



**Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente**

***Chips* de pneus – substituto de brita calcária em aterros  
sanitários**

Ana Margarida Vieira Gomes

Orientadora: Prof. Doutora Ana Silveira

Co-orientador: Eng. Artur Cabeças

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Sanitária.

Lisboa, Outubro de 2009



## Agradecimentos

---

Qualquer trabalho só se torna possível pelo incentivo, encorajamento, companheirismo e colaboração de muitas pessoas, que directa ou indirectamente nos ajudam a desenvolver ideias e a alcançar objectivos.

Aos meus orientadores, à Professora Doutora Ana Silveira e ao Eng. Artur Cabeças, que me ajudaram a definir o trabalho a realizar, a encarar novas formas de pensar neste projecto e que foram sempre possibilitando que este se fosse concretizando, muito obrigada.

Agradeço à Recipneu, nomeadamente ao Dr. António Pedreiro, à Eng. Anabela Veloso e ao Eng. Vasco Pampulim, pela disponibilidade e amabilidade com que nos receberam nas suas instalações, bem como no apoio e constante contacto para a troca de informação e/ou contactos relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

Ficam também os agradecimentos à Amarsul, no nome do Eng. Luís Santos pela disponibilidade e apoio para a realização deste trabalho, tendo resultado num projecto um pouco diferente daquele que foi previsto inicialmente.

Na FCT, não poderia deixar de agradecer a todas as colaboradoras dos laboratórios que me ajudaram na realização deste trabalho, em especial à Maria José Correia pela orientação e disponibilidade para a realização dos ensaios.

Ao longo de todo o curso de mestrado, saliento o apoio e a forma sempre pronta e eficaz da Felicidade Ferreira para qualquer esclarecimento e/ou resolução de problemas. Obrigada, Felicidade.

Obrigada também à colega Conceição Brito, pela parceria que criámos na troca de informação no âmbito dos nossos trabalhos.

E como os amigos e os familiares enriquecem sempre as nossas vidas, um muito obrigada a todos. Nem sempre o tempo e disponibilidade que vos dediquei correspondeu àquilo que vos era merecido.

Agradeço em especial à minha irmã, que talvez por andar também nestas andanças, temos vindo a partilhar dúvidas e pequenas descobertas. Ainda que por pouco, consegui acabar primeiro que tu. Obrigada pelo incentivo, ajuda e apoio nas decisões que fui tomando.

Fica também especial agradecimento à minha mãe. Sempre nos demonstraste que nem todas as situações com que nos deparamos são fáceis, mas que somos sempre fortes e capazes de as conseguir resolver.

Embora não percebendo muito de remo, nem tendo sequer até à data praticado tal desporto, agradeço ao meu “timoneiro”! Obrigada por tudo, João. A medalha é tua!

Mais uma vez um muito obrigada a todos!

## Resumo

---

Os pneus usados podem ser transformados em material para ser utilizado em aplicações de engenharia civil ou geotécnica, tais como aterros para deposição de resíduos (e.g. cobertura diária alternativa, camada de drenagem, recolha de biogás). Apesar da importância da promoção da reciclagem de pneus e com a possibilidade de aplicar o fim de estatuto de resíduos aos pneus usados, torna-se fulcral a investigação da compatibilidade física deste material aplicado num aterro para deposição de resíduos e se este não causa danos ambientais. Esta investigação foca-se na possibilidade dos *chips* de pneus, obtidos através de um processo de corte dos pneus, poderem constituir um substituto da brita nas camadas de drenagem do sistema de selagem de um aterro. Assim, foram estudadas as propriedades químicas dos *chips* de pneus através da determinação da lixiviação de metais em água a pH distintos (4,5, 7,0 e 9,0), recorrendo a testes em *batch* ou de contacto com uma relação Líquido/Sólido (L/S) 10. Al, Fe, Mn e Zn foram os metais que lixiviaram em concentrações maiores. No entanto, todas as concentrações dos metais não ultrapassaram os valores estabelecidos para classificar estes materiais como resíduos inertes.

**Palavras-chave:** Pneus Usados, Pneus em fim de vida, *Chips* de Pneus, Aterro, Valorização, Brita Calcária, Lixiviado



## Abstract

---

Tyre waste can turn into material to use in civil and geotechnic applications, such as landfill engineering (e.g. alternative daily cover, drainage layer, biogas collection). Besides it is important to promote tyre waste recycling and with the possibility of the end of waste criteria applied to tyre waste, it is important to investigate the physical compatibility of this material on landfill and verify that it doesn't cause environmental damage. This research focuses on tyre chips, obtained through tyre cut, as a gravel substitute on drainage layer of a landfill cover system. Thus, tyre chips chemical properties were studied through the determination of metals leachability by water at distinct pH (4.5, 7.0 and 9.0), in batch tests with a L/S 10 ratio. Al, Fe, Mn and Zn were the metals that leached in high concentrations. However, all metals concentrations did not exceeded the values established to classify tyre chips as inert waste.

**Keywords:** Tyre Waste, End-of-life Tyres, Tyre Chips, Landfill, Valorisation, Gravel, Leachate



## Acrónimos

---

ACAP – Associação de Comércio Automóvel

APIB – Associação Portuguesa de Industriais

ANIRP – Associação Nacional dos Industriais de Recauchutagem de Pneus

ASTM – *American Society for Testing Materials*

BLIC – *Bureaux de Liason des Industries du Caoutchouc*

DN – diâmetro nominal

EGF – Empresa Geral do Fomento

EP-Toxicity – *Extraction Procedure Toxicity*

ETRA – *European Tyre Recyclers Association*

ETRMA – *European Tyre and Rubber Manufacturers Association*

EUA – Estados Unidos da América

GAR – Guia de Acompanhamento de Resíduos

LER – Lista Europeia de Resíduos

L/S – Relação Líquido Sólido

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MADRE® – material agregado derivado de resíduos

ODWO – *Ontario Drinking Water Objectives*

OMS – Organização Mundial de Saúde

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

RMA – *Rubber Manufacturing Association*

RU – Resíduos Urbanos

SGPU – Sistema de Gestão de Pneus Usados

SIRAPA – Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente

SIRER – Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos

TDA – *Tire Derived Aggregate*

TCLP – *Toxicity Characterisation Leaching Procedure*

TDF – *Tire Derived Fuel*

US EPA – *United States Environmental Protection Agency*

VFV – Veículos em Fim de Vida

VMA – Valor Máximo Admissível

VMR – Valor Máximo Recomendado

WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*

## Símbolos

---

Al – Alumínio

As – Arsénio

Ba – Bário

Cd – Cádmio

Co – Cobalto

Cr – Crómio

Cu – Cobre

Fe – Ferro

H<sub>2</sub> – Hidrogénio

H<sup>+</sup> – Ião Hidrogénio

K – Potássio

kg – Quilograma

kJ – Quilojoule

Mn – Manganésio ou manganês

µg – Micrograma

µg/l – Micrograma por litro

µS/cm – Microsiemens por centímetro

Mg – Megagrama

mg – Miligrama

mg/l – Miligrama por litro

mg/kg – Miligrama por quilograma

Ni – Níquel

Pb – Chumbo

rpm – rotações por minuto

Zn – Zinco

# Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objectivo.....	4
1.3. Metodologia.....	4
1.4. Organização da Dissertação.....	5
2. Pneus.....	7
2.1. Pneus Usados.....	13
2.1.1.Enquadramento Legal.....	19
2.1.2.Sistemas de Gestão de Pneus Usados.....	27
2.1.3.Destinos dos Pneus Usados.....	39
2.1.4.Fim do Estatuto de Resíduo.....	50
2.2. Aplicação de <i>Chips</i> de Pneus.....	54
2.2.1.A aplicação de <i>chips</i> de pneus em aterros.....	62
2.2.2.O Aterro da Amarsul.....	69
3. Materiais e Métodos.....	77
3.1. Colheita das Amostras.....	78
3.2. Caracterização das Amostras.....	78
3.3. Ensaio Montagem.....	79
3.3.1.Material.....	80
3.3.2.Procedimento.....	81
3.4. Determinação de parâmetros.....	81
4. Apresentação e Discussão de Resultados.....	83
5. Considerações Finais.....	95
6. Referências Bibliográficas.....	99
Anexos	
Anexo A.I. Entidades Gestoras de Pneus Usados.....	111
Anexo A.II. Recipneu – MADRE® - Especificações Técnicas.....	113

Anexo A.III. Resultados.....	115
Anexo A.IV. Calibração do Equipamento de Espectroscopia de Emissão Atômica.....	119

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Constituição de um pneu.....	8
Figura 2.2: Produção de pneus a nível mundial, no período 1980-2020.....	9
Figura 2.3: Destinos de pneus usados na Europa.....	16
Figura 2.4: Sistemas de Gestão de Pneus Usados na Europa.....	29
Figura 2.5: Modelo Operacional do SGPU da Valorpneu.....	32
Figura 2.6: Desempenho em 2007 da Valorpneu e da Europa.....	38
Figura 2.7: Processo mecânico.....	44
Figura 2.8: Processo criogénico.....	44
Figura 2.9: Controlo da Qualidade.....	52
Figura 2.10: Produção de Resíduos Urbanos EU27 em 2007.....	63
Figura 2.11: Destinos de RU EU27 em 2007.....	64
Figura 2.12: Destino de RU em Portugal 1999-2005.....	65
Figura 2.13: Cobertura final de um aterro.....	68
Figura 2.14: Aterro da Amarsul em Palmela.....	70
Figura 2.15: Zona de Intervenção no Aterro da Amarsul em Palmela.....	71
Figura 2.16: <i>Chips</i> de pneus a aplicar na zona de intervenção do Aterro da Amarsul.....	72
Figura 2.17: <i>Chips</i> de pneus no Aterro da Amarsul.....	72
Figura 2.18: Pormenor de <i>chip</i> de pneu no Aterro da Amarsul.....	73
Figura 2.19: Sistema de encerramento.....	74
Figura 2.20: Sistema de encerramento.....	74
Figura 2.21: Zona de intervenção onde será efectuada a aplicação de <i>chips</i> de pneus.....	76
Figura 2.22: A aplicação de <i>chips</i> de pneus.....	76
Figura 3.1: Pormenor de <i>chips</i> de pneu utilizados nos ensaios laboratoriais.....	78
Figura 3.2: Pormenor da brita utilizada nos ensaios laboratoriais.....	79
Figura 4.1: Resultados obtidos para o parâmetro Cr, expresso em mg/kg.....	88
Figura 4.2: Resultados obtidos para o parâmetro Cu, expresso em mg/kg.....	89
Figura 4.3: Resultados obtidos para o parâmetro Ni, expresso em mg/kg.....	90

Figura 4.4: Resultados obtidos para o parâmetro Pb, expresso em mg/kg.....	90
Figura 4.5: Resultados obtidos para o parâmetro Zn, expresso em mg/kg.....	91
Figura A.IV.1: Calibração Equipamento – Al.....	119
Figura A.IV.2: Calibração Equipamento – As.....	119
Figura A.IV.3: Calibração Equipamento – Cd.....	120
Figura A.IV.4: Calibração Equipamento – Cr.....	120
Figura A.IV.5: Calibração Equipamento – Cu.....	121
Figura A.IV.6: Calibração Equipamento – Fe.....	121
Figura A.IV.7: Calibração Equipamento – K.....	122
Figura A.IV.8: Calibração Equipamento – Mn.....	122
Figura A.IV.9: Calibração Equipamento – Ni.....	123
Figura A.IV.10: Calibração Equipamento – Pb.....	123
Figura A.IV.11: Calibração Equipamento – Zn.....	124

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Pesos de pneus por categoria.....	10
Tabela 2.2: Composição dos pneus de veículos ligeiros e pesados.....	10
Tabela 2.3: Componentes de pneus que constam no Anexo I da Convenção de Basileia.....	11
Tabela 2.4: Destinos Pneus Usados.....	15
Tabela 2.5: Destinos Pneus Usados na Europa em 2006.....	17
Tabela 2.6: Sistemas de Gestão de Pneus Usados.....	28
Tabela 2.7: Quantidade de Pneus Usados geridos pela Valorpneu.....	36
Tabela 2.8: Propriedades físicas dos fragmentos de pneus.....	55
Tabela 2.9: Características dos produtos MADRE®TM e MADRE®TL.....	57
Tabela 2.10: Estudos de lixiviação de metais em <i>chips</i> de pneus.....	60
Tabela 4.1: Resultados dos testes de lixiviação dos <i>chips</i> de pneus.....	83
Tabela 4.2: Resultados dos testes de lixiviação da brita calcária.....	84
Tabela 4.3: Resultados da lixiviação de fragmentos de pneus de Håøya (2002).....	85
Tabela 4.4: Valores limites de lixiviação para resíduos inertes.....	88
Tabela 4.5: VMR e VMA para água para consumo humano.....	92
Tabela A.I.1: Entidades Gestoras de Pneus Usados.....	111
Tabela A.III.1: <i>Chips</i> de pneus em meio neutro.....	115
Tabela A.III.2: <i>Chips</i> de pneus em meio ácido.....	115
Tabela A.III.3: <i>Chips</i> de pneus em meio básico.....	116
Tabela A.III.4: Brita calcária em meio neutro.....	116
Tabela A.III.5: Brita calcária em meio ácido.....	117
Tabela A.III.6: Brita calcária em meio básico.....	117



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Em 2008 foram produzidos cerca de 96 mil toneladas de pneus usados em Portugal, sendo os principais destinos destes resíduos, por ordem decrescente: a reciclagem (50,2%), a valorização energética (24,4%), a recauchutagem (23,2%) e a reutilização de pneus usados para outros fins (2,1%) (Valorpneu, 2008b).

Como alternativa à eliminação dos pneus usados, tem-se vindo a promover a utilização de materiais resultantes da valorização destes resíduos em projectos de construção civil e/ou em projectos de geotecnia. Em contexto europeu esta promoção resulta essencialmente da proibição da deposição de pneus usados em aterros preconizada pela Directiva nº 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril, referente a aterros para deposição de resíduos, e da importância crescente que se atribui a temáticas como a sustentabilidade e a reciclagem (Guinness, 2007).

Uma das alternativas da valorização destes resíduos é a reciclagem física, obtendo-se *chips* de pneus. Antes da formação do granulado de borracha (quer por processo criogénico quer por processo mecânico), os pneus passam por uma etapa de corte, em que se obtém este material reciclado, constituído por pequenos pedaços de forma irregular e de tamanho variável.

Em termos de aplicações, um dos possíveis destinos deste material reciclado é a sua aplicação em aterros para deposição de resíduos, substituindo materiais agregados naturais inertes, dos quais são exemplo a brita calcária, o areão, seixo ou cascalho (Cabeças e Dores, 2008).

Segundo Roque *et al.* (2009), a reutilização e a reciclagem de pneus usados em obras geotécnicas são praticamente nulas em Portugal, sendo que a nível internacional a avaliação da aplicabilidade deste material neste tipo de obras teve início na década de 90.

No caso dos aterros para deposição de resíduos, os *chips* de pneus podem fazer parte das seguintes estruturas: (1) cobertura diária alternativa de resíduos (havendo ou não mistura de *chips* de pneus com terras de cobertura); (2) camada colectora de biogás; (3) camada de drenagem de lixiviado; (4) operações de protecção de camadas; e (5) camada de drenagem da cobertura final (Roque *et al.*, 2009; GeoSyntec Consultants, 2008 e 1998; Choi *et al.*, 2007; Sharma e Reddy, 2004; RMA, 2004; Blumenthal, 2001; Reddy e Marella, 2001; Amaral *et al.*, 2000; Serumgard, 1997).

Em Portugal efectuou-se a aplicação de *chips* de pneus, como substituto de material mineral drenante, na camada de drenagem da estrutura de selagem de uma célula do Aterro de Palmela da Amarsul, Sistema Multimunicipal da Margem Sul do Tejo responsável pela gestão adequada de resíduos urbanos e equiparados.

Este projecto teve início em 2007, tendo em 2008 sido executada a aplicação dos *chips* de pneus como camada drenante. O desenvolvimento da presente investigação teve origem no projecto do Aterro da Amarsul em Palmela. No entanto, esta constitui uma abordagem de algumas características ambientais dos *chips* de pneus, visto não ter sido exequível o desenvolvimento do estudo *in loco*, conforme pretendido inicialmente, tendo em conta a calendarização e o limite temporal para a execução da dissertação.

Promover a utilização de materiais reciclados em detrimento da aplicação de materiais naturais deve ser incentivada, não obstante tornar-se imperativo o desenvolvimento de investigação de forma a que sejam conhecidos os potenciais riscos ambientais e/ou geotécnicos que poderão estar associados, bem como a garantia dos requisitos necessários à sua aplicação (Mello *et al.*, 1998).

Apesar das vantagens da aplicação deste material e das características importantes para a utilização em obras geotécnicas, a aplicação do mesmo poderá suscitar algumas preocupações ambientais, nomeadamente no que concerne ao lixiviado resultante do contacto da água com os *chips* de pneus.

Do ponto de vista geotécnico, importa avaliar as propriedades mecânicas e o comportamento dos materiais reciclados tal como é o caso da durabilidade dos materiais, mas também os aspectos ambientais incluindo a compatibilidade química (Sharma e Reddy, 2004).

Para ser considerado uma aplicação em engenharia civil, e não uma deposição, um projecto deve reutilizar pneus usados inteiros ou processados em fragmentos em substituição de materiais de construção (e.g. areia, gravilha, argila), no sentido de constituir um benefício definido de engenharia (Barkerlemer Engineering Consultants, 2005).

De acordo com a composição e o processo de cura, os pneus retêm as propriedades químicas básicas e a forma física. Constituem por isso alvo de preocupação os efeitos que os produtos resultantes da reciclagem de pneus (e.g. *chips* pneus, fragmentos de pneus) possam ter em termos de lixiviação, aquando o contacto com água ou o contacto com lixiviado de um aterro para deposição de resíduos, pelo que se torna fundamental o estudo de possíveis alterações na

composição da água ou do lixiviado aquando o contacto com estes produtos (Rowe e McIsaac, 2005).

Vários autores têm vindo a estudar esta temática (GeoSyntec Consultants, 2008 e 1998; Rowe e Babcock, 2007; Aydilek *et al.*, 2006; Rowe e McIsaac, 2005; Edil *et al.*, 2004; Warith *et al.*, 2004; Moo-Young *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2003; Humphrey e Katz, 2001; Humphrey, 2000; Foose *et al.*, 1996; Zelibor, 1991), recorrendo a ensaios laboratoriais e a ensaios de campo de forma a poder prever o comportamento em termos de lixiviação (e.g. metais e/ou compostos orgânicos) e a compatibilidade da aplicação deste material, quer com o solo quer com a água.

Segundo Aydilek *et al.* (2006), os ensaios laboratoriais indicam sempre que as concentrações dos metais analisados são geralmente inferiores aos valores estabelecidos nos Estados Unidos da América (EUA) para água de consumo humano.

A maioria dos estudos, da literatura consultada realizados no âmbito da lixiviação de metais, são ensaios de percolação e/ou ensaios de campo. Os ensaios de percolação permitem que se crie em laboratório condições mais próximas às condições reais, mas constituem no entanto ensaios mais complexos de executar. Os ensaios de campo permitem monitorizar a lixiviação de metais em situações concretas onde foram aplicados pneus ou fragmentos de pneus.

Os ensaios de percolação e os ensaios de campo serviram de ponto de partida para a presente investigação e foram indicativos da lixiviabilidade dos pneus ou dos fragmentos de pneus, apontando as concentrações dos metais Fe, Zn, Al e Mn como aquelas que se destacavam na concentração do lixiviado (GeoSyntec Consultants, 2008 e 1998; Aydilek *et al.*, 2006; EEDMS/EOS, 2005; Rowe e McIsaac, 2005; Edeskär, 2004; Humphrey e Katz, 2000 e 2001). Os autores anteriormente referidos efectuaram essencialmente comparações entre os valores das concentrações dos metais obtidos nos estudos com os valores estabelecidos em documentos normativos relativos aos parâmetros da qualidade da água. Geralmente, os valores estabelecidos não eram ultrapassados, à excepção dos metais Fe e Mn, nos estudos destes autores.

Para determinar as características de lixiviação de qualquer produto, tal como é o caso dos *chips* de pneus, são utilizados frequentemente ensaios de *batch* (ou por contacto). Estes testes são vulgarmente aplicados pela sua simplicidade e por serem referenciados por alguns documentos normativos, como é o caso da Directiva Aterros – Directiva nº 1999/31/CE, através da Norma Europeia EN 12457/4, para a classificação de resíduos em inertes, não

perigosos e perigosos. Não obstante, a relação sólido/líquido (L/S) utilizada no ensaio (i.e. a massa de *chips* de pneus e o volume de líquido), a duração do ensaio e a extracção do líquido variam de investigação para investigação (Edil, 2008), tornando-se por vezes difícil a comparação dos resultados.

Além dos estudos efectuados até à data, a Directiva-Quadro de Resíduos – Directiva nº 2008/98/CE do Parlamento e do Conselho de 19 de Novembro de 2008, pretende também fomentar o uso de pneus usados, estando inclusive previsto o fim de estatuto de resíduo para os pneus (conforme o disposto no artigo 6º), mediante determinadas condições que ainda não se encontram definidas. O fim de estatuto de resíduo permitirá a alguns resíduos serem promovidos a produtos de elevada qualidade, estando inerente a definição de requisitos mínimos técnicos e ambientais. Pretende-se deste modo facilitar e promover a reciclagem, assegurando a protecção ambiental, reduzindo o consumo de recursos naturais e a quantidade de resíduos para eliminação (JRC, 2008).

## **1.2. Objectivo**

O objectivo da presente dissertação é avaliar do ponto de vista ambiental a utilização de *chips* de pneus em aterros como substituto de agregado natural (e.g. brita calcária), através do estudo de lixiviação de metais em ensaios laboratoriais.

## **1.3. Metodologia**

Foram efectuados ensaios laboratoriais com testes de lixiviação com ensaios de *batch* (ou por contacto) de metais com uma relação L/S 10, com o intuito de verificar de que forma os *chips* de pneus influenciam a qualidade da água. Foram também realizados testes de lixiviação de metais ao material inerte, brita calcária, material vulgarmente utilizado como agregado natural a aplicar em camadas drenantes, para que este constituísse um elemento comparativo. Para ambos os materiais, os ensaios realizaram-se em meio neutro (e.g. tendo em consideração que as águas pluviais que poderão entrar em contacto com a camada de selagem de um aterro terão um valor aproximado de pH neutro), mas também em meio ácido e em meio básico, de forma a verificar se existiam alterações significativas pelo facto de se submeter estes materiais a condições mais adversas.

Através deste estudo pretendeu-se verificar se os *chips* de pneus cumprem os requisitos dispostos no Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto, e que estes não constituem um perigo

para a saúde humana e/ou para o ambiente.

#### **1.4. Organização da Dissertação**

A presente dissertação é constituída por 5 capítulos, que se apresentam seguidamente de forma resumida.

No **Capítulo 1** descreve-se a problemática e o enquadramento da aplicação de *chips* de pneus em aterros, tendo em consideração a importância desta temática. São ainda abordados alguns dos estudos efectuados tendo em consideração ensaios de campo, ensaios de percolação e de contacto, e alguns dos principais resultados no que concerne à lixiviação de metais. Descreve-se ainda a metodologia adoptada de forma a que o objectivo proposto seja alcançado.

O **Capítulo 2** aborda os pneus como material e como fluxo de resíduos de pneus usados, nomeadamente a constituição dos pneus e respectivas propriedades físicas e químicas, o fluxo de resíduos de pneus a nível mundial, o enquadramento legal deste fluxo de resíduos, os sistemas de gestão de pneus usados e o Sistema de Gestão de Pneus Usados (SGPU) da Valorpneu, os principais destinos dos pneus usados, o fim de estatuto de resíduo previsto na Directiva-Resíduos, a aplicação de *chips* de pneus em aterros como material substituto de agregados naturais, e, o Projecto no Aterro da Amarsul em Palmela.

No **Capítulo 3** descrevem-se os materiais e métodos utilizados de forma a alcançar o objectivo proposto para a presente investigação. Deste modo são referidos os procedimentos para a colheita das amostras, caracterizam-se as amostras utilizadas nos ensaios laboratoriais, e, são descritos os procedimentos laboratoriais.

No **Capítulo 4** apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. É neste capítulo que é feita a discussão dos resultados. Neste capítulo procede-se a uma comparação entre os valores obtidos na lixiviação *chips* de pneus e da brita calcária. São comparados os resultados de ambos os materiais com os valores estabelecidos no Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto para a classificação de resíduos inertes. Tendo em consideração a relação L/S utilizada neste estudo, procede-se também à análise dos resultados comparando com os valores estabelecidos em normativos legais referentes à qualidade da água para consumo humano.

Por último, no **Capítulo 5** apresentam-se as considerações finais do projecto desenvolvido, bem como sugestões para trabalho futuro que permitam aprofundar esta temática e consolidar

a viabilidade de aplicação de *chips* de pneus como substituto de agregados naturais em aterros ou outro tipo de obras geotécnicas.

Em anexo apresenta-se um quadro com as entidades gestoras de pneus usados, os resultados obtidos (incluindo brancos e tomas), duas especificações técnicas da Recipneu e a calibração do equipamento de espectroscopia de emissão atómica.

## 2. Pneus

Um pneu é um artigo de borracha que apresenta uma estrutura complexa e tem como principais funções: (1) transmitir à estrada a força do motor necessária à propulsão (a força de tracção e de travagem à superfície da estrada e mudar e manter a direcção em que o veículo se desloca), garantindo a sustentação do veículo sobre o solo; (2) amortece o desnivelamento do pavimento da estrada, assegurando desta forma o conforto na condução; e (3) serve também como um recipiente para manter o ar sob pressão (Basel Convention, 1999).

A composição dos pneus varia consoante o seu tipo (e.g. pneu de bicicleta, pneu de automóvel ligeiro ou de pesado, pneu de equipamento agrícola ou equipamento industrial) e o seu fabricante (Sharma e Reddy, 2004), sendo produzidos por uma grande variedade de fabricantes e estarem em desenvolvimento e investigação permanentes (Roque *et al.*, 2009).

De uma forma genérica, o pneu (Figura 2.1) é constituído pelos seguintes componentes (Valorpneu, 2009):

- uma capa de borracha sintética muito estanque ao ar, sendo que esta capa se encontra no interior do pneu e funciona como câmara-de-ar;
- a carcaça, que é constituída por finos cabos de fibras têxteis dispostas em ângulos rectos e colocados na borracha; a carcaça garante ao pneu resistência e flexibilidade; os cabos são um elemento chave da estrutura do pneu e permitem-lhe resistir à pressão; numa carcaça de pneu de automóvel existem cerca de 1400 cabos que podem resistir, cada um, a uma força de 15 kg;
- um talão cuja função é transmitir os binários do motor e de travagem da jante à área de contacto com o solo;
- os aros de talão servem para fixar o pneu na jante; estes podem suportar até 1800 kg sem risco de ruptura;
- os flancos de borracha macia protegem o pneu contra os choques que poderiam causar danos na carcaça, como pequenos choques contra o passeio, buracos, entre outros; uma borracha dura assegura a ligação entre o pneu e a jante;

- as lonas de reforço são constituídas por cabos de aço muito finos mas muito resistentes, são cruzadas obliquamente e coladas uma sobre a outra; o cruzamento dos seus fios com os da carcaça forma triângulos indeformáveis;
- a banda de rolamento é disposta sobre as lonas de reforço; esta parte do pneu, que receberá as esculturas, ficará em contacto com a estrada; na área de contacto com o solo, a banda de rolamento tem que resistir a esforços muito importantes; a mistura que a constitui deve ser aderente em todos os tipos de solos, resistir ao desgaste, à abrasão, e aquecer o menos possível.

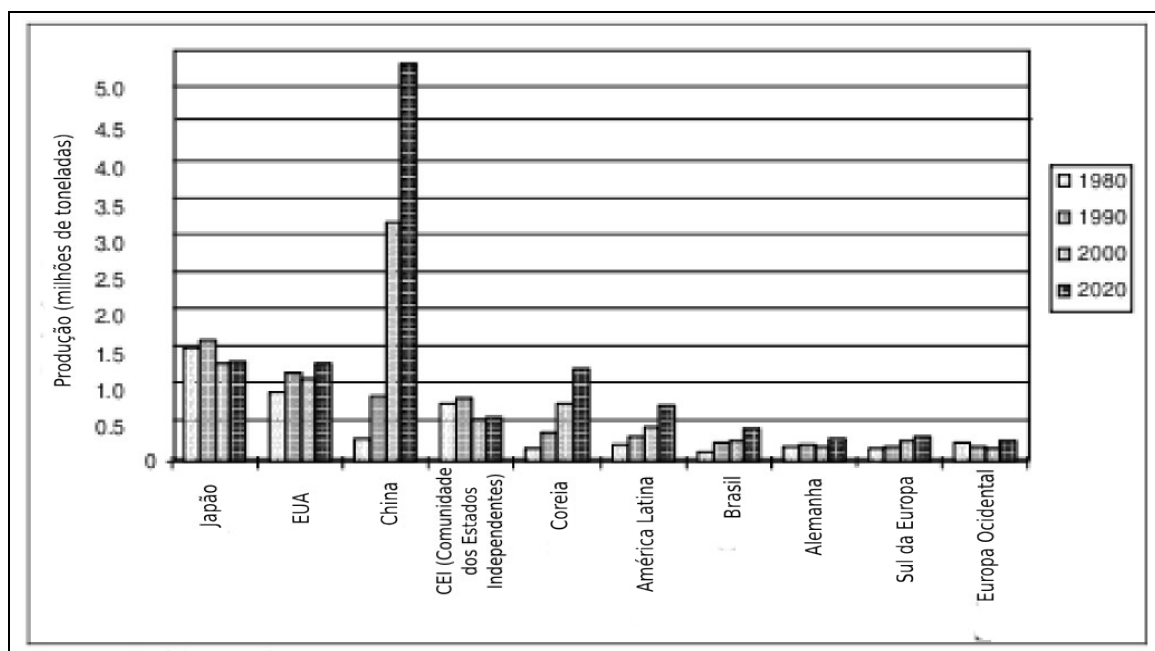


**Figura 2.1** - Constituição de um pneu (adaptado de Valorpneu, 2009)

Os pneus são artigos projectados e manufacturados para resistir a condições ambientais adversas, de forma a que sejam um material durável e seguro aquando o seu uso num veículo (Sharma e Reddy, 2004).

A nível da produção mundial de pneus, o domínio neste mercado pertence à China, sendo que se prevê um aumento da produção de pneus neste país. Dos restantes produtores, elecam-se por ordem decrescente de produção (Figura 2.2): Japão, EUA, Coreia, Comunidade dos Estados Independentes<sup>1</sup>, América Latina, Brasil, Alemanha, Sul da Europa e Europa Ocidental (van Beukering, 2005).

<sup>1</sup> Organização criada em Dezembro de 1991 que agrupou inicialmente 11 repúblicas da antiga URSS (Arménia, Azerbaijão, Bielorrússia, Cazaquistão, Quirguízia, Moldávia, Usbequistão, Rússia, Tajiquistão, Turquimenistão e Ucrânia). O Turquimenistão saiu da Comunidade em 2005. A Geórgia aderiu à Comunidade em 1993 e saiu da Comuidade em 2009.



**Figura 2.2** - Produção de pneus a nível mundial, no período 1980-2020 (adaptado de van Beukering, 2005)

Os pneus dos veículos ligeiros e pesados representam cerca de 85% do número total de pneus manufacturados (Basel Convention, 1999), sendo muitas das vezes a classificação de pneus limitada a estes dois tipos de pneus. Nos EUA, a U.S. Rubber Manufacturing Association (RMA) identifica três tipos de pneus: pneus de veículos ligeiros, pneus de veículos semi-pesados<sup>2</sup> e outros pneus de veículos pesados (R.W. Beck, 2005).

Os pneus variam em termos de *design*, construção e peso total, consoante a sua dimensão e a utilização a que se destina (Tabela 2.1) – e.g. na Europa um pneu de um veículo ligeiro tem cerca de 6,5 kg enquanto que o peso de um pneu de um veículo pesado tem cerca de 53 kg (Basel Convention, 1999).

<sup>2</sup> Em inglês *light truck*, que inclui veículos tais como *pickups*, carrinhas, SUV (*sport utility vehicle*), que não apresentem um peso superior a 3,855 toneladas.

**Tabela 2.1:** Pesos de pneus por categoria (Basel Convention, 1999)

Tipo de Veículo	Peso aproximado por unidade (kg)	Unidades aproximadas por tonelada
Veículo leveiro	+/- 6,5 a 9,0	+/- 100 a 154
Veículo semi-pesado	11	91
Veículo pesado	50	20
Outros veículos pesados	+/- 55 a 80	+/- 12 a 18
Veículos agrícolas	100	10

No que se refere à composição dos pneus, podem distinguir-se os pneus de veículos ligeiros e de veículos pesados, conforme consta na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2:** Composição dos pneus de veículos ligeiros e pesados (Basel Convention, 1999)

Material	Veículos Ligeiros (%)	Veículos Pesados (%)
Borracha/Elastómeros	47	45
Negro de fumo*	21,5	22
Metal	16,5	25
Têxtil	5,5	-
Óxido de Zinco	1	2
Enxofre	1	1
Aditivos	7,5	5

\* nalguns tipos de pneus o negro de fumo pode ser substituído por sílica

De uma forma geral, os pneus são constituídos maioritariamente por borracha natural e borracha sintética (mistura de polímeros vulcanizados ou de polímeros com ligações cruzadas), que no caso dos pneus dos veículos ligeiros representa cerca de 47% do peso do pneu enquanto que no caso dos veículos pesados os pneus apresentam cerca de 45% do seu peso em borracha (Edeskär 2006; Basel Convention, 1999). Refere-se também que no caso da relação entre borracha natural e borracha sintética, geralmente os pneus de veículos pesados apresentam geralmente uma percentagem maior em borracha natural do que os pneus de veículos ligeiros (van Beukering, 2005). Os pneus são também constituídos por metais, sendo que a percentagem de metal utilizada em pneus de veículos pesados é largamente superior do que a utilizada no fabrico de pneus para veículos ligeiros (van Beukering, 2005; Basel Convention, 1999). O têxtil, o aço e o negro de fumo constituem o principal reforço do pneu,

sendo que a proporção destes constituintes é diferente consoante se trate de um pneu de veículos ligeiros ou um pneu de veículos pesados (Edeskär, 2006; van Beukering, 2005). Os cabos de aço são muitas vezes revestidos a bronze e a metal (Rowe e McIsaac, 2005). O têxtil é geralmente constituído à base de seda, poliamida (nylon) e poliéster (Roque *et al.*, 2009; Edeskär, 2006). O negro de fumo além de reforçar a borracha, confere também ao pneu resistência à abrasão (Edil, 2008).

Dos aditivos químicos, o mais importante é o óxido de zinco, que funciona como activador de cura no fabrico de pneus, aquando o processo de vulcanização da borracha (van Beukering, 2005).

Existem ainda outros aditivos químicos, em percentagens reduzidas, com funções determinadas, tais como: agentes de reforço (sílica ou resina), agentes curativos (enxofre), agentes amaciadores e diluentes (óleos), antidetergentes (parafina), agentes resistentes à idade (antioxidantes), outros activadores de cura (ácido esteárico, óxido de chumbo), e pigmentos (dióxido de titânio) (Rowe e McIsaac, 2005).

Os pneus contém cerca de 1,5% de elementos ou componentes que constam do Anexo I da Convenção de Basileia<sup>3</sup> (1999), sendo que apesar de apresentarem concentrações muito reduzidas, são consideradas como resíduos perigosos (Tabela 2.3). São exemplo de resíduos que poderão fazer parte da constituição de um pneu (Edeskär, 2004): (1) o cádmio e o chumbo que constituem impurezas provenientes do óxido de zinco; e , (2) o cobre, o zinco e o ácido esteárico.

**Tabela 2.3:** Componentes de pneus que constam no Anexo I da Convenção de Basileia (Basel Convention, 1999)

Constituinte	Nomenclatura química	Observações	% por peso
Y22	Compostos de cobre	Constituinte da liga metálica	~ 0,02
Y23	Compostos de zinco	Óxido de zinco, retido na mistura de borracha	~ 1
Y26	Cádmio	Vestígios de compostos de cádmio no óxido de zinco	Máx. 0,001
Y31	Chumbo e compostos de chumbo	Vestígios de compostos de cádmio no óxido de zinco	Máx. 0,005
Y34	Soluções ácidas ou ácidos em estado sólido	Ácido esteárico, em estado sólido	~ 0,3
Y45	Compostos organohalogenados	Borracha butil-halogenada (tendência a diminuir)	Contendo halogéneos Máx 0,10

3 Convenção de Basileia (Basel Convention), relativa ao controlo dos movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e à sua eliminação, entrou em vigor a nível internacional a 5 de Maio de 1992 e Portugal é parte desde 11 de Maio de 1994 (APA, 2008b).



## **2.1. Pneus Usados**

Desde que se estabeleceu a civilização humana, as actividades antropogénicas desenvolvidas para satisfazer as necessidades das populações têm causado impactos directos no ambiente (Borrego *et al.*, 2009).

Os pneus apresentam um papel fundamental na contribuição para o transporte de bens e de pessoas (Dias e Santos, 2008). A sociedade de consumo e o aumento progressivo do uso automóvel fez conseqüentemente aumentar o número de pneus que carecem de uma gestão adequada em todo o mundo. De acordo com o Regime Geral de Gestão de Resíduos, estabelecido no Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, existe uma consciência cada vez mais clara de que a responsabilidade pela gestão de resíduos deve ser partilhada pelo todo da colectividade: do produtor de um bem ao cidadão consumidor, do produtor do resíduo ao detentor, dos operadores de gestão às autoridades administrativas reguladoras.

Como qualquer outro material, os pneus têm um tempo de vida útil limitado, pelo que em todo o mundo os pneus usados constituem um problema ambiental (Dias e Santos, 2008). Após a sua utilização, os pneus mantêm a sua composição química, sendo que a degradação requer centenas de anos (Reddy e Marella, 2001). Além disso, este tipo de resíduos criam alguns problemas quer a nível de gestão dos pneus usados no que concerne à sua eliminação (e.g. dimensão) quer pelos problemas de saúde pública que poderão estar associados. Estes problemas são característicos de países que permitem a deposição de pneus usados em aterro e/ou à deposição ilegal de pneus ao “ar livre”. Deste modo, destacam-se os problemas ambientais que têm vindo a causar preocupação e que para os quais se tem vindo a fomentar alternativas à deposição de pneus usados quer em aterro quer ao “ar livre”:

- os pneus usados constituem recursos que podem ser valorizados ambiental e economicamente, e que desta forma estão a ser desperdiçados (WBCSD, 2008; Levy *et al.*, 2002);
- devido às dimensões dos pneus e ao facto de a percentagem de vazios na sua constituição ser elevada (cerca de 75% de um pneu inteiro é espaço vazio), diminuem drasticamente a vida útil do aterro, constituindo um material não biodegradável (Shalaby e Khan, 2005);

- instabilidade física do aterro resultante da introdução de resíduos que demoram mais tempo a decompor-se e que resistem à compactação (Levy *et al.*, 2002)
- se os pneus forem colocados inteiros em aterros onde sejam depositados resíduos biodegradáveis, os pneus poderão acumular biogás proveniente dos resíduos biodegradáveis, podendo resultar em prejuízos na camada de topo aquando a subida dos pneus através das camadas de resíduos, danificando toda a estrutura do aterro (Ferrão *et al.*, 2008; Amoozegar e Robarge, 1999);
- apesar dos pneus não entrarem em combustão espontânea, o armazenamento de pneus ao ar livre acarreta o risco de incêndio (Leff *et al.*, 2007; Edeskär, 2006; Shalaby e Khan, 2005; Siddique e Naik, 2004; Liu *et al.*, 1998;), que caso ocorra é difícil de controlar e de extinguir (Lisi *et al.*, 2004), estando associados problemas da qualidade do ar advindos destes incêndios (emissão de negro de fumo, compostos orgânicos voláteis, compostos orgânicos semi-voláteis, hidrocarbonetos polinucleares aromáticos, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogénio, e partículas tais como arsénio, cádmio, crómio, zinco, ferro, chumbo, entre outros), bem como custos associados à gestão da qualidade da água e do solo (WBCSD, 2008; Liu *et al.*, 1998);
- os pneus usados inteiros, devido à sua forma côncava, permitem a acumulação de água no seu interior e desta forma promovem a proliferação de vectores de doença (e.g. mosquitos) (Ferrão *et al.*, 2008; Leff *et al.*, 2007; Shalaby e Khan, 2005; Lisi *et al.*, 2004; Siddique e Naik, 2004; Reddy e Marella, 2001; Bernal *et al.*, 1996), podendo haver riscos para a saúde humana, nalguns casos riscos de doenças fatais tais como a febre do Nilo, febre de dengue ou a malária (WBCSD, 2008).

Não obstante, a deposição em aterro ou a deposição ao ar livre, legal ou ilegal, ainda constitui um dos destinos a que muitos países recorrem, como é possível constatar pela análise da Tabela 2.4.

**Tabela 2.4:** Destinos Pneus Usados (adaptado de WBCSD, 2008)

	Ano	Pneus em fim de vida/ano <sup>1</sup> (milhões de unidades)	Destinos Pneus Usados			
			Valorização Energética (%)	Utilização em Eng. Civil ou Reciclagem (%)	Aterro, depósito ao ar livre ou outros (%)	Dados de reutilização / deposição / valorização não disponíveis (%)
EUA	2005	292	53	33	14	-
Europa	2006	250	41	43	16	-
China	s.d. <sup>2</sup>	112	-	-	-	100
Japão	2006	80	70	15	15	-
México	2004	30	0	90	10	-
Brasil	s.d. <sup>2</sup>	27	69	14	18	-
Coreia do Sul	2003	23	77	16	7	-
Canadá	2003	22	20	75	5	-
Austrália	2006	20	22	8	70	-
Malásia	s.d. <sup>2</sup>	14	-	-	-	100
África do Sul	2003	12	-	-	-	100
Irão	2006	10	-	-	-	100
Israel	2003	7	-	-	-	100
Nova Zelândia	s.d. <sup>2</sup>	4	0	15	85	-

<sup>1</sup> Exclui exportação e recauchutagem

<sup>2</sup> s.d. - sem data

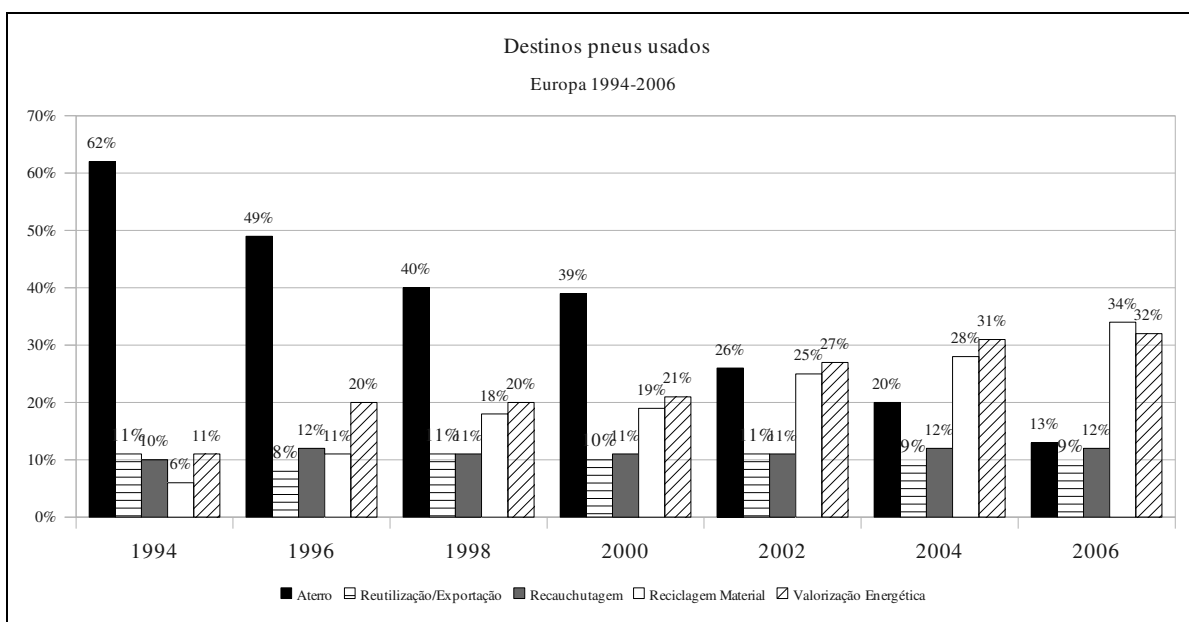
Segundo a *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 2008), os EUA constituem o maior produtor de pneus em fim de vida (292 milhões de pneus/ano), seguido da Europa (250 milhões de pneus/ano), China (112 milhões de pneus/ano) e Japão (80 milhões de pneus/ano). A *European Tyre and Rubber Manufacturers Association*<sup>4</sup> (ETRMA, 2007) apresentou as seguintes taxas de recolha de pneus usados: (1) EUA 82% em 2005; (2) Japão 88% em 2005; (3) Europa 87% em 2006; e, (4) a União Europeia a 15 89% em 2006.

No que diz respeito aos destinos dos pneus em fim de vida, destacam-se algumas imposições legais que poderão estar relacionadas com o facto de serem preferidas alternativas de gestão de pneus usados em detrimento da deposição em aterro. Destacam-se as seguintes medidas: (1) proibição da deposição de pneus usados em aterros na União Europeia, preconizada pela

4 Até 2006 designada de BLIC (*Bureaux de Liason des Industries du Caoutchouc*).

Directiva nº 1999/31/CE, do Conselho de 26 de Abril relativa à deposição em aterros; (2) proibição de deposição de pneus usados em 11 estados dos EUA; (3) 31 estados dos EUA apenas aceitam para deposição em aterro fragmentos de pneus; (4) no Canadá 3 províncias proíbem a deposição de pneus usados em aterro; e (5) na Austrália, a deposição em aterro de pneus usados pressupõe o pagamento de taxas de deposição, enquanto que se os pneus usados foram reciclados ficam isentos do pagamento de qualquer tipo de taxa (WBCSD, 2008).

Relativamente à Europa constata-se que no período de 1994 a 2006 a opção da deposição em aterro diminuiu consideravelmente (62% em 1994 e 13% em 2006) enquanto que opções como a reciclagem (6% em 1994 e 34% em 2006) e a valorização energética (11% em 1994 e 32% em 2006) têm aumentando (Figura 2.3) (ETRA, 2008; ETRMA, 2007). A recauchutagem apresenta valores que se têm vindo a manter relativamente constantes como é possível constar pela análise da Figura 2.3.



**Figura 2.3** - Destinos de pneus usados na Europa (adaptado de ETRMA, 2007 e ETRA, 2008)

Salienta-se o facto das entidades gestoras poderem constituir um dos factores que permitem aferir os resultados apresentados, visto que em 1994 não existia nenhuma entidade, no período de 1996 a 2000 existiam três entidades gestoras, em 2002 as entidades gestoras aumentaram para cinco, em 2004 aumentaram para oito, e em 2006 existiam treze (ETRMA, 2007).

No caso da União Europeia, a tendência dos Estados-Membros depositarem pneus usados em aterro tenderá a ser nula, sendo que alguns países apresentaram em 2006 taxas de 100% de pneus geridos e tratados através da reutilização ou valorização, tais como a Alemanha, a Áustria, a Bélgica, a Dinamarca, a Finlândia, a Holanda, Portugal, a Suécia, a Hungria, a Eslováquia e a Noruega (Tabela 2.5).

**Tabela 2.5:** Destinos Pneus Usados na Europa em 2006 (adaptado de ETRMA, 2007)

Resultados (KToneladas)	Pneus Usados				Pneus em fim de vida			Pneus Usados Tratados (%)
	Recolha	Reutilização	Exportação	Recauchutagem	Reciclagem	Valorização Energética	Aterro e outros	
União Europeia a 15								
Alemanha	585	15	51	59	139	321	-	100
Áustria <sup>E</sup>	55	-	3	3	21	28	-	100
Bélgica	64	-	2	5	28	29	-	100
Dinamarca	46	-	3	4	40	-	-	100
Espanha	321	1	11	40	60	35	174	46
Finlândia <sup>E</sup>	44	-	-	2	30	-	-	100
Grécia	51	1	1	4	37	4	5	92
Holanda	47	8	-	4	27	8	-	100
Irlanda <sup>E</sup>	51	5	1	3	-	-	42	18
Itália	393	30	35	55	105	145	23	94
Portugal	89	1	-	23	43	22	-	100
Reino Unido <sup>E</sup>	486	33	35	57	254	74	33	93
Suécia	88	-	4	16	34	34	-	100
União Europeia a 12								
Bulgária <sup>E</sup>	-	-	-	-	-	-	21	0
Chipre <sup>E</sup>	7	-	-	-	-	-	7	0
Croácia <sup>E</sup>	18	-	-	-	-	-	18	0
Eslováquia	35	-	10	2	21	2	-	100
Eslovénia <sup>E</sup>	18	-	-	4	-	-	14	22
Estónia <sup>E</sup>	13	-	-	2	-	8	3	77
Hungria	42	-	-	-	19	23	-	100
Letónia <sup>E</sup>	13	-	-	2	-	8	3	77
Lituânia <sup>E</sup>	13	-	-	2	-	8	3	77
Malta <sup>E</sup>	1	-	-	-	-	-	1	0
Polónia	160	-	-	22	24	88	26	84
República Checa <sup>E</sup>	61	-	-	12	-	19	30	51
Roménia	48	4	-	1	7	22	14	71
Europa								
Noruega	43	-	2	-	28	13	-	100
Suíça	54	-	14	7	-	25	8	85
Total UE 15	2 789	107	175	332	1 034	845	285	89
(%)	100	4	6	12	37	30	10	
Total Europa	3 238	110	185	380	1 105	1 023	425	87
(%)	100	3,4	5,7	11,7	34,1	31,6	13,1	

<sup>E</sup> - Estimativa

Em termos médios constata-se que na União Europeia a 15 em 2006, 89% de pneus em fim de vida foram tratados, 10% corresponderam à deposição em aterro e outros, cerca de 37% corresponderam à reciclagem material dos pneus em fim de vida e 30% à valorização energética. A recauchutagem correspondia a 12%, a exportação a 6% enquanto que a reutilização dos pneus para outros fins apresentava uma taxa de 4%.

Se forem considerados os 27 países que constituem actualmente a União Europeia juntamente com a Noruega e a Suíça, os valores médios da Europa em 2006 são geralmente inferiores aos anteriormente apresentados para a União Europeia a 15, como é possível constatar pela análise da Tabela 2.5. Assim, em termos médios em 2006, 87% dos pneus foram tratados. No caso dos pneus em fim de vida, 34,1% tiveram como destino a reciclagem material. A taxa de deposição em aterro ou outros e a taxa de valorização energética constituíram as taxas em termos de média europeia que apresentam valores superiores à média da União Europeia a 15. À deposição em aterro e outros, correspondeu a taxa de 13,1% e à valorização energética uma taxa de 31,6%. Relativamente à recauchutagem, reutilização para outros fins e exportação, os valores médios foram similares à União Europeia a 15. Em termos de média europeia cerca de 11,7% dos pneus tiveram como destino a recauchutagem. 3,4% dos pneus tiveram como destino a reutilização para outros fins e cerca de 5,7% dos pneus foram exportados.

Todos os Estados-Membros têm desenvolvidas ou em desenvolvimento políticas de gestão de resíduos a nível nacional, em conformidade com a legislação comunitária, através das Directivas ou Decisões, que são obrigados a transpor para o Direito Jurídico Interno.

Em Portugal, a classificação dos resíduos é efectuada tendo em consideração o local e/ou actividade em que os resíduos são gerados (e.g. resíduo agrícola ou resíduo proveniente da exploração agrícola e/ou pecuária ou similar, resíduo industrial ou resíduo gerado em processos produtivos industriais bem como o que resulta de actividades de produção e distribuição de electricidade gás e água), tal como previsto no Decreto-Lei nº178/2006, de 5 de Setembro.

Os pneus usados, à semelhança das embalagens, electrodomésticos, pilhas, acumuladores ou solventes, fazem parte de um fluxo de resíduos, ou seja, constituem o tipo de componente de uma categoria de resíduos transversal a todas as origens.

### 2.1.1. Enquadramento legal

Torna-se importante efectuar uma breve abordagem da legislação comunitária e nacional vigente, directa ou indirectamente relacionada com a gestão de pneus usados, estando esta abordagem dividida em enquadramento geral e enquadramento específico.

Em termos de enquadramento legal geral destacam-se:

- a Directiva nº 2008/98/CE, do Parlamento e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008;
- o Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro;
- a Portaria nº 209/2004, de 3 de Março;
- a Portaria nº 335/97, de 16 de Maio;
- a Directiva nº 2000/53/CE, do Parlamento e do Conselho, de 18 de Setembro de 2000;
- o Decreto-Lei nº 196/2003, de 23 de Agosto; e
- o Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto.

**A Directiva-Quadro de Resíduos, a Directiva nº 2008/98/CE, de 19 de Novembro de 2008,** estabelece medidas de protecção do ambiente e da saúde humana, prevenindo ou reduzindo os impactos adversos decorrentes da geração e gestão de resíduos, diminuindo os impactos gerais da utilização dos recursos e melhorando a eficiência dessa utilização.

No que diz respeito a definições, importa destacar o que esta directiva considera como:

- resíduos, quaisquer substâncias ou objectos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer;
- valorização, qualquer operação cujo resultado principal seja a transformação dos resíduos de modo a servirem um fim útil, substituindo outros materiais que, caso contrário, teriam sido utilizados para um fim específico, ou a preparação dos resíduos para esse fim, na instalação ou no conjunto da economia;
- reciclagem, qualquer operação de valorização através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins. Inclui o reprocessamento de materiais orgânicos, mas não inclui a valorização energética nem o reprocessamento em

materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento;

- reutilização, qualquer operação mediante a qual produtos ou componentes que não sejam resíduos são utilizados novamente para o mesmo fim para que foram concebidos.

Na Directiva-Quadro de Resíduos a hierarquia da gestão de resíduos é definida da seguinte forma: (a) prevenção e redução; (b) preparação para a reutilização; (c) reciclagem; (c) outros tipos de valorização (e.g. valorização energética); e (d) eliminação.

O artigo 6º da mesma Directiva prevê o fim do estatuto de resíduo para o caso dos pneus, devendo ser tidos em consideração critérios específicos ou jurisprudência aplicável, para o estabelecimento deste estatuto, consoante decisão de cada Estado-Membro. Esta medida visa fomentar a promoção de produtos que permitam reduzir o consumo dos recursos naturais e a diminuição de resíduos para eliminação.

A presente Directiva deverá ser transposta pelos Estados Membros até 12 de Dezembro de 2010, sendo que a partir desta data serão revogadas as Directivas nº 75/439/CEE, nº 91/689/CEE e nº 2006/12/CE, sobre resíduos e resíduos perigosos, respectivamente.

A nível nacional, o **Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro** estabelece o regime geral da gestão de resíduos, transpondo para a ordem jurídica interna a Directiva nº 2006/12/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril, e a Directiva nº 91/689/CEE, do Conselho, de 12 de Dezembro.

Este diploma legal aplica-se às operações de gestão de resíduos, compreendendo toda e qualquer operação de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos, bem como às operações de descontaminação de solos e à monitorização dos locais de deposição após o encerramento das respectivas instalações.

O Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, define:

- resíduo, qualquer substância ou objecto de que o detentor se desfaz ou tem intenção de se desfazer, nomeadamente os identificados na Lista Europeia de Resíduos (LER) conforme a Portaria nº 209/2004, de 3 de Março;
- valorização, a operação de reaproveitamento de resíduos prevista na legislação em vigor: (1) utilização principal como combustível ou outros meios de produção de

energia; (2) recuperação ou regeneração de solventes; (3) reciclagem ou recuperação de compostos orgânicos que não são utilizados como solventes, incluindo as operações de compostagem e outras transformações biológicas; (4) reciclagem ou recuperação de metais e de ligas; (5) reciclagem ou recuperação de outras matérias inorgânicas; (6) regeneração de ácidos ou de bases; (7) recuperação de produtos utilizados na luta contra a poluição; (8) recuperação de componentes de catalisadores; (9) refinação de óleos e outras reutilizações de óleos; (10) tratamento no solo em benefício da agricultura ou para melhorar o ambiente; (11) utilização de resíduos obtidos em virtude das operações enumeradas de (1) a (10); (12) troca de resíduos com vista a submetê-los a uma das operações enumeradas de (1) a (11); e, (13) acumulação de resíduos destinados a uma das operações enumeradas de (1) a (12), com exclusão do armazenamento temporário, antes da recolha, no local onde esta é efectuada;

- reciclagem, o reprocessamento de resíduos com vista à recuperação e ou regeneração das suas matérias constituintes em novos produtos a afectar ao fim original ou a fim distinto; e,
- reutilização, a reintrodução, sem alterações significativas, de substâncias, objectos ou produtos nos circuitos de produção ou de consumo de forma a evitar a produção de resíduos.

Conforme o disposto no artigo 20º do Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, o fluxo de resíduos de pneus dispõe de normas técnicas de gestão de resíduos com legislação e regulamentação específica aplicáveis.

Quanto à hierarquia das operações de gestão de resíduos, o normativo em referência estabelece no artigo 7ª 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 a outras formas de valorização;
- os produtores de resíduos devem proceder à separação dos resíduos na origem de forma a promover a sua valorização em fluxos e fileiras; e,
- deve ser privilegiado o recurso às melhores tecnologias disponíveis com custos economicamente sustentáveis que permitam o prolongamento do ciclo de vida dos

materiais através da sua reutilização, em conformidade com as estratégias complementares adoptadas noutros domínios.

Por último, relativamente a este diploma legal refere-se a criação do Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos (SIRER), actualmente alterado para a plataforma Sistema Integrado da Agência Portuguesa do Ambiente (SIRAPA), que permite agregar toda a informação relativa aos resíduos produzidos e importados para o território nacional e as entidades que operam no sector de resíduos (artigo 45º do diploma legal em referência). Encontram-se sujeitos ao registo neste sistema: (1) os produtores de resíduos não urbanos que no acto da sua produção empreguem pelo menos 10 trabalhadores; (2) os operadores de gestão de resíduos; (3) as entidades responsáveis pelos sistemas de gestão de resíduos; e (4) os operadores que actuem no mercado de resíduos (artigo 48º do diploma legal em referência). O SIRAPA permite ainda reunir a seguinte informação prestada pelos intervenientes na gestão de resíduos: (1) origens discriminadas dos resíduos; (2) quantidade, classificação e destino discriminados dos resíduos; (3) identificação das operações efectuadas; e (4) informação relativa ao acompanhamento efectuado, contendo os dados recolhidos através de meios técnicos adequados (conforme o disposto no artigo 49º).

A Lista Europeia de Resíduos (LER) consta na **Portaria nº 209/2004, de 3 de Março**, assegurando a harmonização do normativo vigente em matéria de identificação e classificação de resíduos, tendo ainda previsto facilitar um perfeito conhecimento pelos agentes económicos do regime jurídico a que estão sujeitos.

Os pneus usados são genericamente classificados com a LER como resíduos não perigosos, estando-lhes atribuído o código de 16 01 03. Caso não sejam retirados previamente dos veículos em fim de vida (VfV) podem também fazer parte deste fluxo, sendo neste caso integrados na classificação 16 01 04. Os resíduos de pneus que sofrem algum tratamento mecânico (e.g. triagem, trituração, compactação, peletização), é-lhes atribuído o código LER 19 12 04, também considerado como resíduo não perigoso. Constam neste diploma legal as operações de eliminação e de valorização de resíduos.

O transporte de resíduos só pode ser efectuado mediante a utilização de uma Guia de Acompanhamento de Resíduos (GAR), de acordo com a **Portaria nº 335/97, de 16 de Maio** que fixa as regras a que fica sujeito o transporte de resíduos em território nacional. O artigo 6º deste diploma legal define a GAR Modelo A de aplicação universal (à excepção do Modelo B

que se aplica ao transporte de Resíduos Hospitalares Perigosos definida no diploma legal em referência e à Guia de Acompanhamento de Resíduos de Construção e de Demolição, aprovada pela Portaria nº 417/2008, de 11 de Junho). De acordo com o estabelecido neste artigo, a GAR deve ser preenchida em triplicado e observar os seguintes procedimentos: (1) o produtor de resíduos deve preencher o campo 1, verificar o preenchimento pelo transportador, do campo 2, nos três exemplares da GAR, e reter um deles; (2) o transportador deve fazer acompanhar os resíduos pelos dois exemplares restantes da GAR, obter do destinatário o preenchimento do campo 3, deixar-lhe um dos exemplares e reter o exemplar restante; (3) o destinatário deve devolver ao produtor ou anterior detentor, e no prazo de 30 dias, uma cópia do seu exemplar, devidamente preenchida; e (4) o produtor ou detentor, o transportador e o destinatário dos resíduos devem manter em arquivo os seus exemplares da GAR por um período de cinco anos. Apenas os pneus usados encaminhados para reutilização não são considerados resíduos na acepção da alínea u) do Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, pelo que não é necessário que o seu transporte seja acompanhado de GAR referidas na Portaria nº 335/97, de 16 de Maio. De acordo com a alínea ee) do Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, entende-se por reutilização, como referido anteriormente, a reintrodução, sem alterações significativas, de substâncias, objectos ou produtos nos circuitos de produção ou de consumo de forma a evitar a produção de resíduos.

O **Decreto-Lei nº 196/2003, de 23 de Agosto** estabelece o regime jurídico a que fica sujeita a gestão de veículos e de veículos em fim de vida (VFV) transpondo para o ordenamento jurídico interno a **Directiva nº 2000/53/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho de 18 de Setembro**. Este diploma não invalida a aplicação relativa a segurança, emissões para a atmosfera, controlo do ruído, protecção do solo e das águas e gestão de óleos usados, de acumuladores usados e de pneus usados.

Este diploma legal tem como principal objectivo a prevenção da produção de resíduos provenientes de veículos e a promoção da reutilização, da reciclagem e de outras formas de valorização de VFV. Como objectivos consequentes e acessórios, o diploma comunitário estabeleceu a redução da quantidade de resíduos a eliminar e a melhoria do desempenho ambiental de todos os operadores intervenientes durante o ciclo de vida dos veículos, sobretudo daqueles directamente envolvidos em operações de tratamento de VFV. Os objectivos enunciados, sendo genericamente válidos para a globalidade dos resíduos,

constituem também uma condição indispensável para um desenvolvimento sustentável.

A nível europeu não existe legislação específica referente à gestão de pneus usados. Apenas a **Directiva nº 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril**, relativa à deposição de resíduos em aterros, a Directiva nº 2000/53/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de Setembro, sobre VFV de vida e a Directiva nº 2000/76/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de Dezembro, relativa à incineração de resíduos, referem, directa ou indirectamente, este fluxo (APA, 2008a).

A Directiva nº 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril, sobre deposição de resíduos em aterros, estabelece que até 16 de Julho de 2006 só podem ser depositados em aterro pneus usados fragmentados. Os restantes pneus não podem ser depositados em aterro, com excepção dos pneus de bicicleta e dos pneus com diâmetro superior a 1400mm, não estando sujeita a deposição destes últimos a qualquer limitação temporal (APA, 2008a).

O **Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto** transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva nº 1999/31/CE, de 26 de Abril, relativa à deposição em aterros, alterada pelo Regulamento (CE) nº 1882/2003, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 29 de Setembro, e aplica a Decisão nº 2003/33/CE, do Conselho de 19 de Dezembro de 2002.

Ao nível da legislação nacional, este normativo revoga o Decreto-Lei nº 152/2002, de 23 de Maio, bem como o artigo 53º referente às taxas de licenciamento de aterros do Regime Geral de Gestão de Resíduos estabelecido no Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro.

O Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e os requisitos gerais a observar na concepção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros, incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros.

Em termos de objectivos, este diploma legal visa evitar ou reduzir os efeitos negativos sobre o ambiente da deposição de resíduos em aterro, quer à escala local, em especial a poluição das águas superficiais e subterrâneas, do solo e da atmosfera, quer à escala global, em particular o efeito de estufa, bem como quaisquer riscos para a saúde humana.

A alínea d) do ponto 1 do artigo 6º mantém a proibição da deposição de pneus usados em aterros, com excepção dos pneus utilizados como elementos de protecção em aterros e dos pneus que tenham um diâmetro exterior superior a 1400 mm.

O Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril, o Decreto-Lei nº 43/2004, de 2 de Março e o Decreto-Lei nº 80/2002, de 4 de Abril são diplomas legais que constituem o enquadramento legal específico aplicado à gestão de pneus usados.

Tendo em consideração que uma política integrada de resíduos assenta prioritariamente na prevenção da sua produção e da sua perigosidade, bem como na maximização das quantidades recuperadas para valorização e na minimização dos resíduos a encaminhar para eliminação, o **Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril** surge com o objectivo de estabelecer uma hierarquia na gestão de pneus usados. Em harmonia com o Programa do XIV Governo Constitucional em matéria de qualidade ambiental, apresenta-se a hierarquia de gestão de resíduos:

- prevenção de produção dos resíduos de pneus;
- reciclagem;
- outras formas de valorização.

Conferindo prioridade à prevenção da produção destes resíduos, o diploma legal assegura no entanto a aplicação e o cumprimento da legislação aplicável em matéria de segurança e circulação rodoviária. Por outro lado, este diploma legal estabelece a proibição da combustão de pneus sem recuperação energética, nomeadamente a queima a céu aberto e o abandono dos pneus usados (conforme o disposto no artigo 5º).

Uma das medidas preconizadas neste diploma corresponde à necessidade da implementação de circuitos de recolha de pneus usados, para assegurar uma correcta triagem dos pneus passíveis de recauchutagem e encaminhamento dos restantes para reciclagem ou outras formas de valorização. Em termos de definições, apresentadas no artigo 2º, o sistema integrado consiste num sistema que pressupõe a transferência de responsabilidade, pela gestão dos pneus usados, para uma entidade gestora devidamente licenciada.

Em termos de aplicabilidade, este diploma legal destina-se a todos os pneus colocados no mercado nacional e a todos os pneus usados, conforme o disposto no artigo 1º. Estão também definidos os princípios e as normas aplicáveis à gestão de pneus e de pneus usados tendo como objectivos a prevenção da produção destes resíduos, a recauchutagem, a reciclagem e outras formas de valorização, por forma a reduzir a quantidade de resíduos a eliminar, bem como a melhoria do desempenho ambiental de todos os intervenientes durante o ciclo de vida dos pneus.

Consideram-se pneus utilizados todos aqueles que sejam provenientes de veículos motorizados, aeronaves, reboques, velocípedes e outros equipamentos, motorizados ou não motorizados, que os contenham (conforme o disposto no artigo 2º do diploma legal).

Em termos de definição de pneus usados, são considerados todos os pneus de que o respectivo detentor se desfaça ou tenha intenção de se desfazer e que constituam resíduos na acepção da alínea u) do artigo 3.º do Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, ainda que destinados a reutilização (recauchutagem).

Define-se como pneu recauchutado, o pneu usado que é objecto de processo industrial de acordo com as especificações técnicas aplicáveis, com vista à sua reutilização, sendo de novo colocado no mercado.

É definida como valorização a utilização de pneus usados para outros fins que não os iniciais, nomeadamente a reciclagem de pneus, a valorização energética, bem como a sua utilização como protecção de embarcações, molhes marítimos ou fluviais e no revestimento de suportes de separadores de vias de circulação automóvel.

Importa por último atender à definição de reciclagem apresentada por este diploma legal, como sendo o processamento de pneus usados para qualquer fim, que não o inicial, nomeadamente como matéria-prima, excluindo a valorização energética.

Em suma, este diploma legal destringe os processos de reutilização e de valorização, sendo que a reutilização apenas engloba a recauchutagem, enquanto que a valorização engloba a reciclagem, a valorização energética e a reutilização dos pneus para outros fins que não os iniciais.

Este diploma legal é alterado nos artigos 4º, 9º e 17º pelo Decreto-Lei nº 43/2004, de 2 de Março. De forma sucinta esta alteração prende-se com:

- o período de vida útil de um pneu, que passa a estar definido como quatro anos normalmente;
- clarifica o cálculo dos objectivos de gestão (indexando os objectivos de recolha e de recauchutagem ao número de pneus usados efectivamente gerados no país, em vez de considerar os pneus anualmente colocados no mercado como constava do Decreto-lei nº 111/2001 de 6 de Abril);

- introduz, nas regras de comercialização, a obrigatoriedade do valor de contrapartida financeira, “Ecovalor”, ser discriminado na factura de venda; e
- esclarece, em relação às regras de recolha de pneus usados, que cabe aos distribuidores receberem gratuitamente os pneus usados aquando da venda de pneus novos.

O **Decreto-Lei nº 80/2002, de 4 de Abril** designa a Direcção-Geral de Viação para os automóveis de mercadorias, de passageiros e respectivos reboques como a entidade nacional competente para a concessão da homologação do fabrico de pneus recauchutados em território nacional.

No mesmo diploma são definidas as infracções e respectivas sanções para a produção ou utilização de pneus recauchutados que não obedeçam às prescrições constantes dos Regulamento nº 108 (estabelece disposições uniformes relativas à homologação do fabrico de pneus recauchutados que se destinem a ser utilizados em automóveis ligeiros de passageiros ou seus reboques, aprovado pelo Decreto nº9/2002) e Regulamento nº 109 (estabelece disposições uniformes relativas à homologação do fabrico de pneus recauchutados que se destinem a ser utilizados em automóveis de mercadorias, pesados de passageiros ou respectivos reboques, aprovado pelo Decreto nº 10/2002) .

A União Europeia aderiu, através das Decisões do Conselho de 26 de Junho, nº 2001/509/CE e nº 2001/507/CE, ao Regulamento nº 108 da e ao Regulamento nº 109 da Comissão Económica para a Europa das Nações Unidas. Contudo, nestas Decisões é referido que a aplicação uniforme destes Regulamentos em toda a Comunidade será regulamentada através de uma directiva comunitária, directiva que ainda não foi publicada (APA, 2008a).

### **2.1.2. Sistemas de Gestão de Pneus Usados**

Considerando-se a legislação aplicável e a crescente preocupação e necessidade em implementar práticas ambientalmente correctas, torna-se fulcral que todos os intervenientes detenham a responsabilidade da gestão de pneus usados através de um sistema de gestão (ETRMA, 2007).

Existem essencialmente três tipos de sistemas de gestão de pneus: (1) responsabilidade do produtor; (2) sistema de taxas; e (3) mercado livre. Na Tabela 2.6 são apresentados os países

que possuem os diferentes tipos de sistemas de gestão de pneus usados.

**Tabela 2.6:** Sistemas de Gestão de Pneus Usados (adaptado de Basel Convention, 2008; ETRMA 2007; Campos, 2006)

<b>Responsabilidade do Produtor</b>	<b>Sistema de Taxas</b>	<b>Mercado Livre</b>
<b>Europa</b> (Bélgica, Espanha, Estónia, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Itália, Letónia, Lituânia, Noruega, Polónia, Portugal, República Checa, Roménia, Suécia, Turquia)	<b>Europa</b> (Dinamarca, Eslováquia, Eslovénia)	<b>Europa</b> (Alemanha, Áustria, Bulgária, Croácia, Irlanda, Reino Unido, Suíça)
<b>Brasil, Canadá</b> ( <i>British Columbia</i> ), <b>Coreia do Sul, Nigéria</b>	<b>Canadá, EUA</b> (maioria dos estados)	<b>EUA</b> (alguns estados), <b>Austrália</b>

Um sistema de gestão baseado na responsabilidade do produtor consiste na atribuição ao produtor da responsabilidade do destino dos resíduos que produz, de acordo com o princípio do poluidor-pagador (Ferrão *et al.*, 2008). Esta responsabilidade poderá ser transferida para uma entidade gestora licenciada para o efeito. A responsabilização do produtor permite colocar o ónus da gestão dos resíduos no interveniente que tem maior impacte em todo o ciclo de vida do material, incentivando alterações na concepção do produto, maximizando a poupança de matérias primas e minimizando a produção de resíduos (Braga e Morgado, 2007). Segundo o Parlamento Europeu, uma adequada implementação do princípio da responsabilidade do produtor constitui um poderoso instrumento da gestão de resíduos (Basel Convention, 2008). Braga e Morgado (2007) consideram que este sistema tem a vantagem de espoletar uma reacção em cadeia através do ciclo de produção – comércio – consumo – pós consumo, na qual cada interveniente passa uma parte da sua responsabilidade para o próximo interveniente na cadeia. Os autores encaram ainda as entidades gestoras como peças fundamentais nestes sistemas, por permitirem unir os diferentes intervenientes da cadeia com vista à prossecução de objectivos comuns.

No caso do sistema de taxas, os produtores ou consumidores pagam uma taxa ao Estado. A responsabilidade é totalmente, a partir desse momento, do Estado de cada país para a organização e para a remuneração dos operadores envolvidos na gestão dos pneus, podendo por exemplo ser implementado através da contratação de empresas operadoras que são remuneradas mediante as taxas cobradas (WBCSD, 2008).

Por último, no sistema de mercado livre, é a legislação que designa os objectivos a alcançar mas não designa o responsável pela gestão dos pneus usados. Deste modo, todos os



Industriais da Borracha [APIB] (20%) (Valorpneu, 2008b).

O Sistema de Gestão de Pneus Usados (SGPU) funciona com base no Ecovalor, que consiste numa prestação financeira que varia mediante a categoria do pneu. O Ecovalor é repercutido na cadeia de comercialização até ao cliente final aquando da venda dos pneus ou dos veículos/equipamentos que os contenham, devendo os produtores e distribuidores discriminar, num item específico a consagrar na respectiva factura, o valor correspondente (Valorpneu, 2009). As receitas da Valorpneu devem fazer face às contrapartidas devidas às entidades responsáveis pelos pontos de recolha e aos custos de transporte e tratamento dos pneus usados (Valorpneu, 2009).

O Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril estabelece a responsabilidade da recolha aos produtores de pneus, transporte e destino final adequado dos pneus usados, sendo o produtor definido como qualquer entidade que fabrique, importe ou introduza pneus novos ou em segunda-mão no mercado nacional (conforme o disposto na alínea d) do artigo 2º deste diploma legal). De notar que a comercialização de veículos (ou outros equipamentos que contenham pneus) também se encontra abrangida por esta legislação (conforme o disposto na alínea d) do artigo 2º deste diploma legal).

Como este diploma legal não estabelece a assunção individual do produtor, e sendo a Valorpneu a única entidade gestora licenciada para a gestão dos pneus usados, a responsabilidade como produtor deve ser transferida para esta entidade (Valorpneu, 2009).

No que se refere às competências definidas pelo Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril para o SGPU, destacam-se: (a) a organização da rede de recolha e transporte dos pneus usados, efectuando os necessários contratos com distribuidores, sistemas municipais e multimunicipais de gestão de resíduos sólidos urbanos ou seus concessionários ou outros operadores, a quem deverá prestar as correspondentes contrapartidas financeiras; (b) a decisão sobre o destino a dar a cada lote de pneus usados, tendo em consideração a hierarquia de princípios de gestão e os objectivos fixados pelo diploma legal no artigo 4º; e (c) a realização de contratos com os recauchutadores, recicladores e outros valorizadores para regular as receitas ou encargos determinados pelos respectivos destinos dados aos pneus.

O esquema da Figura 2.5 resume o funcionamento do SGPU gerido pela Valorpneu, podendo traduzir-se o circuito de pneus usados nos seguintes passos (Campos, 2006; Valorpneu 2006):

- a entrega do pneu pelo utilizador final, é geralmente efectuada na oficina do distribuidor; normalmente os locais onde se efectua a passagem a resíduos são os mesmos onde se vendem os novos pneus; o acto de desclassificar um pneu usado é concomitante com a colocação em marcha de um pneu novo dada a obrigatoriedade do distribuidor em receber pneus usados aquando a venda de pneus novos de substituição, desde que sejam da mesma tipologia e na mesma quantidade; os pneus usados são geralmente descartados em oficinas especializadas sem que haja mistura com outros resíduos;
- a entrega do pneu é efectuada pelos detentores num Ponto de Recolha, sem quaisquer cargos associados; este passo exige uma deslocação específica que é da responsabilidade do detentor do pneu (utilizador final a título particular, distribuidor, serviço camarário, centros de recolha e de desmantelamento de VFV, ou outras empresas e entidades), que por qualquer motivo detenha pneus usados; caso o entendam os detentores poderão ceder os pneus directamente aos recauchutadores;
- os Pontos de Recolha constituem locais devidamente autorizados ou licenciados, em consonância com a legislação aplicável, para armazenamento temporário de qualquer tipo de pneus usados e que funcionam como um reservatório a montante dos operadores do SGPU; os Pontos de Recolha permitem (a) controlar e quantificar todos os fluxos de pneus usados encaminhados para os destinos existentes; e (b) disponibilizar uma rede de recolha adequada e distribuída uniformemente pelo país;
- a distribuição, desde os Pontos de Recolha até aos vários operadores de pneus usados acreditados no sistema (recauchutadores, recicladores e valorizadores) é controlada e suportada financeiramente pelos fundos do SGPU;
- os recauchutadores poderão colocar nos Pontos de Recolha os pneus usados resultantes da triagem das carcaças para recauchutar, sem quaisquer custos associados; caso entendam, estes operadores poderão também adquirir carcaças para recauchutar nos Pontos de Recolha;
- os recicladores e os valorizadores energéticos fecham o ciclo do SGPU, recebendo os

pneus em fim de vida, mediante uma contrapartida financeira e de acordo com as metas legais estabelecidas, dando-lhes o destino adequado (recicladores, através do processo de obtenção de granulado de borracha; e os valorizadores energéticos, através do processo de obtenção de energia).

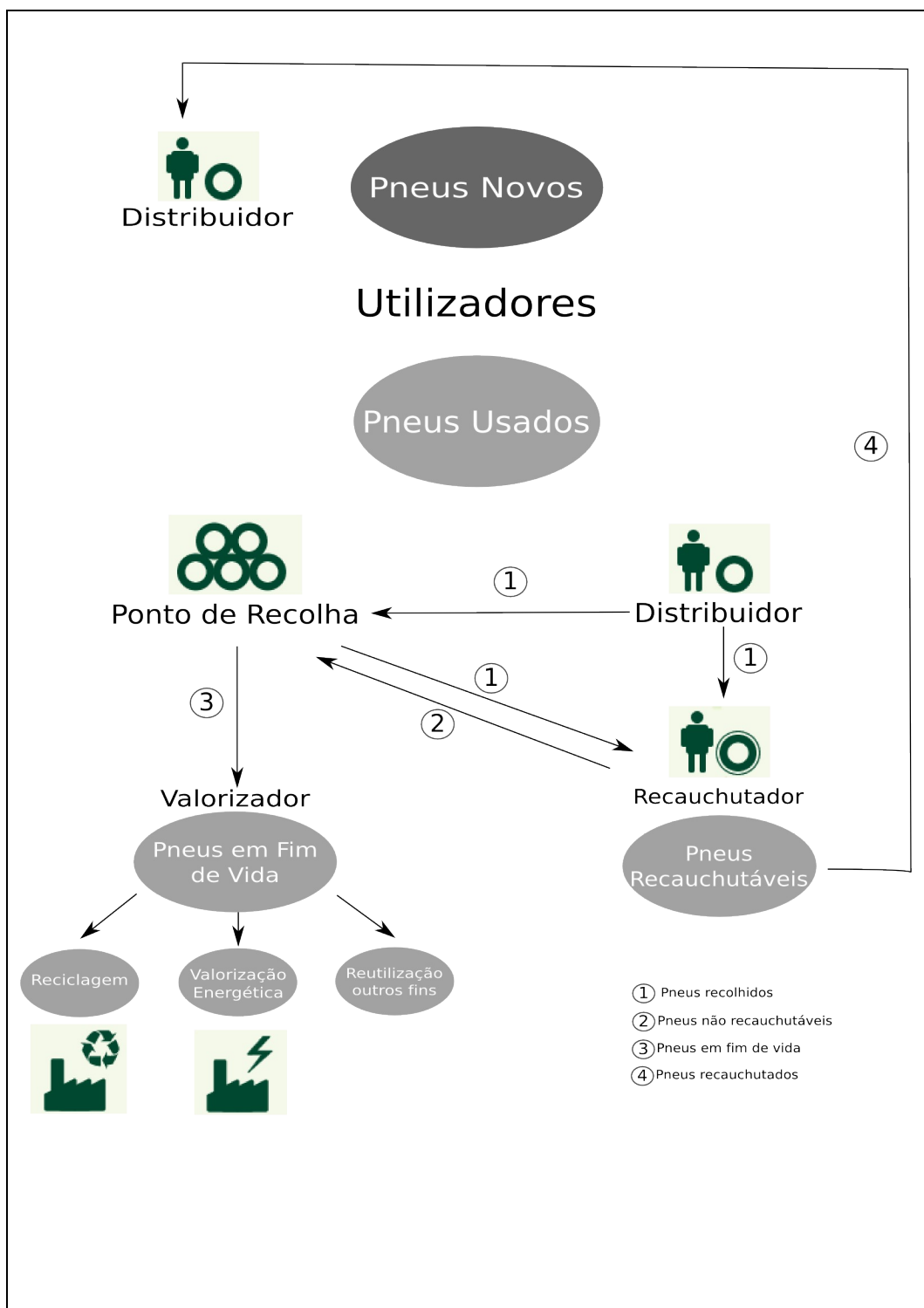


Figura 2.5 - Modelo Operacional do SGPU da Valorpneu (adaptado de Valorpneu, 2009)

Todos os pneus introduzidos no mercado nacional encontram-se abrangidos pelo SGPU gerido pela Valorpneu, sendo classificados em catorze categorias:

- pneus de veículos ligeiros de passageiros/turismo;
- pneus de veículos 4x4 “on/off road”;
- pneus de veículos comerciais;
- pneus de veículos pesados;
- pneus de veículos agrícolas (diversos);
- pneus de veículos agrícolas (rodas motoras);
- pneus de veículos industriais (com diâmetro de jante compreendido entre 8 e 15 polegadas);
- pneus maciços (com diâmetro de jante igual ou inferior a 15 polegadas);
- pneus de veículos de engenharia civil e maciços (até à dimensão 24 polegadas);
- pneus de veículos de engenharia civil e maciços (igual ou superior a 24 polegadas);
- pneus de motos (com cilindrada superior a 50cc);
- pneus de motos (com cilindrada até 50cc);
- pneus de aeronaves; e,
- pneus de bicicleta.

No que se refere ao licenciamento da Valorpneu, de acordo com o Artigo 8º do Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril, a entidade gestora, para que possa ser responsável pelo sistema integrado de gestão de pneus usados, carece de licença, a conceder por decisão conjunta dos Ministros da Economia e das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente.

A Valorpneu obteve a primeira licença a 7 de Outubro de 2002 por um prazo de cinco anos, concedida pelos Ministérios das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente e da Economia. No entanto, o funcionamento do SGPU apenas teve início no dia 1 de Fevereiro de 2003.

A Valorpneu oportunamente requereu uma nova licença para prosseguir a actividade de gestão de pneus usados. Através do Despacho nº 4948/2008, de 25 de Fevereiro de 2008, a prorrogação da licença foi atribuída à Valorpneu por decisão conjunta dos Ministros da Economia e da Inovação, do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. A prorrogação produziu efeitos a partir de 7 de Outubro de 2007 e foi concedida pelo prazo de um ano.

A 4 de Dezembro de 2008 foi atribuída nova licença à Valorpneu pelo Estado português, em vigor para o período de 2008 a 2012 (Valorpneu, 2008a). A licença contempla as definições e os princípios de hierarquia de gestão de resíduos previstos na nova Directiva-Quadro de Resíduos – Directiva nº 2008/98/CE, do Parlamento e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008 (Valorpneu, 2008b). Através do Despacho nº 19692/2009 dos Ministérios do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional e da Economia e da Inovação, de 27 de Agosto de 2009 que altera a licença concedida, a mesma vigora no período de 7 de Outubro de 2008 a 31 de Dezembro de 2013. Esta alteração prende-se com o disposto no nº 6 do artigo 7º do Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril, o qual dispõe que a transferência de responsabilidade de cada produtor para a entidade gestora é objecto de contrato escrito, com a duração mínima de cinco anos.

No que diz respeito às Regiões Autónomas, as Secretarias Regionais de Ambiente das Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores concederam o licenciamento à Valorpneu, a 17 de Janeiro de 2006 e a 1 de Abril de 2006, respectivamente (Valorpneu 2008b). Neste momento, a licença de extensão da Secretaria Regional de Ambiente da Região Autónoma da Madeira é válida no período de 12 de Agosto de 2009 a 31 de Dezembro de 2012.

Os objectivos de gestão para o período correspondente à primeira licença obtida pela Valorpneu estão definidos no Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril. Conforme o disposto no artigo 4º do diploma legal referido, deveria ser garantido:

- até 2003 (a) a cessação da deposição de pneus usados em aterro; (b) a recolha de pneus usados, na proporção de pelo menos 85% dos pneus anualmente colocados no mercado; (c) a recauchutagem de pneus usados, na proporção de pelo menos 25% dos pneus anualmente colocados no mercado; e (d) a reciclagem de pneus usados, na proporção de pelo menos 60% da totalidade dos pneus recolhidos e não recauchutados;
- e,

- até 2007 (a) a recolha de pneus usados, na proporção de pelo menos 95% dos pneus anualmente colocados no mercado; (b) a recauchutagem de pneus usados, na proporção de pelo menos 30% dos pneus anualmente colocados no mercado; e (c) a reciclagem de pneus usados, na proporção de pelo menos 65% da totalidade dos pneus recolhidos e não recauchutados.

Para o período de 2003-2008 considera-se que a Valorpneu obteve resultados elevados e satisfatórios (Tabela 2.7), face às metas estabelecidas, tendo neste período processado cerca de 528 962 toneladas de pneus usados. Este valor inclui também a gestão de um passivo ambiental correspondendo a um total de 36 953 toneladas de pneus.

Através da análise da Tabela 2.7, é possível constatar que a diferença observada entre a quantidade de pneus novos colocados no mercado, ou seja, que pagam ecovalor, e a quantidade de pneus usados gerados, diz respeito aos pneus recauchutados, que por serem reutilizados várias vezes ao longo do seu ciclo de vida, geram consequentemente várias vezes um pneu usado, que apenas contribui para o SGPU aquando a primeira colocação no mercado (Valorpneu, 2008b).

Refere-se que os valores apresentados pela Valorpneu, correspondem por vezes a valores aproximados. No entanto foram ainda detectados alguns valores que apresentam algumas diferenças, nomeadamente no que concerne à taxa de recolha no âmbito do SGPU no período de 2003 a 2008 (valor de 97,7% face ao valor da Valorpneu de 98,2%) e no que concerne aos valores inferiores das taxas de reciclagem dos anos 2004 (59,6%), 2005 (66,6%), 2006 (65,1%), 2008 (65,4%) e no período de 2003 a 2008 (66,3%).

**Tabela 2.7:** Quantidade de Pneus Usados geridos pela Valorpneu (adaptado de Valorpneu, 2008b)

<b>Resultados da Valorpneu</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2003-2008</b>
(a) Pneus usados gerados (Mg)	68 353	78 801	79 199	89 350	93 747	90 304	499 753
(a.1.) Pneus colocados no mercado (Mg) <sup>1</sup>	61 038	73 668	72 614	79 739	83 722	89 139	453 919
(b) Pneus enviados para recauchutagem (Mg)	18 429	20 538	19 808	23 304	25 421	22 317	129 816
(c) Pneus enviados para reutilização (Mg)	-	1 588	1 623	989	400	2 057	6 657
(d) Pneus enviados para reciclagem (Mg)	30 633	33 470	38 641	42 496	43 603	48 332	237 176
(e) Pneus enviados para valorização energética (Mg)	9 287	16 554	16 166	21 793	22 897	23 504	110 201
(f) Pneus enviados para aterro (Mg)	720	4 531	1 591	-	-	-	6 842
(g) Pneus usados gerados recolhidos pelo SGPU (Mg) <sup>2</sup>	59 069	76 682	77 828	88 582	92 322	96 210	490 693
(h) Passivo Ambiental							
(h.1.) Processamento de existências - valorização energética (Mg)	1 905	13 532	6 382	5 369	4 870	4 894	36 953
(h.2.) Processamento de existências - reutilização outros fins (Mg)	-	-	-	-	54	-	55
(h.3.) Processamento de existências - aterro RIB (Mg) <sup>3</sup>	-	874	389	-	-	-	1 263
(i) Quantidade total processada no SGPU (Mg) <sup>4</sup>	60 974	91 087	84 599	93 952	97 246	101 104	528 962
(j) Taxa de recolha no âmbito do SGPU (%) <sup>5</sup>	86,4	97,3	98,3	99,1	98,5	106,5	98,2
(l) Taxa de preparação para reutilização e recauchutagem (%) <sup>6</sup>	27,0	28,1	27,1	27,2	27,5	27,0	27,3
(m) Taxa de recauchutagem (%) <sup>7</sup>	30,1	27,9	27,3	29,2	30,4	25	28,3
(n) Taxa de reciclagem (%) <sup>8</sup>	75,4	61,4	68,5	66,1	65,6	67,3	67,0

<sup>1</sup> Pneus colocados no mercado pagam Ecovalor

<sup>2</sup> (b) + (c) + (d) + (e) + (f)

<sup>3</sup> RIB - Resíduos Industriais Banais

<sup>4</sup> (g) + (h)

<sup>5</sup>  $\% = (g)/(a) * 100$  | Meta 2003 - 85% | Meta 2004-2008 - 95%

<sup>6</sup>  $\% = [(b)+(c)]/(a) * 100$

<sup>7</sup>  $\% = (b)/(a.1.) * 100$  | Meta 2003 - 25% | Meta 2004-2008 - 30%

<sup>8</sup>  $\% = (d)/[(g)-(b)] * 100$  | Meta 2003 - 60% | Meta 2004-2008 - 65%

Em termos globais e tendo em conta as metas estabelecidas pelo Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril, pode verificar-se através da análise da tabela anteriormente apresentada:

- a deposição em aterro de pneus usados cessou no ano de 2005;
- as taxas de recolha de pneus usados, ao longo do período relativo à 1ª Licença da Valorpneu, foram sempre superiores às metas estabelecidas; a meta estabelecida até 2003 era de 85%, sendo que nesse ano a Valorpneu apresentou uma taxa de 86,4%. Para o restante período a meta estabelecida era de 95%, sendo que em 2004 a Valorpneu recolheu 97,3% dos pneus usados, em 2005 a recolha foi de 98,3% dos pneus usados, em 2006 a taxa de recolha foi de 99,1%, em 2007 a taxa de recolha foi de 98,5%, tendo atingido em 2008 o valor de 106,5%. Segundo a Valorpneu (2008b), a taxa de recolha em 2008 só foi possível dado que o método de cálculo da taxa tem, em numerador, os pneus usados efectivamente recolhidos e, em denominador, os pneus usados gerados calculados com base nas declarações de produtores e na estimativa de não aderentes expressivos, o que significa que, ficam ainda de fora pneus introduzidos no mercado nacional com origem paralela; em termos médios no período de 2003-2008 a Valorpneu recolheu 98,2% dos pneus usados;
- as taxas de reciclagem para o período em análise (2003 a 2008) apresentaram sempre valores superiores aos estabelecidos nas metas, excepto no ano de 2004, em que a meta prevista era de 65% e a Valorpneu encaminhou 61,4% dos pneus recolhidos e não recauchutáveis; para a meta estabelecida para 2003 de 60% a Valorpneu encaminhou para reciclagem 75,4%. Para a meta estabelecida de 65%, no ano de 2005 foram encaminhados para reciclagem 68,5%, em 2006 a taxa de reciclagem foi de 66,1%, em 2007 a taxa de reciclagem apresentou um valor de 65,6%, e por último, em 2008 a taxa de reciclagem foi de 67,3%; em termos médios no período de 2003-2008, a Valorpneu encaminhou cerca de 67% dos pneus recolhidos e não recauchutáveis para reciclagem;
- apenas no caso das taxas de recauchutagem não foram atingidos os objectivos estabelecidos nos anos de 2004 (27,9%), 2005 (27,3%), 2006 (29,2%) e 2008 (25%) em que a meta estabelecida era de 30%; no ano 2003 a Valorpneu apresentou uma taxa de 30,1% para a recauchutagem de pneus usados face à taxa de 25% estabelecida nos objectivos de gestão; no ano de 2007, o objectivo estabelecido era de 30%, sendo que os valores apresentados pelo Valorpneu foram ligeiramente superiores (30,4%); em

termos médios para o período entre 2003 e 2008, a taxa de recauchutagem de pneus foi de cerca de 29%.

Segundo dados da Valorpneu (2008b), o SGPU apresenta níveis de desempenho elevados em relação às suas congéneres europeias, como se pode constatar na Figura 2.6. Para ser possível efectuar a comparação dos valores da Valorpneu e entidades gestoras de pneus usados, as percentagens foram recalculadas com base no total de pneus usados gerados recolhidos em 2007. Desta forma, no caso da recauchutagem, Portugal é considerado o país europeu com melhor desempenho, apresentando uma taxa mais do dobro (27,5%) da taxa média europeia (11%). Portugal é ainda considerado como um dos países que mais recicla, no contexto europeu (47,2% no caso português e 39% média europeia). Portugal não apresenta como destino a deposição em aterro (0%), contrariamente ao que sucede em alguns países da Europa, onde a média europeia se situa em 9% dos pneus terem como destino a deposição em aterro. Apenas no que respeita à reutilização/exportação (0,4% face a 9% da média europeia) e à valorização energética (24,8% face a 32% da média europeia), Portugal apresenta taxas inferiores à média europeia.

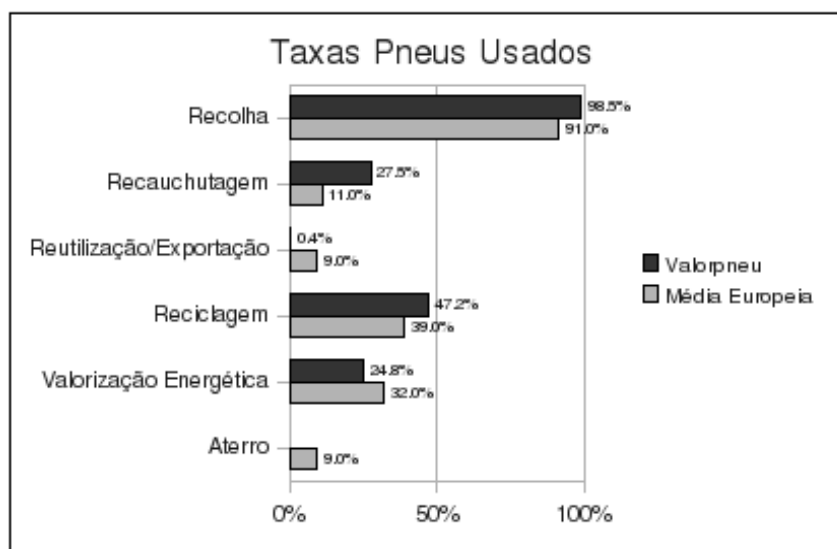


Figura 2.6 - Desempenho em 2007 da Valorpneu e da Europa (adaptado de Valorpneu, 2007 e 2008b)

Nos objectivos de gestão estabelecidos na nova licença da Valorpneu (Despacho nº19692/2009 dos Ministérios do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional e da Economia e da Inovação, de 27 de Agosto de 2009), destacam-se metas mais exigentes para a recolha e para a reciclagem de pneus. No caso da recolha, em relação à anterior licença,

é estabelecido um aumento de 1%, passando de 95% para 96% dos pneus usados gerados. No caso da reciclagem, foi estabelecido um aumento de 4%, ou seja, passando de 65% para 69%, de todos os pneus recolhidos não reutilizados e não recauchutados. No que diz respeito à reutilização e à recauchutagem, a actual licença fixa a taxa de 27% do total dos pneus usados gerados, sendo esta taxa 3% inferior à fixada na anterior licença (Nascimento, 2009).

### **2.1.3. Destinos dos pneus usados**

Segundo o Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril os pneus usados têm essencialmente dois destinos, conforme apresentados anteriormente, a reutilização (recauchutagem) e a valorização (reciclagem, valorização energética e reutilização para outros fins que não os iniciais).

No que se refere à reutilização de pneus implica aproveitá-los enquanto peça inteira (Amaral *et al.*, 2000), através do processo de recauchutagem. Segundo a Valorpneu (2009), a rede de valorização deste sistema é essencialmente constituída por operadores de reciclagem e de valorização energética.

A **recauchutagem**, de acordo com Amaral *et al.* (2000), a principal forma de reutilização e a única com capacidade de absorver uma quantidade de pneus significativa. A recauchutagem é um processo pelo qual se reconstrói um pneu que já rodou tendo desgastado o seu piso, até níveis legalmente admissíveis para circulação, mantendo o restante do pneu, designado por carcaça, com características óptimas para continuar a servir para as suas funções originais (Campos, 2006).

Em termos de opções tecnológicas, a recauchutagem pode recorrer a processos que partem do mesmo princípio mas que se destacam por variar em qualidade e no preço do produto final:

- reconstituição integral a quente – neste processo, o pneu é totalmente raspado colocando a descoberto toda a sua estrutura primitiva; seguidamente o pneu é colocado num molde quente, onde se procede à configuração do piso, segundo as características de origem; constitui o processo mais frequente em termos de recauchutagem (Amaral *et al.*, 2000);

- recauchutagem simples a quente – sendo o processo mais barato, encontra-se em desuso, visto os resultados não serem satisfatórios em termos de segurança do pneu a grandes velocidades, recorrendo-se a esta opção quando não se pretende que o pneu tenha uma vida útil longa; em termos de processo, a cobertura da borracha não é aplicada na totalidade do pneu, mas apenas na zona de aderência à estrada (Amaral *et al.*, 2000); a tendência é para abandonar este tipo de recauchutagem (Levy *et al.*, 2002); e,
- recauchutagem simples a frio – das opções apresentadas constitui o processo mais oneroso, sendo no entanto aquele que apresenta resultados mais seguros no que se refere à durabilidade e resistência do pneu, desde que a estrutura de base da roda esteja em boas condições (Amaral *et al.*, 2000); de forma sucinta o processo consiste em raspar a borracha e depois colar novo piso (Levy *et al.*, 2002).

A recauchutagem é uma actividade existente em Portugal há aproximadamente cinquenta anos, com circuitos comerciais e logísticos muito bem definidos. Como actividade económica tradicional, está fortemente implantada no mercado, particularmente no domínio dos pneus pesados (Valorpneu, 2009).

De acordo com a Valorpneu (2009), a rede de recauchutadores aderente ao SGPU é constituída por trinta e três empresas, sendo que vinte e sete se encontram no Continente, três na Região Autónoma dos Açores e três na Região Autónoma da Madeira. Segundo esta entidade (Valorpneu, 2008b), as trinta e três empresas representam a totalidade do universo de recauchutadores existentes a nível nacional.

A valorização consiste na utilização dos pneus inteiros (reutilização para outros fins que não os iniciais e valorização energética), ou o resultado da reciclagem física, química ou biológica destes materiais na forma de fragmentos, granulado ou em pó.

Existe uma grande variedade de aplicações para valorizar pneus usados, nomeadamente ao nível da **reutilização** de pneus inteiros para outros fins. Beneficiando da resistência estrutural dos pneus usados inteiros, estes podem ser utilizados como elementos de protecção de molhes marítimos ou fluviais, servindo como amortecedor do impacto dos barcos na atracagem (Valorpneu, 2009; Campos, 2006; Amaral *et al.*, 2000; Basel Convention, 1999), como barreiras anti-choque (e.g. nas auto-estradas ou em autódromos – na Fórmula 1, são utilizados na zona de despiste para minimizar o choque dos carros contra as protecções de parede)

(Amaral *et al.*, 2000; Basel Convention, 1999; NDPEP, 1994) ou como revestimento de suportes de separadores de vias de circulação automóvel, previsto no Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril. Podem ainda ser aplicados em obras de engenharia civil, como muros de retenção (Edil, 2008), fundações (Yasuhara, 2008), em aterros (Roque *et al.*, 2009) ou na construção de túneis, para evitar o contacto directo entre as rochas desprendidas dos maciços e a laje superior do túnel (Valorpneu, 2009). Existem ainda outras formas de utilizar os pneus inteiros, tais como recifes artificiais, pelo facto dos pneus se tornarem rapidamente base para o desenvolvimento de conchas e um óptimo habitat para crustáceos, criando um atractivo recife artificial para os peixes, que ali se vão alimentar e também desovar, tendo esta técnica já sido testada com sucesso ao longo das costas do Oceano Atlântico e do Golfo (Campos, 2006; Edeskär, 2004; Siddique e Naik, 2004; Amaral *et al.*, 2000; Basel Convention, 1999). Na revegetação e estabilização de taludes (e.g. construção de uma auto-estrada numa zona de grandes declives que tenham tendência para se desagregarem) são colocados pneus sobre o local em questão, quer empilhados solidamente ou formando uma esteira, minimizando desta forma a erosão directa sobre o solo e constituindo uma base para revegetação, visto poder acomodar terra no seu interior (Sharma e Reddy, 2004; Amaral *et al.*, 2000; NDPEP, 1994). Outra possível utilização dos pneus inteiros é como quebra-mares, constituindo estruturas que impedem que o efeito das marés se exerça sobre os portos e altere as linhas costeiras, apresentando a vantagem de serem estruturas facilmente removíveis (Amaral *et al.*, 2000; NDPEP, 1994). Ainda que utilizados em menor escala em termos quantitativos, os pneus usados podem ser utilizados em equipamentos de parques infantis (e.g. baloiços) (Campos, 2006; NDPEP, 1994).

Como referido anteriormente, a valorização engloba a valorização energética e a reciclagem, sendo dois processos distintos.

Assim valorizando os pneus usados, os operadores de **valorização energética** utilizam-nos como combustível alternativo para produção de energia – através do processo de incineração, aproveitando o excelente poder calorífico do pneu (aproximadamente 37.600kJ/kg, valor superior ao do carvão) (Valorpneu, 2009; Sharma e Reddy, 2004; Amaral *et al.*, 2000), e poupando desta forma o consumo de combustíveis tradicionais (combustíveis fósseis).

Além disso os pneus podem ser utilizados como combustível suplementar nas cimenteiras, centrais eléctricas, instalações fabris de pasta de papel, num processo designado de co-

incineração (Amaral *et al.*, 2000). Em 2006 na Europa cerca de 41% dos pneus em fim de vida foram utilizados como combustível em cimenteiras, cerca de 70% dos pneus em fim de vida no Japão foram utilizados em cimenteiras, indústrias de papel e em indústrias de fabrico de pneus, e no caso dos EUA em 2005, os pneus em fim de vida que tiveram como destino a valorização energética corresponderam a cerca de 53%, utilizados em cimenteiras, indústria de papel e caldeiras (WBCSD, 2008). No processo de co-incineração nas cimenteiras os pneus podem ser utilizados como peça inteira ou como granulado. As restantes instalações apenas podem utilizar pneus triturados visto, as peças inteiras de pneus exigirem temperaturas mais elevadas de processo, de forma a cumprir os requisitos legais referentes às emissões gasosas. Por outro lado, a utilização de pneus inteiros requer equipamentos de transporte e de alimentação específicos, porém mais simples que os utilizados para o material granulado.

No caso da utilização de pneus na indústria cimenteira importa destacar as seguintes vantagens associadas: (1) diminui os custos associados aos combustíveis tradicionais (Blumenthal, 2001); (2) evita a libertação de nitrosaminas (eliminação durante o processo devido às elevadas temperaturas e o tempo de residência) (Amaral *et al.*, 2000); (3) evitam emissões poluentes (e.g. efluentes gasosos são tratados com calcário, neutralizando a acção de óxidos de enxofre) (Blumenthal, 2001; Amaral *et al.*, 2000); (4) parte significativa dos resíduos produzidos durante o processo é reincorporada no cimento (Campos, 2006; Amaral *et al.*, 2000); (5) o aço presente nos pneus é útil para a formulação do cimento, substituindo a adição de sucatas para a correcção do teor de ferro no cimento, sendo adicionado ao processo de produção de cimento (Aiello *et al.*, 2009; WBCSD, 2008; Campos, 2006; Amaral *et al.*, 2000).

No que respeita à utilização de pneus nas indústrias de papel, estas poderão substituir as cascas de árvores ao utilizarem os fragmentos de pneus para a produção de energia, promovendo desta forma a comercialização de *mulch* naturais para cobertura de solo em jardinagem (e.g. cascas de ciprestes, pinheiros) (Campos 2006).

Actualmente, a Valorpneu opera com quatro instalações de valorização energética: Grupo Secil – Cimenteiras localizadas em Maceira, Pataias e Outão; e a instalação de cogeração da empresa Recauchutagem Nortenha em Penafiel (Valorpneu, 2009).

O conceito de reciclagem apresentado pelo Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril, consiste no processamento de pneus usados para qualquer fim, que não o inicial, nomeadamente como matéria-prima, excluindo a valorização energética.

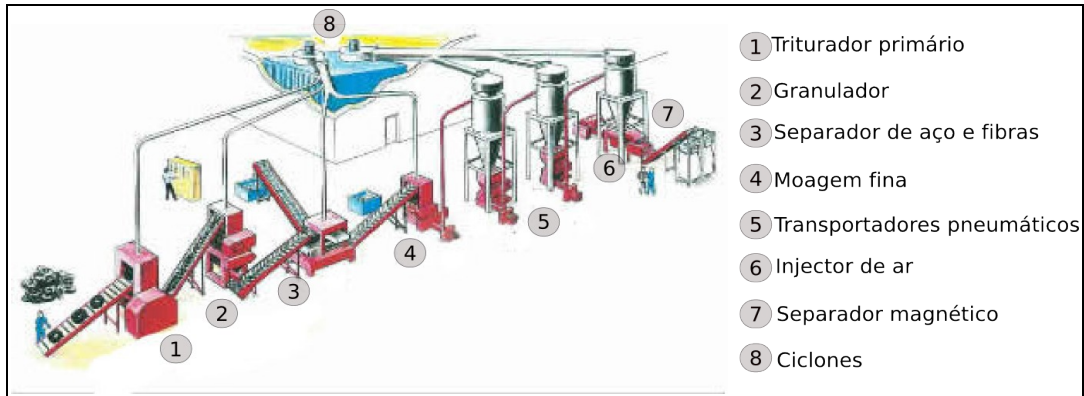
Os pneus usados poderão ser sujeitos a três tipos de reciclagem: reciclagem física, reciclagem química e reciclagem biológica.

No que concerne à **reciclagem física**, segundo a Valorpneu (2009), os recicladores utilizam os pneus usados como matéria prima, interessando-lhes fundamentalmente a borracha vulcanizada. Os operadores de reciclagem recebem os pneus inteiros ou cortados e processam-nos em granulado de borracha (com separação do metal e do têxtil incorporado nos pneus), o qual é depois utilizado para diversas aplicações (betume modificado com borracha, campos de futebol sintéticos, pavimentos, parques infantis, entre outros, que serão abordados ainda neste capítulo). Segundo esta entidade podem distinguir-se dois dos processos mais conhecidos de reciclagem física de pneus usados: processo mecânico e processo criogénico.

Em ambos os processos, a primeira etapa consiste geralmente na redução do pneu em fragmentos, através de uma sequência de corte ou laminagem, trituração ou moagem, viabilizando desta forma mais possibilidades de reciclagem material. Este material resultante da fragmentação simples (ou pré-trituração) poderá ter diferentes aplicações, que serão desenvolvidas neste capítulo ainda que de forma sucinta, tais como a pirólise, a desvulcanização, a cobertura diária de aterros e/ou a incorporação em asfaltos betuminosos (Amaral *et al.*, 2000).

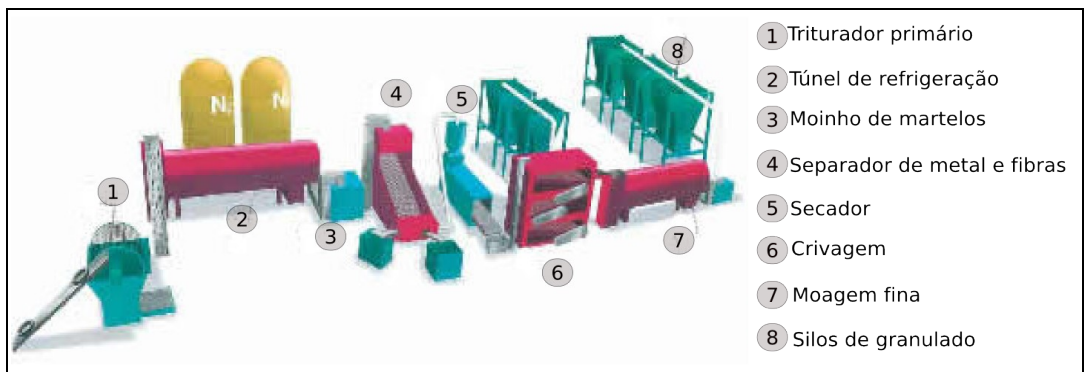
Quando se pretende uma granulometria menor recorre-se à moagem que pode ser efectuada à temperatura ambiente ou por congelamento criogénico.

O processo mecânico (Figura 2.7), segundo a Valorpneu (2009), consiste na trituração mecânica dos pneus. A borracha é fragmentada numa série de trituradoras e moinhos, sendo o aço retirado através de separação magnética e o têxtil separado por diferença de densidade. No final do processo, o granulado de borracha é dividido e categorizado em várias gamas, consoante a sua granulometria, através de crivos com diferentes dimensões de malha.



**Figura 2.7** - Processo mecânico (adaptado de WMW, 2009 e Campos, 2006)

Segundo a Recipneu (2008a), o processo criogénico caracteriza-se pelo estilhaçar muito rápido, numa atmosfera inerte, dos polímeros constituintes da borracha, donde resultam grânulos com uma morfologia cubóide, de aspecto brilhante, como que encapsulados por uma fina película. Deste modo, as peças de pneus são reduzidas a granulado através da temperatura de transição da vitrificação (Serumgard, 1997). O processo criogénico não degrada as cadeias moleculares dos polímeros, pelo que as suas propriedades elásticas não são alteradas (Recipneu, 2008b). A morfologia cubóide das partículas, confere uma área superficial ao granulado de reduzidas dimensões, sem poros nem lascas (Recipneu, 2008a). O agente mais utilizado para o processo criogénico é o azoto líquido (Serumgard, 1997). Neste processo é possível remover o material têxtil e o aço que constituem o “interior” do pneu.



**Figura 2.8** - Processo criogénico (adaptado de WMW, 2009 e Campos, 2006)

A Valorpneu trabalha actualmente com três empresas de reciclagem a Biosafe em Ovar, a Biogoma em Tremês e a Recipneu em Sines. A Biosafe e a Biogoma operam através de um processo mecânico enquanto que a Recipneu possui um processo criogénico.

A classificação dos produtos resultantes da reciclagem, segundo a *European Tyre Recyclers Association* (ETRA) é efectuada de acordo com as seguintes categorias de reciclados (Campos, 2006):

- aglomerados (*bales*), constituindo o empacotamento de pneus inteiros prensados e atados juntos;
- cortes (*cuts*), sendo pneus fragmentados mecanicamente de forma irregular em grandes pedaços (> 300mm);
- fragmentos (*shreds*), constituindo cortes de menores dimensões (50-300mm);
- *chips*, os pedaços de menores dimensões (10-50mm);
- grosagem (*buffings*) ou raspagem, a borracha vulcanizada resultante da raspagem do pneu para remover restos de piso antes da recauchutagem;
- granulado, como sendo a borracha triturada em grãos (1 a 10mm), podendo ser obtidos através de moagem criogénica ou à temperatura ambiente;
- pó, as fracções médias da moagem (<1mm), facilmente obtidos por moagem criogénica;
- pó refinado, as fracções mais finas da moagem (<0,5mm), essencialmente proveniente da moagem criogénica, podendo incluir também pós com superfícies modificadas para fins específicos;
- regenerado (*reclaimed*), a borracha que é submetida a tratamento para reverter a vulcanização e retomar algumas propriedades originais, em especial a capacidade de vulcanizar novamente a processabilidade e a adesividade;
- materiais melhorados (*upgraded*), as borrachas processadas para realçar propriedades específicas;
- aço, as fibras de aço recuperadas dos pneus;
- *fluff*, o algodão resultante da separação dos têxteis presentes nos pneus; e,

- outros artigos.

A classificação granulométrica dos pneus usados processados pode ainda ser efectuada de acordo com os critérios da FprCEN/TS 14243:2009 (classificação europeia através das Normas CEN – *European Committee for Standardisation*) e pela norma americana da *American Society for Testing Materials* ASTM D 6270 (Roque *et al.*, 2009). Salienta-se que a classificação europeia classifica de igual forma alguns produtos reciclados às categorias da ETRA anteriormente apresentadas, nomeadamente no que concerne aos pneus cortados (*tire cuts*) e aos *chips* de pneus (*tire chips*). As restantes categorias são similares.

Assim, segundo a FprCEN/TS 14243:2009:

- pneus cortados (*tire cuts*), de dimensão >300mm;
- fragmentos de pneus (*tire shreds*), de dimensão 20-400mm;
- pequenos fragmentos de pneu (*tire chips*), de dimensão 10-50mm;
- granulado de pneu (*tire granulates*), de dimensão 0,8-20mm; e,
- pó de pneu (*tire powders*), de dimensão <0,8mm.

A ASTM D 6270 classifica os pneus usados processados da seguinte forma:

- pneus cortados (*rough shred*), de dimensão  $50 \times 50 \times 50 < X < 762 \times 50 \times 100$ mm;
- fragmentos de pneus (*tire shreds*), de dimensão 50-305mm;
- pequenos fragmentos de pneu (*tire chips*), de dimensão 12-50mm;
- granulado de pneu (*tire granulates*), de dimensão 0,425-12mm; e,
- pó de pneu (*tire powders*), de dimensão 0,425-2mm.

Apresentam-se algumas das inúmeras aplicações a partir de fragmentos ou *chips*, obtidos através da reciclagem física de pneus.

Uma das aplicações possíveis de fragmentos de pneu poderá ser a compostagem, sendo uma alternativa aos pedaços de madeira que se costumam usar (GeoSyntec Consultants, 2008; WRAP 2006). O principal objectivo desta aplicação é promover o arejamento durante o processo de compostagem. Como vantagem, ao contrário da madeira, a borracha não é biodegradável sendo que não se vai degrada ao longo do processo de compostagem, podendo

ser reutilizado no processo. Os fragmentos de pneus a utilizar para este fim deverão ter dimensões na ordem dos 50 x 50mm (Amaral *et al.*, 2000).

Os fragmentos dos pneus poderão ainda ter outras aplicações para usos agrícolas: como *mulch* para cobertura de solo em jardinagem, diminuindo a compactação do solo (Campos, 2006), misturados com composto e aplicados em jardins e parques infantis (GeoSyntec Consultants, 2008; WRAP, 2007b). Segundo a GeoSyntec Consultants (2008), o *mulch* de borracha constitui um material limpo e seguro para as plantas, e não promove a proliferação de insectos.

No entanto, esta utilização tem o inconveniente de promover a acumulação na natureza de um material praticamente indestrutível, que pese embora dure várias campanhas agrícolas, não será degradado no solo, ao contrário dos *mulch* naturais (e.g. cascas de árvores, ciprestes, pinheiros) (Campos, 2006).

A produção de asfalto com granulado de borracha já se realiza há cerca de cinquenta anos, podendo ser efectuada mediante dois tipos de processos: “processo seco” ou “processo húmido” (Huang *et al.*, 2007; Serumgard, 1997). Sumariamente os processos distinguem-se por: (1) no “processo seco” haver a adição de granulado de borracha, que é dissolvido por um período específico de tempo, tendo em consideração a dimensão das partículas de borracha, no asfalto quente; deste processo as partículas de borracha reagem e alteram o asfalto; neste caso a borracha reciclada é um aditivo particulado seco para misturas de pavimentação de asfalto, que funciona como ligante (2) no “processo húmido” o granulado de borracha substitui a porção de agregados finos, que são depois misturados com o asfalto (Huang *et al.*, 2007; Serumgard, 1997).

Apresentam-se algumas das vantagens associadas à utilização do asfalto modificado com borracha: (1) aumenta a resistência do material e permite diminuir níveis de ruído (GeoSyntec Consultants, 2008); (2) aumenta a resistência e a durabilidade do material permitindo a prevenção de abertura de fissuras nos pavimentos (GeoSyntec Consultants, 2008; Huang *et al.*, 2007); (3) reduz custos de manutenção (GeoSyntec Consultants, 2008); (4) pode ainda ser utilizado como sub-base de estradas tendo como vantagens associadas o facto de constituir um material leve, com grande condutividade hidráulica e baixa condutividade térmica (Huang *et al.*, 2007).

Outra aplicação possível, é a utilização de tiras de pneu, como barreira estanque, em sistemas de recolha de águas pluviais em campos de golfe, sob o solo destes campos (WRAP, 2006). O

sistema poderá apresentar as seguintes vantagens: (1) reduz a irrigação necessária ao relvado, visto reter a água e desta forma disponibilizar água às raízes; (2) evita que a água subterrânea seja contaminada por fertilizantes; e (3) reduz a quantidade de fertilizante usado, visto maximizar a absorção da relva e não existirem perdas associadas (Amaral *et al.*, 2000).

Os pneus usados têm igualmente sido utilizados como barreiras de som (Mondal e Warith, 2008; Allman e Simundic, 1998), nomeadamente em auto-estradas, permitindo diminuir o ruído que chega a zonas residenciais vizinhas. Amaral *et al.* (2000) refere a particularidade da utilização de paredes de fibra de vidro ocas suportadas por vigas de cimento ou aço, e que são preenchidas por granulado de pneus.

Segundo Humphrey (2005), este material reciclado pode também ser aplicado em camadas para linhas de caminhos de ferro, que por ser um material que confere resiliência, diminui a vibração aquando a passagem de locomotivas.

Os fragmentos e/ou *chips* de pneus podem também ser aplicados como material de enchimento de biorreactores para o tratamento de efluentes (Campos, 2006; RMA, 2004).

Encontram-se também a decorrer investigações relativas à adição de pneus usados no cimento, dado que os pneus usados poderão conferir propriedades de maior resistência ao risco sísmico (Shimamura e Sakemoto, 2008; Serumgard, 1997).

Os fragmentos ou granulado de pneu podem ser utilizados como material de enchimento no fabrico de novos pneus (GeoSyntec Consultants, 2008; Serumgard, 1997). Esta aplicação é vulgarmente utilizada sobretudo no fabrico de pneus de equipamento agrícola que requerem elevadas quantidades de borracha e que não são produzidos para atingirem grandes velocidades. No entanto, foram efectuados testes em conjunto pela Michelin e pela Ford que permitiram constatar que é possível adicionar cerca de 10% de granulado de pneus durante a produção de pneus de passageiros, garantindo a qualidade e o desempenho do pneu novo (Amaral *et al.*, 2000).

Outra forma de aplicar este material na indústria automóvel poderá ser no fabrico de sapatas e almofadas de travões (GeoSyntec Consultants, 2008).

O granulado de pneus permite o fabrico de um vasto leque de produtos de borracha, tais como: lombas de velocidade, calços, tapetes, tubos de rega gota-a-gota, feitos pela simples compressão num molde (GeoSyntec Consultants, 2008; Serumgard, 1997). A utilização de

granulado de borracha e do ligante uretano em produtos moldados permite reduzir a matéria-prima para metade, quando comparado com a utilização de compostos de borracha virgem (Amaral *et al.*, 2000). Estes autores referem ainda que os produtos fabricados deverão apresentar requisitos pouco exigentes quanto a esforços e quanto à resistência à abrasão, e que a adição de pigmentos ou outros aditivos poderão ser facilmente introduzidos de forma a alterar as características físicas e de eficácia do produto.

A aplicação de *chips* de pneus ou de granulado de pneus em pavimentos tem vindo a ser bastante utilizada, devido ao facto deste material permitir amortecer as quedas das pessoas (GeoSyntec Consultants, 2008; Amaral *et al.*, 2000), ou seja, com efeito amortecedor de queda. Deste modo, este material pode ser aplicado em pistas de atletismo, em parques infantis e/ou jardins de infância (GeoSyntec Consultants, 2008), em campos de relva sintética (Recipneu, 2008b), havendo a possibilidade dos pavimentos serem coloridos, e em recintos para a prática de equitação, tais como arenas, picadeiros e pistas (Recipneu, 2008a). Segundo a GeoSyntec Consultants (2008), este tipo de pavimentos não é tóxico e não constitui um risco para a saúde das crianças.

Relativamente à **reciclagem química** são exemplo os processos de desvulcanização e de pirólise, que se descrevem seguidamente de forma sucinta.

O processo de desvulcanização compreende a quebra selectiva das ligações de enxofre entre as macromoléculas, nomeadamente das ligações carbono-carbono, carbono-enxofre e enxofre-enxofre, que se haviam estabelecido durante a vulcanização (Campos, 2006). De acordo com Amaral *et al.* (2000), a grande vantagem associada a este processo consiste na atribuição de novas propriedades físicas à borracha através do processo de revulcanização.

Embora não constitua uma tecnologia muito difundida, a pirólise é um processo de valorização material, onde é possível recuperar os elementos que compõem os pneus, tais como negro de fumo (*carbon black*, CB), óleo, gás e aço (Campos, 2006). A borracha é tratada a altas temperaturas e na ausência de ar, de forma a evitar a oxidação, sendo que as longas cadeias de polímeros de borracha se decompõe em moléculas mais pequenas de hidrocarbonetos. Este processo pode ainda ser efectuado em vácuo ou à pressão atmosférica (Amaral *et al.*, 2000).

Por último, importa destacar a possibilidade de reciclar pneus através de uma bactéria, a *Sulfolobus acidocaldarius*, ou seja através de um processo de reciclagem biológica. Esta

bactéria apresenta a particularidade de degradar o enxofre e de se desenvolver em ambientes adversos, em locais onde os valores de pH sejam de cerca 2,5 e os valores de temperatura sejam cerca de 70 °C. Segundo Robert Romine, investigador da *Pacific Northwest National Laboratories*, laboratório responsável por um estudo de biodesulfurização na década de 90, esta bactéria incide apenas no enxofre dos *crosslinks* (estabelecidos durante o processo de vulcanização), tratando a borracha como um substrato inadequado. Este processo não produz qualquer efeito negativo para o ambiente, é relativamente económico e não utiliza qualquer composto químico tóxico. Após 48 horas obtém-se uma substância que pode ser misturada com borracha virgem numa proporção de 15%. Este material pode ser utilizado para o fabrico de pneus novos, garantindo as propriedades importantes no desempenho do pneu. Do processo apenas resulta uma mistura de água com microorganismos em estado inactivo, que serão facilmente removidos recorrendo a um processo vulgar de tratamento de águas residuais (Amaral *et al.*, 2000).

#### **2.1.4. Fim de Estatuto de Resíduo**

O desenvolvimento do mercado destes materiais poderá vir a ser alterado face às inúmeras utilizações que os pneus usados ou os derivados dos pneus usados apresentam e à oportunidade de estes conseguirem o fim de estatuto de resíduo.

Como referido na abordagem da legislação aplicável à gestão de pneus usados, o artigo 6º da Directiva-Quadro de Resíduos prevê o **fim do estatuto de resíduo** para o caso dos pneus. Segundo a Directiva deverão ser tidos em consideração critérios específicos ou jurisprudência aplicável para o estabelecimento deste estatuto, mediante a decisão de cada estado-membro. Esta medida visa fomentar a produção de produtos que permitam reduzir o consumo de recursos naturais e a diminuição de resíduos para eliminação.

O fim do estatuto de resíduo pretende facilitar e promover a reciclagem assegurando que os produtos apresentam um elevado nível de protecção ambiental, reduzindo o consumo de recursos naturais e a diminuição de resíduos para eliminação, e promovendo benefícios económicos e ambientais (JRC, 2008).

Entende-se o estatuto de fim de resíduo quando as substâncias classificadas como resíduos cessam de o ser após um processo de valorização e preenchem determinados critérios que

serão desenvolvidos de acordo com os conceitos básicos definidos nas quatro condições impostas pela Directiva-Quadro de Resíduos no ponto 1 do artigo 6º:

- a substância ou objecto ser habitualmente utilizado para fins específicos;
- existir um mercado ou uma procura para essa substância ou objecto;
- a substância ou objecto satisfazer os requisitos técnicos para os fins específicos e respeitar a legislação e as normas aplicáveis aos produtos; e
- a utilização da substância ou objecto não acarretar impactes globalmente adversos do ponto de vista ambiental ou da saúde humana.

A Directiva-Quadro de Resíduos prevê ainda que caso se considere necessário os requisitos poderão incluir valores limite para os poluentes e ter em conta eventuais efeitos ambientais adversos da substância ou objecto.

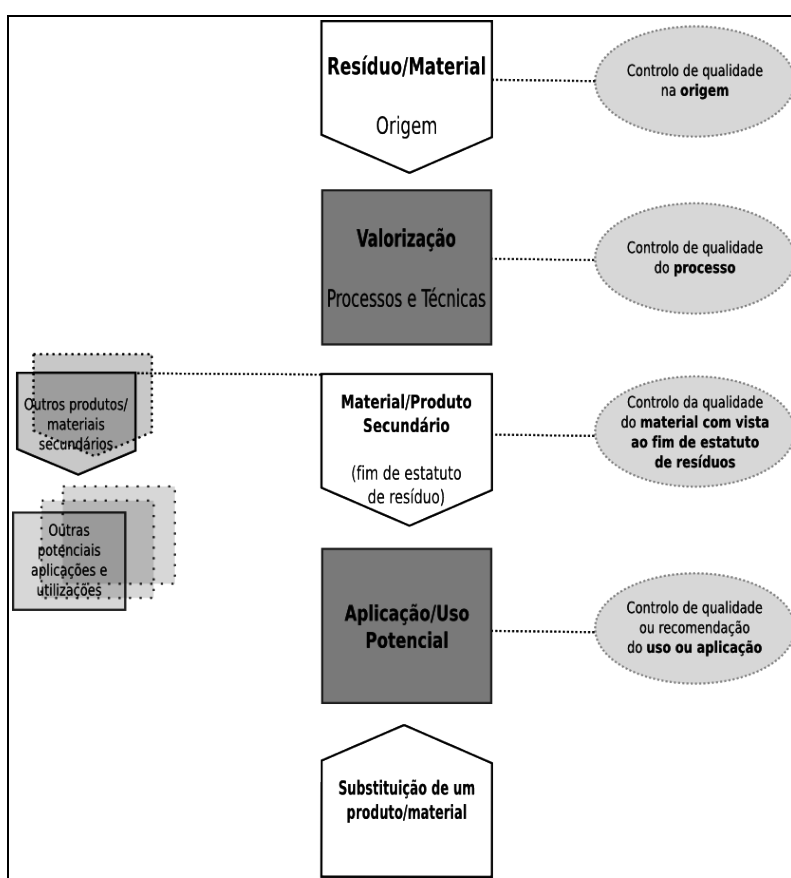
Conforme o disposto no ponto 3 do artigo 6º da Directiva, os resíduos, que adquirirem o estatuto de fim de resíduo, deixam de ser contabilizados para efeitos dos objectivos de valorização e de reciclagem estabelecidos na Directiva nº 94/62/CE, relativa a embalagens e a resíduos de embalagens; na Directiva nº 2000/53/CE, relativa a VFV; na Directiva nº 2002/96/CE, relativa a resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos; 2006/66/CE, relativa a pilhas e acumuladores, e demais legislação comunitária aplicável, quando forem cumpridos os requisitos em matéria de reciclagem e de valorização impostos por essa legislação.

Os critérios do fim de estatuto de resíduos englobam todos os requisitos que têm de ser apresentados pelo material derivado de resíduos, e que asseguram que a qualidade do material não prejudica a saúde humana ou o ambiente (JRC, 2008).

Dada a variabilidade dos resíduos candidatos à obtenção do fim de estatuto de resíduo e à especificidade das preocupações ambientais que poderão estar associadas a cada um deles, o fim do estatuto de resíduos terá de ser definido individualmente para cada uma das categorias de resíduos e para os seus produtos secundários e aplicações (JRC, 2008).

Genericamente dar-se-à enfoque à qualidade do material candidato à obtenção do fim de estatuto de resíduos, como sejam características específicas como a composição do material e/ou valores limite de poluentes. Não obstante, o controlo da qualidade pode estar relacionado

com outras etapas a montante ou a jusante do material que se pretende que deixe de ser considerado como um resíduo (Figura 2.9). Deste modo, o controlo da qualidade do material poderá estar também associado: (1) à primeira etapa do processo, pela separação na fonte de resíduos assegurando uma melhor qualidade a montante do processo (e.g. separação na fonte de papel ou vidro em resíduos de construção e de demolição); (2) ao processo de obtenção do material (e.g. controlo da temperatura na compostagem); ou (3) poderá estar associado a recomendações que o produto final terá de apresentar para que possa ser aplicado numa determinada utilização (e.g. recomendações com a informação da relação dos nutrientes que o composto deve apresentar para que possa ser aplicado na agricultura).



**Figura 2.9** - Controlo da Qualidade (adaptado de JRC, 2008)

A JRC (2008) considera que no caso dos pneus usados e face às inúmeras utilizações que estes podem ter, quer seja a sua aplicação como pneus inteiros, quer seja o resultado da reciclagem de pneus usados como fragmentos de pneus ou granulado de borracha, não será apropriado aplicar o fim de estatuto de resíduos aos pneus de uma forma generalizada, mas sim que

existam diferentes Protocolos de Qualidade específicos para cada material e/ou aplicação do mesmo para a obtenção desse estatuto.

Aplicando o fluxograma da Figura 2.9 ao caso específico dos pneus e tendo por base o *Draft da U.K. Environmental Agency: Tyre-derived rubber materials – End of waste criteria for the production and use of tyre-derived rubber materials* (WRAP, 2009), apresentam-se seguidamente alguns exemplos de controlo de qualidade ao longo do processo.

Relativamente ao Controlo de Qualidade na Origem, nesta etapa do processo deverão ser tidos em consideração critérios de perigosidade associados à contaminação de pneus; assim como *input* do processo teremos pneus (LER 16 03 01), que deverão apresentar um grau de contaminação aceitável, tais como pequenas pedras, terras ou óleos.

No que respeita Controlo de Qualidade no Processo, deverão ser tidos em consideração potenciais riscos ambientais associados às tecnologias ou ao tipo de valorização a que serão sujeitos os pneus, ou seja se estes irão ser reciclados por processo mecânico ou por processo criogénico; deverão ser definidos requisitos que permitem o controlo dos riscos ambientais no processo de obtenção do produto final (e.g. a WRAP refere a existência de especificação técnica relativa à obtenção de materiais derivados de pneus por processo mecânico que também se pode aplicar ao processo criogénico – *BSI PAS 107:2007 da British Standards Institution's Publicly Available Specification*).

No que se refere ao Controlo do Produto, poderão ser utilizadas nesta etapa do processo normas técnicas ou especificações técnicas que o produto deverá apresentar para que possa deixar de ser considerado resíduo aliadas a requisitos ambientais (e.g. cumprimento de valores limite de lixiviação de determinados poluentes).

Quanto ao Controlo da Qualidade no Uso ou Recomendações segundo a Aplicação, e tendo em consideração a aplicação específica, poderão até já existir normas ou especificações técnicas que serão utilizadas como controlo de qualidade, ou seja, se os materiais derivados de pneus não reunirem determinadas características não poderão ser aplicados por exemplo em obras geotécnicas para as quais já existam normas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) ou outras.

Além da promoção destes produtos derivados de pneus, o fim do estatuto de resíduo pode também constituir uma oportunidade de harmonização na Europa no que concerne ao controlo de qualidade da reciclagem de pneus usados (JRC, 2008).

## 2.2. Aplicação de Chips de Pneus

*A capacidade de projectar o futuro será cada vez mais importante para gerir, controlar e procurar minimizar os riscos sociais, tecnológicos e ambientais que se irão avolumar ao longo do século XXI. A questão está em saber se cada um de nós, a nível individual e institucional, em especial decisores políticos e os governos, aproveitará as oportunidades para escolher as opções que melhor asseguram um desenvolvimento sustentável nas vertentes social, económica, institucional e ambiental. Para optar é necessário estar informado e conhecer as possíveis consequências das diversas opções.*

**Filipe Duarte Santos**, *In* Ciência, Tecnologia, Desenvolvimento e Ambiente (Editora Gradiva, 2007)

Do ponto de vista da engenharia geotécnica, os pneus usados apresentam propriedades interessantes, visto serem manufacturados com uma combinação de flexibilidade, força, resiliência e elevada resistência friccional (Edeskär, 2004), tornando-os num produto atractivo para diversas aplicações em engenharia civil.

Genericamente os fragmentos de pneus resultam do corte dos pneus em pedaços de dimensões que variam entre 50 e 300mm (Cabeças e Dores, 2008; Humphrey e Katz, 2001). Segundo Strenk *et al.* (2007), para aplicações em construção civil os pneus são tipicamente reduzidos a fragmentos com dimensões entre 12 e 305mm, sendo também classificadas quanto à sua dimensão: fragmentos de pneus (50-305mm) ou de *chips* de pneus (12-50mm). Ambos os produtos são frequentemente designados como agregado derivado de pneus<sup>5</sup>, segundo o mesmo autor. Estes apresentam uma forma irregular, sendo ainda visível neste material o material têxtil e o aço que compõe os pneus (Cabeças e Dores, 2008).

Como vantagens associadas, os fragmentos de pneus são considerados materiais extremamente duráveis e virtualmente não biodegradáveis (GeoSyntec Consultants, 1998), leves, com baixa condutividade térmica (Humphrey e Katz, 2001), resistentes, flexíveis (GeoSyntec Consultants, 1998), com boa condutividade hidráulica e compressíveis (Barkerleamar Engineering Consultants, 2005).

Na Tabela 2.8 apresenta-se algumas propriedades físicas que caracterizam os fragmentos de pneus.

---

<sup>5</sup> em inglês *tire-derived aggregate* (TDA)

**Tabela 2.8:** Propriedades físicas dos fragmentos de pneus (adaptado de SDAB, 2007)

Parâmetro	Unidade	Valores característicos
Densidade compacta ( $\rho_s$ )	t/m <sup>3</sup>	1,15
Densidade volúmica ( $\rho$ )	t/m <sup>3</sup>	0,45-0,90
Porosidade ( $n$ )	%	40-0
Permeabilidade ( $k$ )	m/s	10-2
Coefficiente de Rigidez ( $E$ )	MPa	0,18-1,6
Ângulo de fricção ( $\varphi^\circ$ )	°	25-45
Coefficiente de condutividade térmica ( $\lambda$ )	W/mK	0,20

Os fragmentos de pneus constituem um material que não flutua (SDAB, 2007) o que é considerado vantajoso para aplicações submersas ou fluidizadas (GeoSyntec Consultants, 2008). Comparativamente com o solo, pode dizer-se que este é cerca de duas vezes mais denso que os fragmentos de pneus (Cabeças e Dores, 2008). No entanto há que ter em consideração a quantidade de metal incorporada nos fragmentos de pneus, visto que quanto maior for essa quantidade mais densos são os fragmentos de pneus, comparativamente com fragmentos de pneus constituídos predominantemente de borracha e material têxtil (Edeskär, 2004).

No que se refere à densidade volúmica, geralmente os fragmentos de pneus são materiais mais leves que os materiais minerais (SDAB, 2007), cerca de um terço mais leves que materiais minerais drenantes (Humphrey, 2005).

Os fragmentos de pneus possuem uma compressibilidade muito superior à dos materiais correntemente utilizados em obras geotécnicas, tais como areão, seixo ou cascalho (Cabeças e Dores, 2008), pelo facto do material ser bastante poroso e constituído por borracha (Reddy e Marella, 2001). Dos estudos efectuados obtiveram-se resultados na ordem dos 44-48% de compressibilidade aquando da aplicação de uma carga de 150kPa, sendo que os valores aumentaram com o aumento da carga aplicada (Aydilek *et al.*, 2006; Rowe e McIsaac, 2005). Estes valores podem também variar consoante a qualidade dos fragmentos de pneus, ou seja, se na sua constituição apresentam mais borracha e/ou metal exposto (Warith *et al.*, 2004)

Os fragmentos de pneus apresentam uma porosidade relativamente elevada quando comparada com a dos solos (Roque *et al.*, 2009), conferindo ao material uma elevada capilaridade e uma boa qualidade de drenagem (cerca de dez vezes superior à drenagem de materiais minerais

drenantes) (SDAB, 2007; Humphrey, 2005). Segundo Edeskär (2004), a porosidade dos fragmentos de pneus é influenciada pelo facto de se aplicar tensões, tais como tensão vertical ou compactação. Deste modo, o autor obteve os seguintes valores de porosidade: (1) 62%, sem compactação e sem tensão vertical aplicada; (2) 45%, com compactação Proctor modificado e sem tensão vertical aplicada; (3) 50%, sem compactação e com tensão vertical igual a 40kPa; (4) 38%, com compactação Proctor modificado e com tensão vertical igual a 40kPa; e (5) 22%, com compactação Proctor modificado e com tensão vertical igual a 400kPa. Quando sujeitos a tensões superiores a 400kPa, os fragmentos não sofrem variação de volume (Edeskär, 2004).

Segundo Salgado *et al.* (2003), os fragmentos de pneus apresentam valores de permeabilidade compreendidos entre 2,0 e 0,75cm/s, valores semelhantes aos que apresentam materiais inertes. Os valores de permeabilidade mais baixa dos fragmentos de pneus ocorrem com elevados níveis de compressão (SDAB, 2007), por redução do volume do material e consequente redução do índice de vazios (Cabeças e Dores, 2008). Segundo os resultados da investigação laboratorial de Aydilek *et al.* (2006), os fragmentos de pneus apresentam valores de permeabilidade superiores a  $1 \times 10^{-5}$  m/s, quando sujeitos a uma compressão de 250 kPa.

A permeabilidade dos fragmentos dos pneus é influenciada pelos seguintes parâmetros: dimensão, densidade e pressão de confinamento. Relativamente a misturas de solo e fragmentos de pneus, verifica-se que a permeabilidade será tanto menor quanto maior for o teor de solo na mistura. Para misturas contendo 30 a 50% de solo, em percentagem de peso, a permeabilidade aproxima-se à do solo (Cabeças e Dores, 2008).

No que se refere à capacidade de absorção da água, os fragmentos de pneus apresentam valores de cerca de 2 a 4%, valores comparáveis com agregados naturais (GeoSyntec Consultants, 2008).

No que diz respeito à condutividade térmica, os fragmentos apresentam valores baixos (Humphrey e Katz, 2001), significativamente inferiores aos valores característicos dos solos, ou seja, cerca de 85% (Roque *et al.*, 2009).

Em Portugal a Recipneu, empresa de reciclagem de pneus, patenteou recentemente o produto MADRE® – material agregado derivado de resíduos. O MADRE® é um produto obtido a partir da reciclagem de pneus usados em fim de vida, através de processamentos físicos que incluem a remoção de contaminantes orgânicos, operações de corte e classificação

dimensional (Recipneu, 2009) (Anexo A.2. – Especificações Técnicas).

A incorporação de MADRE® em obras públicas constitui, segundo a Recipneu (2009) uma oportunidade para os seus promotores se integrarem no espírito da Estratégia Nacional para as Compras Ecológicas 2008-2010, estabelecida na Resolução do Conselho de Ministros nº 65/2007, de 7 de Maio. Deste modo incentiva-se a promoção da indústria recicladora nacional e da preservação do ambiente, substituindo com vantagens técnicas e económicas, recursos naturais por produtos reciclados (Recipneu, 2009).

Algumas das possibilidades de aplicação deste material consistem: (1) no enchimento em paredes de retenção; (2) na camada de amortecimento de vibrações; (3) no enchimento de sistemas de drenagem das auto-estradas e de caminhos de ferro; (4) no enchimento de fundações de edifícios; e (5) em aterros de resíduos, na camada de drenagem de fundo de um aterro ou na camada drenante da selagem de um aterro.

Este produto foi aplicado num aterro de resíduos como substituto de agregados naturais na camada de drenagem do sistema de impermeabilização da cobertura final. Este projecto será abordado ainda neste capítulo.

Este produto da Recipneu encontra-se dividido em duas classes: MADRE®TM e MADRE®TL, apresentando algumas diferenças na sua composição como é possível constatar pela análise da Tabela 2.9.

**Tabela 2.9:** Características dos produtos MADRE®TM e MADRE®TL (Recipneu, 2009)

Propriedades	MADRE®TM				MADRE®TL			
Massa específica	1,30 ± 0,10kg/dm <sup>3</sup>				1,55 ± 0,06 kg/dm <sup>3</sup>			
Limites dimensionais	40-140mm (Classe “Medium”)				50-200mm (Classe “Large”)			
Dureza Shore A	55 ± 3				66 ± 3			
Comportamento sob compressão	Força de Compressão (kPa)	Densidade a granel	Porosidade total (%)	Permeabilidade (m/s)	Força de Compressão (kPa)	Densidade a granel	Porosidade total (%)	Permeabilidade de (m/s)
	100	0,90	32	2,3x10 <sup>-4</sup>	100	0,88	43	2,4x10 <sup>-4</sup>
	200	1,01	23	1,4x10 <sup>-4</sup>	200	0,97	37,5	1,7x10 <sup>-4</sup>
	300	1,08	17	8,4x10 <sup>-5</sup>	300	1,02	34	1,3x10 <sup>-4</sup>
	400	1,13	14	4,5x10 <sup>-5</sup>	400	1,06	31,5	1,0x10 <sup>-4</sup>
	500	1,17	10,5	1,4x10 <sup>-5</sup>	500	1,09	29,5	7,9x10 <sup>-4</sup>

Os produtos diferem em termos de dimensão, sendo as classes *Medium* e *Large* atribuídas de acordo com a Norma AFNOR XP T47-751.

A dimensão dos produtos tem influência nas restantes características, como é possível verificar para a propriedade massa específica em que o MADRE®TM o valor indicado pela Recipneu é de 1,30kg/dm<sup>3</sup>, enquanto que os valores do MADRE®TL são 1,55kg/dm<sup>3</sup>. Relativamente à Dureza Shore A, a Recipneu refere que MADRE®TM apresenta valores na ordem de 55 enquanto que no caso do MADRE®TL, os valores se situam na ordem de 66.

De acordo com as Especificações Técnicas definidas pela Recipneu, ambas as classes de produtos apresentam as seguintes características:

- grande estabilidade;
- resistência a agentes físicos e químicos (radiação UV, radiação IV, humidade, oxidação e envelhecimento atmosféricos, esforços de abrasão e esmagamento);
- resistividade térmica sete a oito vezes superior à de um solo granular;
- material não tóxico, praticamente inodoro, não biodegradável e insolúvel em águas pluviais ou superficiais;
- condutividade térmica – 0,1-0,35W/m.K;
- ponto de ignição – 315 ± 25 °C;
- absorção de água – 2 a 4%;
- densidade a granel (compacta) – 0,70 ± 0,10;
- coeficiente de Poisson – 0,25-0,35; e,
- compressibilidade – 30 a 60%.

Os efeitos dos produtos resultantes da reciclagem de pneus, como *chips* e fragmentos de pneus, são preocupação em termos de risco de lixiviação aquando contacto com água ou com lixiviado num aterro de resíduos, visto os fragmentos de pneus reterem as propriedades químicas básicas e a forma física (Rowe e McIsaac, 2005). Cabeças e Dores (2008) reforçam ainda que os *chips* de pneus mantêm as mesmas propriedades dos pneus, mesmo quando triturados até granulometrias reduzidas.

Após a sua utilização, os pneus usados mantêm a sua composição química, sendo que a sua degradação requer centenas de anos (Reddy e Marella, 2001).

Segundo Edeskär (2004), a composição dos *chips* de pneus foi calculada pela *Bureaux de Liason des Industries du Caoutchouc*<sup>6</sup> (BLIC) num estudo análise do ciclo de vida que esta associação elaborou em 2001. Todos os produtores europeus de pneus elencaram uma lista específica de constituintes para dois modelos de pneus alternativos, pneus com sílica e pneus com negro de fumo. Tendo em consideração que tipicamente um pneu de um veículo ligeiro perde cerca de 10 a 20% das esculturas da banda de rolamento, foi estimada a composição dos fragmentos de pneus. Desta forma e confrontando o teor dos diversos constituintes dos pneus, prevê-se que a composição dos fragmentos de pneus tenham menos 10 a 20% dos seus constituintes, em proporções iguais.

De uma forma geral, os fragmentos de pneus e os pneus não são considerados materiais perigosos. Não obstante, a possível lixiviação de metais e/ou compostos orgânicos suscitam algumas preocupações ambientais, tendo os seus potenciais impactes sido estudados por diversos autores (GeoSyntec Consultants, 1998).

No caso dos *chips* de pneus, os elementos de aço surgem frequentemente expostos. Este facto para além de poder constituir um risco para os operadores e/ou equipamentos, poderá igualmente promover a lixiviação de metais, tais como o zinco, constituinte da borracha ou dos elementos metálicos expostos (EGF, 2007; Humphrey e Katz, 2001).

Tendo já sido verificadas as vantagens de aplicação de *chips* de pneus em obras geotécnicas (tais como sub-base de estradas, aterros de resíduos, fundações, muros de retenção ou sistemas sépticos de drenagem (Strenk *et al.*, 2007; Humphrey e Swett, 2006; R.W. Beck, 2005)), continuam a persistir dúvidas se este tipo de material pode de alguma forma prejudicar o ambiente, nomeadamente no que concerne à lixiviação dos *chips*, passível de contaminar águas superficiais, águas subterrâneas ou ambientes aquáticos (Edil, 2008).

---

6 Desde 2006 designada de ETRMA (*European Tyre and Rubber Manufacturers Association*).

Estudo	Referência	Tipo de Estudo	Condições	Resultados/Conclusões
Tire Chip Evaluation Permeability and Leachability Assessments	Waste Management of Pennsylvania (1989), citado por Park et al. (2003) e WFAAP (2007)	Testes laboratoriais, testes de percolação com lixiviado	Valores de temperatura de 23 e de 50 °C; Análise de resultados aos 0, 30, 60 e 90 dias	Não existiram alterações apreciáveis na concentração em 90 dias
The RMA TCLP Assessment Project: Radian Report Leachate from Tire	Zalbor (1991)	Testes laboratoriais	Procedimentos normalizados TCLP	Todos os resultados são inferiores aos limites estabelecidos (TCLP Regulatory Levels e US EPA Drinking Water Standards)
Environmental Study of the Use of Shredded Waste Tires for Roadway Subgrade Support	Minnesota Pollution Control Agency (1990), citado por Park et al. (2003)	Ensaio laboratorial e de campo	Foram analisados 14 lótes metálicos em condições de pH 3,5, 5, 7 e 8	Apartes em condições de pior cenário possível, os valores limite de água para consumo foram excedidos, embora não tenham sido excedidos os valores limite estabelecidos pelo EP toxicity
Development of Engineering Criteria for Shredded Waste Tire in Highway Applications	Edli e Bosscher (1992), citado por Park et al. (2003)	Ensaio laboratorial (AFS leach e EP toxicity) e de campo (lixivato)	Ensaio de campo: colheita de 10 amostras no período de 2 anos	Amostras do ensaio de campo foram contatadas com outras fontes; as amostras do laboratório lixivaram Ba, Fe, Mn e Zn, embora os resultados não sejam considerados perigosos
Final Report on leachable metals in scrap tires	Ealding (1992), citado por EEDMS/EOS (2005)	Ensaio laboratorial	Ensaio laboratorial com condições de pH de 4, 7 e 8	Os teores de metais nos ensaios de lixiviação apresentaram uma concentração máxima e depois tendem a diminuir: Cu (328 ppb), Pb (49 ppb) e Cd (3,5 ppb) em menos de uma semana; Zn (150 ppb), Ni (2460 ppb), Cr (82 ppb), Ag (5 ppb) e Ba (2083 ppb) após vários meses; Fe apresentou concentração máxima após 2 semanas (31 ppm) não diminuindo a concentração apenas 6 meses depois.
A Study of Waste Tire Leachability in Potential Disposal and Usage Environments	Miller e Chadik (1993), citado por Park et al. (2003)	Ensaio laboratorial tipo batch	Foram consideradas as variáveis: diluição, tempo e condições de pH 5,4, 7,0 e 8,6	Lixiviação de metais: atividade biológica pode ter afetado os resultados obtidos
Water Quality Testing for Dingley Road Tire Chip Test Project	Humphrey e Katz (1995), citado por Park et al. (2003)	Ensaio de campo	Carnada de 15 e 30 cm <i>chips</i> de pneus colocada acima de lençol freático (água subterrânea)	Todos os metais, à exceção do Mn apresentaram concentrações inferiores aos valores estabelecidos para água de consumo humano
Water Quality Effects of Tire Chips Placed Above the Groundwater Table	Humphrey, Katz e Blumenthal (1997), citado por EEDMS/EOS (2005)	Ensaio de campo	Carnada de <i>chips</i> de pneus colocada acima de lençol freático (água subterrânea); colheitas efectuadas e analisadas no período de 2,5 anos	Metais com concentrações inferiores aos limites estabelecidos para parâmetros sanitários de água para consumo humano ( <i>Primary Drinking Water Standard</i> ); Metais com concentrações inferiores aos limites estabelecidos para parâmetros estéticos de água para consumo humano ( <i>Secondary Drinking Water Standard</i> ), à exceção de Fe e Mn.
Five Year Field Study of the Water Quality Effects of Tire Shreds placed Above the Water	Humphrey e Katz (2000) e Humphrey e Katz (2001)	Ensaio de Campo	Carnada de lençol ( <i>chips</i> ) de pneus colocada acima de lençol freático (água subterrânea); colheitas efectuadas e analisadas no período de 5 anos	Detectados valores superiores aos estabelecidos como limite em água para consumo humano dos parâmetros Fe e Mn (parâmetros estéticos).
Tire Reinforced Earthfill Environmental Assessment	O'Shaughnessy e Garga (2000), citado por Edeskär (2004)	Ensaio laboratorial ensaios de percolação	Testes de percolação em condições de pH ácido (3,5), pH neutro (6,5) e pH (9,5), em estruturas de solo com lençol ( <i>chips</i> ) de pneus. Redistribuição do lixiviado num período compreendido entre 90 e 180 dias	Presença de Al, Fe, Zn e Mn que excederam os valores limite estabelecidos no lençol (Ontario Drinking Water Objectives) (ODWO), excepto para o metal Zn

**Tabela 2.10:** Estudos de lixiviação de metais em chips de pneus (adaptado de Park *et al.*, 2003; Edil, 2008; EEDMS/EOS, 2005 e Edeskär, 2006)

Estudo	Referência	Tipo de Estudo	Condições	Resultados/Conclusões
Recycling of Shredded Rubber Tyres Base in Manitoba: A Case Study	Riaz (2001), citado por EEDMS/EOS (2005)	Ensaio de Campo	Fragmentos de pneus utilizados como sub base de estrada, com colheita de lixiviados	Metais com concentrações inferiores aos limites estabelecidos para parâmetros sanitários de água para consumo humano (Memph Primary Drinking Water Standard); Metais com concentrações inferiores aos limites estabelecidos para parâmetros estéticos de água para consumo humano (Memph Secondary Drinking Water Standard); à exceção de Al, Fe e Mn.
Tire Reinforced Earthfill Environmental Assessment	O'Shaughnessy e Garga (2000), citado por EEDMS/EOS (2005) e Edeskär (2004)	Ensaio de Campo	Colheita de lixiviado durante 2 anos	Cd, Cr e Pb não foram detectados no lixiviado, enquanto que foram detectadas concentrações de Zn e Fe, sendo que os valores detectados se apresentaram como valores inferiores aos estabelecidos pela Norma ODWO.
Suitability of Shredded Tyres as a Substitute for a Landfill Leachate Collection Medium	Aydilek <i>et al.</i> (2003), citado por Park <i>et al.</i> (2003)	Ensaio laboratorial testes de percolação	Análise de lixiviado de testes de coluna com mistura de solo e memph (chips), de pneus (duração de 830 dias) e testes de coluna com solo (790 dias).	Foram analisados os metais Zn, Pb, Ba, As e Se, não tendo nenhuma amostra apresentado concentrações superiores aos valores limites estabelecidos para água de consumo humano.
Field Evaluation of a Leachate Collection System Constructed with Scrap Tyres	Aydilek <i>et al.</i> (2006)	Ensaio de Campo	Monitorização de 4 anos de um sistema de recolha de lixiviado com fragmentos de pneus na sua constituição.	Foram detectadas concentrações superiores de Fe e Zn no final do estudo, embora quando comparadas com a composição do lixiviado do aterro sanitário, essas diferenças não sejam muito significativas, sendo que não foi possível deduzir se os fragmentos de pneus influenciaram a qualidade do lixiviado
Clogging of Tire Shreds and Gravel Permeated with Landfill Leachate	Rowe e McIsaac (2005)	Ensaio laboratorial testes de percolação	4 testes em coluna, com fragmentos de pneus de dimensões diferentes e de gravilha, em contacto com lixiviado de um aterro sanitário de RU; teste com duração de 2 anos.	Metais lixiviarão das colunas de teste que continham fragmentos de pneus Al, Zn, Fe e Cu.
Physical and Chemical Properties of Recycled Tire Shreds for Use in Construction	Moo Young <i>et al.</i> (2003)	Ensaio laboratorial testes de percolação	Testes de coluna com caudal em contínuo e testes de coluna com caudal fixo utilizados para analisar a lixiviação de fragmentos de pneus.	No que diz respeito a metais, apenas foi analisado o parâmetro Fe. No caso dos testes em contínuo, após cerca de 1 dia o lixiviado apresenta uma concentração máxima de cerca de 0.25 mg/l, sendo que no período seguinte do teste a concentração diminui e tende a manter-se constante (cerca de 0.5 mg/l). No caso dos testes em caudal fixo, a concentração de Fe vai aumentando até ao 3º dia, onde atinge a concentração máxima de cerca de 0.25 mg/l e depois tende a manter-se constante, durante o restante período de tempo do teste
Risk assessment of the impact on the environment and human health of waste tyre reuse in engineering applications	Remade Scotland (2006), citado por WRAP (2007)	Revisão Bibliográfica	Revisão Bibliográfica de vários casos de estudo com a utilização de pneus usados em aplicações de engenharia civil, analisando potenciais riscos para o ambiente e para a saúde humana.	O uso de granulado ou de fragmentos de borracha apresentam um risco potencial de aplicação em ambientes aquáticos onde a diluição é baixa e em áreas onde os valores de pH são extremos, não sendo considerado prudente a utilização nestes locais.

Como se pode observar pela compilação de estudos efectuada, o estudo e a aplicação deste material em obras de engenharia civil remontam à década de 90, tendo sido desenvolvidas diversas investigações sobretudo nos EUA, no âmbito da lixiviação de metais e/ou de compostos orgânicos.

As circunstâncias definidas para o desenvolvimento das investigações apontadas na Tabela 2.10, bem como a diferença dos normativos aplicáveis em diferentes países, tornam dificultada a tarefa de comparar os resultados obtidos.

No entanto, dos estudos efectuados foram sempre reportadas concentrações de metais resultantes da lixiviação, onde os valores estabelecidos para parâmetros da qualidade da água não eram geralmente ultrapassados, à excepção Fe, Mn, Al e/ou Zn.

Quanto aos possíveis impactes ambientais que este tipo de material poderá acarretar aquando a sua aplicação, segundo Humphrey e Katz (2000), os *chips* de pneus têm efeitos negligenciáveis em termos de influência na qualidade da água, aquando o contacto com água com pH próximo do neutro, podendo ser utilizado em muitas aplicações de engenharia civil.

A WRAP (2007a) considera que nenhuma das aplicações estudadas é passível de representar um risco para a saúde humana ou para ambientes terrestres, aconselhando que se evite a aplicação de *chips* ou de granulado em locais onde o pH é extremo, pelo facto de promoverem a lixiviação de metais ou de compostos orgânicos.

Não obstante, os impactes ambientais a longo prazo são ainda desconhecidos, resultantes da aplicação deste material em diversas infra-estruturas de construção civil (Engstrom e Lamb, 1994).

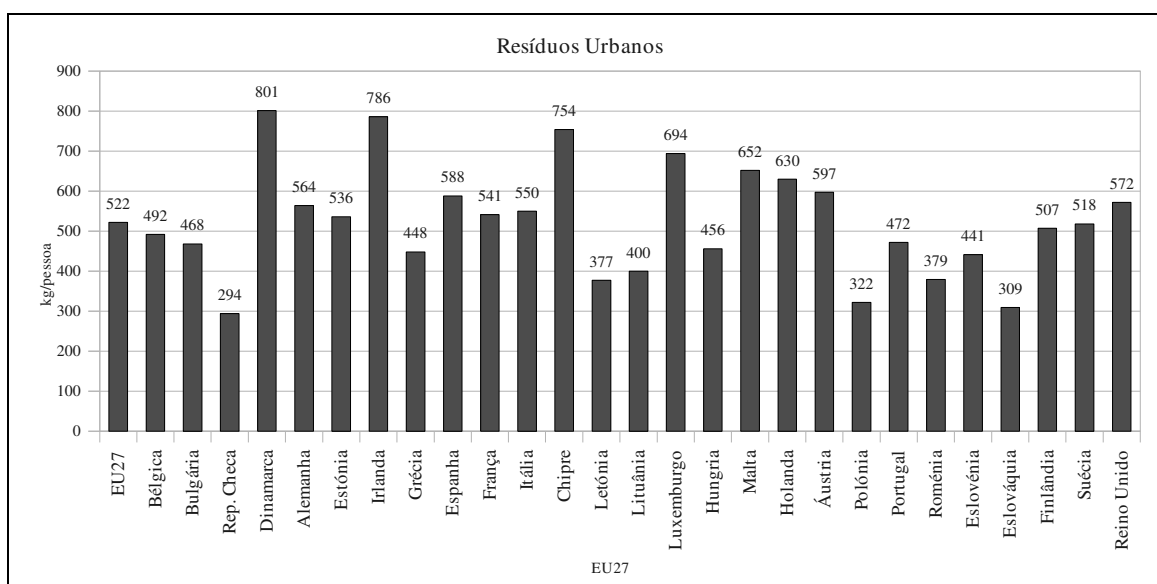
### **2.2.1. A aplicação de *chips* de pneus em aterros**

A aplicação de fragmentos de pneus tem sido bem sucedida em determinadas estruturas da construção e de operação de aterros para deposição de resíduos, das quais se incluem a utilização de fragmentos de pneus para colectores de lixiviado, camadas de colectores de biogás e estradas do aterro (Barkerleamar Engineering Consultants, 2005), bem como alternativa à cobertura diária do aterro, havendo geralmente mistura com terras de cobertura (Sousa *et al.*, 2006; Serumgard, 1997).

Segundo a WRAP (2008), a aplicação de *chips* de pneus como material substituto na construção de aterros deverá ser um mercado com tendência a estabilizar ou a diminuir, devido aos seguintes factores: (1) torna-se cada vez mais crítico disponibilizar áreas desocupadas e de grandes dimensões com destino à construção e operação de um aterro para a deposição de resíduos; e, (2) por outro lado, prevê-se uma diminuição de resíduos a encaminhar para aterro, tendo em conta a introdução de tecnologias alternativas que permitam tratar e/ou valorizar os resíduos, em detrimento da deposição em aterro.

No entanto, este tipo de infra-estruturas não irá deixar de existir, mas assumirá cada vez mais o papel de medida de fim de linha para os sistemas de gestão de resíduos, ou seja, conforme previsto na hierarquia de resíduos, a deposição em aterro deverá constituir a última opção de gestão, sendo preferíveis as seguintes operações de gestão: (1) prevenção; (2) reutilização; (3) reciclagem; ou (4) outras formas de valorização. O Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto relativo a aterros reforça a aplicação da hierarquia de gestão de resíduos, prevendo a minimização da deposição em aterro de resíduos que apresentem potencial de reciclagem e de valorização.

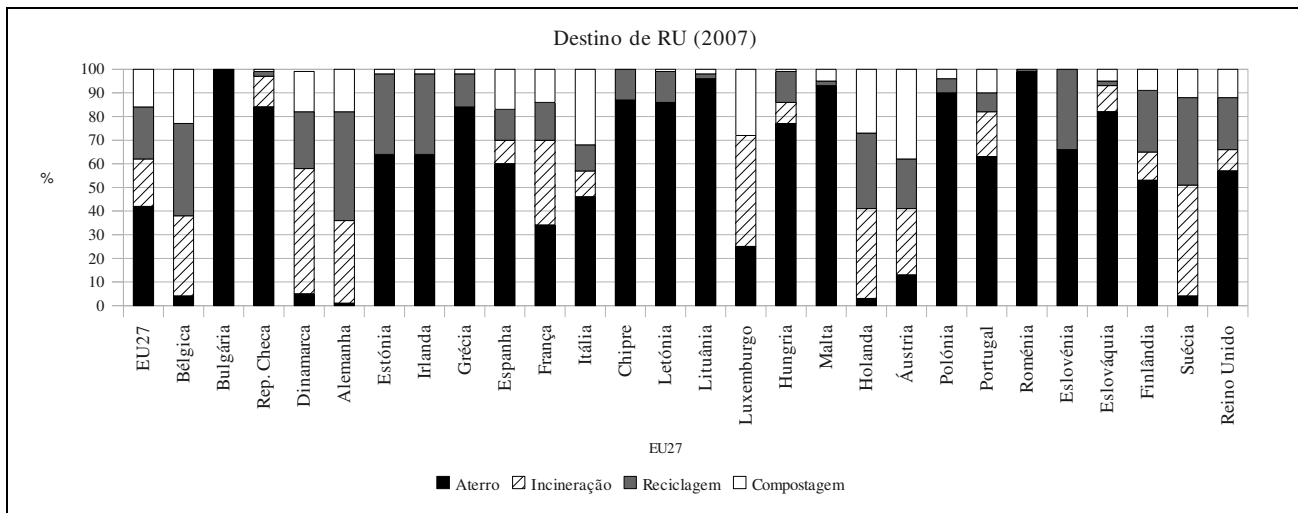
Assim, para melhor compreensão da possível aplicação de *chips* de pneus em aterros de resíduos, proceder-se-á seguidamente a um breve enquadramento onde serão tidos em conta algumas considerações gerais e alguns aspectos técnicos acerca de aterros de resíduos.



**Figura 2.10** - Produção de Resíduos Urbanos EU27 em 2007 (Eurostat, 2009)

Segundo dados da Eurostat (2009), no ano de 2007 Portugal apresentou uma produção de resíduos de 472 kg/pessoa, sendo que a produção média de resíduos da União Europeia a 27 (EU27) de cerca de 522 kg/pessoa (Figura 2.10).

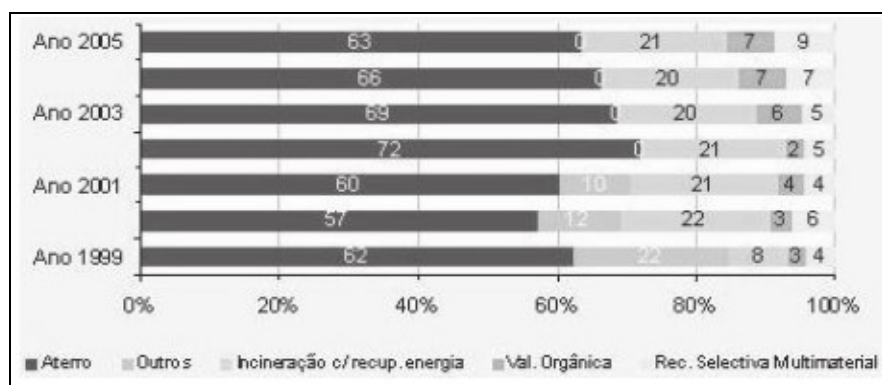
Em Portugal, desta produção de resíduos, sabe-se que cerca de 10% dos RU foram valorizados por compostagem, 8% dos RU tiveram como destino a reciclagem; 19% dos RU foram incinerados e 63% dos RU teve como destino a deposição em aterro (Figura 2.11).



**Figura 2.11** - Destinos de RU EU27 em 2007 (Eurostat, 2009)

No que se refere à média europeia, a deposição em aterro representa uma percentagem inferior à apresentada por Portugal (42%). Na União Europeia as taxas de reciclagem (22%) e de compostagem (17%) são significativamente superiores às taxas de Portugal. O valor da taxa de incineração em termos de média europeia situa-se próxima do apresentado por Portugal (20%).

No panorama português, as áreas metropolitanas com elevada densidade habitacional evoluíram para soluções tecnológicas por Incineração (Valorsul – área metropolitana de Lisboa e Lipor – área metropolitana do Porto), mas estes sistemas dispõem ainda de infra-estruturas de triagem, de valorização orgânica e de aterros como infra-estruturas de apoio. Os restantes sistemas dispõem de aterros como infra-estrutura principal, e apresentam ou irão apresentar em breve soluções para a valorização orgânica, quer por processos de compostagem, tratamento mecânico e biológico ou de digestão anaeróbia.



**Figura 2.12** - Destino de RU em Portugal 1999-2005 (PERSU II, 2007)

Verifica-se que a deposição de RU em aterro tem vindo a diminuir (Figura 2.12), tendo nos últimos anos sido adoptadas novas soluções de acordo com as melhores tecnologias disponíveis e sido promovidas campanhas de sensibilização para o aumento da taxa de reciclagem.

Além disso estão preconizadas no Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos para o período de 2007 a 2016 (PERSU II, 2007), metas de resíduos a desviar da deposição em aterro de forma a atingir os objectivos de gestão para resíduos passíveis de serem valorizados e reciclados (e.g. resíduos de embalagens e resíduos orgânicos).

Conforme preconizado na hierarquia de gestão de resíduos, o aterro assumirá cada vez mais o papel de destino final (eliminação ou confinamento de resíduos em fim de linha de outras soluções adoptadas), em vez do papel de tratamento (que ainda sucede em alguns sistemas de gestão de resíduos em que há deposição directa de RU no aterro).

O aterro como solução de destino final promove a incorporação definitiva da massa de resíduos compactada e estabilizada na modelação espacial imprimida ao terreno que lhe serve de fundação, com um enquadramento ajustado à sua integração paisagística e ao uso seguro deste local após o seu encerramento (Cabeças, 2007).

Segundo o Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto define-se como aterro a instalação de eliminação de resíduos através da sua deposição acima ou abaixo da superfície natural, incluindo: (1) as instalações de eliminação internas, considerando-se como tal os aterros onde o produtor de resíduos efectua a sua própria eliminação de resíduos no local de produção; e (2) uma instalação permanente, considerando-se como tal a que tiver uma vida útil superior a

um ano, usada para armazenagem temporária.

A Directiva nº 1999/31/CE do Conselho de 26 de Abril, transposta para o direito jurídico interno através do Decreto-Lei nº 152/2002, de 23 de Maio, teve como objectivo prever medidas, processos e orientações que evitem ou reduzam tanto quanto possível os efeitos negativos sobre o ambiente, em especial a poluição de águas de superfície, das águas subterrâneas, do solo e da atmosfera, sobre o ambiente global, incluindo o efeito de estufa, bem como quaisquer riscos para a saúde humana resultantes da deposição de resíduos em aterros durante todo o ciclo de vida do aterro (Pereira *et al.*, 2007).

O Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto veio revogar o Decreto-Lei nº 152/2002, de 23 de Maio, bem como o artigo 53º referente às taxas de licenciamento de aterros do Regime Geral de Gestão de Resíduos estabelecido no Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro. Relativamente aos objectivos preconizados neste diploma legal, assemelham-se aos estabelecidos pelo diploma legal revogado relativo à deposição de resíduos em aterros.

Um aterro constitui uma infra-estrutura de engenharia, que resulta geralmente de uma modelação de terras (ISWA, 2009) e que para o seu correcto dimensionamento tem em consideração diversos factores tais como: (1) o horizonte de projecto; (2) tipologia de resíduos a receber em aterro; (3) estudo demográfico; (4) produção de resíduos; (5) volume de resíduos a depositar; (6) determinação da área necessária para o aterro; (7) levantamento topográfico; e (8) prospecção geológica, geohidrológica e geotécnica (Levy e Cabeças, 2006; Williams, 2005).

Segundo o Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto, é possível diferenciar os aterros em três classes distintas: (1) aterro para deposição de resíduos inertes; (2) aterro para deposição de resíduos não perigosos; e (3) aterro para deposição de resíduos perigosos.

Os requisitos técnicos variam consoante a classe do aterro, estando estabelecidos no diploma legal em referência os requisitos quanto à localização, ao controlo das emissões e protecção do solo e das águas, à estabilidade, aos equipamentos, às instalações e infra-estruturas de apoio, bem como quanto ao encerramento e à integração paisagística.

Os requisitos mínimos que um aterro para resíduos não perigosos deve obedecer constam do Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto, sendo que fazem parte os seguintes elementos: (1) sistema de protecção ambiental passivo, com barreira de segurança passiva; (2) sistema de protecção ambiental activo, constituído por uma barreira de impermeabilização artificial, um

sistema de drenagem de águas pluviais, um sistema de recolha e de drenagem de lixiviados e um sistema de drenagem e tratamento de biogás; (3) um sistema de selagem final, que consoante o tipo de resíduos admitidos no aterro poderá haver a necessidade de apresentar uma camada de drenagem de gases; será também constituído por uma camada mineral impermeável; por uma camada de drenagem >0,5m, e por uma cobertura final com material terroso >1m; e (4) por instalações e infra-estruturas de apoio, tais como vedação, portão, vias de circulação e no caso de se aplicar, um queimador de biogás.

Em suma, é tido em consideração o cumprimento de exigências técnicas que englobam fundamentalmente: (1) a protecção das águas subterrâneas e superficiais; (2) o controlo dos efluentes residuais líquidos – águas lixiviantes; (3) o controlo dos efluentes residuais gasosos – biogás; (4) o controlo da deposição dos resíduos e a exploração do aterro; e (5) a monitorização global do aterro e zonas envolventes (Levy e Cabeças, 2006).

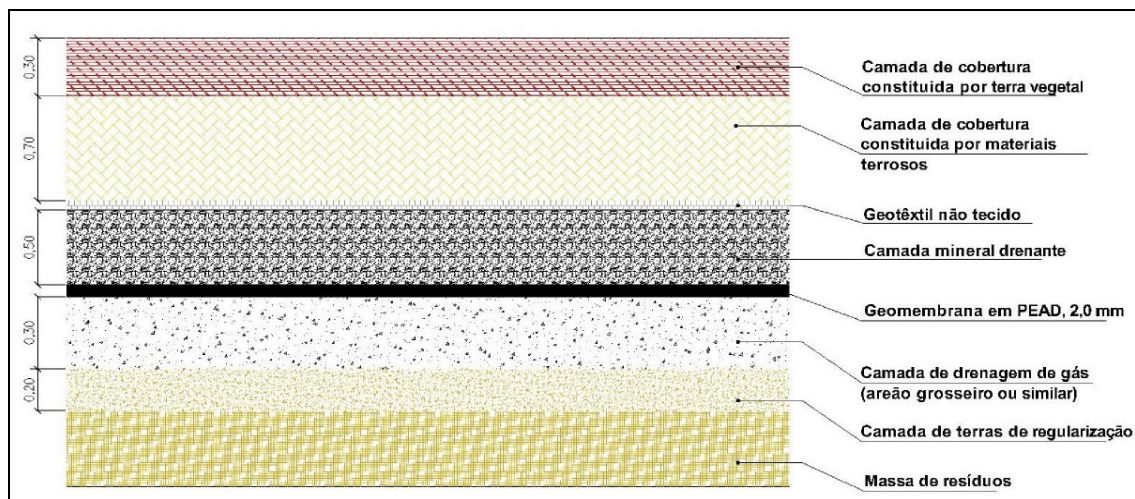
Face aos requisitos técnicos de um aterro, destacam-se alguns desses requisitos focalizados no sistema de cobertura final e na camada drenante, devido à possibilidade de aplicação de *chips* de pneus neste sistema como alternativa aos agregados naturais utilizados.

Segundo Levy e Cabeças (2006), o sistema de cobertura final constitui uma parte fundamental no encerramento de um aterro, assim que atingida a sua capacidade máxima. As principais funções deste sistema compreendem: (1) a minimização do escoamento superficial; (2) o controlo da infiltração de forma a minimizar a produção de lixiviados; (3) o impedimento da migração de lixiviados através dos taludes laterais; (4) a protecção das pessoas e animais do contacto directo com os resíduos; (5) o controlo da emissão de gases; (6) a minimização da possibilidade de ocorrência de incêndios; e (7) a prevenção de entrada de ar que poderá perturbar o processo anaeróbio de biodegradação (Levy e Cabeças, 2006; Williams, 2005; Tchobanoglous, 1993).

O sistema de impermeabilização da cobertura final de um aterro (Figura 2.13) deve contemplar a seguinte estrutura sobre a última camada de resíduos (Cabeças e Dores, 2008; Levy e Cabeças, 2006):

- camada de terras de regularização com 0,20m de espessura;
- camada de drenagem de biogás (areão grosseiro ou similar)
- geomembrana de PEAD 2,0mm;

- camada drenante em material mineral natural, com 0,50m de espessura;
- geotêxtil não tecido;
- camada de material terroso, com 0,70m de espessura; e,
- camada de terra vegetal, com 0,30m de espessura.



**Figura 2.13** - Cobertura final de um aterro (EGF, 2007)

A função principal da camada drenante consiste em minimizar a carga hidráulica no interior do aterro, visto permitir a drenagem lateral da água infiltrada pelo topo (Levy e Cabeças, 2006; Williams, 2005). Esta camada é, geralmente, constituída por material natural drenante (e.g. areia ou brita), para permitir o escoamento e percolação em grande das águas pluviais precipitadas para o sistema de drenagem pluvial implantado (Cabeças e Dores, 2008). Para separação da camada de drenagem da camada de topo, utiliza-se geralmente um geotêxtil não tecido (Levy e Cabeças, 2006).

Após a selagem de um aterro, de acordo com o Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto prevê-se: (1) que se efectue um levantamento topográfico do aterro, tendo em consideração os assentamentos que se verifiquem no aterro; (2) o controlo semestral do volume produzido e da qualidade dos lixiviados gerados; (3) o controlo das águas superficiais, tendo em consideração os mesmos pontos de amostragem definidos aquando a exploração do aterro; (4) o controlo semestral dos gases, através da medição das emissões de metano, oxigénio, dióxido de carbono e outros de acordo com a composição dos resíduos depositados (e.g. hidrogénio,

sulfato de hidrogénio); e (5) o controlo das águas subterrâneas. É recomendado ainda que se efectue um controlo dos dados meteorológicos, através do registo de: (1) volume de precipitação; (2) temperatura média mensal; (3) evaporação; e, (4) humidade atmosférica média mensal.

Devido às propriedades vantajosas que os *chips* de pneus apresentam, como abordado no início desta secção, este material apresenta-se como um substituto adequado na execução da camada drenante de aterros, promovendo desta forma a poupança de um recurso natural e a promoção de um produto reciclado.

Salienta-se que quanto à restrição de deposição de resíduos de pneus em aterros preconizada quer no Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio quer no Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto, não se aplica aos *chips* de pneus. Conforme referido anteriormente, este material resulta do processamento dos pneus usados, tendo como objectivo a sua valorização aquando a aplicação no sistema de impermeabilização de um aterro. Este material assume a função de protecção na produção de águas lixiviantes, na emissão de gases poluentes e na integração paisagística (Cabeças e Dores, 2008).

A avaliação da aplicabilidade de materiais resultantes da reciclagem de pneus usados em obras geotécnicas teve início na década de 90, a nível internacional, sendo que em Portugal, são praticamente nulas estas aplicações (Roque *et al.*, 2009).

### **2.2.2. O Aterro da Amarsul**

Em 2007, a Empresa Geral do Fomento (EGF), *sub-holding* do Grupo Águas de Portugal, iniciou um projecto com a substituição de material britado da camada drenante na selagem de uma célula do aterro da Amarsul em Palmela, com a aplicação de *chips* de pneus (Cabeças e Dores, 2008), produto patenteado pela Recipneu como MADRE®.

A Amarsul, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., entidade concessionária do Sistema Multimunicipal da Margem Sul do Tejo recebe os RU e equiparados recolhidos pelas Câmaras dos vários municípios pertencentes ao sistema: Alcochete, Barreiro, Moita, Montijo, Palmela, Sesimbra, Almada e Seixal. O sistema engloba unidades de valorização energética (sistema de aproveitamento de biogás), valorização orgânica (unidade de compostagem e no futuro uma unidade de digestão anaeróbia), é também responsável pela recolha multimaterial

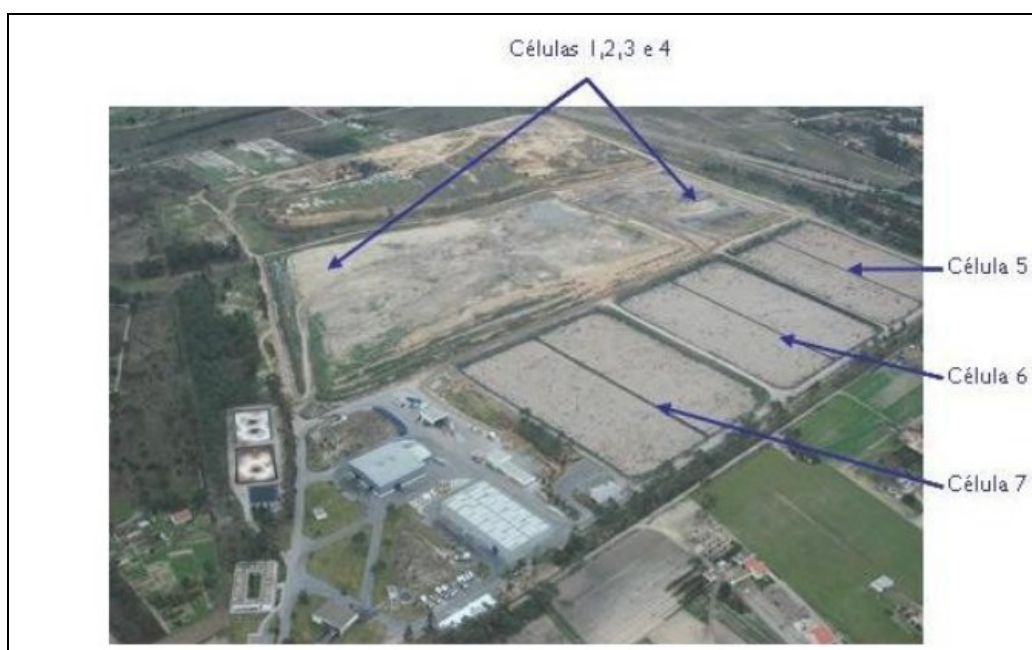
(ecopontos, ecocentro e recolha de cartão porta-a-porta), pelas centrais de triagem que encaminham os resíduos passíveis de valorização resultantes da recolha multimaterial e pela exploração de aterros para deposição de RU ou equiparados.

Neste momento a Amarsul dispõe de dois aterros em exploração, um aterro em Palmela (recebe RU de Alcochete, Barreiro, Moita, Montijo, Palmela e Sesimbra), e um aterro no Seixal (recebe RU de Almada e do Seixal) (Amarsul, 2009).

O Aterro de Palmela localiza-se no Distrito de Setúbal, Concelho de Palmela, na localidade de Pinhal das Formas.

A exploração teve início no ano de 1997, tendo sido recepcionados e depositados em total de 2 659 154 toneladas de resíduos, predominantemente urbanos (EGF, 2007).

Quando se esgota a capacidade do aterro, procede-se ao seu encerramento e posterior selagem que consiste na impermeabilização superficial e reconversão paisagística (Amarsul, 2009).



**Figura 2.14** - Aterro da Amarsul em Palmela (Amarsul, 2009)

Em 2007 a Amarsul lançou um concurso público internacional de concepção-construção para selagem das células 1,2,3 e 4 do Aterro de Palmela (Figura 2.14) (Cabeças e Dores, 2008).

A zona de intervenção encontra-se identificada na Figura 2.15, que compreende uma área de cerca de 15,3 ha (EGF, 2007).



**Figura 2.15** - Zona de Intervenção no Aterro da Amarsul em Palmela (Cabeças e Dores, 2008)

O projecto da EGF (2007) previa a aplicação de *chips* com um calibre nominal de 150mm e um volume de cerca 5 300m<sup>3</sup> de *chips* necessários para a execução da camada de drenante. Esta substituição de material mineral natural por *chips* de pneus abrange uma área com cerca de 1,0 ha.



**Figura 2.16** - *Chips* de pneus a aplicar na zona de intervenção do Aterro da Amarsul

Como os *chips* disponibilizados não estavam isentos de elementos metálicos, o projecto da EGF previu a execução de uma camada de protecção com recurso a geotêxtil de protecção com  $270\text{g/m}^2$ , sobrepondo então a este material, uma camada de *chips* com 50cm de espessura, garantindo a integridade da geomembrana.



**Figura 2.17** - *Chips* de pneus no Aterro da Amarsul



**Figura 2.18** - Pormenor de *chip* de pneu no Aterro da Amarsul

A estratigrafia proposta para o sistema de de encerramento deste projecto (Figura 2.19) foi:

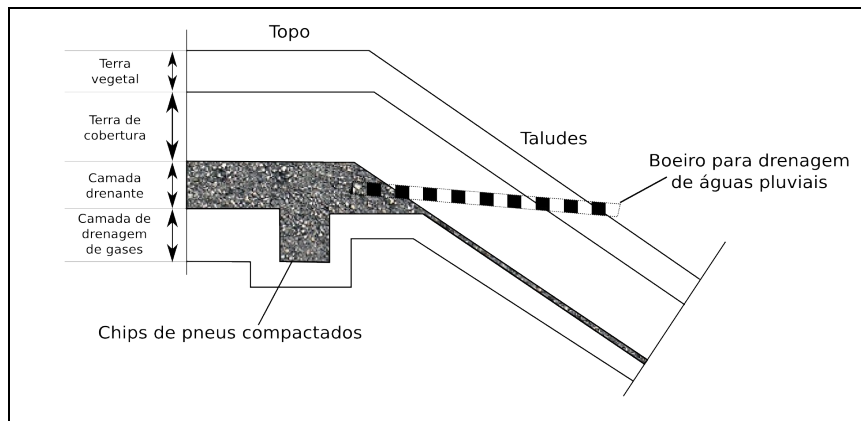
#### Topo do Aterro

- camada de regularização (com o intuito de facilitar a aplicação das camadas integrantes do sistema de impermeabilização e do sistema de drenagem de biogás);
- camada de drenagem de gases com uma espessura de 25cm;
- geocompósito bentonítico ou geotêxtil de protecção;
- camada drenante com 50cm de espessura com *chips* de pneus;
- terra de cobertura com uma espessura de 70cm; e,
- terra vegetal com uma espessura de 30cm.

#### Taludes do Aterro

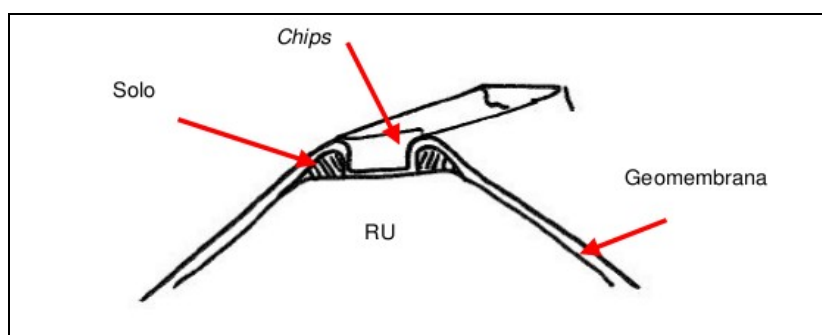
- camada de regularização (com o intuito de corrigir situações de taludes instáveis e de facilitar a aplicação das camadas integrantes do sistema de impermeabilização e do sistema de drenagem de biogás);
- camada de drenagem de gases com uma espessura de 25cm;
- geocompósito bentonítico;
- geomembrana em PEAD com 1,5cm de espessura;

- geocompósito drenante;
- terra de cobertura com uma espessura de 70cm; e,
- terra vegetal com uma espessura de 30cm.



**Figura 2.19** - Sistema de encerramento (adaptado de Cabeças e Dores, 2008)

Segundo o projecto, a área onde os *chips* foram aplicados está isolada do resto da cobertura por execução de uma “caixa” (Figura 2.20), definida com a aplicação de solo e impermeabilizada com geomembrana. O fundo da “caixa” apresenta a base uma estrutura em telhado invertido, com uma inclinação mínima de fundo de 2,0%, definindo os caminhos preferenciais para o escoamento das águas produzidas.



**Figura 2.20** - Sistema de encerramento (Cabeças e Dores, 2008)

Sobre a superfície interior da caixa, após aplicação e compactação dos *chips* estava previsto a aplicação de uma tubagem para drenagem em PEAD, DN 315. A área de influência máxima de cada tubagem prevista era de 2 500m<sup>2</sup>, garantindo-se que o comprimento não ultrapassava os 50m.

As referidas tubagens permitem promover a drenagem da zona em estudo, conduzindo as águas para caixas de visita adjacentes à zona encerrada e daí para um depósito localizado no exterior do aterro com capacidade de 1,0m<sup>3</sup>, por forma a permitir a colheita de amostras para avaliação das características das águas pluviais.

Conforme proposto em projecto, as águas pluviais precipitadas serão drenadas através dos *chips* e conduzidas a um depósito localizado no exterior da célula encerrada. Este depósito será coberto por forma a garantir que apenas é recolhida água proveniente da cobertura.

O projecto da EGF previa uma construção semelhante para um sistema de recolha de águas pluviais precipitadas sobre a cobertura, fora da zona de colocação dos *chips*. As águas provenientes desta área, onde a camada drenante é constituída por material mineral drenante são encaminhadas para um depósito de características semelhantes às já descritas.

Os dois depósitos de armazenamento apresentam uma ligação à rede de drenagem de águas residuais do aterro, assegurando o tratamento da água recolhida e armazenada.

No que concerne à monitorização das águas pluviais drenadas através quer da camada drenante com *chips* de pneus quer da camada mineral drenante – que constituirá o ensaio em branco, foi proposta uma colheita semanal recolhidas em ambos os depósitos de armazenamento. Relativamente aos parâmetros a monitorizar, o projecto previa a avaliação dos seguintes parâmetros físico-químicos: (1) pH; (2) condutividade; (3) CQO, CBO5 e COT; (4) mercúrio; (5) chumbo; (6) níquel; (7) zinco; (8) alumínio; e (9) ferro, lista de parâmetros que poderia ser revista e aumentada caso fosse solicitado pela autoridade competente. Desta forma o projecto previa assegurar a não ocorrência de lixiviação de compostos que pudessem constituir um risco para o ambiente e para a saúde pública. O projecto referia ainda que as amostras colhidas deveriam ser enviadas para laboratórios de análises da qualidade da água devidamente acreditados para o efeito.



**Figura 2.21** - Zona de intervenção onde foi efectuada a aplicação de *chips* de pneus



**Figura 2.22** - A aplicação de *chips* de pneus (Recipneu, 2009)

A execução da aplicação de *chips* de pneus como camada drenante da estrutura de selagem do aterro teve lugar em 2008 (Figura 2.21 e Figura 2.22).

Os resultados da monitorização à qualidade das águas deste projecto ainda não foram publicados.

### 3. Materiais e Métodos

Este capítulo contempla os materiais e métodos utilizados de forma a que o objectivo proposto para a presente dissertação seja alcançado. Serão descritos os procedimentos referentes aos testes de lixiviação efectuados em laboratório aos *chips* de pneus e à brita.

De forma a serem estudadas as características dos *chips* de pneus, verificando a possível aplicação em aterros, optou-se por um estudo de lixiviação de metais (ensaios laboratoriais para a caracterização das propriedades químicas) onde se fizesse variar o pH e desta forma determinar o comportamento destes elementos na qualidade da água. Na camada de drenagem de aterros, os *chips* de pneus apenas contactam com águas pluviais. No entanto, o intuito de submeter este material a meios com diferentes valores de pH é verificar se os metais se comportam de forma diferente em termos de lixiviação em situações mais adversas. Embora Edil (2008) refira que num estudo de Miller e Chadik em 1993, estes autores concluíram não existir uma forte correlação entre os valores de pH 5,4; 7,0 e 8,6 e as características do lixiviado, outros autores referem que os metais tendem a aparecer em maior concentração em condições de meio ácido, pelo facto de ser promovida a reacção entre o metal e o ião  $H^+$  (Liu *et al.*, 1998; Engstrom e Lamb, 1994).

Foram efectuados também ensaios de lixiviação de brita calcária, material natural e inerte que se utiliza recorrentemente como camada drenante em aterros, de forma a constituir um elemento comparativo.

De acordo com Edeskär (2004), testes de lixiviação realizados em laboratório para a determinação da concentração de metais poderão fornecer informações úteis em termos de avaliação de riscos ambientais. Não obstante, importa referir que se tratam de estudos que geralmente retratam casos no “pior cenário possível” e/ou são efectuados mediante determinadas condições, devidamente definidas e controladas, que poderão não ser extrapolados para situações reais. Os resultados laboratoriais poderão servir de indicadores de quais os componentes expectáveis que sejam lixiviados em maior concentração.

Os testes tipo *batch* ou de contacto são os ensaios mais utilizados devido à sua simplicidade de montagem além de estarem referenciados por diversas normas (Piantone, 2009), como é o caso da Directiva Aterros, que refere Norma Europeia EN 12457/4.

Tal como Edeskär (2004), Piantone (2009) também refere que embora testes laboratoriais

sejam importantes, o contexto real da aplicação de materiais e respectivos resultados poderão ser mais complexos de serem analisados.

Os testes tipo *batch* são geralmente mais conservadores quando comparadas as concentrações obtidas através de ensaios de percolação através de colunas de teste (Piantone, 2009; Edil, 2008), sendo que os últimos ensaios referidos se aproximam mais de situações em contexto real.

### **3.1. Colheita de Amostras**

As colheitas das amostras quer de *chips* de pneus quer de brita calcária foram da responsabilidade da Recipneu e da Amarsul, respectivamente, tendo-lhes sido solicitado que a dimensão fosse compatível com o diâmetro das garrafas de plástico utilizadas nos ensaios laboratoriais.

### **3.2. Caracterização das Amostras**

Seguidamente efectua-se uma breve caracterização dos *chips* de pneus e da brita calcária.

Os *chips* de pneus (Figura 3.1) resultam do processo mecânico de corte apresentando dimensões variáveis e formas irregulares. Para o presente estudo foram seleccionados pelo fornecedor da amostra cerca de 1500g, os pedaços que apresentavam menores dimensões de forma a não constituírem uma dificuldade aquando a colocação nas garrafas com abertura de diâmetro de 60mm. Em termos médios, os *chips* apresentavam as dimensões 15 x 20mm.



**Figura 3.1** - Pormenor de *chips* de pneu utilizados nos ensaios laboratoriais

O critério da dimensão também foi utilizado no caso da brita (Figura 3.2), pelas razões apresentadas, sendo que em termos médios as dimensões da brita eram de 25 x 20mm. A colheita da amostra deste material natural e inerte, com cerca de 2000g, foi efectuada nas instalações do Aterro da Amarsul em Palmela.



**Figura 3.2** - Pormenor da brita utilizada nos ensaios laboratoriais

Importa referir que na aplicação destes materiais, quer se trate da material britado quer se trate de *chips* de pneus, em contexto real num aterro ou noutra tipo de infra-estruturas, estes materiais apresentam geralmente dimensões superiores.

### **3.3. Ensaios Montagem**

Foram produzidos eluatos resultantes do contacto entre *chips* de pneus e de brita calcária com diferentes meios (água com pH 7,0; água com pH 4,5 e água com pH 9,0), de acordo com a Norma Europeia EN 12457/4, nas seguintes condições: as garrafas da mistura entre o meio e a amostra foram colocados num agitador mecânico a 10rpm durante 24 horas, numa sala a temperatura constante (16 °C).

Foram também colocados no agitador mecânico três garrafas que constituíram os ensaios em branco, apenas com o meio líquido, ou seja, um frasco com água com pH 7,0; um frasco com água a pH 4,5 e um frasco com água com pH 9,0, sujeitos às mesmas condições que os restantes que continham as amostras.

No que se refere à temperatura, este parâmetro regista diversas variações num aterro ao longo do ano, sendo que neste caso se escolheu o valor de 16 °C, constituindo um factor controlado

em termos de contexto laboratorial e facilitar a repetição do ensaio em trabalhos futuros.

Findo o período de tempo estabelecido, filtrou-se o sobrenadante contido no frasco com a mistura, tendo sido retiradas duas tomas no caso dos brancos e três tomas por mistura de amostra com meio líquido. No entanto para análise, apenas foram determinados os parâmetros químicos de uma toma de cada branco, e duas tomas de cada mistura de amostra e meio líquido a diferentes pH (Anexo A.2.).

O protocolo utilizado para a realização destes ensaios efectuou-se através do método de produção de lixiviado conforme Norma Europeia EN 12457/4 e a análise de lixiviado sobretudo de metais pesados conforme ENV 12506, adaptado do Protocolo de produção de lixiviação e determinação de metais pesados, adaptado do Curso de Pós-Graduação e Mestrado em Gestão Integrada e Valorização de Resíduos, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

### **3.3.1. Material**

- agitador mecânico rotativo (8 lugares) de bancada – *Velp Scientifica Rotax 6.8* – previsto para a produção de eluatos;
- balança analítica – *Mettler PJ 3600* – prevista para rigorosamente medir a massa das amostras;
- 9 garrafas de 1 l de plástico, previstas para a solução entre a amostra e o meio de forma a obter-se eluatos;
- 9 balões volumétricos de 500ml;
- sistema de filtração, previsto para filtrar o sobrenadante;
- filtros 0.45µm, previsto para incorporar o sistema de filtração;
- aparelho de pH – *Sartorius Docu-pH meter* – previsto para a leitura de pH da preparação de soluções e dos eluatos;
- condutivímetro – *Orion* – previsto para a leitura de condutividade dos eluatos ;
- amostra de *chips* de pneus;
- amostra de brita calcária;

- água destilada, prevista como meio;
- ácido nítrico (HNO<sub>3</sub> a 65%), previsto para conservar as amostras;
- ácido clorídrico (HCl 1M), previsto para obter meio ácido; e,
- hidróxido de sódio (NaOH 1N ou 15%), previsto para obter meio básico.

### **3.3.2. Procedimento**

Retirar do exsiccador a amostra que foi previamente seca na estufa a 105 °C. Determinar a humidade.

Pesar exactamente 50g de amostra numa garrafa de plástico de 1 l e adicionar água destilada, água a pH 4,5 e água a pH 9,0; na proporção de 10 l/kg de amostra. Para o efeito medir com rigor 500ml de água destilada, água a pH 4,5 e água a pH 9,0 em balão volumétrico. Repetir a operação de modo a preparar 6 garrafas de plástico de 1 l com amostra e meios a pH diferentes, e três brancos (três garrafas de plástico de 1 l só com um dos meios: só com água destilada, só com água a pH 4,5 e só com água a pH 9,0). Verificar se as garrafas estão bem fechadas e colocá-las de modo a que fiquem seguras no agitador mecânico. Agitar a 10rpm durante 24 horas. Após este período retirar as garrafas e deixar em repouso pelo menos, durante 15 minutos.

Preparar o sistema de filtração que inclui bomba de vácuo, kitasato, copo, membrana de filtração e filtros de 0.45µm de porosidade. Filtrar 150ml de eluato cuidadosamente pipetando directamente da garrafa de plástico de 1 l que contém a amostra.

Retirar o eluato-filtrado do kitasato para 2 frascos de plástico devidamente identificados para análise de metais pesados por ICP (Espectrometria de Emissão Atómica de Plasma).

O eluato filtrado restante deve ser colocado num copo para medição do pH, condutividade e temperatura.

### **3.4. Determinação de parâmetros**

Os parâmetros analisados foram o pH e a condutividade (µS/cm), bem como a análise dos seguintes metais: alumínio (Al), arsénio (As), cádmio (Cd), crómio (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), potássio (K), manganésio ou manganês (Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn).

A determinação da concentração de metais foi efectuada através do método de espectroscopia de emissão atómica (Anexo A.4.), de acordo com a Norma ENV 12506. No que respeita aos normativos legais foram tidos em consideração os seguintes diplomas legais: Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de Agosto (que estabelece os valores limite para a qualidade da água), o Decreto-Lei nº 243/2001 de 5 de Setembro (que estabelece os valores limite para a qualidade da água para consumo humano) e o Decreto-Lei nº 183/2009 de 10 de Agosto (que estabelece os valores limite de lixiviação que os resíduos e os seus eluatos deverão respeitar para serem admitidos em cada uma das classes de aterros), com o intuito de comparar os resultados obtidos e os valores estabelecidos por estes diplomas legais.

## 4. Apresentação e Discussão de Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes de lixiviação dos *chips* de pneus e da brita, no que concerne à concentração de metais detectada nos eluatos produzidos. Serão discutidos os resultados obtidos e confrontados com a bibliografia consultada e normativos legais.

Apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, sendo que a Tabela 4.1 corresponde aos valores obtidos na lixiviação dos *chips* de pneus, para os diferentes parâmetros analisados.

**Tabela 4.1:** Resultados dos testes de lixiviação dos *chips* de pneus

	Meio Ácido		Meio Neutro		Meio Básico	
pH (escala de Sorensen) (temperatura 21,9 a 23,6 °C)	8,33		7,65		8,92	
Condutividade (µS/cm) (temperatura 20,7 a 22,6 °C)	209,35		57,65		388	
	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg
Al	0,14	1,36	0,2882	2,88	0,06	0,56
As	< 0.01*	< 0.1	< 0.01*	< 0.1	< 0.01*	< 0.1
Cd	< 0.001*	< 0.01	< 0.001*	< 0.01	< 0.001*	< 0.01
Cr	< 0.001*	< 0.01	0,0012	0,01	0,0009	0,01
Cu	< 0.001*	< 0.01	0,0090	0,09	< 0.001*	< 0.01
Fe	0,2339	2,34	0,4230	4,23	0,082	0,82
K	0,2552	2,55	0,0295	0,29	0,1420	1,42
Mn	0,0089	0,09	0,0298	0,30	0,0012	0,01
Ni	0,0009	0,01	< 0.001*	< 0.01	0,0013	0,01
Pb	0,0093	0,09	0,0030	0,03	0,0035	0,04
Zn	< 0.002*	< 0.02	0,1147	1,15	< 0.002*	< 0.02

\* - concentração do parâmetro analisado é inferior ao valor limite de detecção do equipamento

Na Tabela 4.2 constam os resultados obtidos na lixiviação da brita calcária, para os diferentes parâmetros analisados.

**Tabela 4.2:** Resultados dos testes de lixiviação da brita calcária

	Meio Ácido		Meio Neutro		Meio Básico	
pH (escala de Sorensen) (temperatura 21,9 a 23,6 °C)	9,57		9,66		9,78	
Condutividade (μS/cm) (temperatura 20,7 a 22,6 °C)	169,5		71,4		509	
	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg
Al	0,0568	0,57	0,0939	0,94	0,1233	1,23
As	< 0.01*	< 0.1	< 0.01*	< 0.1	< 0.01*	< 0.1
Cd	< 0.001*	< 0.01	< 0.001*	< 0.01	< 0.001*	< 0.01
Cr	< 0.001*	< 0.01	0,0010	0,01	0,0028	0,03
Cu	< 0.001*	< 0.01	0,0015	0,01	< 0.001*	< 0.01
Fe	0,0074	0,07	0,0042	0,04	< 0.002*	< 0.02
K	< 0.01*	< 0.1	0,0145	0,14	0,662	0,66
Mn	< 0.0002*	< 0.002	0,0008	0,01	< 0.0002*	< 0.002
Ni	< 0.001*	< 0.01	< 0.001*	< 0.01	0,0040	0,04
Pb	< 0.006*	< 0.06	0,0012	0,01	0,0103	0,10
Zn	< 0.002*	< 0.02	< 0.002*	< 0.02	< 0.002*	< 0.02

\* - concentração do parâmetro analisado é inferior ao valor limite de detecção do equipamento

Os valores apresentados em ambas as tabelas correspondem à média dos valores das duas tomas das concentrações dos metais nos eluatos, sendo os valores expressos em mg/l. De forma a transformar esses resultados em mg/kg, foi utilizada a seguinte expressão:

$$A(mg/kg) = \frac{c \times v}{p}$$

em que  $A$  representa a concentração de metal expresso em mg/kg peso seco;  $c$  representa a concentração do metal no eluato, expresso em mg/l;  $v$  representa o volume de água destilada, expresso em l, e por último  $p$  representa o peso seco da amostra, expresso em kg. Como a relação estabelecida entre o líquido e sólido era de 10 l/kg,  $v$  corresponde ao valor de 0,5 l e  $p$  corresponde ao valor de 0,050kg. No que respeita ao peso seco, importa referir que os valores de humidade das amostras de *chips* e brita calcária são desprezáveis, pelo que os resultados são expressos em peso tal e qual.

No que se refere aos parâmetros analisados As e Cd, em todas as amostras não foi detectada a presença destes metais, permitindo concluir que as concentrações eram inferiores ao limite de

deteccção (valor limite de deteccção: As – 10µg/l e Cd – 1µg/l).

Relativamente à Tabela 4.1 e Tabela 4.2, os parâmetros em que não são apresentados valores revelam que estes são inferiores ao nível de deteccção. Assim, apresentam-se seguidamente os valores mínimos de deteccção do equipamento: Al – 10µg/l, Cr – 1µg/l, Cu – 1µg/l, Fe – 2µg/l, K – 10µg/l, Mn – 0,2µg/l, Ni – 1µg/l, Pb – 6µg/l, Zn – 2µg/l.

Como é possível constatar pela análise das duas tabelas, e confrontando com os resultados obtidos nas amostras que serviram de branco (Anexo A.III), considera-se que os reagentes utilizados previstos para se obter o meio ácido e o meio básico, poderão ter influenciado o valor do pH, estando associados eventuais erros nos ensaios de montagem e/ou fontes de contaminação. Não foi efectuada medição do valor do pH no tempo 0, ou seja no meio que cada garrafa tinha (brancos, e amostras e meios), mas somente após o período de 24 horas de contacto no agitador mecânico. Por outro lado, prevê-se ainda que os componentes das amostras tenham também influenciado os valores de pH, como é possível constatar nos valores de pH obtidos nas garrafas que continham as amostras de brita calcária, em que os valores de pH se situaram na ordem de 9,6 e 9,8 independentemente do meio, tornando desta forma todas as soluções com pH básico.

Seguidamente serão designados os meios ácido, neutro e básico, apenas como referência, sendo no entanto claro que estes conceitos não se adequam aos valores de pH obtidos após as 24 horas de contacto entre o meio e as amostras.

Por outro lado, tem-se ainda em consideração que os valores das concentrações apresentam diferenças reduzidas entre eles, apesar dos meios serem supostamente diferentes em termos de pH.

De uma forma geral os *chips* de pneus lixiviam concentrações superiores de metais quando comparadas com as concentrações de lixiviado de brita, excepto para os casos do Cr, Ni e Pb (Tabelas 4.1 e 4.2). No caso do parâmetro Zn, este metal apenas é detectado no lixiviado dos *chips* de pneus em meio ácido.

Segundo Edeskär (2004), foi realizado um estudo por Håøya em 2002, em que foram efectuados testes de lixiviação a fragmentos de pneus de dimensão inferior a 40mm, em meio líquido neutro, e segundo a norma europeia EN 12457, tendo em consideração a relação L/S de 10 l/kg. Neste estudo foram analisados os seguintes parâmetros As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn. Na Tabela 4.3 constam os resultados do referido estudo, exceptuando para o

parâmetro Co, visto não ter sido objecto de estudo da presente investigação. Os testes numerados de 1 a 5 representam as repetições do ensaio laboratorial.

**Tabela 4.3:** Resultados da lixiviação de fragmentos de pneus de Håøya (2002) (Edeskär, 2004)

Parâmetro	Teste 1		Teste 2		Teste 3		Teste 4		Teste 5	
	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg
As	0,001	<0,001	0,001	<0,001	0,001	<0,001	0,001	<0,001	0,001	<0,001
Cd	0,0005	<0,005	0,0006	0,006	0,0005	<0,005	0,0005	<0,005	0,0005	0,005
Cr	0,005	<0,05	0,005	<0,05	0,005	<0,05	0,005	<0,05	0,005	<0,05
Cu	0,005	<0,05	0,005	<0,05	0,005	<0,05	0,005	<0,05	0,001	<0,1
Fe	0,732	7,3	0,603	6	0,444	4,4	0,497	5	1,25	12,5
Mn	0,061	0,61	0,071	0,7	0,084	0,8	0,073	0,73	0,085	0,8
Ni	0,005	<0,05	0,005	<0,05	0,005	<0,05	0,005	<0,05	0,005	<0,05
Pb	0,010	<0,10	0,010	<0,10	0,010	0,1	0,010	<0,10	0,010	<0,10
Zn	0,134	1,4	0,212	2,1	0,196	2	0,172	1,7	0,228	2,3

Pela análise das Tabelas 4.1 e 4.3 é possível constatar que os resultados obtidos por Håøya (2002) para os parâmetros As (0,001mg/l) e Cd (0,0005 e 0,0006mg/l) são valores inferiores aos valores limites de detecção do equipamento utilizado na presente investigação (0,01mg/l, 0,001mg/l, respectivamente).

Confrontando os resultados obtidos com os resultados dos testes de lixiviação de Håøya (2002), estes constituem sempre valores superiores aos analisados na presente investigação (Cr, Fe, Mn, Ni Pb e Zn), à excepção do parâmetro Cu, em que o valor obtido se encontra entre o intervalo de 0,005 e 0,01mg/l definidos pelos 5 testes de Håøya. No entanto, importa salientar que no caso dos parâmetros Fe, Pb e Zn os valores não apresentam diferenças muito relevantes quando comparados.

No que se refere a todos os parâmetros analisados, esperava-se que os metais tendessem a aparecer em maior concentração em condições de meio ácido, pelo facto de se promover a reacção entre o metal e o ião  $H^+$ , onde o metal doa electrões ao  $H^+$  formando  $H_2$ , ficando o metal ligado a um anião (Engstrom e Lamb, 1994 e Liu *et al.*, 1998).

Apenas foi possível constatar este facto no caso dos valores de K, Ni e Pb nos testes de lixiviação com *chips* de pneus. Nos restantes testes realizados não se verificou esta ocorrência, sendo as concentrações mais elevadas de metais as respeitantes aos testes de lixiviação com

*chips* de pneus em meio neutro do que os efectuados em meio ácido (parâmetros Al, Cr, Cu, Fe, Mn e Zn).

No caso dos ensaios com a brita as concentrações tenderam a ser mais elevadas quando o meio era básico, como se pode constatar pelos valores obtidos para o parâmetro Al, Cr, K, Mn e Pb.

Os valores obtidos através da lixiviação de metais podem ainda ser comparados com os valores estabelecidos no Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto. Embora não tenham sido analisados todos os parâmetros que constam na Tabela nº 2 Parte B do Anexo IV do referido diploma legal, referente aos valores limites de lixiviação de resíduos inertes, apresentam-se seguidamente esses valores na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4:** Valores limites de lixiviação para resíduos inertes

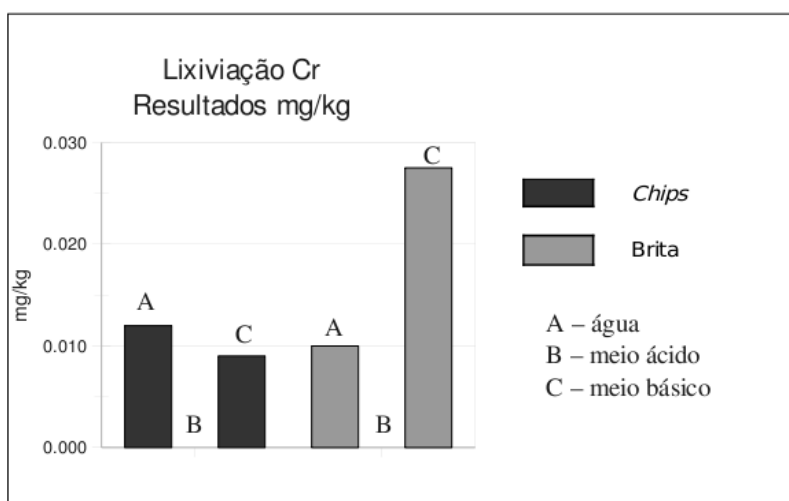
Componente	mg/kg de matéria seca L/S (*) = 10 l / kg
As	0,5
Cd	0,04
Cr total	0,5
Cu	2
Ni	0,4
Pb	0,5
Zn	4

\* - Relação líquido para sólido para libertação total

Apesar de não constituir como objectivo a deposição de *chips* de pneus em aterro, mas sim o seu uso na constituição da infra-estrutura, considerou-se interessante comparar os dados obtidos com os valores estabelecidos no decreto-lei nº 183/2009, de 10 de Agosto que define a classificação de resíduos a depositar em aterro.

Para os parâmetros analisados, pode considerar-se que quer a brita quer os *chips* podem classificar-se em resíduos inertes, visto os valores obtidos serem bastante inferiores aos valores limite estabelecidos para este tipo de resíduos.

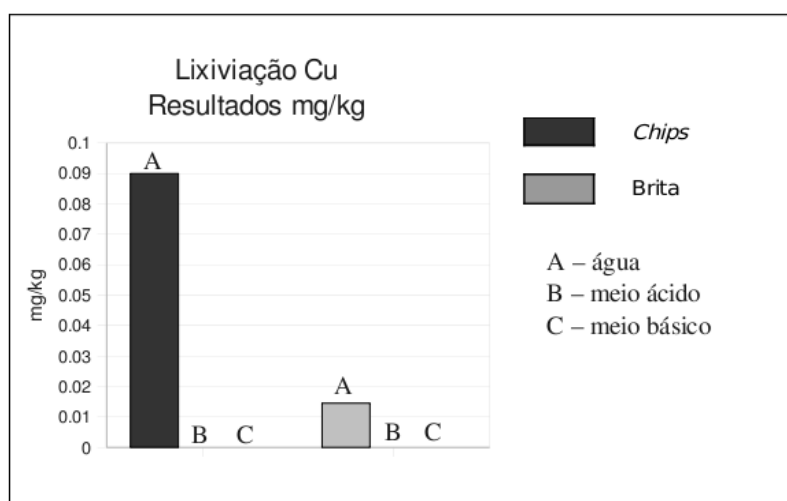
Nas Figuras 4.1 a 4.5 permitem constatar esse facto, confrontando os valores obtidos com os valores estabelecidos pelo diploma legal.



**Figura 4.1** - Resultados obtidos para o parâmetro Cr, expresso em mg/kg.

Pela análise do gráfico da Figura 4.1, é possível constatar que todos os valores são inferiores ao valor limite de lixiviação estabelecido pelo Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto – 0,5mg/kg. Quer no caso dos *chips* quer no caso da brita, as concentrações em meio ácido do parâmetro analisado foram inferiores ao valor limite de detecção do equipamento. Os valores em meio neutro (0,01mg/kg) e em meio básico (0,01mg/kg) dos *chips* são similares. O valor da concentração de cromo na brita em meio neutro é de igual ordem de grandeza ao dos valores detectados para o caso dos *chips* (0,01mg/kg).

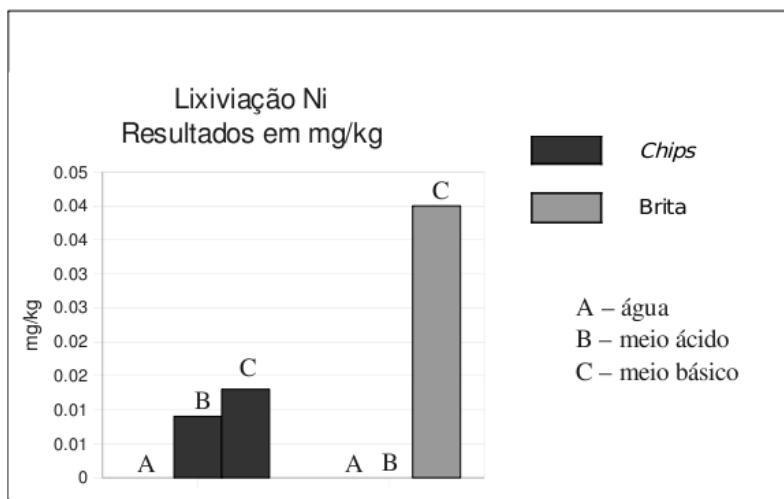
Destaca-se a concentração elevada, quando comparada com as restantes, da concentração de cromo na lixiviação da brita em meio básico, tendo registado o valor mais elevado dos ensaios laboratoriais para este parâmetro (0,03mg/kg).



**Figura 4.2** - Resultados obtidos para o parâmetro Cu, expresso em mg/kg

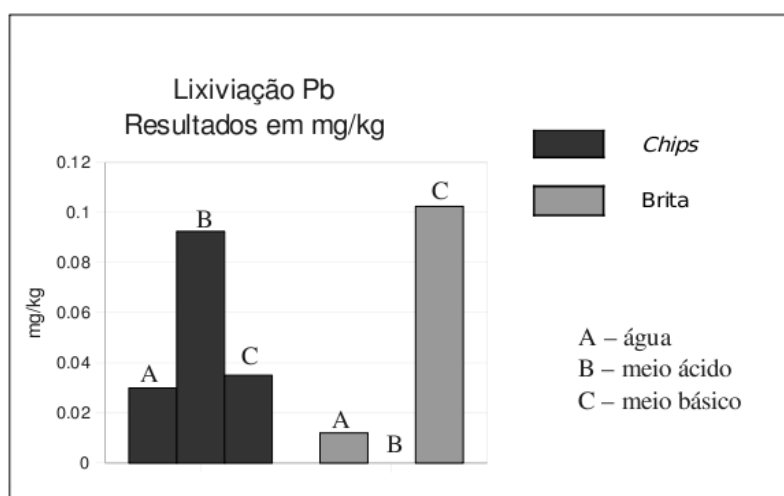
O valor limite de lixiviação estabelecido pelo Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto é de 2mg/kg para o parâmetro Cu. Como é possível verificar na Figura 4.2, as concentrações detectadas em meio neutro quer no caso dos *chips* quer no caso da brita constituem inferiores ao valor limite. O valor da concentração de Cu em meio neutro é superior no caso dos *chips* (0,09mg/kg) do que no caso da brita (0,01mg/kg).

Em meio ácido e em meio básico não foram detectadas concentrações para este parâmetro.



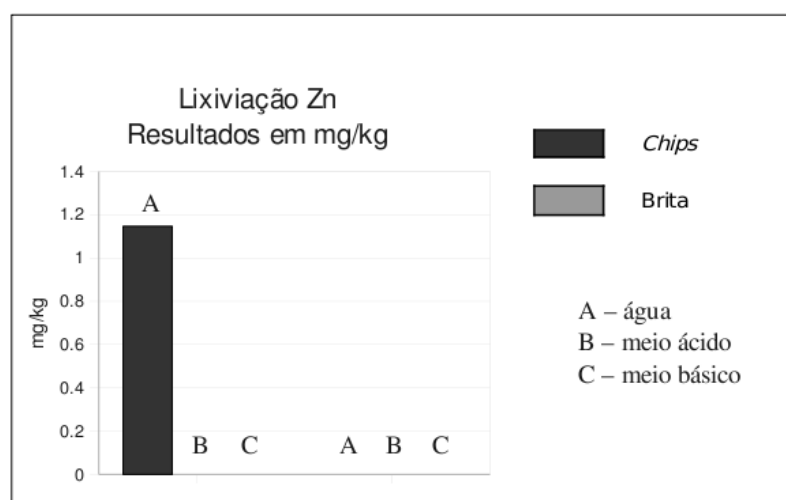
**Figura 4.3** - Resultados obtidos para o parâmetro Ni, expresso em mg/kg

Analisando a Figura 4.3, verifica-se que os valores das concentrações deste parâmetro são todas inferiores ao valor limite de lixiviação de 0,4mg/kg, de acordo com o disposto no Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto. Não foram detectadas concentrações deste metal em meio neutro quer para a brita quer para os *chips*, e em meio ácido para o caso da brita. No que se refere ao caso dos *chips*, a concentração em meio ácido foi sensivelmente inferior à concentração em meio básico. A concentração mais elevada, quando comparada com as restantes, corresponde à concentração deste metal no ensaio entre a brita e o meio básico (0,04mg/kg).



**Figura 4.4** - Resultados obtidos para o parâmetro Pb, expresso em mg/kg

O valor limite de lixiviação do Pb é de 0,5mg/kg, segundo o Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto, valor que não foi ultrapassado por nenhum dos ensaios como se pode observar na Figura 4.4. Apenas em meio ácido, a concentração da lixiviação da brita para este parâmetro foi inferior ao valor limite de detecção do equipamento. No caso dos *chips*, a concentração mais elevada de lixiviação corresponde ao meio ácido (0,09mg/kg), seguida do meio básico (0,04mg/kg) e do meio neutro (0,03mg/kg). Relativamente aos ensaios com a brita, o valor mais elevado corresponde à lixiviação em meio básico (0,10mg/kg), a que corresponde a concentração mais elevada quando comparada com as restantes. A lixiviação em meio neutro da brita apresenta um valor de 0,01mg/kg, assumindo o valor mais baixo quando comparado com os valores das restantes concentrações.



**Figura 4.5** - Resultados obtidos para o parâmetro Zn, expresso em mg/kg

No caso do parâmetro Zn, apenas ocorreu lixiviação deste metal no ensaio entre *chips* de pneus e o meio neutro (1,15mg/kg), sendo as restantes concentrações inferiores ao valor limite de detecção do equipamento. Conforme o disposto no Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto, o valor limite de lixiviação é de 4mg/kg, valor superior ao detectado no ensaio entre os *chips* em meio neutro.

Tendo em consideração a literatura consultada, em que os resultados obtidos na lixiviação dos *chips* foram comparados com os valores de parâmetros de água para consumo humano, decidiu-se também efectuar esta comparação. A Tabela 4.5 apresenta os valores para cada um dos parâmetros analisados estabelecidos no anexo VI do Decreto-Lei nº 236/98, de 1 de

Agosto que estabelecem os Valores Máximo Recomendados (VMR) e os valores Máximo Admissíveis (VMA), bem como os valores dispostos no Decreto-Lei nº 243/2001, de 5 de Setembro e os valores indicativos recomendados pela Organização Mundial de Saúde.

**Tabela 4.5:** VMR e VMA para água para consumo humano

Parâmetros	D.L. 236/98, de 1 de Agosto <sup>1</sup>		D.L. 243/2001, de 5 de Setembro	OMS <sup>2</sup> Valor Indicativo
	VMR	VMA		
pH (escala de Sorensen)	6,5-8,5	9,5	-	-
Condutividade (µS/cm)	400	-	-	-
Al (mg/l)	0,05	0,2	-	-
As (mg/l)	-	0,05	0,01	0,05
Cd (mg/l)	-	5	5	5
Cr (mg/l)	-	0,05	0,05	0,05
Cu (mg/l)	0,1	3	2	1*
Fe (mg/l)	0,05	0,2	-	-
K (mg/l)	10	12	-	-
Mn (mg/l)	0,02	0,05	-	-
Ni (mg/l)	10	12	20	-
Pb (mg/l)	-	0,05	-	0,005
Zn (mg/l)	0,1	5	0,2	0,2

\* - Valor indicativo por razões estéticas e não toxicológicas

<sup>1</sup> – Anexo VI

<sup>2</sup> – Organização Mundial de Saúde

Importa ressaltar que a comparação efectuada para estes parâmetros apenas é válida tendo em consideração a relação L/S utilizada, pelo que estes resultados poderão não ser extrapolados para outros ensaios laboratoriais e/ou para situações em contexto real. Pode destacar-se o meio líquido, que no caso dos ensaios de *batch* não é realista, visto estarmos na presença de um volume de líquido fixo, não sendo tido em consideração o potencial de dispersão e de adsorção ( que poderá existir em situações reais (Edil, 2008). O mesmo autor refere ainda que o facto de se submeter os *chips* de pneus a condições agressivas, os testes não simulam as condições reais existentes nas obras geotécnicas onde este tipo de material é aplicado.

Os parâmetros Cr, Cu, K e Ni destacam-se por apresentarem concentrações inferiores aos valores estabelecidos quer pelos diplomas legais quer pelos valores indicativos da OMS.

No caso do Pb, apenas nos *chips* de pneus em meio ácido a concentração deste metal no lixiviado (0,0093mg/l) é superior ao VMR indicativo da OMS.

Pela análise de estudos similares, quer referentes sobre testes de lixiviação, quer referentes a ensaios de campo, era expectável que nos ensaios com os *chips* as concentrações de Al, Fe, Mn e Zn fossem elevadas visto fazerem parte da composição dos pneus. No caso do Al, Fe e Mn, estes componentes constituem geralmente a liga metálica que os pneus têm incorporada. Quando os pneus são submetidos ao processo de corte, esta liga metálica fica geralmente exposta.

No que respeita ao parâmetro Fe, a concentração deste metal em meio básico (0,0822 mg/l) é superior ao VMR, mas inferior ao VMA. Quer nos meios neutro (0,4230 mg/l) e ácido (0,2339mg/l), a concentração de Fe é superior ao VMA.

Apenas a concentração de Mn obtida através da lixiviação de *chips* de pneus em meio neutro (0,0298mg/l) ultrapassou o VMR, conforme o disposto no Decreto-Lei nº 236/98, de 1 de Agosto, constituindo os valores em meio ácido (0,0089mg/l) e em meio básico (0,0012mg/l), valores inferiores ao VMR.

No que se refere ao Zn, este metal faz geralmente parte dos agentes activadores de cura no fabrico de pneus (óxido de zinco). No caso dos ensaios efectuados a este metal, este apenas foi detectado no ensaio onde a amostra era *chips* de pneus. O valor mais elevado corresponde às condições onde o meio é neutro, sendo o VMR excedido mas não ultrapassa o VMA no que concerne ao Decreto-Lei nº 236/98, de 1 de Agosto. No caso do Decreto-Lei nº 243/2001, de 5 de Setembro e os valores indicativos da OMS, o resultado obtido também não ultrapassa os valores estabelecidos.

Relativamente à lixiviação da brita constata-se pela análise dos dados da Tabela 4.2, as concentrações de Al, Cr, K, Ni e Pb foram mais elevadas quando o ensaio se realizou em meio básico, quando comparadas com os restantes meios. No caso dos parâmetros Cu, Fe e Mn em meio básico os valores das concentrações foram inferiores aos limites de detecção do equipamento. O mesmo sucedeu para o Ni em meio neutro e em meio ácido e para Cr, Cu, K, Mn e Ni, em meio ácido.

Em comparação com os valores limites estabelecidos na Tabela 4.5, destaca-se o parâmetro Al pelo facto dos valores de lixiviação em meio neutro (0,0939mg/l), em meio ácido (0,0568mg/l) e em meio básico (0,1233mg/l) serem superiores ao VMR, não ultrapassando no entanto o VMA.

Destaca-se também que na lixiviação do Pb em meio básico (0,0103mg/l) o valor obtido é inferior ao VMA, mas superior ao valor indicado pela OMS.

Os restantes parâmetros apresentam valores inferiores aos respectivos VMR.

Em suma, os parâmetros que apresentam concentrações com valores mais elevados nos ensaios de lixiviação de *chips* de pneus estão elencados como substâncias indesejáveis do ponto de vista estético no diploma legal em referência, exceptuando o Al. Presume-se que apesar dos valores elevados estes não sejam susceptíveis de causar danos ao ambiente e/ou à saúde humana. Porém importa salientar que os ensaios realizados não permitem inferir resultados em situações reais nem deduzir os possíveis efeitos a médio e/ou longo prazo aquando a aplicação deste material.

Importa referir, e fazendo analogia dos *chips* de pneus às lamas das estações de tratamento de águas (resíduo a aplicar como material em obras geotécnicas, tais como na estrutura de base de aterros para deposição de resíduos), estudado por Roque e Cabeças (2009), não se prevê que possam existir contaminações significativas para solos, águas superficiais e subterrâneas a partir de obras geotécnicas construídas com *chips* de pneus. Roque e Cabeças (2009) referem que a quantidade de cada espécie química que pode ser lixiviada a partir de uma obra geotécnica, será não só reduzida e descontínua (e.g. água pluvial provém de um fenómeno intermitente), como haverá diluição do eluato até atingir as águas superficiais ou subterrâneas. Além disso, não havendo qualquer alimentação exterior, os autores referem ainda que a massa poluente tende para um esgotamento a prazo.

Edeskär (2006) refere também que os testes de lixiviação são efectuados com regularidade, sendo as relações L/S mais utilizadas a relação L/S 2 e a relação L/S 10. No estudo efectuado por este autor na aplicação de fragmentos de pneus na construção da sub-base de estrada, e tendo em consideração a estimativa do balanço entre a precipitação e a evaporação deste local onde foi construída a estrada, prevê-se que a relação L/S 2 seja atingida em 36 anos, enquanto que no que respeita à relação L/S 10 prevê-se que a relação L/S 10 seja atingida em 180 anos. Deste modo, e para aquele local especificamente, o tempo para atingir as concentrações indicadas pelos testes de lixiviação é consideravelmente longo.

## 5. Considerações Finais

Os resultados obtidos no ensaio laboratorial poderão ter sido influenciados por possíveis contaminações e eventuais erros nos ensaios de montagem. Não foi efectuada medição do valor do pH no tempo 0, ou seja no meio que cada garrafa tinha (brancos, e amostras e meios), mas na preparação do meio e nos eluatos após o período de 24 horas de contacto no agitador mecânico. Por outro lado, prevê-se ainda que os componentes das amostras tenham também influenciado os valores de pH, como é possível constatar nos valores de pH obtidos nas garrafas que continham as amostras de brita calcária, em que os valores de pH se situaram na ordem de 9,6 e 9,8 independentemente do meio, tornando desta forma todas as soluções com pH básico.

No entanto as designações de meio ácido, meio neutro e meio básico, foram mantidas apenas como referência, sendo no entanto claro que estes conceitos não se adequam aos valores de pH nos eluatos obtidos após as 24 horas de contacto entre o meio e as amostras.

Por outro lado, tem-se ainda em consideração que os valores das concentrações apresentam diferenças pouco significativas entre eles.

Refere-se que dos parâmetros químicos analisados, as concentrações de metais tenderam a ser mais elevadas em meio neutro do que em meio ácido, contrariamente ao relatado por Liu *et al.* (1998) e Engstrom e Lamb (1994), excepto para os parâmetros K, Ni e Pb. Não obstante, existem autores que referem a inexistência de uma forte correlação entre os valores de pH e as características do lixiviado (Edil, 2008).

De uma forma geral, os resultados obtidos foram inferiores, embora similares aos relatados por Håøya em 2002 (Edeskär, 2004). As concentrações de As, Cd e Ni de Håøya em 2002 constituíam valores inferiores aos limites de detecção do equipamento utilizado na presente investigação, sendo que no caso do As e Cd estes metais não foram detectados na presente investigação. Teve-se em consideração este autor devido ao facto de este ter realizado o mesmo tipo de ensaio laboratorial, com meio neutro e a mesma relação L/S, o que facilitou a comparação dos valores obtidos.

Em termos de lixiviação de metais, e tendo em conta a constituição dos pneus, os elementos químicos que se destacam pelas concentrações mais elevadas são o Al, o Fe, o Mn e o Zn, resultados similares aos relatados por diversos autores (Aydilek *et al.*, 2006; EEDMS/EOS,

2005; Rowe e McIsaac, 2005; Edeskär, 2004; Park *et al.*, 2003; Young *et al.*, 2003; Humphrey e Katz, 2001 e 2000), ainda que tenham sido estudos efectuados em circunstâncias distintas (tipo de ensaio, relação L/S, duração) e não ser possível a comparação dos seus valores. Estes parâmetros não estão directamente ligados a aspectos sanitários, tratando-se de elementos indesejáveis, assim designados por não terem efeitos tóxicos, mas por provocarem efeitos visíveis e indesejáveis. As doses tóxicas para esses elementos são muito mais elevadas que as doses recomendadas e aceitáveis para consumo humano (Mendes e Oliveira, 2004).

Destaca-se contudo, que a análise efectuada entre as concentrações dos metais e a sua comparação com os valores estabelecidos pelos diplomas legais referentes à qualidade de água para consumo humano, apenas é válida tendo em consideração a relação L/S 10 l/kg. Assim, esta análise poderá não ser extrapolada para outros ensaios laboratoriais e/ou para situações em contexto real.

Por outro lado, e comparando os resultados obtidos com os valores limite de lixiviação estabelecidos no Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto, quer a brita calcária quer os *chips* de pneus podem ser considerados como resíduos inertes, visto os resultados obtidos serem muito inferiores aos valores estabelecidos. No entanto, em alguns parâmetros a brita constitui um material mais inerte quando comparado com os *chips*. Pretende-se que os *chips* de pneus sejam considerados como material e não como resíduo.

Salientando que se tratou apenas de um ensaio laboratorial em que não houve possibilidade de efectuar repetições dos ensaios como seria desejável, e tendo em consideração as limitações do estudo como a possibilidade de existência de possíveis contaminações dos eluatos, considera-se que os *chips* de pneus poderão constituir uma alternativa à aplicação da brita calcária, promovendo-se desta forma a valorização de um resíduo e a poupança de um recurso natural.

Assim, deverão ser efectuados mais estudos de lixiviação de metais, bem como na possível lixiviação de outro tipo de elementos constituintes de pneus (e.g. compostos orgânicos), à escala laboratorial, que incluam um maior número de repetições dos ensaios e/ou outro tipo de ensaios (e.g. ensaios de percolação em colunas). Devem ainda ser promovidos e monitorizados projectos com aplicações em situações reais, de forma a que se possa verificar que os *chips* de pneus são uma alternativa viável e fiável, que não é susceptível de provocar danos à saúde humana e/ou ao ambiente, a médio e/ou longo prazo. Importa referir que os testes de

lixiviação tipo *batch*, apesar de constituírem elementos fundamentais para a caracterização de um material, poderão não ser os mais representativos de situações em contexto real. Assim, deverão ser fomentados estudos com o recurso a lisímetros, que apesar de mais morosos e onerosos, poderão indicar valores de concentrações mais fidedignos.

Deverá ser promovido o estudo da aplicação de *chips* de pneus no Aterro da Amarsul em Palmela, e/ou em outro aterro onde se tenha efectuado aplicação semelhante.

Em investigações em contexto real deverão ser averiguadas as relações L/S, para que seja possível a comparação dos valores obtidos em ensaios de campo e os resultados de investigações laboratoriais e/ou de normativos de referência.

Por outro lado, serão ainda necessários estudos técnico-económicos que suportem a viabilidade da aplicação deste tipo de material, quer em aterros quer nouro tipo de obras geotécnicas, em comparação com os materiais que tipicamente são utilizados. No âmbito da temática de aplicação de *chips* de pneus em detrimento de agregados naturais, sugere-se a abordagem dos seguintes tópicos: (1) o custo quer dos materiais agregados naturais quer dos materiais valorizados; (2) a distância e/ou o transporte dos materiais; e (3) o valor económico implícito ao facto de se promover a conservação de um recurso natural e a valorização de um resíduo.

Em suma, este material apesar de ser vulgarmente utilizado nos EUA, Japão, Canadá e em alguns países da Europa tais como França ou Espanha, necessita de uma maior divulgação e de estudo, para que seja melhor definida a viabilidade da sua aplicação e assegurado que não constitui qualquer risco, a médio e/ou longo prazo, susceptível de provocar dano ao ambiente e/ou à saúde humana. Por este facto, a definição de critérios e especificações para que os pneus possam perder o estatuto de resíduos, previsto na Directiva nº 2008/98/CE, poderá constituir um incentivo para a utilização de pneus usados e desta forma promover a reciclagem e a valorização deste fluxo.



## 6. Referências Bibliográficas

- Aiello, M.; Leuzzi, F.; Centonze, G.; Maffezzoli, A. (2009). “Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: pull-out behaviour, compressive and flexural strength”, *Waste Management*, nº 29, pp. 1960-1970
- Allman, M.; Simundic, G. (1998). “Testing of a retaining wall constructed of waste tyres”, Editor Pedro S. Sêco e Pinto, in *Environmental Geotechnics, volume 2 – Remediation of Polluted Land and Abandoned Landfills, Re-Use or By-Product, Risk Analysis, Quality Assurance and Regulations*. SPG e LNEC Lisboa. A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield , pp. 655–660
- Amaral, J.; Canas, A.; Correia, M.; Ladeira, S.; Ferrão, P.; Lagos, P.; Olim, M.; Reis, C. (2000). *A Ecologia Industrial e o Automóvel em Portugal*, Celta Editora, ISBN 972-774-092-8
- Amarsul (2009). *Confinamento Técnico*. (Consult. 3 Jan. 2009) Disponível na WWW:<URL: <http://www.amarsul.pt>
- Amoozegar, A.; Robarge, W. (1999). *Evaluation of tire chips as a substitute for gravel in the trenches of septic systems – Final Report for Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance Department of Environment and Natural Resources and Chatam County Board of Commissioners, North Carolina State University*
- APA – Agência Portuguesa do Ambiente (2008a). *Dossier Temático – Prevenção de Resíduos – Tema 6 – Pneus Usados*. Amadora. (Consult. 3 Jan. 2009) Disponível na WWW:<URL: <http://www.apambiente.pt>
- APA – Agência Portuguesa do Ambiente (2008b). *Relatório do Estado do Ambiente 2007*. Agência Portuguesa do Ambiente, Depósito Legal 138 314/99, Tiragem 500 exemplares, ISBN 978-972-8577-46-9
- Aydilek, A.; Madden, E.; Demirkan, M. (2006). “Field Evaluation of a Lechate Collection System Constructed with Scrap Tires”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, Nº 8, pp. 990-1000
- Barkerleamar Engineering Consultants (2005). *Scrap Tire Workshop – Construction Applications for Landfills*. Training Manual/Reference Guide

- Basel Convention (2008). *Revised technical guidelines on environmentally sound management of used tyres*, Technical matters: technical guidelines on environmentally sound management: revised technical guidelines on environmentally sound management of used tyres , Versão Revista em Novembro
- Basel Convention (1999). *Technical Guidelines on Hazardous Wastes: Identification and Management of Used Tyres*, Basel Convention on the control of transboundary movements of hazardous wastes and their disposal, Basel Convention Series, SBC No 99/008, Geneve
- Bernal, A.; Lovell, C.; Salgado, R. (1996). “Laboratory study on the use of tire shreds and rubber-sand in backfilled and reinforced soil applications”, Joint Transportation Research Program, Purdue Libraries - e-pub <http://docs.lib.purdue.edu/jtrp/136>
- Blumenthal, M. (2001). *The McGraw-Hill Recycling Handbook*. The McGraw-Hill, United States of America, 2ª edição, ISBN 0-07-039156-4
- Borrego, C.; Lopes, M.; Ribeiro, I. (2009). “Sociedade, tecnologia e ambiente: um trinómio para o desenvolvimento sustentável”, Actas – Seminário de Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas – Caracterização e Medidas para o Desenvolvimento do Sector, Universidade de Aveiro
- Braga, J.; Morgado, E. (2007). *Guia do Ambiente – Empresas, Competitividade e Desenvolvimento Sustentável*. Monitor, 1ª Edição, Lisboa, ISBN 978-972-9413-69-8
- Cabeças, A. (2007). “Perspectiva Histórica e Experiências Adquiridas”, Seminário Geotécnico de Aterros de Resíduos, LNEC, Lisboa
- Cabeças, A.; Dores, R. (2008). “Aplicação de *Chips* de Pneus em Camadas de Drenagem”, Encontro Nacional de Saneamento Básico (ENASB), Associação Portuguesa para Estudos de Saneamento Básico (APESB), Covilhã
- Campos, P. (2006). *Aproveitamento Industrial da Borracha Reciclada de Pneus Usados (a reciclagem do resíduo 160103 da L.E.R.)*, Dissertação de Mestrado em Gestão Ambiental Universidade do Minho
- Cetin, H.; Fener, M.; Gunaydin, O. (2006). “Geotechnical Properties of Tire-Cohesive Clayey Soil Mixtures as a Fill Material”, *Engineering Geology*, Vol. 8, pp. 110-120

- Choi, M.; Hudak, K.; Penabad, D. (2007). *Scrap Tire Management – A Case Study of Vermont*. Technical Report, Rockefeller Center at Dartmouth College
- Dias, J.; Santos, L. (2008). “Characteristics of asphalt binders modified with the incorporation of recycled crumbled rubber”, 3<sup>rd</sup> European Pavement and Asset Management Conference – EPAM3, Coimbra, Disponível na WWW: <URL: [www.biosafe.pt/noticias/LuisFeiteiraEpam3.pdf](http://www.biosafe.pt/noticias/LuisFeiteiraEpam3.pdf)
- Edeskär, T. (2006). *Use of Tyre Shreds in Civil Engineering Applications – Technical and Environmental Properties*, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Department of Civil and Mining Engineering – Division of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2006:67, ISSN: 1402-1544 - ISRN: LTU-DT-06/07—SE
- Edeskär, T. (2004). *Technical and Environmental Properties of Tyre Shreds Focusing on Ground Engineering Applications*, Lulea University of Technology, Department of Civil and Mining Engineering – Division of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSN: 1402-1536 - ISRN: LTU-TR—2004/5—SE
- Edil, T. (2008). “A review of environmental impacts and environmental applications of shredded scrap tires”, In pp. 3–18, Hemanta Hazarika and Kazuya Yasuhara, editores, *Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges*, Taylor & Francis, London, Master e-book ISBN 0-203-92932-2
- Edil, T.; Park, J.; Kim, J (2004). “Effectiveness of Scrap Tires as Sorptive Drainage Material”, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 130, N° 7, pp. 824-831
- EEDMS; EOS (2005). *Évaluation Environnementale Déchets – Utilisation des pneumatiques usages entiers ou broyés dans le contexte des centres de stockage de déchets et dans le domaine des bassins de rétention d’eaux pluviales – Synthèse d’une étude de l’état de l’art technique, économique et réglementaire dans les domaines d’application envisagés*. Technical Report, EEDMS/EOS pour ALIAPUR et l’ADEME (Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie)
- EGF (2007). *Projecto de Aplicação de Chips de Pneus na Camada de Encerramento do AS de Palmela*, EGF – Empresa Geral do Fomento

EN 12457/4 – Lixiviação – Ensaio de Conformidade de Lixiviação de Materiais de Resíduos Granulares e de Lamas

Engstrom, G.; Lamb, R. (1994). *Using Shredded Waste Tires as Lightweight Fill Material for Road Subgrades – A Summary Report*, Minnesota Department of Transportation, Physical Research & Geotechnical Engineering Sections, Materials Research & Engineering, Maplewood, MN

ENV 12506 – Análise de Eluatos – Determinação de pH, As, Ba, Cd, Cl, Co, Cr, Cr VI, Cu, Mo, Ni, NO<sub>2</sub>, Pb, Stotal, SO<sub>4</sub>, V e Zn (Análise de constituintes inorgânicos de resíduos sólidos e/ou seus eluatos e elementos em grandes quantidades, pequenas e vestigiais)

ETRA (2008). “Tyre Recycling in a Recycling Society – 2008 update”, presented in Ecolanes Management Meeting

ETRMA (2007). “End-of-Life Tyres – A valuable resource with growing potential”, European Tyre and Rubber Manufacturers Association, Bruxelas, Disponível na WWW:<URL: [www.etrma.org/public/activitieseofltelts.asp](http://www.etrma.org/public/activitieseofltelts.asp)

Eurostat (2009). “Municipal Waste – half a ton of municipal waste generated per person in EU27 in 2007 – almost 40% of this waste was recycled or composted”, Eurostat News Release, 31/2009, Eurostat Press Office, Disponível na WWW:<URL: <http://ec.europa.eu/eurostat>

Ferrão, P.; Ribeiro, P.; Silva, P. (2008). “A management system for end-of-life tyres: A Portuguese case study”, *Waste Management*, N° 28, pp. 604-614

Foose, G.; Benson, C.; Bosscher, P. (1996). “Sand reinforced with shredded waste tires”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, N° 9, pp. 760-767

GeoSyntec Consultants, Inc. (2008). *Guidance Manual for Engineering Uses of Scrap Tires*, Maryland Department of the Environment's Scrap Tire Program, Columbia, Maryland, Geosyntec Project No ME0012-11

GeoSyntec Consultants, Inc. (1998). *Guidance Manual – Tire Shreds as Final Cover Foundation Layer Material at Municipal Solid Waste Landfills*, California Integrated Waste Management Board (CIWMB), Sacramento California, Project Number: WL0048, CIWMB Publication #212-98-002

- Guiness, J. (2007). “Confidence in Quality”, *The Journal for Waste & Resource Management Professionals*, pp. 24-27
- Huang, Y.; Bird, R.; Heidrich, O. (2007). “A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements”, *Resources, Conservation and Recycling*, N° 52, pp. 58–73
- Humphrey, D. (2005). “Tire Derived Aggregate – A New Road Building Material – Barriers and Opportunities”, Presented in Recycled Materials in Road and Airfield Pavement
- Humphrey, D. (2004). “Civil Engineering Applications of Scrap Tires”, Heartland Scrap Tire Management Conference
- Humphrey, D.; Katz, L. (2001). “Field Study of Water Quality Effects of Tire Shreds Placed Below the Water Table”, Proceedings of the International Conference on Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications, Arlington, VA, pp 699-708
- Humphrey, D.; Katz, L. (2000). “Five-Year Field Study of Tire Placed Below the Water Table on Groundwater Quality”, Transportation Research Record No. 1714, Transportation Research Board, Washington DC
- Humphrey, D.; Swett, M. (2006). “Literature Review of Water Quality Effects of Tire Derived Aggregate and Rubber Modified Asphalt Pavement”, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maine, Reviewed by Civil Engineering Committee of RCC Scrap Tire Workgroup, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency – Resource Conservation Challenge
- ISWA (2009). “Guideline for Stormwater and Sediment Control” by Working Group on Landfill, ISWA – International Solid Waste Association Turn Waste into Ideas, Lisboa
- JRC (2008). *End of Waste Criteria – Final Report*, Joint Research Centre – European Commission – Institute for Prospective Technological Studies, Technical Report EUR – Scientific and Technical Research Series – ISSN 1018-5593
- Leff, A.; McNamara, C.; Leff, L (2007). “Bacterial Communities of leachate from tire monofill disposal sites”, *Science of the Total Environment*, N° 387, pp. 310-319

- Levy, J.; Cabeças, A. (2006). *Resíduos Sólidos Urbanos – Princípios e Processos*. AEPSA – Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente, 1ª edição, ISBN 989 95059 0 0
- Levy, J.; Teles, M.; Madeira, L.; Pinela, A. (2002). *O Mercado dos Resíduos em Portugal*. AEPSA – Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente, 1ª edição, ISBN 972 9027 57 9
- Lisi, R.; Park, J.; Stier, J. (2004). “Mitigating nutrient leaching with a sub-surface drainage layer of granulated tires”, *Waste Management*, N° 24, pp. 831-839
- Liu, H.; Mead, J.; Stacer, R. (1998). *Technical Report #2 Environmental Impacts of Recycled Rubber in Light Fill Applications: Summary and Evaluation of Existing Literature*, Chelsea Center for Recycling and Economic Development – Plastics Conversion Project, University of Massachusetts Lowell
- Mello, L.; Impe, W.; Lundgren, T.; Herstus, J.; Mawlawi, F.; Floess, C.; Hachich, W.; Gonçalves, H.; Boscov, M. (1998). “Assessment of geo-environmental hazards from non-traditional geotechnical construction materials”, Editor Pedro S. Sêco e Pinto, *Environmental Geotechnics, volume 3 – Reports*, SPG e LNEC Lisboa. A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield, pp. 1075–1100
- Mendes, B.; Oliveira, J. F. Santos (2004). *Qualidade da Água para Consumo Humano*, Lidel – Edições Técnicas, Lda, ISBN 978-972-757-274-8
- Mondal, B.; Warith, M. (2008). “Use of Tire Chips and Tire Crumbs as Packing Media in Trickling Filter Systems for Landfill Leachate Treatment”, *Environmental Technology*, Vol. 29, N° 8, pp. 827-836
- Nascimento, T. (2009). “Nova Licença traz mais exigências à Valorpneu”, in *Jornal Água & Ambiente*, nº131, Ano XI, Tiragem 4000 exemplares, Depósito Legal: 129849/98
- NDPEP (1994). *Waste Tire Management Plan*, Technical Report, Nevada Division of Environmental Protection (NDPEP), Solid Waste Branch-Department of Conservation & Natural Resources, Carson City, Nevada
- Park, J. K.; Edil, T. B.; Kim J. Y.; Huh, M.; Lee, S.; Lee, J.J. (2003). “Suitability of shredded tyres as a substitute for a landfill leachate collection medium”, *Waste Management & Research*, nº 21, pp. 278-289

- Pereira, B.; Gonçalves, P.; Silva, M. (2007). “Adaptação dos Aterros ao Decreto-Lei nº 152/2002, de 23 de Maio”, Seminário Geotécnico de Aterros de Resíduos, LNEC, Lisboa
- PERSU II (2007). Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos – Instrumento Estratégico Director da Gestão de RSU – 2007-2016, Portaria nº 187/2007, de 12 de Fevereiro
- Piantone, P. (2009). “Leaching Tests: Uses, Misuses and Limits”, Actas – Seminário de Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas – Caracterização e Medidas para o Desenvolvimento do Sector, Universidade de Aveiro
- Recipneu (2009). *MADRE® - material agregado derivado de resíduos*, (Consult. 1 Abr. 2009) Disponível na WWW:<URL: <http://www.recipneu.com>
- Recipneu (2008a). *Flexygran – cryogenic rubber infill by Recipneu*, (Folheto)
- Recipneu (2008b). *Cryoflex – cryogenic rubber infill by Recipneu*, (Folheto)
- Reddy, K.; Marella, A. (2001). “Properties of different size scrap tires shreds: implications on using as drainage material in landfill cover systems”, The Seventeenth International Conference on Solid Waste Technology and Management - Philadelphia, PA, USA, pp. 1-19
- RMA Rubber Manufacturers Association (2004). *U.S. Scrap Tire Markets 2003 Edition*. Technical Report, Rubber Manufacturers Association
- Roque, A.; Cabeças, A. (2009). “Valorização das lamas das Estações de Tratamento de Água para Consumo Humano em Obras Geotécnicas”, Actas – Seminário de Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas – Caracterização e Medidas para o Desenvolvimento do Sector, Universidade de Aveiro
- Roque, A.; Silva, P.; Fortunato, E. (2009). “Valorização dos Resíduos de Pneus Usados em Obras Geotécnicas”, Actas – Seminário de Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas – Caracterização e Medidas para o Desenvolvimento do Sector, Universidade de Aveiro
- Rowe, R.; Babcock, D. (2007). “Modelling the clogging of coarse gravel and tire shreds in column tests”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44, pp. 1273-1285

- Rowe, R.; McIsaac, R. (2005). “Clogging of Tire Shreds and Gravel Permeated with Landfill Leachate”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, N° 6, pp. 682-693
- R.W. Beck (2005). *Analysis of New York Scrap Tires Markets*. Final Report, New York State Department of Economic Development
- Salgado, R.; Yoon, S.; Siddiki, N. (2003). *Final Report – Construction of Tire Shreds Test Embankment*, Indiana Department of Transportation, Purdue University West Lafayette, Report No. FHWA/IN/JTPR-2002/35
- SDAB (2007). *Recycled Tyres – material with a great potencial*, SDAB – Svensk Däckatervinning AB, Estocolmo, Disponível na WWW:<URL: <http://www.sdab.se>
- Serumgard, J. (1997). *Municipal Solid Wastes – Problems and Solutions*, Lewis Publishers, Boca Raton New York, ISBN 1-56670-215-1
- Shalaby, A.; Khan, R. (2005). “Design on unsurfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: a case study”, *Resources, Conservation and Recycling*, n° 44, pp. 318-332
- Sharma, H.; Reddy K. (2004). *Geoenvironmental Engineering – Site Remediation, Waste Containment and Emerging Waste Management Technologies*, Wiley John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-21599-6
- Shimamura, A.; Sakemoto, J. (2008). “Basic Properties of Soil-Cement Slurry Mixed with Elastic Material”, In pp. 197–204, Hemanta Hazarika and Kazuya Yasuhara, editores, *Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges*, Taylor & Francis, London, Master e-book ISBN 0-203-92932-2
- Siddique, R.; Naik, T. (2004). “Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview”, *Waste Management*, N° 24, pp. 563–569
- Sousa, J.; Way, G.; Carlson, D. (2006). “Cost Benefit Analysis and Energy Consumption of Scrap Tire Management Options”, Disponível na WWW:<URL: [www.asphaltrubber.org](http://www.asphaltrubber.org)

- Strenk, P.; Wartman, J.; Grubb D., Humphrey D.; Natale, M. (2007). “Variability and Scale-Dependency of Tire-Derived Aggregate”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19 n° 3, pp. 233–241
- Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, Inc., ISBN 0-07-063237-5
- van Beukering, P. (2005). *Improving Markets for Used Rubber Tyres*. OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development – Working Group on Waste Prevention and Recycling, Capítulo 4
- Valorpneu (2009). *Soluções para Pneus Usados* (Consult. 3 Jan. 2009) Disponível na WWW:<URL: <http://www.valorpneu.pt>
- Valorpneu (2008a). “Info Valorpneu – Junho”, Newsletter Quadrimestral, Disponível na WWW:<URL: <http://www.valorpneu.pt>
- Valorpneu (2008b). “Relatório Anual & Contas 2008”, Edição Valorpneu, Sociedade de Gestão de Pneus, Lda, Tiragem 500 exemplares
- Valorpneu (2007). “Relatório Anual & Contas 2007”, Edição Valorpneu, Sociedade de Gestão de Pneus, Lda
- Valorpneu (2006). “Relatório Anual & Contas 2005”, Edição Valorpneu, Sociedade de Gestão de Pneus, Lda
- Warith, M.; Evgin, E.; Benson, P.; Rao, S. (2004). “Suitability of shredded tires for use in landfill collection systems”, *Waste Management*, Vol. 24, pp 967-979
- WBCSD (2008). *Managing End-of-Life Tires – Full Report*, World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), ISBN 978-3-940388-31-5, Disponível na WWW:<URL: [www.wbcd.org/web/tires](http://www.wbcd.org/web/tires)
- Williams, P. (2005). *Waste Treatment and Disposal*, John Wiley & Sons, 2ª Edição, United Kingdom, ISBN 0-470-84912-6
- WMW (2009). *Tires Recycling* by Waste Management World (Consult. 05 Set. 2009) Disponível na WWW:<URL: <http://www.waste-management-world.com>

- WRAP (2009). *Tyre-Derived Rubber Materials – End of Waste Criteria for the Production and Use of Tyre-Derived Rubber Materials – Draft*, Waste & Resources Action Programme (WRAP), UK Environment Agency, Waste Protocols Project, Disponível na WWW:<URL: <http://www.wrap.org.uk>
- WRAP (2008). *An Assessment of WRAP's Tyre Programme and Forecast of the UK's Used Tyre Market up to 2015 – Final Report*, Waste & Resources Action Programme (WRAP), UK Environment Agency, Waste Protocols Project, Disponível na WWW:<URL: <http://www.wrap.org.uk>
- WRAP (2007a). *Tyre-derived rubber materials – A technical report on the manufacture of tyre-derived rubber materials*, Waste & Resources Action Programme (WRAP), UK Environment Agency, Waste Protocols Project, Disponível na WWW:<URL: <http://www.wrap.org.uk>
- WRAP (2007b). *Dunweedon: Tyre shred as a horticultural mulch – Waste Tyres Case Study*, Waste & Resources Action Programme (WRAP), UK Environment Agency, Waste Protocols Project, Disponível na WWW:<URL: <http://www.wrap.org.uk>
- WRAP (2006). *Tyres Re-used and Recycling*, Waste & Resources Action Programme (WRAP), UK Environment Agency, Waste Protocols Project, Disponível na WWW:<URL: <http://www.wrap.org.uk>
- Yasuhara, K. (2008). “Recent Japanese experiences on scrapped tires for geotechnical applications” In pp. 19–42, Hemanta Hazarika e Kazuya Yasuhara, editores, *Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges*, Taylor & Francis, London, Master e-book ISBN 0-203-92932-2
- Young, H. M.; Sellasie, K.; Zeroka, D.; Sabnis, G. (2003). “ Physical and Chemical Properties of Recycled Tire Shreds for use in Construction”, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 129, Nº 10, pp. 921–929
- Zelibor, J. (1991). “ The RMA TCLP Assessment Project: Radian Report – Leachate from Tire Samples”, In Scrap Tire Management Council – Educational Seminar on Scrap Tire Management, Washington D.C.

# **Anexos**



## A.I. Entidades Gestoras de Pneus Usados

Tabela A.I.1: Entidades Gestoras de Pneus Usados

País	Entidade Gestora	WWW URL http://	Contacto
Bélgica		<a href="http://www.recytyre.be">www.recytyre.be</a>	Chris Lorquet
Espanha		<a href="http://www.signus.es">www.signus.es</a>	Jesus Maria Nunez Imaz
Estónia		<a href="http://www.rehviliit.ee">www.rehviliit.ee</a>	Kaur Kuurme
Finlândia		<a href="http://www.rengaskierratys.com">www.rengaskierratys.com</a>	Harry Sjöberg
França		<a href="http://www.aliapur.com">www.aliapur.com</a>	Eric Fabiew
Grécia		<a href="http://www.ecoelastika.gr">www.ecoelastika.gr</a>	Giorgios Mavrias
Holanda		<a href="http://www.recybem.nl">www.recybem.nl</a>	Cees van Ostenrijk
Hungria		<a href="http://www.hurec.hu">www.hurec.hu</a>	Istvan Muzsay
Itália		<a href="http://www.ecopneus.it">www.ecopneus.it</a>	Giovanni Corbetta

País	Entidade Gestora	WWW URL <a href="http://">http://</a>	Contacto
Noruega	 NORSK DEKKRETUR AS	<a href="http://www.dekkretur.no">www.dekkretur.no</a>	Hroar Braathen
Polónia	 CENTRUM UTYLIZACJI OPON ORGANIZACJA ODEYSKU SA	<a href="http://www.utyliczajaopon.pl">www.utyliczajaopon.pl</a>	Grzegorz Karnicki
Portugal	 valorpneu	<a href="http://www.valorpneu.pt">www.valorpneu.pt</a>	Climénia Silva
Roméia	 ECO ANVELOPE SOCIETATE DE GESTIUNE A PNEULOR ANVELOPEI STATE	<a href="http://www.ecoanvelope.ro">www.ecoanvelope.ro</a>	Florin Brabete
Suécia	 SDAB SVENSK DÄCKÅTERVINNING AB	<a href="http://www.svdab.se">www.svdab.se</a>	Lars Aman
Turquia	 LASDER Lastik Sanayicileri Dernegi	<a href="http://www.lasder.org.tr/">http://www.lasder.org.tr/</a>	
Canadá	 TIRE Stewardship New value from old tires BC	<a href="http://www.tirestewardshipbc.ca">http://www.tirestewardshipbc.ca</a>	

## A.II. Recipneu – MADRE®

### Especificações Técnicas



#### Especificações técnicas

Código do produto : **MADRE® TM**

#### Descrição do produto

O Produto é obtido a partir da reciclagem de pneus em fim de vida, através de processamentos físicos que incluem; remoção de contaminantes orgânicos, operações de corte, e classificação dimensional.  
O Produto possui grande estabilidade e resistência a agentes físicos e químicos, à radiação UV e IV e à humidade, à oxidação e envelhecimento atmosféricos, e a esforços de abrasão e esmagamento. A resistividade térmica deste produto é cerca de 7 a 8 vezes superior à de um solo granular típico, sendo portanto uma excelente alternativa para camada isolante. O produto não é biodegradável, não é tóxico, é insolúvel em águas pluviais ou superficiais, e é praticamente inodoro. Apresenta algum comportamento elástico (compressibilidade). As suas emissões por lixiviação (Pb, Cd, Cr, Hg, Sn, Zn, DOC, e EOX) estão de acordo com os critérios exigidos pela Norma DIN V-18035-7 relativa à qualidade das águas superficiais, cumprindo os limites indicados.

#### Características Técnicas

Constituição química:	Material Compósito, constituído maioritariamente por borracha vulcanizada e filamentos reforçantes de aço e fibras têxteis
Massa Específica:	1,30 ± 0,10 kg/dm <sup>3</sup>
Forma física:	Irregular, embora com predominância de formatos rectangulares
Limites dimensionais <sup>a)</sup> :	40 - 140 mm a) Classe "Medium" segundo a Norma AFNOR XP T47-751
Condutividade térmica:	0,1 - 0,35 W/m.K
Ponto de ignição:	315 ± 25 °C
Dureza Shore A:	55 ± 3 ,
Absorção de água:	2 - 4 %
Densidade a granel (compacta):	0,70 ± 0,10
Coefficiente de Poisson:	0,20 - 0,35
Compressibilidade:	30 - 60 %

Comportamento sob compressão:

Força de compressão (kPa)	Densidade a granel	Porosidade Total (%)	Permeabilidade (m/s)
100	0,90	32	2,3E-04
200	1,01	23	1,4E-04
300	1,08	17	8,4E-05
400	1,13	14	4,5E-05
500	1,17	10,5	1,4E-05

**Embalagem: Este Produto é fornecido a granel**

Revisão: Janeiro 2009



**RECIPNEU – Empresa Nacional de Reciclagem de Pneus, Lda.**

Morada: Apartado 26 7521-901 SINES - Portugal \* Tel. : (+351) 269 878 170 \* Fax : (+351) 269 878 172

[www.recipneu.com](http://www.recipneu.com)

## Especificações Técnicas



### Especificações técnicas

Código do produto : **MADRE® TL**

#### Descrição do produto

O Produto é obtido a partir da reciclagem de pneus em fim de vida, através de processamentos físicos que incluem; remoção de contaminantes orgânicos, operações de corte, e classificação dimensional.

O Produto possui grande estabilidade e resistência a agentes físicos e químicos, à radiação UV e IV e à humidade, à oxidação e envelhecimento atmosféricos, e a esforços de abrasão e esmagamento. A resistividade térmica deste produto é cerca de 7 a 8 vezes superior à de um solo granular típico, sendo portanto uma excelente alternativa para camada isolante. O produto não é biodegradável, não é tóxico, é insolúvel em águas pluviais ou superficiais, e é praticamente inodoro. Apresenta algum comportamento elástico (compressibilidade). As suas emissões por lixiviação (Pb, Cd, Cr, Hg, Sn, Zn, DOC, e EOX) estão de acordo com os critérios exigidos pela Norma DIN V-18035-7 relativa à qualidade das águas superficiais, cumprindo os limites indicados.

#### Características Técnicas

Constituição química:	Material Compósito, constituído maioritariamente por borracha vulcanizada e filamentos reforçantes de aço e fibras têxteis
Massa Específica:	1,55 ± 0,06 kg/dm <sup>3</sup>
Forma física:	Irregular, embora com predominância de formatos rectangulares
Limites dimensionais <sup>a)</sup> :	50 - 200 mm a) Classe "Large" segundo a Norma AFNOR XP T47-751
Condutividade térmica:	0,1 - 0,35 W/m.K
Ponto de ignição:	315 ± 25 °C
Dureza Shore A:	66 ± 3
Absorção de água:	2 - 4 %
Densidade a granel (compacta):	0,70 ± 0,10
Coefficiente de Poisson:	0,20 - 0,35
Compressibilidade:	30 - 60 %

Comportamento sob compressão:

Força de compressão (kPa)	Densidade a granel	Porosidade Total (%)	Permeabilidade (m/s)
100	0,88	43	2,4E-04
200	0,97	37,5	1,7E-04
300	1,02	34	1,3E-04
400	1,06	31,5	1,0E-04
500	1,09	29,5	7,9E-05

**Embalagem: Este Produto é fornecido a granel**

Revisão: Janeiro 2009



**RECIPNEU – Empresa Nacional de Reciclagem de Pneus, Lda.**

Morada: Apartado 26 7521-901 SINES - Portugal \* Tel. : (+351) 269 878 170 \* Fax : (+351) 269 878 172

[www.recipneu.com](http://www.recipneu.com)

## A.III. Resultados

**Tabela A.III.1:** Chips de pneus em meio neutro

Parâmetros	Branco	Toma 1	Toma 2
pH (escala de Sorensen)	6,52	7,6	7,69
temperatura (°C)	22,9	21,9	21,9
Condutividade (µS/cm)	69,7	59,5	55,8
temperatura (°C)	21,5	22,1	21,9
Al (mg/l)	*	0,2661	0,3102
As (mg/l)	*	*	*
Cd (mg/l)	*	*	*
Cr (mg/l)	0,0039	0,0049	0,0053
Cu (mg/l)	0,0042	0,0135	0,0129
Fe (mg/l)	0,0255	0,4347	0,4623
K (mg/l)	0,0045	0,0300	0,0379
Mn (mg/l)	*	0,0301	0,0294
Ni (mg/l)	0,0048	0,0037	0,0038
Pb (mg/l)	0,0177	0,0212	0,0202
Zn (mg/l)	*	0,1096	0,1197

\* - concentração do parâmetro analisado é inferior ao valor limite do equipamento

**Tabela A.III.2:** Chips de pneus em meio ácido

Parâmetros	Branco	Toma 1	Toma 2
pH (escala de Sorensen)	5,19	8,21	8,44
temperatura (°C)	22,5	22,5	22,3
Condutividade (µS/cm)	166,2	208,8	209,6
temperatura (°C)	20,8	20,7	21
Al (mg/l)	0,0086	0,1400	0,1494
As (mg/l)	*	*	*
Cd (mg/l)	*	*	*
Cr (mg/l)	0,0051	0,0048	0,0050
Cu (mg/l)	0,0189	0,0264	0,0084
Fe (mg/l)	0,0281	0,2461	0,2778
K (mg/l)	2,0389	2,3140	2,2742
Mn (mg/l)	0,0005	0,0092	0,0096
Ni (mg/l)	0,0048	0,0061	0,0053
Pb (mg/l)	0,0206	0,0320	0,0277
Zn (mg/l)	0,0425	0,0515	0,0317

\* - concentração do parâmetro analisado é inferior ao valor limite do equipamento

**Tabela A.III.3: Chips de pneus em meio básico**

Parâmetros	Branco	Toma 1	Toma 2
pH (escala de Sorensen)	6,94	8,9	8,93
temperatura (°C)	24,2	23,6	23,2
Condutividade (µS/cm)	339	389	387
temperatura (°C)	21,7	21,9	22,3
Al (mg/l)	*	0,0471	0,0640
As (mg/l)	*	*	*
Cd (mg/l)	*	*	*
Cr (mg/l)	0,0007	0,0013	0,0019
Cu (mg/l)	0,0110	0,0042	0,0070
Fe (mg/l)	0,0399	0,1059	0,1382
K (mg/l)	0,0459	0,1821	0,1937
Mn (mg/l)	*	0,0010	0,0013
Ni (mg/l)	*	*	0,0013
Pb (mg/l)	*	0,0019	0,0051
Zn (mg/l)	0,0092	*	0,0032

\* - concentração do parâmetro analisado é inferior ao valor limite do equipamento

**Tabela A.III.4: Brita calcária em meio neutro**

Parâmetros	Branco	Toma 1	Toma 2
pH (escala de Sorensen)	6,52	9,66	9,66
temperatura (°C)	22,9	21,7	22,1
Condutividade (µS/cm)	69,7	70,2	72,6
temperatura (°C)	21,5	21,4	21,7
Al (mg/l)	*	0,0880	0,0998
As (mg/l)	*	*	*
Cd (mg/l)	*	*	*
Cr (mg/l)	0,0039	0,0047	0,0051
Cu (mg/l)	0,0042	0,0044	0,0069
Fe (mg/l)	0,0255	0,0284	0,0309
K (mg/l)	0,0045	0,0151	0,0228
Mn (mg/l)	*	0,0008	*
Ni (mg/l)	0,0048	0,0039	0,0051
Pb (mg/l)	0,0177	0,0217	0,0161
Zn (mg/l)	*	*	*

\* - concentração do parâmetro analisado é inferior ao valor limite do equipamento

**Tabela A.III.5:** Brita calcária em meio ácido

Parâmetros	Branco	Toma 1	Toma 2
pH (escala de Sorensen)	5,19	9,57	9,56
temperatura (°C)	22,5	22,5	22,6
Condutividade (µS/cm)	166,2	168,5	170,6
temperatura (°C)	20,8	21,3	21,5
Al (mg/l)	0,0086	0,0874	0,0433
As (mg/l)	*	*	*
Cd (mg/l)	*	*	*
Cr (mg/l)	0,0051	0,0018	*
Cu (mg/l)	0,0189	0,0061	0,0022
Fe (mg/l)	0,0281	0,0415	0,0294
K (mg/l)	2,0389	0,0715	0,0518
Mn (mg/l)	0,0005	*	*
Ni (mg/l)	0,0048	0,0033	*
Pb (mg/l)	0,0206	*	*
Zn (mg/l)	0,0425	*	*

\* - concentração do parâmetro analisado é inferior ao valor limite do equipamento

**Tabela A.III.6:** Brita calcária em meio básico

Parâmetros	Branco	Toma 1	Toma 2
pH (escala de Sorensen)	6,94	9,73	9,82
temperatura (°C)	24,2	23,7	23,3
Condutividade (µS/cm)	339	508	510
temperatura (°C)	21,7	22,5	22,6
Al (mg/l)	*	0,12	0,13
As (mg/l)	*	*	*
Cd (mg/l)	*	*	*
Cr (mg/l)	*	*	*
Cu (mg/l)	0,01	*	*
Fe (mg/l)	0,04	0,03	0,03
K (mg/l)	0,05	0,11	0,12
Mn (mg/l)	*	*	*
Ni (mg/l)	*	*	*
Pb (mg/l)	*	0,02	*
Zn (mg/l)	0,01	*	*

\* - concentração do parâmetro analisado é inferior ao valor limite do equipamento



## A.IV. Calibração do Equipamento de Espectroscopia de Emissão Atômica

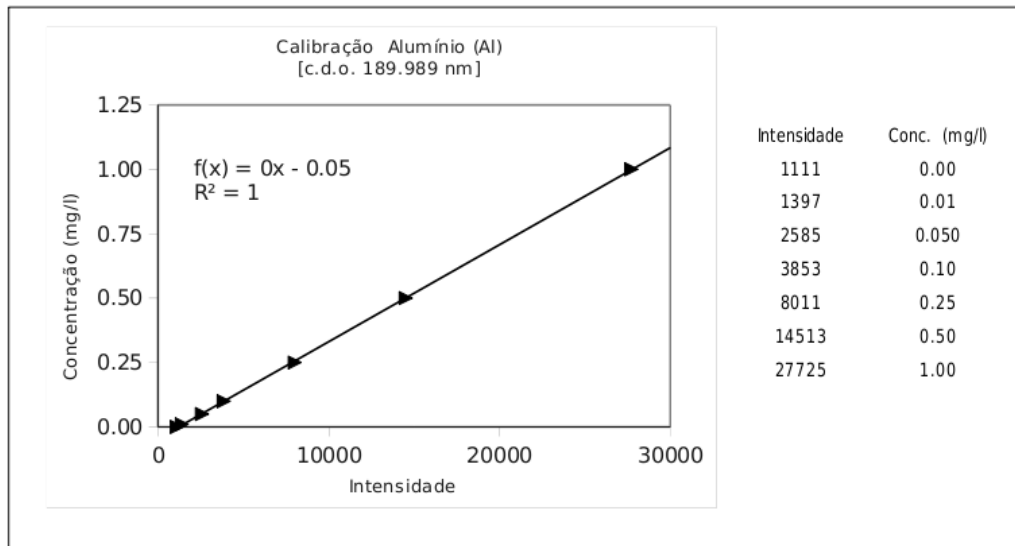


Figura A.IV.1 - Calibração Equipamento – Al

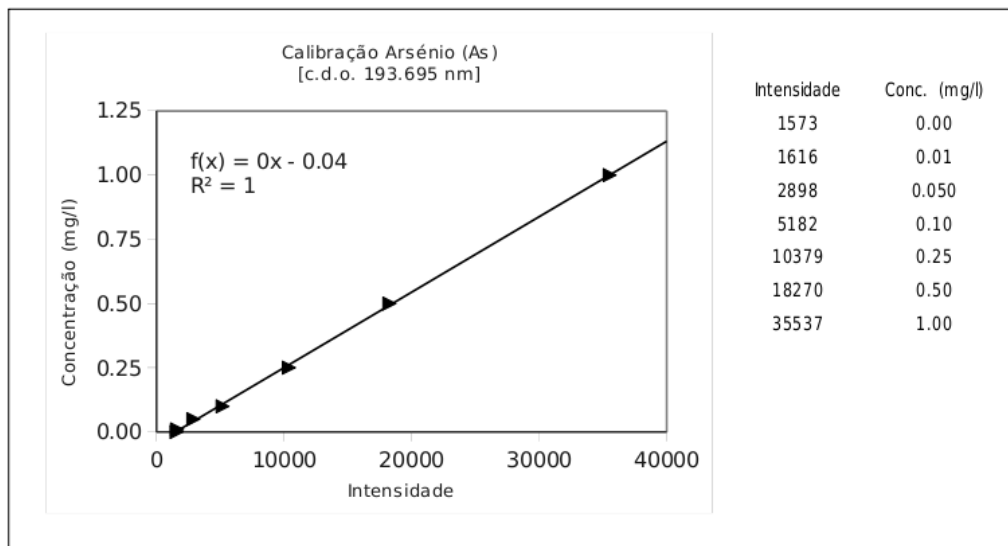
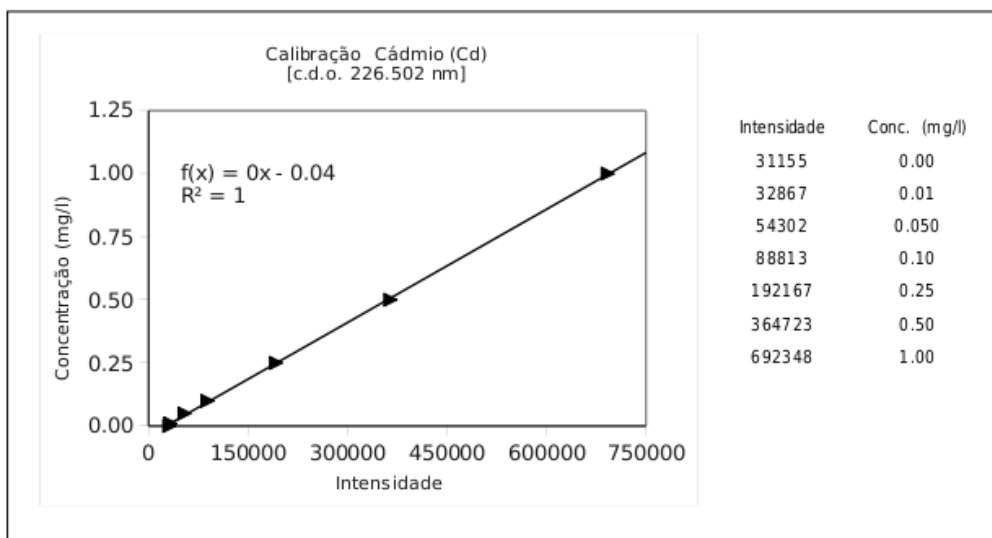
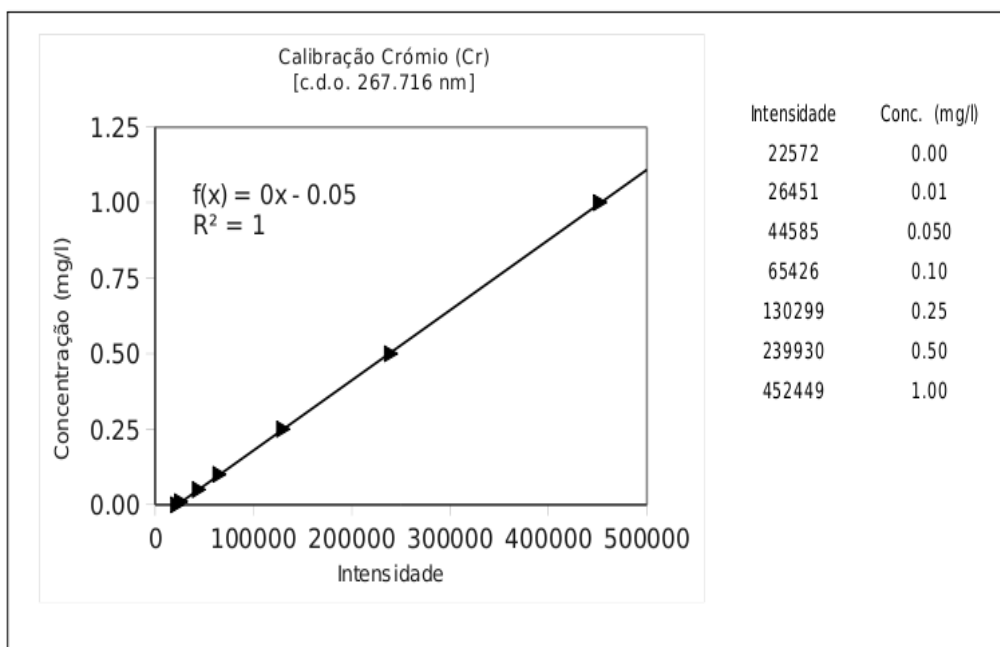


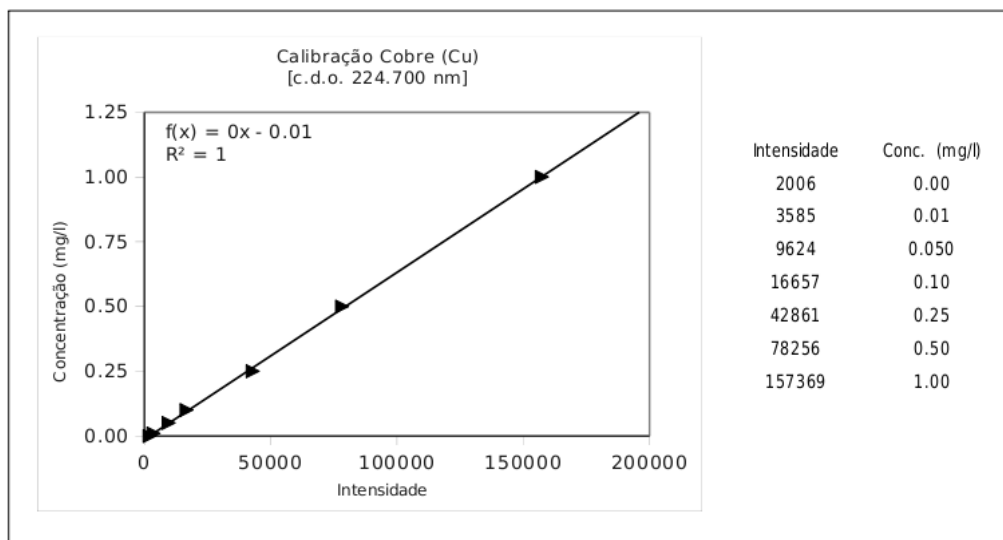
Figura A.IV.2 - Calibração Equipamento – As



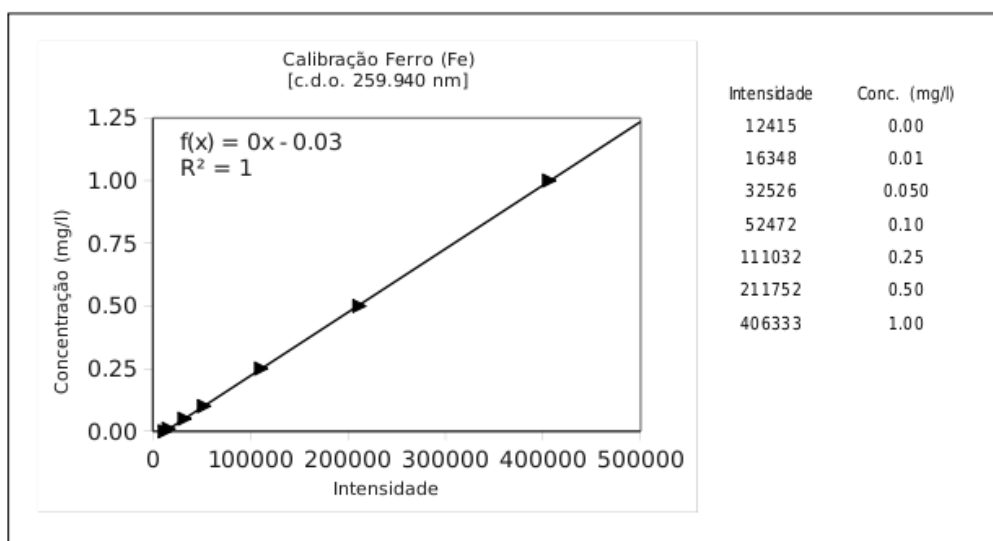
**Figura A.IV.3 - Calibração Equipamento – Cd**



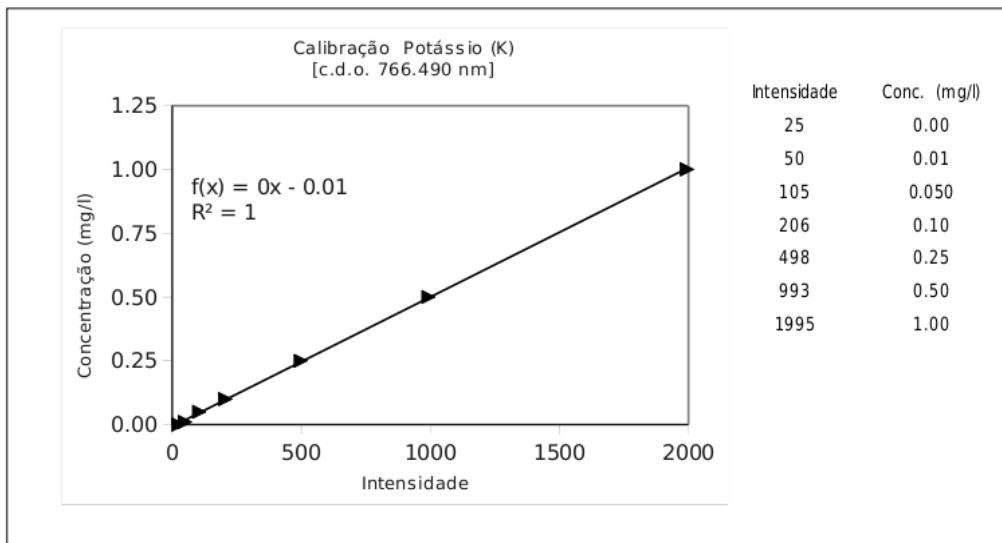
**Figura A.IV.4 - Calibração Equipamento – Cr**



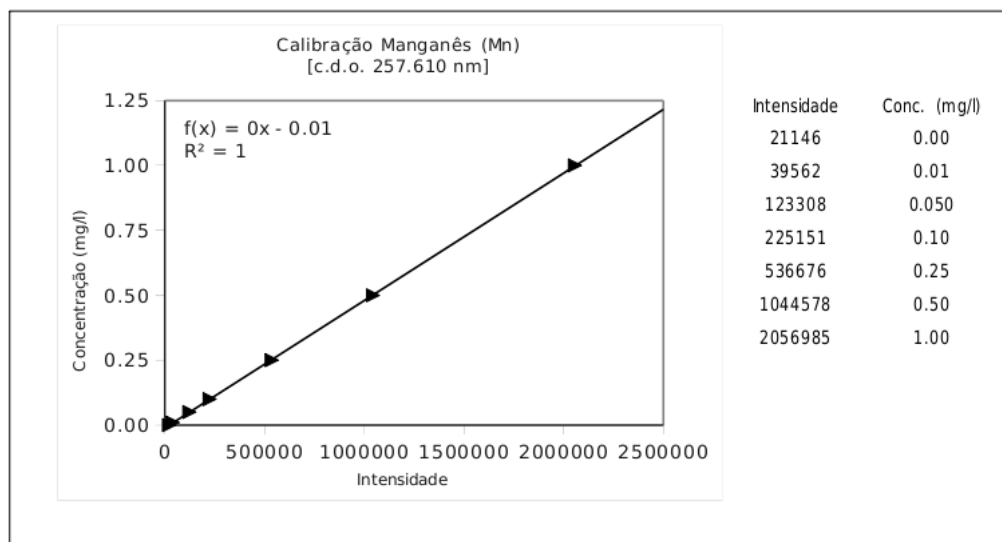
**Figura A.IV.5 - Calibração Equipamento – Cu**



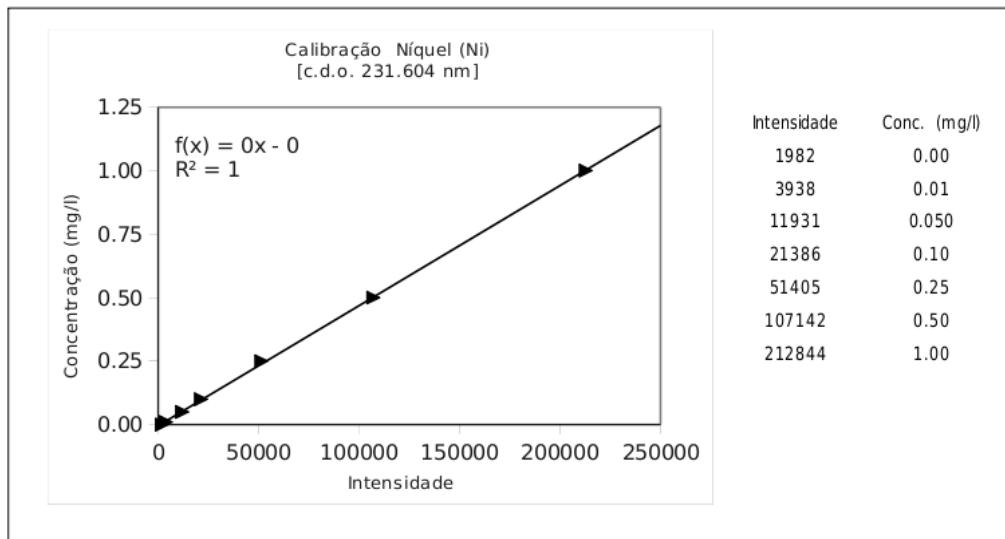
**Figura A.IV.6 - Calibração Equipamento – Fe**



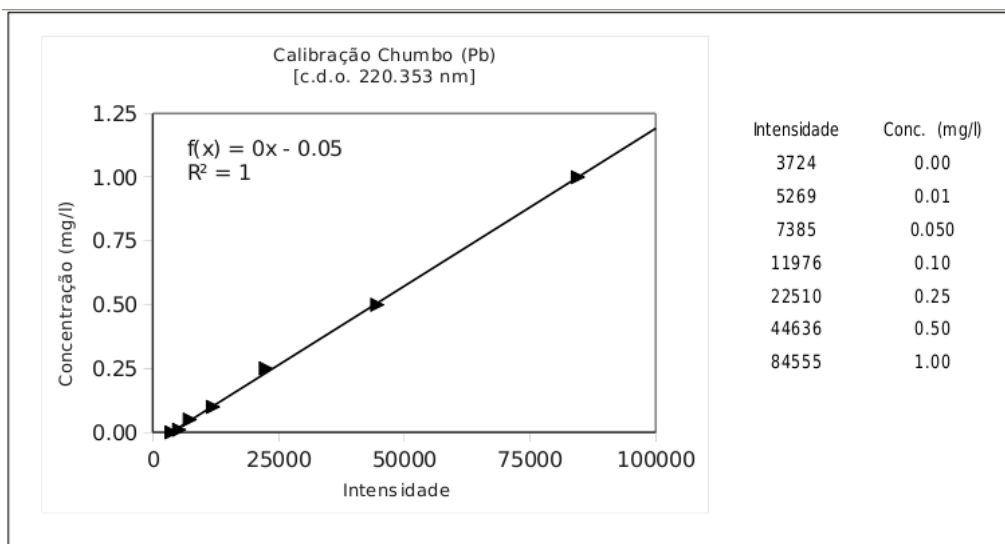
**Figura A.IV.7 - Calibração Equipamento – K**



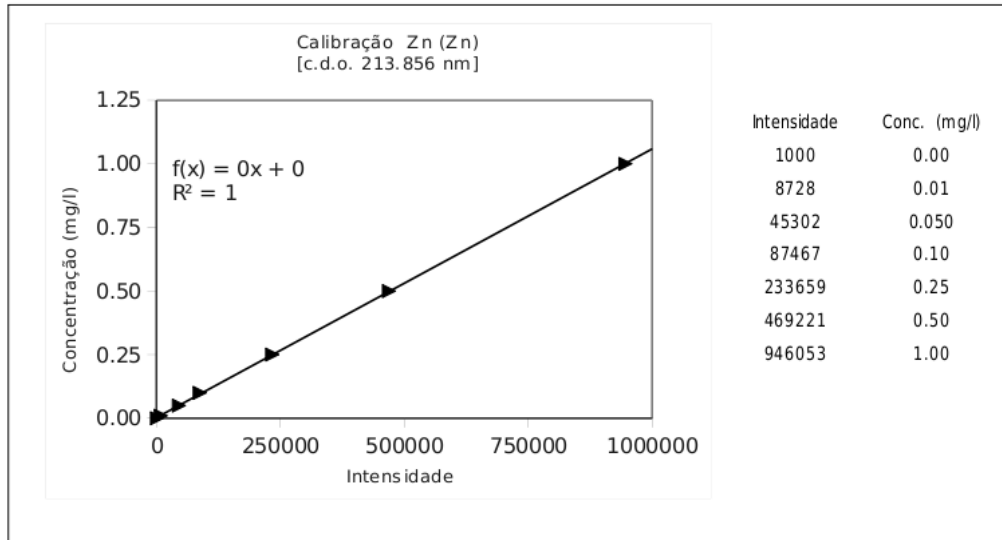
**Figura A.IV.8 - Calibração Equipamento – Mn**



**Figura A.IV.9** - Calibração Equipamento – Ni



**Figura A.IV.10** - Calibração Equipamento – Pb



**Figura A.IV.11 - Calibração Equipamento – Zn**