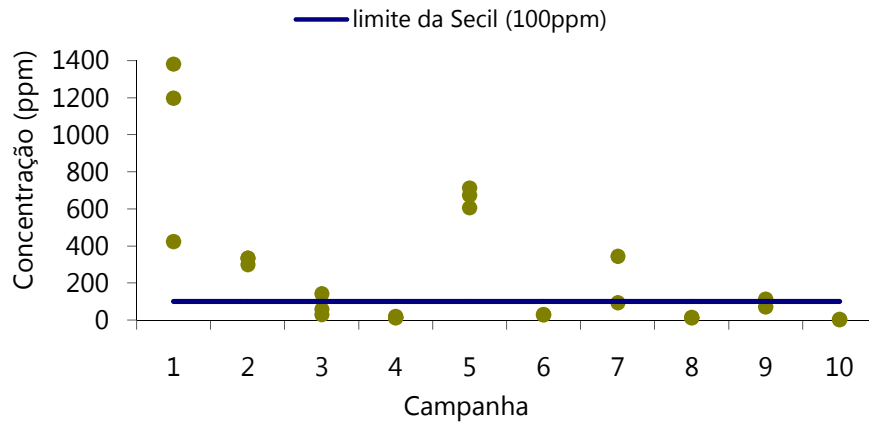


Figura 4.46. Níquel no resíduo Final.

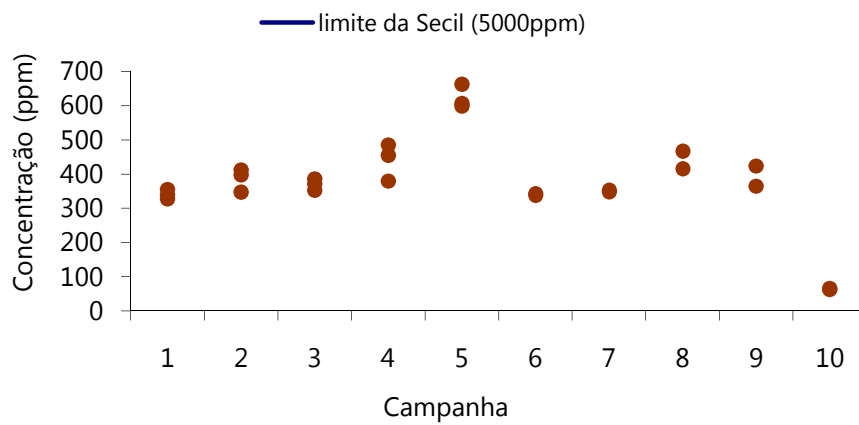


Figura 4.47. Potássio no resíduo Final.

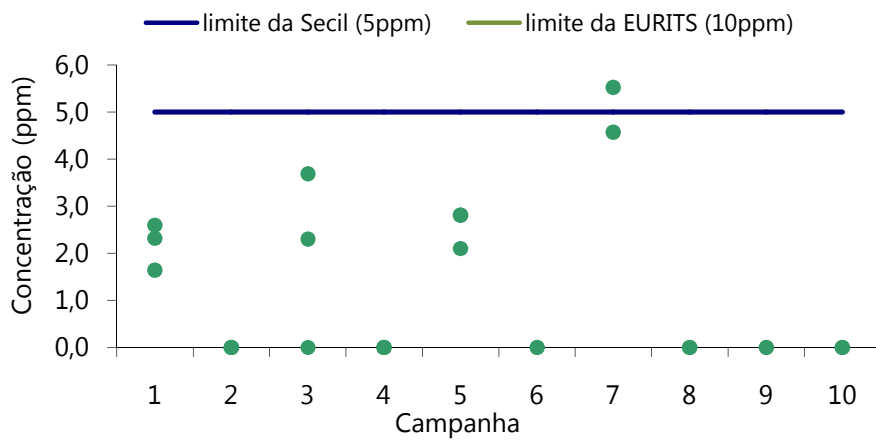


Figura 4.48. Selênio no resíduo Final.

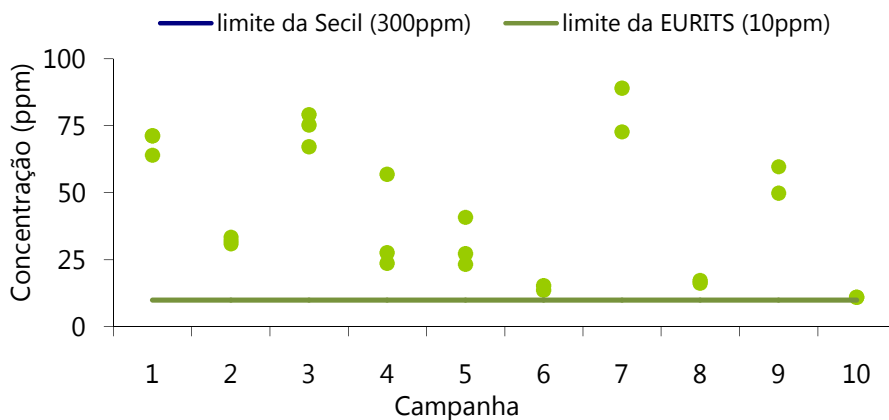


Figura 4.49. Antimónio no resíduo Final.

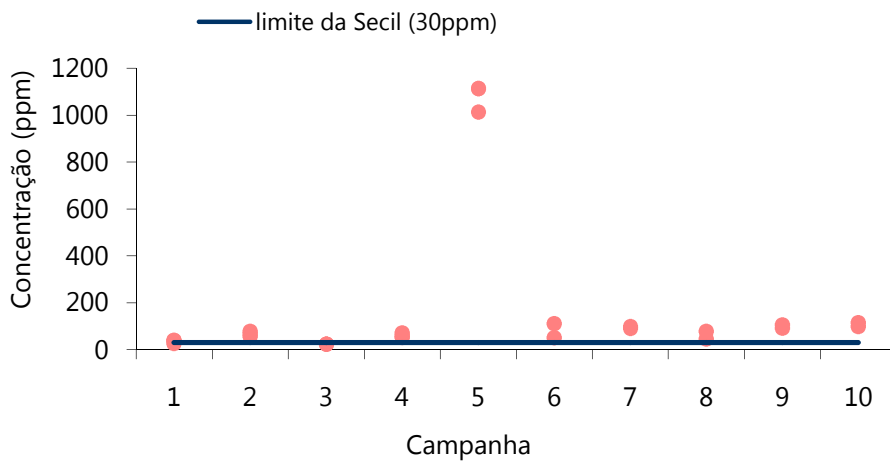


Figura 4.50. Tálíio no resíduo Final.

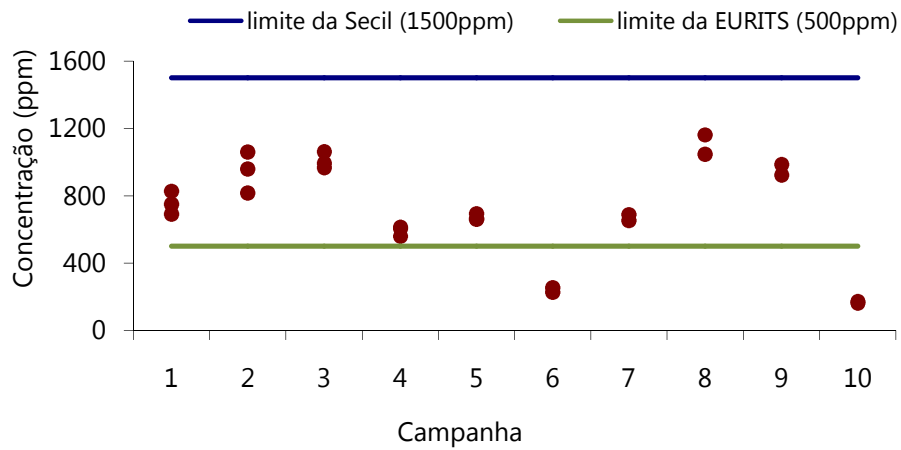


Figura 4.51. Zinco no resíduo Final.

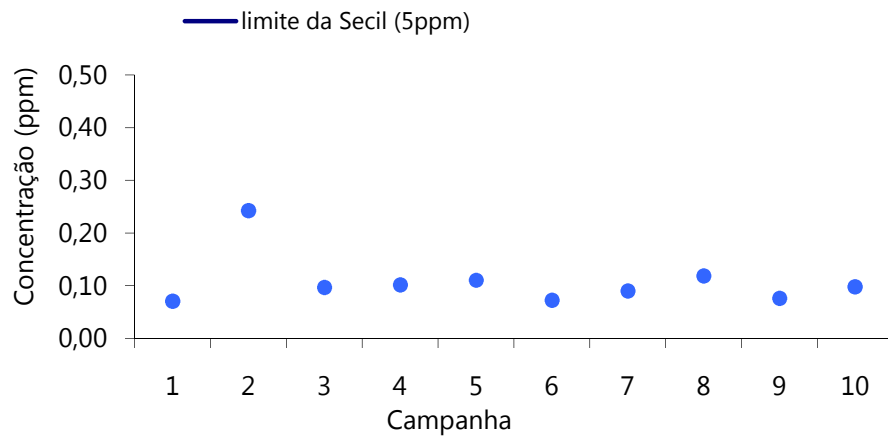


Figura 4.52. Mercúrio no resíduo Final.

4.4.4. Verificação da conformidade com as normas

Na Tabela 4.44 apresentam-se as médias de todos os parâmetros determinados que seguem uma distribuição normal, assim como a situação em que se encontram perante as normas de referência.

Em relação aos parâmetros para os quais não foi possível associar uma distribuição normal, compararam-se os valores máximo obtidos com os limites impostos pelas normas, de acordo com a Tabela 4.45.

Tabela 4.44. Comparação dos resultados médios do resíduo Final com as especificações CEN, Secil e EURITS.

Parâmetro	Média	CEN ⁽¹⁾	Secil ⁽²⁾	EURITS ⁽³⁾
Humidade (%)	48,8	-	✗	-
Cinzas (% peso seco)	10,7	-	-	✗
N (% peso seco)	0,42	-	-	✓
Cl (% peso seco)	4,93	✗	✗	✗
S (% peso seco)	0,151	-	✓	✓
Pb (ppm peso seco)	62,1	-	✓	✓
Cr (ppm peso seco)	109	-	✗	✓
Sn (ppm peso seco)	59,0	-	✗	✓
Na (ppm peso seco)	790	-	✓	-
V (ppm peso seco)	2,84	-	✓	✓

Fonte: (1) CEN/TS 15359:2005, (2) ESA01, Secil, 2005 e (3) Gendebien *et al.*, 2005

✓ - Cumpre os limites da Norma; ✗ - Não cumpre os limites da Norma

Tabela 4.45. Comparação dos resultados máximos do resíduo Final com as especificações CEN, Secil e EURITS.

Parâmetro	Máximo	CEN ⁽¹⁾	Secil ⁽²⁾	EURITS ⁽³⁾
Al (ppm peso seco)	50 780	-	✗	-
Ba (ppm peso seco)	1 336	-	✓	-
Cd (ppm peso seco)	4,60	-	✓	-
Co (ppm peso seco)	348	-	✗	✗
Cu (ppm peso seco)	272	-	✗	✗
Ni (ppm peso seco)	1 382	-	✗	-
K (ppm peso seco)	662	-	✓	-
Se (ppm peso seco)	5,50	-	✗	✓
Sb (ppm peso seco)	89,10	-	✓	✗
Tl (ppm peso seco)	1 113	-	✗	-
Zn (ppm peso seco)	1 163	-	✓	✗
Hg (ppm peso seco)	0,24	-	✓	-
Hg (mg/MJ mediana) ^(a)	0,01	✓ Classe 1	-	-
Tl+Hg (ppm peso seco)	1 080	-	-	✗

Fonte: (1) CEN/TS 15359:2005, (2) ESA01, Secil, 2005 e (3) Gendebien *et al.*, 2005

Nota: ^(a) o parâmetro mercúrio está expresso em mg/MJ em peso húmido na classificação CEN e corresponde à mediana

✓ - Cumpre os limites da Norma; ✗ - Não cumpre os limites da Norma

5.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DE CONTAMINANTES NOS RESÍDUOS

A metodologia aplicada na realização deste trabalho permitiu identificar os seguintes contaminantes nos resíduos da indústria de reciclagem de plásticos (expressos em percentagem de peso seco):

Pré-lavagem (Figura 5.1): 35% de matéria orgânica, 9% de PP e PSE (leves), 28% de PS e fibras têxteis (semi-pesados), 12% de PET, PVC, vidros e pedras (pesados), 6% de metais e 10% de finos (material com dimensão inferior a 2mm);

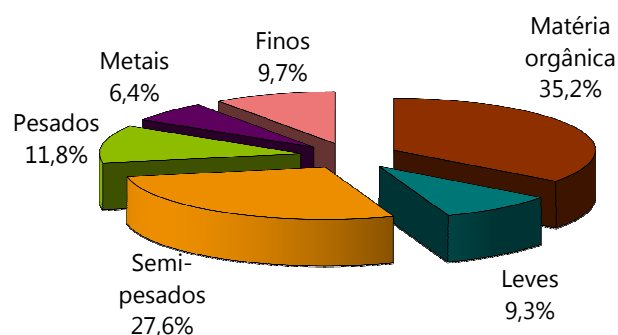


Figura 5.1 Contaminantes no resíduo Pré-lavagem (em peso seco).

Moinha (Figura 5.2): 32% de matéria orgânica, 59% de PP e PSE (leves), 2% de PS e fibras têxteis (semi-pesados), 0,2% de PET e PVC (pesados) e 7% de finos (material com dimensão inferior a 2mm);

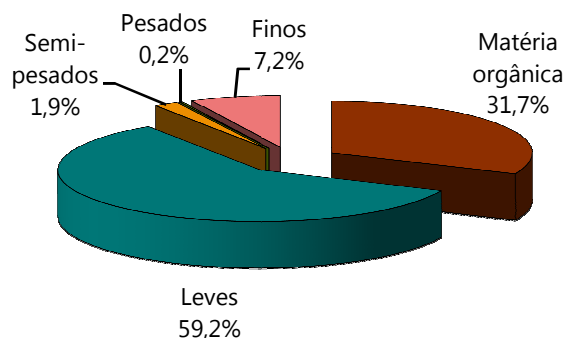


Figura 5.2. Contaminantes no resíduo Moinha (em peso seco).

Final (Figura 5.3): 18% de matéria orgânica, 9% de PP e PSE (leves), 50% de PS e fibras têxteis (semi-pesados), 21% de PET e PVC (pesados) e 2% de finos (material com dimensão inferior a 2mm).

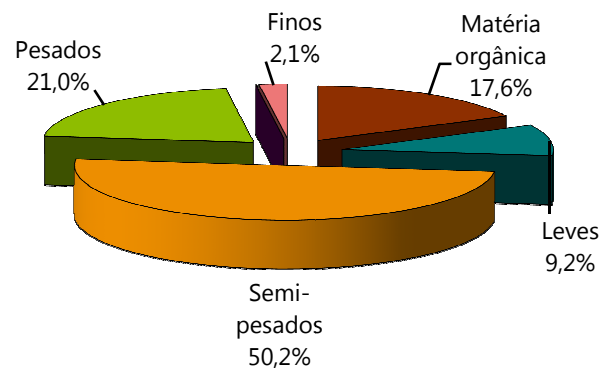


Figura 5.3. Contaminantes no resíduo Final (em peso seco).

Os resíduos analisados correspondem a resíduos industriais produzidos na reciclagem mecânica e são recolhidos em diferentes locais do processo. Embora tenha sido realizada uma análise individual, uma vez que os resíduos são produzidos em diferentes quantidades, é importante contabilizar a composição global, em termos de contaminantes, de acordo com o peso relativo de cada um.

Considerando que os resíduos são produzidos na proporção de 50% de Pré-lavagem, 40% de Moinha e 10% de Final, apresenta-se, na Figura 5.4, a composição global dos resíduos em termos de contaminantes.

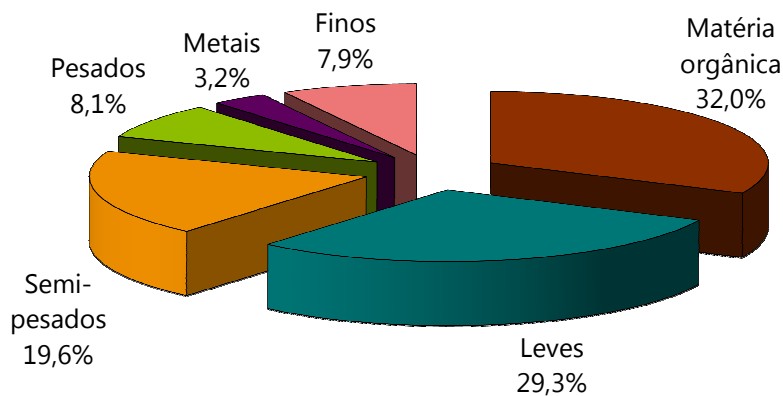


Figura 5.4. Contaminação global dos resíduos (em peso seco).

Os resíduos da indústria de reciclagem, no seu todo, têm 32% de matéria orgânica, 29% de PP e PSE (leves), 20% de PS e fibras têxteis (semi-pesados), 8% de PET, PVC, vidros e pedras (pesados), 3% de metais e 8% de finos.

5.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS

A determinação experimental da composição físico-química elementar e concentração de metais, permitiu a caracterização dos resíduos e a comparação dos resultados do caso de estudo com os valores especificados nas normas consideradas. Assim, apresentam-se, nas Tabelas 5.1 a 5.3, as conformidades para a incineração, a co-incineração e os combustíveis derivados de resíduos em geral.

Incineração – norma EURITS

Na Tabela 5.1 apresentam-se os valores médios observados nos parâmetros analisados (expressos em peso seco) de acordo com a norma EURITS e a verificação do cumprimento dos limites especificados.

Os limites especificados pela norma da EURITS não são cumpridos na totalidade por nenhum dos resíduos, o que compromete o seu encaminhamento para incineração.

O resíduo Pré-lavagem apresenta concentrações de cloro, cobre e o somatório de mercúrio e tálio superiores aos limites estabelecidos. O PCI é inferior a 15 MJ/kg (peso húmido) e as cinzas são superiores a 5% (peso seco).

O resíduo Moinha apresenta apenas a concentração do somatório de mercúrio e tálio superior ao limite e o teor de cinzas é ligeiramente superior a 5% (peso seco).

O resíduo Final apresenta concentrações de cloro, antimónio, zinco e do somatório de mercúrio e tálio superiores aos limites estabelecidos. O PCI é ligeiramente inferior a 15 MJ/kg (peso húmido) e o teor de cinzas é superior a 5% (peso seco).

Tabela 5.1. Incineração: conformidade com a norma EURITS.

Parâmetro	PCI	Cinzas	N	Cl	S	Pb	Co	Cu	Cr	Sn	Se	Sb	V	Zn	Hg+Tl	
Unidade	MJ/kg (peso húmido)	% (peso seco)				ppm (peso seco)										
Limite	15	5	0,7	0,5	0,4	200	200	200	200	200	10	10	200	500	2	
P	Média	6,22	27,1	0,54	0,81	0,138	94,1	5,28	784	129	36,8	2,04	6,05	5,30	344	90,6
	Conformidade	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
M	Média	15,1	6,95	0,36	0,15	0,083	37,6	3,73	44,9	42,5	4,51	0,41	4,94	1,94	300	25,3
	Conformidade	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
F	Média	11,0	10,7	0,42	4,93	0,151	62,1	60,0	70,9	109	59,0	1,21	43,3	2,84	727	171
	Conformidade	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗

P – Pré-lavagem; **M** – Moinha; **F** – Final

✓ - Cumpre os limites da Norma; ✗ - Não cumpre os limites da Norma

Co-incineração – Secil

Na Tabela 5.2 apresentam-se os valores médios observados nos parâmetros analisados de acordo com as especificações da cimenteira Secil e a verificação do cumprimento dos limites especificados.

Os limites especificados pela indústria cimenteira Secil não são cumpridos na totalidade por nenhum dos resíduos, o que compromete o seu encaminhamento para co-incineração.

O resíduo Pré-lavagem apresenta concentrações de cobre, crómio, níquel e tálio superiores aos limites estabelecidos.

O resíduo Moinha apresenta concentrações, para todos os parâmetros, inferiores aos limites estabelecidos, excepto para a humidade.

O resíduo Final apresenta concentrações de cloro, cobalto, crómio, estanho, níquel e tálio superiores aos limites estabelecidos.

Os três resíduos apresentam um teor de humidade superior a 10%, contudo considera-se que este parâmetro pode ser facilmente ajustado ao limite estabelecido, através de um processo de secagem/desidratação.

Tabela 5.2. Co-incineração: conformidade com as especificações da indústria cimenteira Secil.

Parâmetro	Humidade	Cl	S	Al	Ba	Cd	Pb	Co	Cu	Cr	Sn	Ni	K	Se	Na	Sb	Tl	V	Zn	Hg	
Unidade	%	% (peso seco)		ppm (peso seco)																	
Limite	10	1	2	25 000	2 000	50	200	20	150	100	50	100	5 000	5	5 000	300	30	100	1 500	5	
P	Média	52,2	0,81	0,14	6 046	128	2,26	94,1	5,28	784	129	36,8	123	1 021	2,04	1 314	6,05	87,0	5,30	344	4,25
	Conformidade	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	x	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
M	Média	48,5	0,15	0,08	1 307	27,3	1,14	37,6	3,73	44,9	42,5	4,51	26,2	203	0,41	667	4,94	24,7	1,94	300	1,16
	Conformidade	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
F	Média	48,8	4,93	0,15	14 578	272	2,15	62,1	60,0	70,9	109	59,0	278	386	1,21	790	43,3	187	2,84	727	0,11
	Conformidade	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x	x	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓

P – Pré-lavagem; **M** – Moinha; **F** – Final

✓ - Cumpre os limites da Norma; x - Não cumpre os limites da Norma

Combustível Sólido Recuperado (Combustíveis em geral) – norma CEN

Na Tabela 5.3 apresentam-se os valores médios observados nos parâmetros analisados de acordo com as especificações da norma CEN e a verificação do cumprimento dos limites especificados.

Os limites especificados pela norma CEN não são cumpridos na totalidade pelos resíduos Pré-lavagem e Final. O resíduo Moinha cumpre os três parâmetros, embora em classes diferentes.

Os resíduos Pré-lavagem e Final não podem ser classificados de acordo com a norma CEN, mas o resíduo Moinha pode ser classificado como CSR de classe 4, a classe mais desfavorável em que se classifica quanto ao teor de mercúrio.

Tabela 5.3. Combustível sólido recuperado: conformidade com a norma CEN.

	Parâmetro	PCI	CI	Hg
	Unidade	MJ/kg (peso húmido)	% (peso seco)	mg/MJ mediana (peso húmido)
P	Valor médio observado	6,22	0,81	0,69
	Conformidade	Classe 5	Classe 3	✘
M	Valor médio observado	15,1	0,15	0,08
	Conformidade	Classe 3	Classe 1	Classe 4
F	Valor médio observado	11,0	4,93	0,01
	Conformidade	Classe 4	✘	Classe 1

P – Pré-lavagem; **M** – Moinha; **F** – Final

✘ - Não cumpre os limites da Norma

Conclusões

A aplicação da norma XP U44-164, da AFNOR, para a identificação de contaminantes na indústria de reciclagem de plásticos, permitiu, de forma expedita, separar as amostras de resíduos em fracções e a identificação dos principais contaminantes presentes em cada fracção.

Os plásticos contaminantes identificados foram: poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET) e policloreto de vinilo (PVC). Foi possível identificar também outro tipo de contaminantes como matéria orgânica, fibras têxteis, metais e areias.

O tipo de contaminação, ou seja, a quantidade relativa de cada uma das fracções varia entre resíduos. Esta situação está de acordo com o local de recolha dos resíduos segundo o processo de reciclagem da indústria estudada.

Assim, o primeiro resíduo, Pré-lavagem, é essencialmente constituído pelos materiais contaminantes mais pesados, como areias, pedras, vidros e metais. O segundo resíduo, Moinha, é composto por cerca de 60% de materiais contaminantes leves, como o PP e o PSE. O terceiro resíduo, Final, é constituído por cerca de 50% de materiais contaminantes semi-pesados, como o PS.

A contaminação por matéria orgânica assume maior importância nos resíduos Pré-lavagem e Moinha, onde foram registadas quantidades relativas entre 30% e 35%. A presença de matéria orgânica está relacionada com a proveniência dos resíduos e

resulta, normalmente, do contacto das embalagens com os alimentos ou outros constituintes orgânicos.

Os processos de reciclagem de plásticos devem permitir a remoção dos contaminantes que se revelem prejudiciais na obtenção de um produto final de qualidade. A análise de inertes, segundo a norma da AFNOR, permitiu verificar o tipo de materiais que são removidos durante o processo de reciclagem de plásticos de PEAD e PEBD, possibilitando a produção de um polímero final que cumpre os critérios de qualidade de acordo com a sua aplicação.

O correcto encaminhamento dos resíduos industriais deve ser determinado tendo em conta as características dos resíduos e o seu potencial para valorização, de forma a evitar a sua deposição em aterro.

Desta forma, caracterizaram-se os resíduos em estudo de forma a avaliar o seu potencial para valorização energética através de incineração ou co-incineração. Os parâmetros estudados foram comparados com as normas em vigor em matéria de incineração (EURITS), co-incineração (cimenteira Secil) e produção de combustível sólido recuperado (CEN).

Em termos de valorização energética dos resíduos industriais, é possível concluir que os parâmetros especificados pela norma EURITS (incineração) e pela indústria cimenteira (co-incineração) não são cumpridos na totalidade. Desta forma, a sua valorização dependerá da adaptação destes resíduos às exigências dos limites estabelecidos.

Do ponto de vista dos combustíveis em geral (CSR), regulamentados pela norma CEN, conclui-se que o resíduo Moinha é um CSR de classe 4, uma vez que é classificável em termos de PCI, cloro e mercúrio. Os resíduos Pré-lavagem e Final não cumprem os limites em termos de mercúrio e cloro, respectivamente.

Trabalho futuro

A metodologia aplicada na análise de inertes, para identificação de contaminantes do processo de reciclagem de plásticos, tem potencial para ser aplicada na análise de resíduos industriais provenientes da reciclagem mecânica de outro tipo de polímeros, como PET, PP, PS ou PVC.

Considera-se que seria interessante aplicar esta metodologia noutras empresas do sector da reciclagem mecânica de plásticos e comparar os resultados obtidos.

Tendo em conta a caracterização dos resíduos e a identificação de diversos contaminantes, seria de todo o interesse o desenvolvimento de uma análise de ciclo de vida a um micro contaminante, como por exemplo o chumbo. Este estudo levaria à identificação da origem do contaminante e permitiria saber se este é constituinte do polímero virgem ou do polímero reciclado. Este estudo revela-se de grande importância, por exemplo na área da embalagem de alimentos.

Considerando apenas a valorização energética através da incineração e co-incineração de resíduos industriais, seria importante estudar as diversas opções existentes nesta matéria. Nomeadamente, em termos de processos de incineração (pirólise, gaseificação, etc.) e em termos de logística actualmente disponível (cimenteiras, centrais termoeléctricas, etc.) ou passível de ser criada para este fim (pequenos incineradores dedicados).

Face às características dos resíduos em termos de humidade, que comprometem o seu encaminhamento para valorização energética, seria importante estudar processos de desidratação aplicáveis a este tipo de resíduos.

– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS –

ACHILIAS, D. S., ROUPAKIAS, C., MEGALOKONOMOS, P., LAPPAS, A.A., ANTONAKOU, E.V. (2007), Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, 7 p.

AFNOR (2007), *Association Française de Normalisation*, <http://www.afnor.org> (consultado a 16 de Novembro de 2007)

AMBIENTE, S.A. (2007), *Ambiente, Recuperação de Materiais Plásticos S.A.*, <http://www.ambiente-sa.com> (consultado a 28 de Dezembro de 2007)

ANZANO, J., CASANOVA, M.E., BERMÚDEZ, M.S., LASHERAS, R.J. (2006), Rapid characterization of plastics using laser-induced plasma spectroscopy (LIPS). *Polymer Testing*, **25**, 623-627

APA (2008), *Agência Portuguesa do Ambiente*, <http://www.apambiente.pt> (consultado a 11 de Janeiro de 2008)

APIP (2008), *Associação Portuguesa da Indústria de Plásticos*, <http://www.apip.pt> (consultado a 3 de Janeiro de 2008)

ARCHER, E., BADDLEY, A., KLEIN, A., SCHWAGER, J., WHITING, K. (2005), *Mechanical-Biological Treatment: A Guide for Decision Makers – Processes, Policies and Markets, Annexe B – Issues arising out of the Regulatory & Policy Framework.0* Version 1.0, United Kingdom, Juniper Consultancy Services, Ltd.

AZAPAGIC, A., EMSLEY, A., HAMERTON, I. (2003), *Polymers, the Environment and Sustainable Development*. John Wiley & Sons Ltd., Inglaterra, 219 p.

BRANDRUP, J., BITTNER, M., MICHAELI, W., MENGES, G. (1995), *Recycling and recovery of Plastics*. Hanser Publishers, Alemanha, 893 p.

BRANDRUP, J., IMMERGUT, E.H., GRULKE, E.A. (1999), *Polymer Handbook*. 4ª edição, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc. Publication, EUA, volume 1, V/9-V/113

BROGNOLI, R. (2006), *Desenvolvimento da Qualidade na Reciclagem de Plásticos*. SBRT – Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, Brasil

Brundtland, G.H. (1987), *Our Common Future/Relatório Brundtland*, Comissão Mundial das Nações Unidas para o Desenvolvimento e o Ambiente

CALAPES, Maria Eduarda (1998), *A Origem da Indústria Transformadora de Plásticos em Portugal*. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre no ramo de História e Filosofia das Ciências, especialidade Epistemologia das Ciências pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa

CEN/TS 15357:2006, Documentação - *Solid Recovered Fuels – Terminology, definitions and descriptions*

CEN/TS 15359:2005, Documentação - *Solid Recovered Fuels - Specifications and classes*

CEN/TS 15400:2006, Documentação - *Solid Recovered Fuels - Methods for the determination of calorific value*

CEN/TS 15403:2006, Documentação - *Solid Recovered Fuels - Methods for the determination of ash content*

CEN/TS 15408:2006, Documentação - *Solid Recovered Fuels - Methods for the determination of sulphur(S), chlorine (Cl), Fluorine (F) and bromine (Br) content*

CEN/TS 15414-3:2006, Documentação - *Solid Recovered Fuels - Determination of moisture content using the oven dry method - Part 3: Moisture in general analysis sample*

COSTLEY, C.T., MOSSOP, K.F., DEAN, J.R., GARDEN, L.M., MARSHALL, J., CARROLL, J. (1999), *Determination of mercury in environmental and biological samples using pyrolysis atomic absorption spectrometry with gold amalgamation*. Por School of Applied and Molecular Sciences, University of Northumbria, Newcastle

Daniels, E.J. (1997), EUA, University of Chicago, Argonne National Laboratory - Separation and Recovery of Thermoplastics for Reuse via Froth-Flotation. US patent 5,653,867, 1997-08-05

Decisão n.º 2000/532/CE. Da Comissão (2000-05-03). Estabelece uma lista de resíduos e uma lista de resíduos perigosos. Lista Europeia de Resíduos (LER)

Decisão n.º 2003/33/CE. Do Conselho (2002-12-19). Estabelece os critérios e processos de admissão de resíduos em aterros

Decreto-Lei n.º 239/97. "D.R. 1ª série" 275 (1997-11-27) 6388. Estabelece as regras a que fica sujeita a gestão de resíduos, nomeadamente a sua recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação

Decreto-Lei n.º 366-A/97. "D.R. 1ª série" 293 (1997-12-20) 6732. Estabelece os princípios e as normas aplicáveis à gestão de embalagens e resíduos de embalagens

Decreto-Lei n.º 162/2000. "D.R. 1ª série" 172 (2000-07-27) 3626. Introduce as alterações ao DL n.º 366-A/97

Decreto-Lei n.º 89/2002. "D.R. 1ª série" 83 (2002-04-08) 3350. É revisto o Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Industriais (PESGRI 99)

Decreto-Lei n.º 152/2002. "D.R. 1ª série" 119 (2002-05-23) 4680. Regula a instalação, a exploração, o encerramento e a manutenção pós-encerramento de aterros destinados a resíduos

Decreto-Lei n.º 196/2003. "D.R. 1ª série" 194 (2003-08-23) 5489. Estabelece o regime jurídico a que fica sujeita a gestão de veículos e de veículos em fim de vida

Decreto-Lei n.º 3/2004. "D.R. 1ª série" 2 (2004-01-03) 26. Consagra o regime jurídico do licenciamento da instalação e da exploração dos centros integrados de recuperação, valorização e eliminação de resíduos perigosos, designados por CIRVER

Decreto-Lei n.º 230/2004. "D.R. 1ª série" 288 (2004-12-10) 7050. Estabelece o regime jurídico a que fica sujeita a gestão de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE)

Decreto-Lei n.º 174/2005. "D.R. 1ª série" 205 (2005-10-25) 6188. Introduce as alterações ao DL n.º 230/2004

Decreto-Lei n.º 178/2006. "D.R. 1ª série" 171 (2006-09-05) 6526,. Estabelece o regime geral da gestão de resíduos

DIN (2008), *DIN – Deutsches Institut für Normung*, <http://www.din.de> (consultado a 25 de Fevereiro de 2008)

Directiva n.º 75/442/CEE. Do Conselho (1975-07-15). Relativa aos resíduos

Directiva n.º 91/689/CE. Do Conselho (1991-12-12). Relativa aos resíduos perigosos

Directiva n.º 94/62/CE. Do Parlamento e do Conselho (1994-12-20). Relativa a embalagens e resíduos de embalagens

Directiva n.º 1999/31/CE. Do Conselho (1999-04-26). Relativa à deposição de resíduos em aterros

Directiva n.º 2000/76/CE. Do Parlamento Europeu e do Conselho (2000-12-04). Relativa à incineração de resíduos

Directiva n.º 2002/96/CE. Do Parlamento Europeu e do Conselho (2003-01-27). Relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos electrónicos (REEE)

Directiva n.º 2004/12/CE. Do Parlamento Europeu e do Conselho (2004-02-11). Relativa a embalagens e resíduos de embalagens

Directiva n.º 2006/12/CE. Do Parlamento Europeu e do Conselho (2006-04-05). Relativa aos resíduos

Directiva n.º 2000/53/CE. Do Parlamento Europeu e do Conselho (2000-09-18). Relativa aos veículos em fim de vida

EN 13346:2000, Documentation - *Characterization of sludges – Determination of trace elements and phosphorus – Aqua Regia extraction methods*

EN 10204-3.1 B, Documentation – *Material Certification and Identification*

ESA01 Documentation – Especificação para aceitação de RDF, Secil, 2005

FROELICH, D., MARIS, E., HAOUES, N., CHEMINEAU, L., RENARD, H., ABRAHAM, F., LASSARTESSES, R. (2007), State of the art of plastic sorting and recycling: Feedback to vehicle design. *Minerals Engineering*, **20**, 902-912

GARG, A., SMITH, R., HILL, D., SIMMS, N., POLLARD, S. (2007), Wastes as co-fuels: The Policy Framework for Solid Recovered Fuels (SRF) in Europe, with UK Implications. *Environmental Science & Technology*, **41**, 4868-4874

GENDEBIEN, A., LEAVENS, A., BLACKMORE, K., GODLEY, A., LEWIN, K., WHITING, K.J., DAVIS, R., GIEGRICH, J., FEHRENBACH, H., GROMKE, U., BUFALO, N., HOGG, D. (2003), *Refuse derived fuel, current practice and perspectives- Final report*. European Commission – Directorate General Environment

GONDAL, M.A., SIDDIQUI, M.N. (2007), Identification of different kinds of plastics using laser-induced breakdown spectroscopy for waste management. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, **42**, 1989-1997

HEILMANN, A., BILITEWSKI, B. (1999), High-grade fuel derived from residual waste. In *Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*, Environmental Sanitary Engineering Centre, Itália

INR (2002), *Resíduos Sólidos Urbanos – Conceção, Construção e Exploração de Tecnosistemas, Projectos, metodologias e tecnologias aplicadas em Portugal no período de 1996 a 2001*. Instituto dos Resíduos

INR (2007), *Instituto dos Resíduos*, <http://www.inresiduos.pt> (consultado a 28 de Dezembro de 2007)

LOPES, Maria Rosa Geadas (2006), *Contribuição para o desenvolvimento de uma estratégia integrada de gestão de resíduos industriais não perigosos – Caso de estudo da região de Santarém*. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Sanitária, Lisboa

MARTINHO, M.G., PIRES, A. (2006), Fase D – Alternativas para a utilização energética dos RSU e dos Fluxos especiais de resíduo. *In Contrato n°10/04 – Relatório Final, Anexo D*, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa

MARZOUK, O.Y., DHEILLY, R.M., QUENEUDEC, M. (2006), Valorisation of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*, **27**, 310-318

MISKOLCZI, N., BARTHA, L., ANGYAL, A. (2006), High Energy Containing Fractions from Plastic Wastes by Their Chemical Recycling. *Macromolecular Symposia*, 599-606

MUCCIO, E.A. (1994), *Plastics Processing Technology*, ASM International ® - The Materials Information Society, EUA

PAROISSE, A. H., NOYON, N. (1993), *MODECOM™, Méthode de Caractérisation des Ordures Ménagères*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Ademe Centre d'Angers, França

PEDROSA, A.C., GAMA, S.M.A. (2004), *Introdução Computacional à Probabilidade e Estatística*. Porto Editora, Porto

PESGRI (2001), *Parte III – Estratégia e Programas de acção*. In PESGRI 2001 – Plano Estratégico Sectorial de Gestão de Resíduos Industriais

PNAPRI (2001), *Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais*, INETI, Lisboa, 130 p.

PLASTICS EUROPE (2008), *Plastics Europe – Association of plastics manufacturers*, <http://www.plasticseurope.org> (consultado a 28 de Janeiro de 2008)

PLASTICS EUROPE (2004), An analysis of plastics consumption and recovery in Europe 2002-2003. In *Plastics Europe – Association of plastics manufacturers*, <http://www.plasticseurope.org> (consultado a 22 de Fevereiro de 2008)

PRERESI (2008), *PRERESI – Plano para a Prevenção dos Resíduos Industriais*, <http://www.preresi.ineti.pt> (consultado a 25 de Fevereiro de 2008)

RAL (2003), Quality label for solid recovered fuels. *In Instructions for taking, preparing and analyzing samples of solid recovered fuels within the framework*

SILVEIRA, A.I.E., MARTINHO, M.G. (2004), *Caracterização do Material do Embalão e Avaliação da Triagem das Embalagens*. In Série Resíduos n.º 1, FCT/UNL, Caparica

SIMMS, N., POLLARD, S., SMITH, R., HILL, D. (2007), Wastes as co-fuels: the policy framework for solid recovered fuel (SRF) in Europe, with UK implications. *Environmental Science & Technology*, **41**, 4868-4874

SIRPLASTE (2008), *Sirplaste*, <http://www.sirplaste.pt> (consultado a 28 de Janeiro de 2008)

SPINACÉ, M.A.S., PAOLI, M.A. (2005), A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros. *Química Nova*, **28**, 65-72

SPSS Inc. (2005), SPSS 14.0 para Windows Evaluation Version, Release 14.0.0. 5 de Setembro de 2005

SPV (2008), *Sociedade Ponto Verde*, <http://www.pontoverde.pt> (consultado a 3 de Janeiro de 2008)

VALORSUL (2008), *Valorsul S.A.*, <http://www.valorsul.pt> (consultado a 29 de Fevereiro de 2008)

WEI, J., REALFF, M.J. (2005), Design and Optimization of Drum-type Electrostatic Separators for Plastics Recycling. *Industrial and Engineering Chemical Research*, **44**, 3503-3509

WEISS, N.A. (1993), *Elementary Statistics*. 2ª Edição, Addison-Wesley Publishing Company, EUA

XP U44-164 Documentation – *Amendements organiques et supports de culture – Méthode d'analyse des composants inertes dans un compost*, Association Française de Normalisation (AFNOR), Janeiro de 2004

ANEXO A

ANÁLISE DE CONTAMINANTES NOS RESÍDUOS

A1. PRÉ-LAVAGEM

Tabela A1. Contaminantes da reciclagem de plásticos no resíduo Pré-lavagem.

C	Material processado	Fracção contaminante	A (% peso seco)	B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	Compostagem	matéria orgânica	38,80	40,63	39,72	1,29
		leves	5,10	5,17	5,13	0,05
		semi-pesados	14,42	18,55	16,49	2,92
		pesados	12,55	8,33	10,44	2,99
		metais	5,67	2,19	3,93	2,46
		finos	23,44	25,13	24,29	1,19
2	PEAD	matéria orgânica	41,45	39,63	40,54	1,28
		leves	4,62	4,73	4,67	0,07
		semi-pesados	29,46	26,63	28,04	2,00
		pesados	20,05	22,40	21,22	1,66
		metais	1,86	4,49	3,17	1,87
		finos	2,57	2,13	2,35	0,31
3	Compostagem	matéria orgânica	44,24	42,58	43,41	1,18
		leves	7,40	9,20	8,30	1,28
		semi-pesados	19,94	24,67	22,31	3,34
		pesados	13,77	10,69	12,23	2,18
		metais	3,78	1,76	2,77	1,43
		finos	10,88	11,11	10,99	0,16
4	Ecoponto	matéria orgânica	40,99	33,70	37,35	5,16
		leves	4,41	4,65	4,53	0,17
		semi-pesados	30,67	36,60	33,63	4,19
		pesados	4,52	10,15	7,33	3,98
		metais	8,95	4,69	6,82	3,02
		finos	10,46	10,23	10,34	0,16
5	Ecoponto	matéria orgânica	23,48	22,08	22,78	0,99
		leves	9,69	8,88	9,29	0,57
		semi-pesados	26,93	21,94	24,44	3,53
		pesados	20,21	14,91	17,56	3,75
		metais	15,41	26,54	20,97	7,87
		finos	3,83	5,15	4,49	0,93
6	PEAD	matéria orgânica	28,52	24,65	26,59	2,74
		leves	8,80	8,11	8,46	0,48
		semi-pesados	32,70	35,89	34,30	2,26
		pesados	16,68	17,66	17,17	0,70
		metais	3,80	0,99	2,39	1,99
		finos	9,50	12,69	11,10	2,26
7	Compostagem	matéria orgânica	31,51	35,67	33,59	2,94
		leves	6,22	5,31	5,77	0,64
		semi-pesados	36,84	33,64	35,24	2,26
		pesados	9,08	8,53	8,80	0,39
		metais	5,07	6,18	5,62	0,78
		finos	11,27	10,66	10,97	0,43

C	Material processado	Fracção contaminante	A (% peso seco)	B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
8	Compostagem	matéria orgânica	38,37	43,65	41,01	3,74
		leves	4,33	4,93	4,63	0,42
		semi-pesados	37,83	32,57	35,20	3,72
		pesados	6,18	5,51	5,84	0,47
		metais	2,73	1,70	2,21	0,73
		finos	10,56	11,64	11,10	0,76
9	Compostagem	matéria orgânica	32,58	30,79	31,68	1,26
		leves	32,10	32,86	32,48	0,54
		semi-pesados	18,58	18,54	18,56	0,03
		pesados	6,36	5,30	5,83	0,75
		metais	8,93	9,85	9,39	0,65
		finos	1,46	2,67	2,06	0,85
10	Ecoponto + Agricultura	matéria orgânica	16,05	13,05	14,55	2,12
		leves	35,95	31,47	33,71	3,17
		semi-pesados	9,52	12,31	10,91	1,97
		pesados	3,80	4,83	4,32	0,72
		metais	6,89	5,19	6,04	1,21
		finos	27,79	33,16	30,47	3,79

A2. MOINHA

Tabela A2. Contaminantes da reciclagem de plásticos no resíduo Moinha.

C	Material processado	Fracção contaminante	A (% peso seco)	B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	Compostagem.	matéria orgânica	19,96	21,00	20,48	0,74
		leves	77,60	76,65	77,13	0,67
		semi-pesados	0,61	1,58	1,09	0,69
		pesados	-	-	-	-
		metais	-	-	-	-
		finos	1,83	0,77	1,30	0,75
2	PEAD	matéria orgânica	15,34	14,14	14,74	0,85
		leves	75,98	70,17	73,08	4,11
		semi-pesados	0,91	0,57	0,74	0,24
		pesados	0,26	0,13	0,19	0,09
		metais	-	-	-	-
		finos	7,51	14,99	11,25	5,29
3	Compostagem	matéria orgânica	52,29	53,65	52,97	0,96
		leves	37,85	38,97	38,41	0,80
		semi-pesados	0,40	0,69	0,55	0,20
		pesados	-	-	-	-
		metais	-	-	-	-
		finos	9,46	6,69	8,07	1,96
4	Ecoponto	matéria orgânica	36,32	31,45	33,88	3,44
		leves	48,75	59,75	54,25	7,78
		semi-pesados	2,94	0,88	1,91	1,46
		pesados	-	-	-	-
		metais	-	-	-	-
		finos	11,99	7,92	9,96	2,88

C	Material processado	Fracção contaminante	A (% peso seco)	B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
5	Ecoponto	matéria orgânica	26,44	26,60	26,52	0,11
		leves	69,17	70,55	69,86	0,98
		semi-pesados	0,24	0,29	0,27	0,03
		pesados	-	-	-	-
		metais	-	-	-	-
		finos	4,15	2,56	3,36	1,12
6	PEAD	matéria orgânica	10,13	10,51	10,32	0,27
		leves	80,27	78,90	79,59	0,97
		semi-pesados	2,93	2,10	2,52	0,59
		pesados	-	-	-	-
		metais	-	-	-	-
		finos	6,67	8,49	7,58	1,29
7	Compostagem	matéria orgânica	42,97	43,05	43,01	0,06
		leves	47,55	47,65	47,60	0,08
		semi-pesados	5,52	5,95	5,73	0,30
		pesados	-	-	-	-
		metais	-	-	-	-
		finos	3,97	3,35	3,66	0,44
8	Compostagem	matéria orgânica	70,45	68,60	69,53	1,31
		leves	21,96	23,86	22,91	1,34
		semi-pesados	2,22	2,46	2,34	0,17
		pesados	-	-	-	-
		metais	-	-	-	-
		finos	5,37	5,08	5,23	0,21
9	Compostagem	matéria orgânica	32,15	34,83	33,49	1,90
		leves	58,39	54,90	56,64	2,47
		semi-pesados	2,33	2,71	2,52	0,27
		pesados	-	-	-	-
		metais	-	-	-	-
		finos	7,13	7,57	7,35	0,31
10	Ecoponto + Agricultura	matéria orgânica	11,72	11,98	11,85	0,19
		leves	72,84	72,08	72,46	0,54
		semi-pesados	1,67	1,43	1,55	0,17
		pesados	-	-	-	-
		metais	-	-	-	-
		finos	13,77	14,50	14,13	0,52

A3. FINAL

Tabela A3. Contaminantes da reciclagem de plásticos do resíduo Final.

C	Material processado	Fracção contaminante	A (% peso seco)	B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
1	Compostagem	matéria orgânica	18,42	17,01	17,72	1,00
		leves	4,16	3,48	3,82	0,48
		semi-pesados	57,21	60,27	58,74	2,16
		pesados	19,12	17,27	18,20	1,31
		metais	-	-	-	-
		finos	1,09	1,97	1,53	0,62

C	Material processado	Fracção contaminante	A (% peso seco)	B (% peso seco)	Média (% peso seco)	Desvio padrão
2	PEAD	matéria orgânica	17,53	19,50	18,52	1,39
		leves	21,72	18,44	20,08	2,32
		semi-pesados	46,22	46,13	46,18	0,07
		pesados	11,70	12,58	12,14	0,62
		metais	-	-	-	-
		finos	2,83	3,35	3,09	0,37
3	Compostagem	matéria orgânica	15,05	16,19	15,62	0,80
		leves	12,23	8,47	10,35	2,66
		semi-pesados	49,28	48,44	48,86	0,60
		pesados	22,45	25,86	24,15	2,41
		metais	-	-	-	-
		finos	0,99	1,04	1,02	0,04
4	Ecoponto	matéria orgânica	18,64	18,35	18,49	0,20
		leves	10,60	9,71	10,15	0,63
		semi-pesados	42,82	47,07	44,94	3,00
		pesados	26,36	23,91	25,13	1,73
		metais	-	-	-	-
		finos	1,59	0,96	1,27	0,44
5	Ecoponto	matéria orgânica	14,48	31,04	22,76	11,71
		leves	10,21	8,50	9,36	1,20
		semi-pesados	52,49	25,18	38,84	19,31
		pesados	21,12	29,54	25,33	5,95
		metais	-	-	-	-
		finos	1,69	5,72	3,70	2,85
6	PEAD	matéria orgânica	-	-	-	-
		leves	-	-	-	-
		semi-pesados	-	-	-	-
		pesados	-	-	-	-
		metais	-	-	-	-
		finos	-	-	-	-
7	Compostagem	matéria orgânica	16,49	15,02	15,75	1,04
		leves	4,15	2,79	3,47	0,96
		semi-pesados	47,98	56,38	52,18	5,94
		pesados	28,53	22,39	25,46	4,34
		metais	-	-	-	-
		finos	2,86	3,42	3,14	0,40
8	Compostagem	matéria orgânica	16,07	14,00	15,03	1,46
		leves	11,03	12,45	11,74	1,01
		semi-pesados	46,56	45,68	46,12	0,63
		pesados	24,81	26,48	25,65	1,18
		metais	-	-	-	-
		finos	1,53	1,39	1,46	0,10
9	Compostagem	matéria orgânica	17,56	16,38	16,97	0,83
		leves	5,23	3,16	4,19	1,46
		semi-pesados	62,93	68,12	65,53	3,67
		pesados	13,02	10,07	11,54	2,08
		metais	-	-	-	-
		finos	1,26	2,27	1,76	0,71
10	Ecoponto + Agricultura	matéria orgânica	4,13	1,91	3,02	1,57
		leves	84,47	87,56	86,01	2,19
		semi-pesados	8,96	5,83	7,40	2,21
		pesados	2,44	4,70	3,57	1,59
		metais	-	-	-	-
		finos	-	-	-	-

ANEXO B

HUMIDADE

B1. PRÉ-LAVAGEM

Tabela B1. Humidade (%) do resíduo Pré-lavagem.

Campanha									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
55,77	52,52	54,65	54,60	43,56	51,36	56,40	66,76	47,43	35,32
57,62	50,08	55,74	55,67	42,06	50,47	56,18	66,82	49,87	37,59
55,60	51,80	53,78	54,65	52,69*	49,04	57,58	69,39	46,33	35,91
59,57	51,86	54,42	55,73	45,31	47,11	57,16	70,56	50,94	36,92
56,40	46,25	56,07	54,42	38,78	48,04	55,86	69,73	50,10	34,93
60,18	54,72	53,66	55,65	41,80	50,34	55,87	68,51	49,95	34,60
59,41	47,46	42,26*	57,73	40,51	48,12	58,30	68,89	49,71	36,70
60,61	50,43	53,79	50,93	37,06	50,95	56,20	67,35	53,30	35,96
59,36	48,23	54,77	-	41,14	49,58	57,18	68,99	52,06	37,55
-	50,57	54,11	-	43,30	50,83	56,93	68,88	55,36	45,06*
-	49,42	53,29	-	44,00	52,99	55,86	72,60	54,54	39,60
-	52,91	54,47	-	44,84	51,23	55,42	74,04	49,28	37,70
-	49,30	54,36	-	46,05	-	58,83	73,25	52,77	37,95
-	51,96	-	-	38,21	-	55,62	73,88	55,05	36,93
-	51,83	-	-	-	-	-	74,27	-	39,61
-	48,54	-	-	-	-	-	74,30	-	36,82
-	52,86	-	-	-	-	-	-	-	33,59
-	51,42	-	-	-	-	-	-	-	36,28
-	48,33	-	-	-	-	-	-	-	-

* Valores eliminados nos testes de normalidade, não contabilizados no cálculo das médias.

B2. MOINHA

Tabela B2. Humidade (%) do resíduo Moinha.

Campanha									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
50,22	31,03	46,77	44,79	52,17	33,21	55,84	69,17	49,35	39,37
50,99	31,19	46,97	45,25	53,09	31,62	54,23	68,46	50,07	39,38
50,53	32,29	47,18	45,60	54,36	33,55	56,67	70,22	49,13	37,16
50,41	29,14	47,06	45,53	52,38	33,02	55,90	70,44	50,38	40,70
49,08	29,81	47,83	44,56	55,86	33,01	56,03	69,52	49,70	40,49
49,85	30,60	47,02	44,43	54,88	32,53	56,90	69,19	51,37	41,75
50,52	30,44	47,38	44,51	54,92	32,62	55,60	69,00	49,92	40,00
50,99	31,24	47,07	45,63	54,78	32,67	54,65	69,09	53,95	33,88
51,36	34,90	47,73	-	53,17	21,40*	55,30	69,74	54,78	35,72
50,82	33,91	50,21*	-	55,08	34,79	55,41	69,69	54,38	37,18
50,28	33,29	49,37*	-	58,28	32,59	55,56	71,04	-	35,32
49,92	36,75	48,65	-	56,49	31,83	55,06	68,02	-	37,64
50,49	33,88	47,78	-	56,75	-	54,94	68,04	-	37,16
50,49	37,96	-	-	55,15	-	56,04	68,70	-	38,75
49,97	-	-	-	52,04	-	-	69,01	-	39,53
-	-	-	-	53,86	-	-	68,30	-	-

* Valores eliminados nos testes de normalidade, não contabilizados no cálculo das médias.

B3. FINAL

Tabela B3. Humidade (%) do resíduo Final.

Campanha									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
47,61	51,66	39,76	45,13	49,88	52,84	37,85	49,88	47,94	46,40
46,38	46,15	44,94	44,75	58,83	51,70	40,05	46,57	50,58	47,24
49,89	53,33	43,80	43,99	49,80	64,34	38,50	48,71	42,42	48,05
51,61	51,39	39,05	45,61	52,80	56,72	42,19	56,75	42,64	44,91
52,38	47,22	39,82	43,35	46,28	60,90	46,11	59,86	42,46	50,46
53,88	46,40	44,58	44,27	58,37	55,71	43,77	56,00	41,95	49,15
52,39	46,91	43,92	48,36	53,61	64,99	50,18	57,14	41,68	51,78
52,84	45,94	49,89	48,13	59,56	60,29	40,58	39,72	49,53	47,97
54,14	45,18	52,36*	-	57,70	58,31	42,73	42,05	44,51	47,34
54,67	55,80	44,46	-	51,13	66,91	43,13	44,51	45,46	50,07
52,36	38,92	40,79	-	52,59	-	41,83	44,51	49,17	49,61
-	45,45	40,84	-	55,18	-	45,40	34,36	46,64	-
-	48,84	43,66	-	52,82	-	43,26	-	-	-
-	47,99	-	-	55,47	-	43,93	-	-	-
-	46,37	-	-	52,21	-	-	-	-	-
-	46,23	-	-	51,87	-	-	-	-	-
-	45,04	-	-	51,83	-	-	-	-	-
-	47,37	-	-	-	-	-	-	-	-
-	47,54	-	-	-	-	-	-	-	-
-	51,31	-	-	-	-	-	-	-	-
-	52,43	-	-	-	-	-	-	-	-
-	57,25	-	-	-	-	-	-	-	-
-	55,20	-	-	-	-	-	-	-	-
-	63,86*	-	-	-	-	-	-	-	-

* Valores eliminados nos testes de normalidade, não contabilizados no cálculo das médias.

ANEXO C
CINZAS E SÓLIDOS VOLÁTEIS

C1. PRÉ-LAVAGEM

Tabela C1. Cinzas e Sólidos Voláteis (% peso seco) do resíduo Pré-lavagem.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cinzas	46,80	20,00	24,27	23,76	17,14	21,37	27,04	21,07	20,12	36,56
	36,00	20,59	26,47	24,27	17,95	22,60	27,18	21,63	21,53	47,37
	32,00	21,78	27,62	24,04	17,89	22,02	25,20	22,92	19,76	42,07
	54,37	19,80	25,71	24,51	21,26	-	-	-	-	-
	60,78	21,78	25,00	24,27	19,41	-	-	-	-	-
	36,63	21,57	28,85	23,81	-	-	-	-	-	-
	41,18	20,21	-	-	-	-	-	-	-	-
Sólidos Voláteis	53,20	80,00	75,73	76,24	82,86	78,63	72,96	78,93	79,88	63,44
	64,00	79,41	73,53	75,73	82,05	77,40	72,82	78,37	78,47	52,63
	68,00	78,22	72,38	75,96	82,11	77,98	74,80	77,08	80,24	57,93
	45,63	80,20	74,29	75,49	78,74	-	-	-	-	-
	39,22	78,22	75,00	75,73	80,59	-	-	-	-	-
	63,37	78,43	71,15	76,19	-	-	-	-	-	-
	58,82	79,79	-	-	-	-	-	-	-	-

C2. MOINHA

Tabela C2. Cinzas e Sólidos Voláteis (% peso seco) do resíduo Moínha.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cinzas	8,91	2,88	11,20	7,18	4,73	4,37	4,15	8,30	9,47	8,32
	6,93	2,94	12,50	8,70	3,15	4,97	4,35	8,07	9,07	8,13
	5,94	1,98	11,65	9,90	4,73	4,89	3,95	8,02	8,81	8,98
	10,89	3,96	12,26	9,80	3,60	-	-	-	-	-
	7,92	4,00	12,75	6,80	2,94	-	-	-	-	-
	5,94	3,92	11,32	5,88	-	-	-	-	-	-
	7,92	2,71	-	-	-	-	-	-	-	-
Sólidos Voláteis	91,09	97,12	88,80	92,82	95,27	95,63	95,85	91,70	90,53	91,68
	93,07	97,06	87,50	91,30	96,85	95,03	95,65	91,93	90,93	91,87
	94,06	98,02	88,35	90,10	95,27	95,11	96,05	91,98	91,19	91,02
	89,11	96,04	87,74	90,20	96,40	-	-	-	-	-
	92,08	96,00	87,25	93,20	97,06	-	-	-	-	-
	94,06	96,08	88,68	94,12	-	-	-	-	-	-
	92,08	97,29	-	-	-	-	-	-	-	-

C3. FINAL

Tabela C3. Cinzas e Sólidos Voláteis (% peso seco) do resíduo Final.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cinzas	10,78	13,08	11,88	10,68	13,33	8,45	14,57	9,13	11,73	4,13
	11,76	10,89	9,71	9,62	12,96	7,47	14,44	9,07	13,12	3,95
	8,82	11,00	11,82	10,48	13,48	8,61	14,53	9,23	14,73	3,96
	8,91	12,00	12,84	9,52	14,08	-	13,92	-	-	-
	11,00	10,68	11,43	9,62	12,92	-	-	-	-	-
	8,91	9,90	11,85	11,11	-	-	-	-	-	-
	8,91	8,91	-	-	-	-	-	-	-	-
Sólidos Voláteis	89,22	86,92	88,12	89,32	86,67	91,55	85,43	90,87	88,27	95,87
	88,24	89,11	90,29	90,38	87,04	92,53	85,56	90,93	86,88	96,05
	91,18	89,00	88,18	89,52	86,52	91,39	85,47	90,77	85,27	96,04
	91,09	88,00	87,16	90,48	85,92	-	86,08	-	-	-
	89,00	89,32	88,57	90,38	87,08	-	-	-	-	-
	91,09	90,10	88,15	88,89	-	-	-	-	-	-
	91,09	91,09	-	-	-	-	-	-	-	-

ANEXO D

PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS) E INFERIOR (PCI)

D1. PRÉ-LAVAGEM

Tabela D1. PCS e PCI (MJ/kg) do resíduo Pré-lavagem.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PCS	11,4	19,9	18,8	17,0	16,8	16,6	15,0	16,3	23,9	22,4
	14,5	22,0	18,1	16,5	17,3	16,7	15,7	16,3	27,4	20,7
	14,2	19,2	18,4	16,7	17,3	16,5	15,2	15,8	25,7	23,9
	14,8	20,4	19,4	16,8	-	-	-	-	-	-
PCI	2,6	7,3	6,3	5,0	7,4	5,8	4,0	2,0	8,6	11,8
	3,9	8,4	6,0	4,8	7,7	5,8	4,3	2,0	10,3	10,7
	3,8	7,0	6,1	4,9	7,7	5,8	4,1	1,8	9,5	12,8
	4,1	7,6	6,6	4,9	-	-	-	-	-	-

D2. MOINHA

Tabela D2. PCS e PCI (MJ/kg) do resíduo Moinha.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PCS	33,5	42,6	28,2	34,8	36,8	40,6	28,3	28,3	33,6	37,5
	33,8	41,5	28,1	34,6	36,2	40,6	27,7	27,5	33,7	37,0
	33,4	42,1	28,6	34,7	36,9	40,3	30,8	28,5	32,6	38,2
	34,0	41,4	29,7	35,0	-	-	-	-	-	-
PCI	12,9	24,9	11,7	15,6	13,2	24,1	9,2	5,3	13,0	19,7
	13,0	24,2	11,7	15,4	13,0	24,1	8,9	5,1	13,0	19,4
	12,8	24,6	11,9	15,5	13,3	24,0	10,3	5,4	12,5	20,2
	13,1	24,1	12,5	15,7	-	-	-	-	-	-

D3. FINAL

Tabela D3. PCS e PCI (MJ/kg) do resíduo Final.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PCS	24,3	26,5	25,8	26,0	21,6	36,5	23,7	23,3	23,7	42,7
	24,7	26,5	25,6	25,5	22,3	36,0	24,7	23,4	21,6	42,7
	24,0	27,2	25,2	25,5	21,4	37,1	24,1	23,2	23,2	43,4
	25,1	26,4	26,3	23,4	-	-	-	-	-	-
PCI	10,1	10,5	11,9	11,5	7,3	10,8	11,0	9,3	10,4	17,7
	10,4	10,5	11,8	11,2	7,7	10,6	11,6	9,3	9,3	17,7
	10,0	10,8	11,5	11,2	7,3	11,1	11,2	9,3	10,2	18,1
	10,6	10,4	12,2	10,1	-	-	-	-	-	-

ANEXO E

CARACTERIZAÇÃO ELEMENTAR

E1. PRÉ-LAVAGEM

Tabela E1. Carbono, Hidrogénio, Azoto e Oxigénio (% peso seco) do resíduo Pré-lavagem.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Carbono	36,91	48,72	40,82	39,08	37,89	40,31	39,46	41,10	52,70	42,06
	34,97	53,81*	39,69	39,90	37,81	41,73	39,50	40,89	56,99	47,99
	34,96	46,83	30,81	38,86	40,22	41,75	39,19	42,29	54,81	47,19
	30,84	48,07	43,48	42,49	40,58	39,55	43,56	37,67	51,20	18,23*
	38,34	47,66	37,09	50,77*	41,01	-	-	-	-	-
	34,77	46,69	30,85	40,92	41,03	-	-	-	-	-
	-	47,05	40,66	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	41,68	-	-	-	-	-	-	-
Hidrogénio	4,99	5,41	5,48	4,96	5,05	5,27	4,90	5,22	8,42	6,24
	4,37	6,13	5,27	4,98	4,88	5,60	4,87	5,04	9,10	7,18
	4,46	5,72	3,65	4,81	5,08	5,64	4,55	5,27	8,68	6,98
	3,85	5,82	5,72	6,97	5,30	5,07	5,57	4,53	7,58	4,60*
	5,08	6,09	4,60	8,50	5,23	-	-	-	-	-
	4,47	5,37	3,64	5,43	4,98	-	-	-	-	-
	-	5,96	6,14	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	5,73	-	-	-	-	-	-	-
Azoto	0,48	0,16	0,44	0,39	0,23	0,22	0,36	0,15	0,33	1,50
	0,51	0,12	0,39	0,48	0,09	0,31	0,39	0,12	0,36	3,22
	0,38	0,15	0,50	0,39	0,07	0,19	0,41	0,13	0,38	4,80
	0,40	0,16	0,46	0,29	0,06	0,22	0,33	0,78	0,17	3,56*
	0,42	0,19	0,49	0,39	0,17	-	-	-	-	-
	0,45	0,20	0,43	0,22	-	-	-	-	-	-
	-	0,19	0,56	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	0,54	-	-	-	-	-	-	-
Oxigénio	57,62	45,70	53,26	55,57	56,83	54,20	55,28	53,53	38,55	50,20
	60,14	39,94	54,65	54,64	57,22	52,36	55,24	53,95	33,54	41,61
	60,20	47,30	65,04	55,93	54,63	52,42	55,84	52,31	36,14	41,04
	64,91	45,95	50,34	50,26	54,07	55,15	50,53	57,02	41,05	73,61*
	56,16	46,07	57,81	40,35	53,59	-	-	-	-	-
	60,31	47,73	65,08	53,42	53,99	-	-	-	-	-
	-	46,81	52,64	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	52,06	-	-	-	-	-	-	-

* Valores eliminados nos testes de normalidade, não contabilizados no cálculo das médias.

E2. MOINHA

Tabela E2. Carbono, Hidrogénio, Azoto e Oxigénio (% peso seco) do resíduo Moinha.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Carbono	68,44	78,81	39,78	62,76	62,73	76,26	61,19	57,71	59,92	56,95
	69,61	79,67	52,45	65,20	62,71	73,09	62,00	52,25	57,03	72,09
	67,96	-	44,63	64,25	72,17	76,37	60,22	54,07	67,40	69,05
	67,70	85,32	66,26	63,77	67,46	76,43	61,26	53,54	61,53	42,04
	68,50	80,48	60,86	65,12	63,28	-	-	-	-	-
	68,56	83,35	55,26	64,50	41,55	-	-	-	-	-
	-	-	63,27	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	55,23	-	-	-	-	-	-	-
Hidrogénio	10,74	12,78	5,39	9,86	10,59	12,66	9,13	8,55	9,33	8,92
	11,33	12,71	7,91	10,43	10,35	11,73	9,45	7,13	8,65	11,92
	11,08	-	6,16	10,33	11,81	12,60	9,02	7,62	10,70	11,36
	11,00	13,84	10,52	12,68	10,48	12,51	9,28	7,72	9,42	12,68
	11,23	12,79	9,39	13,17	9,95	-	-	-	-	-
	11,27	13,50	7,93	10,45	5,24	-	-	-	-	-
	-	-	11,16	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	9,02	-	-	-	-	-	-	-
Azoto	0,63	0,10	0,29	0,25	-	-	0,22	0,14	0,22	1,18
	0,35	0,11	0,31	0,31	-	0,14	0,16	0,12	0,37	0,94
	0,24	-	0,40	0,32	0,07	0,16	0,23	0,09	0,17	2,29
	0,20	-	0,24	0,27	0,06	-	0,22	0,71	0,10	1,55
	0,23	-	0,36	0,27	0,04	-	-	-	-	-
	0,24	-	0,34	0,22	0,17	-	-	-	-	-
	-	-	0,30	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	0,37	-	-	-	-	-	-	-
Oxigénio	20,18	8,30	54,54	27,14	26,68	11,08	29,45	33,60	30,53	32,95
	18,71	7,51	39,33	24,06	26,94	15,04	28,39	40,50	33,96	15,05
	20,72	-	48,82	25,10	15,94	10,87	30,53	38,22	21,73	17,30
	21,11	0,85	22,98	23,29	22,01	11,06	29,24	38,02	28,95	43,72
	20,04	6,73	29,39	21,44	26,74	-	-	-	-	-
	19,92	3,16	36,47	24,83	53,05	-	-	-	-	-
	-	-	25,26	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	35,37	-	-	-	-	-	-	-

E3. FINAL

Tabela E3. Carbono, Hidrogénio, Azoto e Oxigénio (% peso seco) do resíduo Final.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Carbono	47,51	63,85	55,57	52,38	45,57	70,86	55,33	54,14	45,42	82,65
	52,11	61,09	59,46	54,63	50,01	73,11	53,19	54,40	47,56	82,68
	52,82	58,90	62,82	50,01	49,72	73,12	49,75	53,37	48,45	83,56
	54,21	61,51	55,67	53,72	51,06	77,77	53,30	55,69	50,11	-
	51,11	61,28	57,07	53,87	51,50	-	-	-	-	-
	52,01	68,24	50,04	51,82	48,15	-	-	-	-	-
	-	57,94	53,69	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	51,38	-	-	-	-	-	-	-
Hidrogénio	6,23	7,34	6,55	6,21	6,31	11,36	7,36	7,06	6,26	14,15
	4,82	8,20	6,94	4,63	6,14	11,56	7,02	6,99	6,31	14,09
	6,15	7,77	7,31	6,64	6,13	11,73	6,37	7,02	6,22	14,24
	6,73	8,62	6,70	9,19	6,67	12,46	6,78	7,44	6,35	13,93*
	6,02	7,42	8,25	9,29	6,65	-	-	-	-	-
	6,12	8,69	6,84	7,21	6,34	-	-	-	-	-
	-	7,11	7,40	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	7,02	-	-	-	-	-	-	-
Azoto	0,46	0,16	0,30	0,56	0,32	0,22	0,44	0,18	0,41	0,18
	0,35	0,31	0,31	-	0,22	0,24	0,34	0,13	0,68	0,70
	0,40	0,23	0,77	0,72	0,12	0,35	0,37	0,15	1,26	0,74
	0,25	0,27	0,62	0,67	0,09	0,18	0,43	1,37*	0,22	1,00*
	0,44	0,22	1,39	0,48	0,09	-	-	-	-	-
	0,37	0,19	1,19	0,50	0,29	-	-	-	-	-
	-	0,20	0,63	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	0,65	-	-	-	-	-	-	-
Oxigénio	45,81	28,65	37,58	40,85	47,80	17,56	36,87	38,61	47,91	3,02
	42,72	30,41	33,29	40,75	43,64	15,09	39,45	38,48	45,45	2,53
	40,63	33,10	29,10	42,63	44,03	14,80	43,51	39,45	44,07	1,47
	38,81	29,60	37,01	36,42	42,17	9,59	39,49	35,51	43,32	-
	42,42	31,07	33,30	36,35	41,75	-	-	-	-	-
	41,50	22,89	41,93	40,47	45,22	-	-	-	-	-
	-	34,76	38,27	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	40,94	-	-	-	-	-	-	-

* Valores eliminados nos testes de normalidade, não contabilizados no cálculo das médias.

ANEXO F
CLORO E ENXOFRE

F1. PRÉ-LAVAGEM

Tabela F1. Cloro e Enxofre (% peso seco) do resíduo Pré-lavagem.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cloro	0,193	3,504	0,129	0,214	0,315	1,668	0,299	0,193	0,411	0,289
	0,201	3,509	0,130	0,220	0,395	2,149	0,237	0,219	0,643	0,217
	0,246	3,512	0,133	0,190	0,404	1,799	0,205	0,233	0,531	0,323
	0,236	3,527	0,162	0,352	-	-	-	-	-	-
	0,231	2,246	0,165	0,218	-	-	-	-	-	-
	0,275	2,268	0,166	0,226	-	-	-	-	-	-
	0,281	2,264	0,211	0,214	-	-	-	-	-	-
	-	2,259	0,226	-	-	-	-	-	-	-
	-	2,260	0,244	-	-	-	-	-	-	-
	Enxofre	0,173	0,152	0,123	0,119	0,134	0,148	0,158	0,152	0,170
0,173		0,157	0,123	0,119	0,130	0,148	0,148	0,147	0,136	0,094
0,121		0,155	0,124	0,117	0,132	0,142	0,145	0,146	0,175	0,105
0,119		0,153	0,124	0,131	-	-	-	-	0,188	-
0,117		0,145	0,123	0,125	-	-	-	-	-	-
0,131		0,148	0,124	0,129	-	-	-	-	-	-
0,132		0,147	0,134	0,128	-	-	-	-	-	-
-		0,148	0,141	-	-	-	-	-	-	-
-		0,144	0,140	-	-	-	-	-	-	-
-		0,148	-	-	-	-	-	-	-	-

F2. MOINHA

Tabela F2. Cloro e Enxofre (% peso seco) do resíduo Moinha.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cloro	0,117	0,225	0,123	0,169	0,134	0,260	0,436	0,209	0,131	0,086
	0,118	0,227	0,118	0,170	0,082	0,127	0,588	0,208	0,135	0,048
	0,120	0,229	0,136	0,166	0,079	0,098	0,221	0,204	0,118	0,059
	0,146	0,147	0,063	0,141	-	-	-	-	-	0,104
	0,145	0,147	0,064	0,161	-	-	-	-	-	-
	0,151	0,153	0,063	0,170	-	-	-	-	-	-
	0,112	0,169	0,101	0,122	-	-	-	-	-	-
	0,113	0,167	0,115	0,124	-	-	-	-	-	-
	-	0,170	0,118	0,116	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	0,121	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Enxofre	0,086	0,084	0,090	0,094	0,088	0,040	0,079	0,077	0,056	0,047
	0,087	0,085	0,086	0,092	0,099	0,044	0,078	0,076	0,061	0,042
	0,087	0,086	0,089	0,091	0,086	0,041	0,078	0,078	0,062	0,042
	0,142	0,086	0,085	0,092	-	-	0,078	0,074	-	-
	0,142	0,086	0,083	0,092	-	-	0,062	0,066	-	-
	0,140	0,080	0,085	0,091	-	-	-	-	-	-
	0,090	0,080	0,105	0,093	-	-	-	-	-	-
	0,089	0,078	0,105	0,092	-	-	-	-	-	-
	-	-	0,100	0,089	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	0,090	-	-	-	-	-	-

F3. FINAL

Tabela F3. Cloro e Enxofre (% peso seco) do resíduo Final.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cloro	4,430	4,778	6,411	6,465	2,987	1,042	3,580	3,789	6,925	0,424
	4,431	4,777	6,388	6,507	3,968	0,991	5,192	4,442	4,176	0,920
	4,123	4,869	6,522	6,457	3,428	0,888	4,193	4,601	6,893	0,243
	4,104	4,869	6,487	6,191	-	-	-	-	-	-
	3,990	7,527	7,285	6,295	-	-	-	-	-	-
	3,936	7,516	7,293	6,182	-	-	-	-	-	-
	-	7,540	6,890	7,088	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	7,050	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	7,076	-	-	-	-	-	-
Enxofre	0,145	0,145	0,152	0,151	0,206	0,151	0,193	0,198	0,138	0,137
	0,150	0,144	0,152	0,154	0,208	0,157	0,139	0,151	0,183	0,144
	0,145	0,031	0,176	0,154	0,195	--	0,196	0,152	0,150	0,143
	0,143	0,032	0,176	0,153	-	-	-	-	-	-
	0,146	0,087	0,177	0,158	-	-	-	-	-	-
	0,148	0,086	-	0,153	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	0,160	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	0,168	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	0,170	-	-	-	-	-	-

ANEXO G
OUTROS METAIS

G1. PRÉ-LAVAGEM

Tabela G1. Outros metais (ppm peso seco) do resíduo Pré-lavagem.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Alumínio	11837,6	5944,8	4342,3	5569,7	4269,7	8267,9	5547,1	2435,4	3990,6	5750,4
	12945,6	5565,4	4677,9	5901,2	5254,7	7992,6	2402,7	4249,8	4404,6	9311,6
	10649,1	5872,5	4935,1	5259,9	3765,1	-	-	-	-	-
Bário	227,3	48,4	544,8	32,6	21,3	26,7	46,9	26,6	60,8	40,6
	246,0	42,9	297,3	42,6	21,1	15,2	32,0	37,4	44,3	41,2
	256,3	202,7	749,8	50,9	34,6	-	-	-	-	-
Cádmio	1,8	1,9	2,4	1,9	7,0	2,0	1,3	0,6	1,2	1,2
	1,6	2,6	1,8	1,8	6,6	1,6	1,2	1,0	1,2	2,1
	1,5	2,0	1,7	1,5	6,9	-	-	-	-	-
Chumbo	108,3	68,3	62,5	49,7	253,2	20,8	103,7	51,6	78,7	52,2
	170,5	84,3	65,2	48,6	248,9	21,5	103,2	95,5	82,0	37,7
	115,9	55,8	108,3	53,1	212,1	-	-	-	-	-
Cobalto	5,1	9,7	16,9	2,3	2,0	2,5	2,1	1,7	2,5	2,2
	4,8	9,7	15,4	2,4	2,1	2,9	2,0	2,4	2,6	2,5
	4,6	10,3	19,0	2,5	1,9	-	-	-	-	-
Cobre	70,9	69,0	6146,8	88,5	72,3	65,5	74,3	141,3	108,7	158,8
	110,4	79,2	3991,5	81,5	63,0	82,2	198,6	160,4	126,9	127,1
	180,1	64,1	7169,6	108,7	66,8	-	-	-	-	-
Crômio	237,7	48,9	250,9	108,0	51,3	28,3	46,5	43,0	165,0	85,2
	254,0	65,0	182,6	128,4	51,4	22,6	55,8	53,3	177,8	77,0
	261,9	351,6	287,6	149,5	47,5	-	-	-	-	-
Estanho	13,3	87,2	23,1	18,9	39,1	105,2	29,6	11,6	17,2	22,9
	15,9	87,6	25,4	18,9	37,9	103,0	25,4	16,6	18,2	24,2
	13,0	86,5	24,6	19,1	35,0	-	-	-	-	-
Níquel	222,0	53,2	535,6	25,3	13,7	20,3	46,8	26,4	58,9	42,0
	225,0	46,5	282,8	35,5	16,9	12,0	31,0	34,2	40,9	43,6
	255,1	191,1	736,1	46,7	34,5	-	-	-	-	-
Potássio	1514,5	852,7	1146,7	947,3	874,4	894,4	1497,3	736,7	912,4	471,3
	1417,4	894,0	1085,3	965,9	855,3	910,6	1527,2	1306,6	1025,8	373,2
	1495,2	848,5	1107,3	1005,1	856,1	-	-	-	-	-
Selênio	0,0	7,1	0,0	0,0	0,0	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0
	2,9	7,5	2,9	0,0	0,0	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	8,5	3,8	0,0	0,0	-	-	-	-	-

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sódio	1319,8	2034,7	1026,6	1075,5	1011,8	2356,3	1473,1	981,7	838,7	578,5
	1344,5	2072,1	1059,4	1094,9	1009,0	2461,6	1537,7	1577,3	889,7	501,1
	1312,0	1963,1	1019,5	10952,8*	1008,3	-	-	-	-	-
Antimônio	2,4	3,6	6,6	5,3	10,2	8,8	6,3	4,1	7,1	5,4
	3,9	4,3	8,3	3,1	8,5	8,9	5,0	4,6	8,5	4,6
	3,5	5,6	10,6	3,5	8,5	-	-	-	-	-
Tálio	119,7	48,0	115,2	132,9	60,7	45,7	89,3	45,3	108,5	98,9
	113,7	54,6	99,3	126,1	62,5	45,6	96,4	76,1	108,0	115,6
	93,4	53,9	98,9	125,7	41,4	-	-	-	-	-
Vanádio	6,5	2,9	8,3	5,3	5,1	2,9	6,4	2,9	6,6	3,9
	6,6	3,1	8,0	6,1	5,4	2,7	5,9	4,3	7,2	3,7
	5,3	4,3	9,1	5,4	4,5	-	-	-	-	-
Zinco	337,0	329,0	310,4	483,7	325,5	158,1	558,6	238,3	323,4	264,8
	374,9	330,6	320,6	545,7	268,8	172,2	565,4	323,9	342,2	252,5
	334,4	288,0	338,9	550,3	266,8	-	--	-	-	-
Mercúrio	2,89	1,92	6,52	1,63	2,27	2,13	3,97	11,34	7,31	2,52

* Valores eliminados nos testes de normalidade, não contabilizados no cálculo das médias.

G2. MOINHA

Tabela G2. Outros metais (ppm peso seco) do resíduo Moinha.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Alumínio	1251,1	728,4	1244,2	1465,3	736,4	794,7	1304,0	1686,1	1403,7	1889,9
	1196,8	743,9	1766,5	1558,3	1251,7	926,0	1900,6	1867,0	1071,8	1307,0
	1271,8	542,1	2163,0	-	-	-	-	-	-	-
Bário	45,6	14,4	41,3	48,0	6,4	28,0	13,2	41,6	27,5	20,0
	46,7	9,6	24,1	45,0	5,8	51,6	15,3	29,3	25,3	12,7
	130,7*	17,9	30,2	-	-	-	-	-	-	-
Cádmio	0,7	3,5	1,6	0,6	1,8	0,5	0,3	0,5	0,5	0,7
	0,7	3,3	0,7	0,5	1,9	0,8	0,5	0,6	0,6	0,4
	0,7	4,0	0,9	-	-	-	-	-	-	-
Chumbo	54,4	21,4	20,7	74,3	31,5	12,4	45,1	50,3	24,8	272,1*
	50,8	23,4	31,3	82,4	30,5	9,0	40,3	36,6	21,4	25,3
	47,9	65,7	28,4	-	-	-	-	-	-	-
Cobalto	1,2	4,5	2,7	1,8	0,2	9,8	0,5	7,5	7,6	0,8
	0,9	4,8	3,6	1,8	0,2	7,7	0,6	8,5	7,3	1,1
	25,0*	4,8	4,1	-	-	-	-	-	-	-
Cobre	26,4	21,1	32,2	39,1	75,9	33,3	30,1	30,1	133,0	54,0
	32,1	22,7	36,2	30,2	72,1	44,1	34,1	31,9	94,1	46,4
	34,9	1326,0*	32,8	-	-	-	-	-	-	-

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Crômio	58,2	19,1	29,0	127,9	17,9	43,1	13,3	47,6	43,4	35,2
	48,4	13,8	36,9	118,7	14,0	76,7	22,6	41,2	36,6	26,8
	48,6	14,7	43,4	-	-	-	-	-	-	-
Estanho	2,8	5,4	1,9	4,6	1,8	1,3	7,6	6,1	10,8	212,0*
	2,5	4,5	2,8	4,3	2,1	2,7	7,7	6,7	8,8	5,8
	2,2	15,8*	2,4	-	-	-	-	-	-	-
Níquel	46,1	9,9	41,7	45,8	4,2	29,5	10,8	41,4	27,8	16,6
	48,5	8,5	22,7	43,9	3,5	51,4	13,0	29,6	24,6	11,2
	133,6	16,0	30,0	-	-	-	-	-	-	-
Potássio	275,9	53,4	247,1	212,8	151,2	113,4	225,8	389,6	193,4	138,5
	281,4	65,6	304,3	190,9	143,1	112,6	242,1	407,7	171,4	123,6
	277,5	72,6	284,5	-	-	-	-	-	-	-
Selênio	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	1,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Sódio	786,6	527,5	784,4	758,5	670,6	678,5	483,6	994,7	485,2	353,0
	774,5	567,3	891,9	737,8	641,1	681,8	484,7	1020,5	447,6	334,0
	793,5	585,5	858,5	-	-	-	-	-	-	-
Antimônio	1,9	3,5	1,6	19,0	2,5	2,8	5,3	5,5	6,3	3,2
	4,1	4,2	2,9	17,9	2,4	3,4	4,2	6,2	5,0	3,1
	3,9	2,3	2,4	-	-	-	-	-	-	-
Tálio	27,6	7,2	39,8	26,8	19,1	14,3	26,9	26,1	23,7	21,9
	34,9	6,7	53,6	26,5	14,7	10,1	26,4	30,8	20,2	22,5
	30,6	4,2	53,6	-	-	-	-	-	-	-
Vanádio	2,1	2,5	2,3	1,5	1,6	0,8	1,8	2,9	1,4	1,6
	1,9	2,8	3,5	1,3	1,2	0,4	2,0	2,7	1,4	1,0
	1,7	2,5	3,8	-	-	-	-	-	-	-
Zinco	436,7	96,4	422,0	485,0	136,1	136,2	223,7	242,7	191,4	167,7
	448,2	106,6	524,6	476,3	133,7	116,8	238,3	212,8	209,4	142,4
	423,7	831,8	508,2	-	-	-	-	-	-	-
Mercúrio	0,19	1,12	2,67	1,41	0,74	0,52	1,83	1,18	1,33	0,63

* Valores eliminados nos testes de normalidade, não contabilizados no cálculo das médias.

G3. FINAL

Tabela G3. Outros metais (ppm peso seco) do resíduo Final.

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Alumínio	11147,8	4555,4	10668,7	7426,3	17328,0	6912,7	50780,2	18553,7	18354,0	371,4
	18359,7	4052,0	8175,4	7735,9	17207,4	7145,9	49395,3	18511,9	27885,2	508,6
	18235,9	3757,7	11948,1	8001,1	17427,0	-	-	-	-	-

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bário	410,3	318,1	30,7	16,1	665,6	29,2	348,4	17,1	67,8	3,5
	1336,1	292,9	131,1	17,9	675,2	37,0	94,3	20,0	111,0	5,4
	1158,9	317,4	55,6	24,0	607,0	-	-	-	-	-
Cádmio	1,8	4,6	2,5	1,6	1,9	1,7	2,5	2,3	1,5	0,4
	1,2	3,9	2,3	1,9	2,8	2,2	2,5	2,0	1,3	0,4
	1,7	4,3	2,5	1,9	2,0	-	-	-	-	-
Chumbo	100,9	106,9	42,3	40,1	63,9	35,0	87,2	56,1	52,9	9,2
	88,0	113,7	53,9	39,9	52,6	37,4	107,4	59,5	58,5	10,0
	75,8	97,2	41,9	67,4	54,0	-	-	-	-	-
Cobalto	108,1	7,0	10,3	1,9	169,8	1,5	77,7	1,6	15,8	0,4
	348,2	6,4	10,0	1,6	183,2	2,0	21,3	1,7	26,1	0,0
	308,4	7,4	9,9	1,4	178,6	-	-	-	-	-
Cobre	33,6	648,7*	36,6	55,7	52,2	32,1	146,0	58,7	58,3	8,6
	179,3	271,8	32,4	49,3	54,4	35,9	131,0	80,7	49,2	7,9
	26,8	137,4	33,8	51,2	79,1	-	-	-	-	-
Crômio	52,2	164,8	243,7	62,6	51,3	84,5	126,8	227,8	88,8	5,9
	96,4	173,0	152,1	59,8	112,3	154,4	115,6	248,5	74,3	6,2
	81,2	115,6	128,9	49,5	42,9	-	-	-	-	-
Estanho	50,2	45,5	98,4	65,9	57,1	20,6	62,8	93,6	58,4	4,7
	59,9	44,5	96,4	61,9	57,6	20,9	72,4	100,7	63,1	5,7
	62,7	42,4	106,2	64,4	59,6	-	-	-	-	-
Níquel	423,0	334,1	29,1	13,9	674,5	27,9	343,7	12,3	70,7	2,8
	1382,3	298,6	141,5	12,7	714,2	32,1	93,2	14,7	115,1	6,2
	1196,6	333,0	59,8	19,4	607,5	-	-	-	-	-
Potássio	355,8	397,2	371,5	454,3	598,7	343,5	352,7	466,6	424,1	62,8
	327,6	412,7	353,0	485,6	662,1	337,7	348,0	415,0	365,3	65,5
	339,9	347,1	386,7	380,0	605,6	-	-	-	-	-
Selênio	1,6	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	5,5	0,0	0,0	0,0
	2,3	0,0	2,3	0,0	2,8	0,0	4,6	0,0	0,0	0,0
	2,6	0,0	3,7	0,0	2,1	-	-	-	-	-
Sódio	956,8	1035,4	1033,7	669,3	843,3	497,9	838,4	816,0	602,6	304,1
	951,5	1123,5	929,0	691,0	858,8	551,4	850,0	812,7	620,9	303,9
	903,3	969,3	1105,3	592,6	883,6	-	-	-	-	-
Antimônio	71,3	33,5	67,2	27,7	23,4	13,7	89,1	16,3	49,9	11,1
	71,4	32,2	79,3	56,9	27,3	15,3	72,9	17,2	59,8	11,0
	64,1	30,9	75,3	23,7	40,9	-	-	-	-	-
Tálio	26,6	77,9	23,9	51,9	1012,9	50,0	89,6	45,2	107,0	98,6
	37,9	56,7	23,1	70,5	1112,5	110,8	98,2	78,1	92,2	114,2
	39,1	67,7	23,0	59,0	1113,1	-	-	-	-	-
Vanádio	2,1	2,7	1,6	2,7	4,4	3,0	5,2	2,7	3,6	0,0
	2,4	2,4	1,7	2,8	4,6	3,7	5,6	2,8	3,7	0,0
	2,5	2,2	2,1	2,5	4,1	-	-	-	-	-

Parâmetro	Campanha									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zinco	828,1	957,8	965,8	611,4	664,2	226,4	689,0	1046,2	984,9	160,4
	748,4	815,3	992,2	603,9	694,8	252,7	651,6	1163,0	921,6	171,1
	690,5	1059,5	1060,4	559,4	659,8	-	-	-	-	-
Mercurio	0,07	0,24	0,10	0,10	0,11	0,07	0,09	0,12	0,08	0,10

* Valores eliminados nos testes de normalidade, não contabilizados no cálculo das médias.