

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Ciência dos Materiais
Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente

**RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO:
CONTRIBUIÇÃO PARA CONTROLO DO PROCESSO**

Por:

Dora Alexandra Neto Algarvio

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Gestão Integrada e Valorização de Resíduos, Ramo Ecomateriais e Valorização de Resíduos

Orientador: Maria Lucelinda Ferreira Alcântara da Cunha

Co-orientador: Maria Margarida Rolim Augusto Lima

Lisboa

2009

Sumário

O objectivo deste trabalho é a melhoria do processo da Unidade Piloto de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição instalada em Montemor-o-Novo. A Unidade tem uma capacidade instalada para produção de agregados reciclados de 50 a 80 t/h, apresentando como etapas de processamento: fragmentação, separação magnética e crivagem.

Numa perspectiva de conhecer os contaminantes existentes nos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) que chegam à Unidade, procedeu-se à caracterização (separação manual) dos contaminantes presentes por produtor. Com vista à melhoria da qualidade do processo de reciclagem, estuda-se a eficiência da operação de separação magnética, por variação da distância entre a tela transportadora e o separador magnético. A aplicabilidade dos agregados reciclados constitui a terceira fase do estudo, em que se efectua a análise granulométrica dos agregados reciclados de *tout-venant* (produzidos com abertura fixa da goela do moinho) e calibrados (por crivos de barras), para verificar/comprovar a sua distribuição real, passando-se depois à caracterização dos contaminantes nesses agregados, por separação manual, magnética e por densidades.

Os resultados revelam que a percentagem de contaminantes nos RCD é bastante baixa, sendo a madeira o contaminante presente em maior quantidade. A eficiência do separador magnético demonstra que esta diminui bastante para distâncias superiores a 27cm. A análise granulométrica revela que os agregados reciclados de *tout-venant* não são adequados a aplicação em sub-base de estradas. Nos agregados calibrados, a percentagem de material dentro da classe granulométrica desejada é geralmente baixa, devido ao uso de crivos de barras. Nos agregados reciclados, os contaminantes mais significativos são o material magnético e cortiça.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição, agregados reciclados, contaminantes, análise granulométrica, separação magnética.

Abstract

This work aim is the process improvement of the Construction and Demolition Waste Recycling Pilot Plant of Montemor-o-Novo. The process has a capacity of 50-80t/h and the main operations are comminution, magnetic separation and screening.

To improve the knowledge on the Construction and Demolition Waste (C&DW), a characterization procedure was implemented by hand-sorting. In order to improve the recycling process, the magnetic separation efficiency was studied by variation of the distance between the magnet and the conveyor belt. The applicability of the recycled aggregates was studied in two stages. First, size analysis were performed on *tout-venant* recycled aggregates, produced with a defined hammer-mill opening, and on calibrated recycle aggregates obtained with bar profile screens. Second, a contaminants characterization was performed, using hand-sorting, magnetic separation and density separation.

Results showed that contaminants percentage in the C&DW is very low, and wood was identified as the most frequent. Concerning the magnetic separation, results showed that for distances above 27cm the separation efficiency decreases significantly. Sieving results on *tout-venant* recycled aggregates showed that they are not suitable for road subbases, and on some calibrated aggregates, a decreasing amount of material from the correct size range was found, due to screens bar shape. The most frequent contaminants of recycled aggregates, are magnetic material and cork.

Keywords: Construction and demolition waste, recycled aggregate, contaminants, size analysis, magnetic separation.

Simbologia e Notações

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

C – Coeficiente de variação

CCDR/A – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo

f – Percentagem de finos

HAP – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

IC – Intervalo de Confiança

INE – Instituto Nacional de Estatística

IST – Instituto Superior Técnico

LER – Lista Europeia de Resíduos

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

M1 – Massa seca da amostra, em quilogramas

M2 – Massa seca do material com granulometria superior a 75 μ m, em quilogramas

NP – Norma Portuguesa

P – Massa do material peneirado retido no fundo, em quilogramas

PCB – Polibifenilos Policlorados

QUERCUS – Associação Nacional de Conservação da Natureza

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

REAGIR – Reciclagem de Entulho no Âmbito da Gestão Integrada de Resíduos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

S – Desvio padrão

SIRER – Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos

UE – União Europeia

UPRE – Unidade Piloto de Reciclagem de Entulho

\bar{x} - Média

% - Percentagem

Índice de Matérias

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. A CONSTRUÇÃO CIVIL E OS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	9
1.2. PREVENÇÃO E VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	10
1.3. O ECOMATERIAL E AS SUAS APLICAÇÕES.....	18
1.4. ESTADO DA ARTE	21
1.4.1. <i>Gestão e Valorização de RCD na Europa.....</i>	<i>23</i>
1.4.2. <i>Gestão e Valorização de RCD em Portugal.....</i>	<i>25</i>
2. CASO DE ESTUDO: PROJECTO REAGIR - RECICLAGEM DE ENTULHO NO ÂMBITO DA GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS	33
2.1. ENQUADRAMENTO DO PROJECTO	33
2.2. GESTÃO DE RCD.....	34
2.3. VALORIZAÇÃO DE RCD.....	35
2.4. AGREGADOS RECICLADOS	38
3. PARTE EXPERIMENTAL	41
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES PRESENTES NOS RCD	41
3.2. DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SEPARADOR MAGNÉTICO	43
3.3. ESTUDO DOS AGREGADOS RECICLADOS.....	46
3.3.1. <i>Análise Granulométrica do Tout-venant.....</i>	<i>46</i>
3.3.2. <i>Análise Granulométrica dos Agregados Calibrados.....</i>	<i>49</i>
3.3.3. <i>Caracterização dos Contaminantes em Agregados Recicladoss.....</i>	<i>52</i>
3.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	56
3.4.1. <i>Caracterização dos Contaminantes Presentes nos RCD.....</i>	<i>56</i>
3.4.2. <i>Determinação da Eficiência do Separador Magnético.....</i>	<i>61</i>
3.4.3. <i>Estudo dos Agregados Recicladoss.....</i>	<i>63</i>
3.4.3.1. <i>Análise Granulométrica do Tout-venant.....</i>	<i>63</i>
3.4.3.2. <i>Análise Granulométrica dos Agregados Calibrados.....</i>	<i>66</i>
3.4.3.3. <i>Caracterização dos Contaminantes em Agregados Recicladoss.....</i>	<i>75</i>
4. CONCLUSÕES.....	83
5. PERSPECTIVAS FUTURAS.....	87
6. BIBLIOGRAFIA	89

Índice de Figuras

Figura 1.1 Equipamentos de fragmentação: a) Britadeira de maxilas e b) Britadeira giratória.	13
Figura 1.2 Equipamento de fragmentação: Moinho de martelos.....	15
Figura 1.3 Diagrama geral do processo de triagem e reciclagem da LOBBE TRANSLICON.....	29
Figura 1.4 Diagrama geral do processo de triagem e reciclagem da ECOLABOR.....	30
Figura 1.5 Diagrama geral do processo de triagem e reciclagem da TRIANOVO.	31
Figura 2.1 Deposição de RCD: a) Vermelhos - Tijolos e telhas e b) Cinzentos – Betão.	36
Figura 2.2 Equipamento de reciclagem: a) Britagem e b) Separação magnética.....	36
Figura 2.3 Equipamento de reciclagem: a) Crivagem e b) Transporte.....	36
Figura 2.4 Armazenamento de agregados reciclados.....	37
Figura 2.5 a) RCD “vermelhos” e b) Agregados reciclados “vermelhos”.....	39
Figura 2.6 a) RCD “cinzentos” e b) Agregados reciclados “cinzentos”.....	39
Figura 3.1 Fluxograma da UPRE, indicando o trabalho experimental associado a cada etapa.....	41
Figura 3.2 Diagrama simplificado do procedimento para determinação dos contaminantes da matéria-prima.	42
Figura 3.3 a) Crivo de 31mm em funcionamento e b) Recolha manual dos contaminantes.....	43
Figura 3.4 a) Preparação para recolha dos metais e b) Colocação dos contaminantes recolhidos em baldes.	43
Figura 3.5 Diagrama simplificado para determinação da eficiência de remoção de metais ferrosos.	44
Figura 3.6 Agregados reciclados utilizados nos ensaios, +31mm: a) “cinzentos” e b) “vermelhos”.....	45
Figura 3.7 Metais ferrosos utilizados nos ensaios: a) Metais recolhidos e b) Pesagem de metais.	46
Figura 3.8 Construção de uma amostra: a) Colocação dos metais sobre os agregados, e b) Amostra completa.....	46
Figura 3.9 Preparação do equipamento: a) Ajuste da distância entre a tela e o separador e b) Colocação do big bag para recolher os metais separados.	46
Figura 3.10 Diagrama simplificado do procedimento para produção e recolha de tout-venant.....	47
Figura 3.11 a) Interior do moinho de martelos: a) Placa de impacto e martelos e b) Betão da RTS.	48
Figura 3.12 Diagrama simplificado do procedimento para análise granulométrica do tout-venant.	48
Figura 3.13 Diagrama simplificado do procedimento para análise granulométrica das várias fracções.	51
Figura 3.14 Diagrama simplificado de preparação das amostras para caracterização dos contaminantes.	53
Figura 3.15 Diagrama simplificado do procedimento para determinação dos contaminantes das várias fracções... 54	
Figura 3.16 Recolha por via seca nos agregados calibrados: a) Separação magnética e b) Inspeção visual.....	54
Figura 3.17 Recolha por via húmida nos agregados calibrados: a) Vários contaminantes em suspensão e b) Transferência de contaminantes recolhidos por via húmida, após estufa.	55
Figura 3.18 Recolha de contaminantes no tout-venant: a) Recolha por via seca, b) Recolha dos contaminantes.	55
Figura 3.19 Recolha de contaminantes no tout-venant: a) Contaminantes e b) Material e contaminantes na estufa. 55	
Figura 3.20 Exemplo de uma das obras caracterizadas: a) Vista geral e b) Pormenor de alguns contaminantes.	57
Figura 3.21 Classes de contaminantes: a) Madeira, b) Plásticos Mistos, c) Metais e d) Indiferenciados.....	58
Figura 3.22 Percentagem em peso de contaminantes: a) Para cada obra; b) Em relação à percentagem.....	59
Figura 3.23 Percentagem em volume de contaminantes: a) Para cada obra e b) Em relação à percentagem em peso	

<i>de material inerte (total para todas as obras).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.24 Eficiência de separação em função da distância entre o separador e a tela transportadora.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.25 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados de tout-venant “cinzentos”.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.26 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “vermelhos” de classe granulométrica 0/4mm.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.27 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “vermelhos” de classe granulométrica 4/8mm.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.28 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “vermelhos” de classe granulométrica 8/12mm.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 3.29 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “cinzentos” de classe granulométrica 0/4mm.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.30 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “cinzentos” de classe granulométrica 4/8mm.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3.31 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “cinzentos” de classe granulométrica 8/12mm.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3.34 Comparação entre a percentagem em peso de contaminantes (real e explodida) e o material inerte nos agregados reciclados calibrados.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 3.35 Comparação entre a percentagem em peso de contaminantes (real e explodida) e o material inerte nos agregados reciclados de tout-venant.</i>	<i>82</i>

Índice de Quadros

<i>Quadro 1.1 Capítulo 17 da Lista Europeia de Resíduos (adaptado).....</i>	<i>26</i>
<i>Quadro 3.1 Resultados da picnometria de hélio e respectivo cálculo estatístico, para os agregados reciclados “vermelhos”</i>	<i>50</i>
<i>Quadro 3.2 Resultados da picnometria de hélio e respectivo cálculo estatístico, para os agregados reciclados “cinzentos”</i>	<i>50</i>
<i>Quadro 3.3 Massa de cada amostra e massa total a recolher de acordo com a NP EN 933-1 2000</i>	<i>51</i>
<i>Quadro 3.4 Condições de lavagem para os agregados reciclados em análise.....</i>	<i>52</i>
<i>Quadro 3.5 Massa de cada amostra e massa total a recolher de acordo com a NP EN 933-1 2000</i>	<i>53</i>
<i>Quadro 3.6 Obras utilizadas para caracterização dos RCD.....</i>	<i>57</i>
<i>Quadro 3.7 Classes de contaminantes consideradas na caracterização dos RCD.....</i>	<i>57</i>
<i>Quadro 3.8 Percentagem em peso dos contaminantes (por classes e total por obra) e de inertes (total por obra)....</i>	<i>58</i>
<i>Quadro 3.9 Percentagem em volume dos contaminantes (por classes e total de obra) e percentagem.....</i>	<i>60</i>
<i>Quadro 3.10 Peso dos metais adicionados e removidos para cada distância entre o separador e a tela transportadora.....</i>	<i>61</i>
<i>Quadro 3.11 Eficiência de separação de metais e respectivos cálculos estatísticos, para cada uma das distâncias..</i>	<i>62</i>
<i>Quadro 3.12 Percentagem de finos e validação no tout-venant</i>	<i>63</i>
<i>Quadro 3.13 Resultados da análise granulométrica do tout-venant</i>	<i>64</i>
<i>Quadro 3.14 Comparação dos valores de percentagem cumulativa inferior para o tout-venant analisado</i>	<i>64</i>
<i>Quadro 3.15 Resultados dos cálculos da percentagem de finos e da validação dos resultados para os agregados reciclados calibrados “vermelhos” e “cinzentos”</i>	<i>66</i>
<i>Quadro 3.16 Resultados da análise granulométrica para os agregados reciclados calibrados “vermelhos”</i>	<i>67</i>
<i>Quadro 3.17 Resultados da análise granulométrica para os agregados reciclados calibrados “cinzentos”</i>	<i>68</i>
<i>Quadro 3.18 Percentagem de agregados dentro da classe granulométrica desejada (agregados reciclados “vermelhos” e agregados reciclados “cinzentos”).....</i>	<i>75</i>
<i>Quadro 3.19 Materiais abrangidos por cada classe de contaminantes, nos agregados calibrados e tout-venant.....</i>	<i>77</i>
<i>Quadro 3.20 Percentagem de contaminantes nas fracções analisadas (0/4mm, 4/8mm e 8/12mm)</i>	<i>77</i>
<i>Quadro 3.21 Percentagem de contaminantes no tout-venant (0/31mm).....</i>	<i>79</i>
<i>Quadro 3.22 Contaminantes nas fracções analisadas, em relação à massa total de inertes</i>	<i>81</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. A CONSTRUÇÃO CIVIL E OS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A engenharia tem feito parte da vida quotidiana desde o início da existência humana. Pode considerar-se que a engenharia civil teve o seu início entre 4000 e 2000 a.C., no Egipto e na Mesopotâmia, quando os humanos começaram a abandonar a vida nómada, o que levou à necessidade de construir abrigos [1].

As Pirâmides de Gizé, no Egipto (2700-2500 a.C.) podem ser consideradas as primeiras grandes construções, feitas à base de tijolos dispostos de modo a garantir a sustentação de toda a estrutura [1]. Em Portugal também existem vestígios de povoamentos remotos: as construções antigas mais específicas são as manifestações funerárias do período megalítico: dólmenes ou antas, entre 4000 e 2000 a.C. [2].

A Revolução Industrial teve um papel crucial ao fomentar o desenvolvimento de novos materiais, bem como de novas fontes de energia. Foi nesta época que surgiu o ferro, o aço e o betão e também o carvão e o vapor [2].

Nos dias de hoje, uma obra de construção envolve uma multiplicidade de tarefas, desde o seu início até ao seu final, o que a torna um processo bastante dinâmico. A nível genérico, são realizados trabalhos de demolição de estruturas, de escavação, de armação de ferro, de betonagem, de alvenaria, de reboco ou estuque, de coberturas, de carpintaria, de serralharia e de pintura e/ou envernizagem [3].

Segundo dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), no ano de 2006 em Portugal foram concluídos 38227 edifícios, sendo a sua quase totalidade referente a obras de edificação, com uma pequena minoria correspondente a obras de demolição. No ano de 2007, este valor ascendeu para os 39011 edifícios [4]. A nível económico e social, a construção civil é um sector com forte e constante desenvolvimento e com elevadas potencialidades empreendedoras, contribuindo grandemente para a dinamização da economia e influenciando directamente uma série de actividades [3].

Em termos ambientais, a construção civil implica a extracção de recursos naturais e minerais, tais como madeira, água, minérios e agregados naturais, bem como o consumo de energia. Alguns

destes recursos têm reservas escassas e outros, apesar de renováveis, requererem uma gestão adequada, como é o caso da madeira.

Por outro lado, a jusante de toda a actividade de construção civil está inevitavelmente associada a geração de resíduos. A par do crescimento desta actividade, também o problema dos resíduos por ela gerados tem sido crescente. Estes resíduos, denominados **Resíduos de Construção e Demolição (RCD)**, também conhecidos vulgarmente como entulho, provêm da construção de novos edifícios/estruturas e da demolição de edifícios/estruturas antigos.

Os RCD podem ser classificados como: (1) Resíduos de construção, (2) Resíduos de remodelação, reabilitação e renovação e (3) Resíduos de demolição. [5]

Os resíduos de construção têm origem no mau aproveitamento de matérias-primas (p. ex., agregados), de materiais danificados e das perdas decorrentes das próprias técnicas de construção. Apresentam igualmente muitos materiais de embalagem.

Os resíduos de remodelação, reabilitação e renovação também apresentam composição muito variada, que depende da área que está a ser intervencionada, apresentando características próximas dos resíduos de demolição.

Por último, os resíduos de demolição são os que se apresentam em maior quantidade, sendo compostos maioritariamente por material inerte e solos, com características que dependem da obra em causa e igualmente da selectividade da demolição.

Os RCD podem ser classificados como inertes, não perigosos e perigosos. Destas categorias, os mais representativos são sem dúvida os materiais inertes, como sejam o betão, os tijolos, ladrilhos e materiais cerâmicos. Este materiais representam 40 a 50% dos RCD [6].

1.2. PREVENÇÃO E VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A actividade de construção civil, tal como indicado anteriormente, é grande consumidora de recursos naturais e minerais, sendo também fonte de resíduos bastante heterogéneos e em grande quantidade. Com vista a minorar os impactes negativos dos RCD, é necessária a sua prevenção e a valorização dos resíduos que forem inevitavelmente gerados.

A **prevenção** é prioridade para a correcta gestão de resíduos. No caso dos RCD, esta cabe a todos os intervenientes no processo de construção civil, em todas as suas fases [7].

Na fase inicial, deve ser feita a escolha dos materiais, considerando sempre a sua futura reutilização, as suas dimensões, a sua durabilidade, reciclabilidade e flexibilidade.

Na fase de construção, a qualidade dos resíduos que são inevitavelmente gerados pode ser melhorada através da correcta separação dos mesmos, facilitando o seu encaminhamento para valorização ou deposição. A prevenção da geração de RCD é possível através da minimização do material de embalagem dos produtos que entram na obra.

Na fase de demolição dos edifícios/estruturas, o prolongamento do tempo de vida útil dos mesmos permite reduzir, obviamente, a quantidade de RCD gerados, uma vez que a demolição é evitada. Quando a demolição é inevitável, a qualidade e a composição dos RCD pode ser melhorada através da demolição selectiva, ou *desconstrução*. Existem restrições quanto à aplicação da demolição selectiva: é necessário garantir o acesso aos materiais a serem removidos e espaço para os colocar. As limitações de tempo e os custos são também factores que podem impedir a sua aplicação.

Após todo o processo de demolição e correcto encaminhamento dos RCD, o próximo passo é a sua valorização. Legalmente, a valorização inclui todas as operações que visem o aproveitamento dos resíduos identificadas na Portaria n.º 209/2004, de 3 de Março, das quais consta, por exemplo, a reciclagem. Através da triagem e da reciclagem dos RCD obtêm-se materiais secundários que podem e devem ser de novo incorporados na actividade da construção civil, com as seguintes vantagens [8]:

- Redução da má gestão e do abandono destes resíduos;
- A triagem permite que a maioria dos componentes dos RCD sejam encaminhados para reutilização ou reciclagem;
- A reciclagem permite que a fracção inerte dos resíduos possa ser utilizada como material secundário (agregado reciclado), diminuindo a quantidade de resíduos a depositar em aterro;
- A reciclagem limita a necessidade de inertes extraídos em pedreiras, saibreiras e areeiros, contribuindo para a preservação dos recursos naturais;
- A comercialização dos agregados reciclados (material secundário) é uma fonte de receitas para financiamento da gestão de RCD.

Os materiais que não são reaproveitados em obra ou enviados para aterro podem ser alvo de valorização ou reciclagem mecânica, utilizando os processos e as tecnologias do tratamento de minérios. Através da reciclagem mecânica de RCD obtêm-se matérias-primas secundárias (agregados reciclados), também denominados ecomateriais, que ao serem utilizados como matérias-primas darão origem a ecoprodutos.

O processo de reciclagem de RCD envolve as seguintes operações unitárias fundamentais [9]:

- **Individualização** das diferentes espécies por cominuição ou fragmentação, através de 3 etapas principais: britagem, granulação e moagem;
- **Classificação** das partículas fragmentadas em lotes de calibres com dimensões semelhantes, denominadas classes granulométricas, através de crivagem ou peneiração;
- **Separação ou concentração**, por processos que se baseiam nas propriedades físicas das partículas, por exemplo no seu calibre, densidade, susceptibilidade magnética, condutividade eléctrica e molhabilidade.

A qualidade dos vários produtos obtidos depende grandemente do número de operações e etapas, do tipo de equipamento utilizado para reduzir o tamanho do material e dos métodos de separação do material obtido.

A triagem a montante do processo de reciclagem mecânica revela-se crucial para garantir a qualidade dos produtos reciclados que irão ser obtidos a jusante. Realizada no local da obra de origem dos RCD ou em centrais de triagem dedicadas, permite separar os RCD em várias fracções através de diversos métodos, sendo a separação manual largamente utilizada. Os materiais indesejáveis (ex.: papel, madeira, plásticos, etc.) são colocados em contentores individualizados [7].

Uma vez removidos os materiais não desejáveis, resta a fracção inerte dos RCD. No entanto, as suas dimensões não são adequadas para que possa ser aplicada directamente como agregado reciclado na construção civil. A redução de tamanho, e/ou a **individualização**, tal como indicado anteriormente, é conseguida através da britagem (fragmentação primária), granulação (fragmentação secundária) ou moagem (fragmentação terciária), pelo que nestas etapas a dimensão do material é reduzida gradualmente [9,10]. Nesta operação é utilizada diversa maquinaria, tal como as: britadeiras de maxilas e giratórias e britadores de impacto.

As britadeiras de maxilas são equipamentos muito comuns e bastante conhecidas, sendo largamente utilizadas na indústria mineira, algumas com capacidade de mais de 20 000 toneladas de minério por dia [7]. São compostas por duas chapas que abrem e fecham como duas maxilas, colocadas num determinado ângulo uma em relação à outra, formando um “V”, tal como se pode verificar na figura 1.1 a) [11].

A descarga do material fragmentado é feita para uma calha vibratória, que recolhe a pedra, betão e aço. Esta calha também pode ser utilizada para fazer uma crivagem do material, quando equipada com um sistema de crivos. [7]

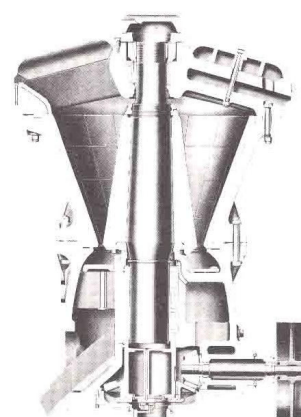
Comparativamente a outros equipamentos, a britadeira de maxilas consome relativamente pouca energia e tem uma estrutura bastante simples, apesar da sua forma em “V” implicar congestionamentos frequentes de material, mas facilmente solucionáveis [7].

As britadeiras giratórias são utilizadas na indústria mineira em substituição das britadeiras de maxilas, em relação às quais têm uma capacidade 3 ou 4 vezes superior, mas menos potência [7,12].

Consistem num enorme eixo vertical que comporta um elemento cónico de metal (cabeça). O eixo vertical está suspenso, e à medida que vai rodando, descreve um trajecto circular no interior da câmara de fragmentação, que se encontra fixa, tal como se pode ver na figura 1.1 b). [11].



(a)



(b)

Figura 1.1 Equipamentos de fragmentação: a) Britadeira de maxilas e b) Britadeira giratória.

Fonte: [13, 14]

Durante o processo, o material é comprimido entre a cabeça e as paredes da câmara de fragmentação. Devido ao seu movimento, usar este equipamento equivale a usar várias britadeiras de maxilas ao mesmo tempo, facto que explica a sua maior capacidade em relação a estas [11]. São igualmente menos susceptíveis a congestionamentos, mesmo com pedaços maiores [7], podendo igualmente operar com a cabeça coberta de material [11].

Os britadores de impacto são mais adequados aos RCD comparativamente com os equipamentos indicados anteriormente devido ao estado do material após a fractura: na fragmentação por compressão, ainda existem tensões internas que podem provocar mais roturas após o processo, ao passo que na fragmentação por impacto a fractura é imediata, não sendo criadas tensões internas. Este estado livre de tensões e consequente estabilidade é particularmente importante nos agregados utilizados para a produção de tijolos, para a construção civil e para a construção de estradas, uma vez que estes materiais irão ser utilizados com agentes ligantes (ex.: betume). [11]

Nos britadores de impacto combina-se a massa com o movimento rápido de um rotor, que pode ter dentes ou lâminas acoplados, contra o qual material é fragmentado. Para além deste impacto, os pedaços de material também são atirados uns contra os outros e contra uma placa de impacto, sofrendo novamente fragmentação. A maioria dos equipamentos têm mais do que uma placa de impacto, que podem não estar fixas sendo possível ajustar hidraulicamente o seu ângulo, e em alguns casos removê-las. [7]

Quando existe um crivo à saída do equipamento, este restringe a saída de material, de modo que o material que não possuir determinada granulometria é retido e volta a ser fragmentado [11]. Na figura 1.2 é apresentado um corte esquemático de um moinho de martelos.

Os britadores de impacto têm uma série de componentes que são controlados hidraulicamente, por exemplo para ajustar a largura da saída e aumentá-la automaticamente em caso de sobrecarga, definir a resistência da fragmentação ajustando o ângulo das placas de impacto e ajustar automaticamente a largura da abertura após uma paragem. [7]

No caso dos moinhos de martelos, a razão de redução pode ser de até 20:1, funcionando em circuito aberto, e de até 40:1, quando em circuito fechado. [12]

Após o processo de fragmentação dos RCD, procede-se à **separação ou concentração** dos materiais que foram libertados, especificamente do material ferroso (material magnético) em relação ao material inerte (material não-magnético). Esta separação é conseguida através do uso

de campos magnéticos.

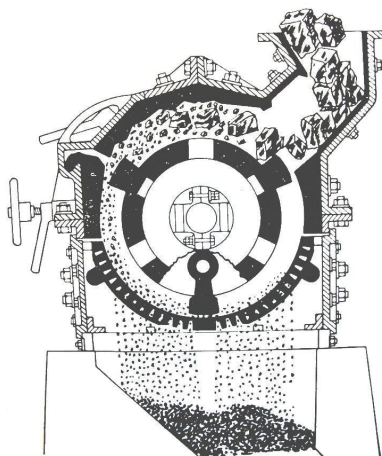


Figura 1.2 Equipamento de fragmentação: Moinho de martelos

Fonte: [11].

A susceptibilidade magnética de um material determina a sua resposta a um campo magnético sobre ele aplicado. Com base nesta propriedade, os materiais podem ser classificados em (1) paramagnéticos, se forem atraídos por um campo magnético, e (2) diamagnéticos, caso sejam repelidos por este. Os materiais que são fortemente paramagnéticos são classificados numa categoria à parte, sendo denominados de ferromagnéticos, nos quais se incluem, por exemplo, o ferro e o aço. Para a remoção destes materiais são utilizados separadores magnéticos que podem ser de duas categorias: (1) de baixa intensidade e (2) de alta intensidade. Os primeiros são usados preferencialmente para materiais ferromagnéticos, e os últimos para paramagnéticos de baixa susceptibilidade magnética [12].

No caso particular dos RCD, estes contêm muitos metais, principalmente aço (utilizado no betão armado), que é considerado um material ferromagnético, sendo utilizados para a sua remoção os separadores magnéticos de baixa intensidade. Estes separadores podem ser electromagnéticos ou permanentes, os primeiros são utilizados quando são necessários campos magnéticos relativamente muito fortes, sendo que os segundos são mais amplamente utilizados [12].

É importante que a remoção dos metais seja feita quanto antes, de modo a evitar que os pedaços de metal danifiquem as telas transportadoras [7]. Assim, imediatamente após a fragmentação, o material é levado por uma tela transportadora até ao separador magnético, que se localiza sobre a mesma.

A distância entre o material e o separador magnético tem influência no desempenho do separador. Ao aumentar a distância, pequenos incrementos provocam uma diminuição drástica no desempenho do separador. Geralmente, os separadores magnéticos são concebidos para operar a uma distância de 15 a 20cm do material. [15]

O separador pode estar fixo ou em rotação, sendo que este último tem a vantagem de remover o metal e encaminhá-lo imediatamente para um dos lados da tela transportadora [7].

Para além dos metais ferrosos, os RCD também contêm outros metais que não são ferrosos: alumínio, cobre, latão, chumbo e zinco. Estes metais e ligas não são magnéticos e podem ser separados manualmente ou através de Correntes de Eddy (ou Correntes de Foucault). O seu funcionamento assenta no princípio de que, quando um metal condutor é sujeito a um campo magnético variante, são geradas correntes “parasitas” no metal, que geram, em resposta, outro campo magnético, com direcção contrária ao primeiro. Como resultado, o metal é repelido. Por ser bom condutor, o alumínio reage de modo particularmente forte às correntes de Foucault, o que permite que este metal seja facilmente separado. [7]

No caso específico dos RCD, após a separação magnética, procede-se à **classificação**, que permite que o material fragmentado e livre dos principais contaminantes seja separado consoante a sua granulometria, num processo denominado de crivagem.

Os objectivos da classificação granulométrica são, genericamente, os seguintes: [9]

- Limitar superiormente o calibre do material que vai ser alimentado nos equipamentos de fragmentação, de modo a que não sejam excedidas as dimensões da boca dos mesmos;
- Limitar inferiormente o calibre do material que vai ser alimentado nos mesmos equipamentos do ponto anterior, de modo a aumentar a eficiência do processo;
- Obter material de dimensões bem definidas, que obedeam às especificações referidas pelas indústrias que vão utilizar os materiais a jusante.

No processo de reciclagem dos RCD, esta operação tem como objectivo obter um produto final com a granulometria adequada para que possa ser utilizado como agregado secundário em diversas actividades da construção civil, como seja na produção de betão ou aplicação directa como *tout-venant*. Por outro lado, a classificação também pode ser utilizada a montante da fragmentação para retirar à cabeça as terras e/ou o material mais fino, que sejam considerados

indesejáveis para determinadas aplicações do produto final [7].

Nesta operação, o equipamento chave são os crivos, superfícies com uma multiplicidade de aberturas que funcionam como barreiras físicas que provocam a separação do material consoante a sua dimensão. Idealmente, as partículas maiores do que os orifícios da superfície ficam retidas (*oversize*), enquanto que as menores, pelo menos em duas das suas dimensões, a atravessam (*undersize*). [12]

O equipamento de crivagem é classificado primeiramente consoante a sua mobilidade: fixo ou móvel. Dentro dos crivos móveis, os crivos vibratórios são os mais utilizados, existindo uma grande variedade de equipamentos que são classificados de acordo com o movimento resultante na própria superfície, o local onde o movimento é aplicado e como é gerado o movimento vibratório [12]. Estes equipamentos não necessitam de muito espaço, e a superfície apenas precisa de uma pequena inclinação, podendo operar num sistema de *decks* múltiplos, em que a alimentação é efectuada no crivo superior (que possui aberturas maiores e retêm o material mais grosseiro). O material mais fino cai para o crivo inferior, com aberturas menores, onde é igualmente efectuada a separação. Deste modo produz-se uma série de fracções estreitamente calibradas [11].

Outro equipamento móvel bastante utilizado, e dos mais antigos, é o crivo rotativo ou *trommel*, que consiste num crivo cilíndrico, ligeiramente inclinado, com movimento rotacional e que pode ser utilizado por via seca ou por via húmida. A alimentação é feita por uma das extremidades do crivo, e as partículas de dimensões inferiores às aberturas da malha atravessam o crivo, sendo que as partículas de dimensões superiores saem pela extremidade oposta à alimentação [11]

As superfícies dos crivos podem ser classificadas de acordo com três tipos básicos, consoante a malha: (1) Chapa perfurada, (2) Grades ou grelhas e (3) Barras.

As superfícies em chapa perfurada são obtidas através da perfuração de uma chapa de aço. As aberturas podem ter uma variedade de formas, que dão o nome à malha final: malha circular, malha quadrada ou malha rectangular, por exemplo. Estas superfícies são mais duráveis do que as de grades ou grelhas, sendo mais resistentes e rígidas. Têm, no entanto, menos capacidade, pelo que são utilizadas preferencialmente para material com partículas mais grosseiras [12]

As superfícies em grades ou grelhas são de longe as mais utilizadas. Existe igualmente uma grande variedade de aberturas, sendo que, por exemplo, as aberturas quadradas são utilizadas

para crivagem grosseira e as rectangulares para a crivagem mais fina [11]. As aberturas rectangulares têm a desvantagem de serem menos precisas no processo de classificação do que as aberturas quadradas [12].

1.3. O ECOMATERIAL E AS SUAS APLICAÇÕES

Um dos objectivos e uma das vantagens da valorização/reciclagem de RCD é a produção de agregados reciclados, que podem ser utilizados no sector que lhes deu origem. Tendo em consideração as características destes materiais, estes podem ser considerados ecomateriais, cuja definição é “*aqueles que são concebidos especificamente para minimizar os efeitos adversos no ambiente, ao mesmo tempo que mantêm o seu desempenho e apresentam um preço competitivo*” [16].

A qualidade dos agregados reciclados é condição chave para garantir a sua aplicabilidade, sendo esta condicionada por todas as etapas que levaram à sua produção, desde a origem dos RCD (influenciada por exemplo pela selectividade da demolição e pela existência ou não de triagem em obra), até todo o processo de reciclagem e da sequência e número das etapas que o constituíram.

A título de exemplo apresentam-se algumas opções de aplicação dos seguintes materiais: (1) Betão, (2) Tijolos e alvenaria, (4) Madeira, (5) Asfalto e misturas betuminosas e (6) Metais.

Betão

O betão é um material compósito, constituído por agregados, cimento *portland*, água e aditivos. Sem processamento, o betão reciclado pode ser utilizado, por exemplo para enchimento e elevação de terrenos, na construção de estradas, em barreiras sonoras e em banquetas [7].

Para a produção de betão, são utilizadas as fracções mais grosseiras de agregados reciclados (4/32mm), e eventualmente a fracção mais fina (0/4mm), desde que misturada com areia natural. O betão assim obtido tem a desvantagem de ser menos denso, logo mais poroso, o que implica que tenha de ser utilizada mais água para conseguir a saturação completa do material e de mais compactação. Este problema pode ser minorado se houver remoção da fracção mais fina dos RCD (inferior a 4mm), antes do processo de reciclagem. A resistência deste betão tende a ser 80-100% da resistência do que é produzido com agregados naturais. [7]

Um estudo realizado pelo Instituto Superior Técnico (IST), referente à Qualidade dos Agregados Reciclados em Betões e Argamassas, concluiu que a utilização de agregados reciclados em betão é tecnicamente viável e que as utilizações actuais destes agregados correspondem a um desaproveitamento das suas características. O mesmo estudo indica que em igualdade de circunstâncias este betão tem pior desempenho do que o obtido com agregados naturais. [17]

Há que ter também em atenção as seguintes dificuldades, relativamente à reciclagem de betão [7]:

- É difícil cumprir as normas relativamente aos contaminantes presentes nos agregados reciclados;
- Existem custos acrescidos devido ao controlo de qualidade, ao armazenamento de agregados reciclados e às alterações no seu processo de fabrico;
- Existem custos de transporte desde a obra de origem até à unidade de reciclagem e desta para a obra onde serão reutilizados;
- Ainda existe a percepção de que os agregados reciclados são apenas resíduos.

Devido a todos estes problemas, não é de admirar que a maior parte do betão proveniente dos RCD seja vendido como *tout-venant*, ou seja, a fracção 0/40mm, com aplicação em sub-base de estradas. A sub-base tem como objectivo aumentar a carga que o pavimento pode suportar, sendo geralmente constituída por brita. Nesta aplicação, segundo alguns autores, não é recomendável o uso de misturas de agregados naturais com agregados reciclados. [7]

Tijolos e alvenarias

As aplicações dos agregados reciclados provenientes do processamento de tijolos contidos nos RCD são as mesmas do que as do betão. No entanto, este material é menos adequado nalgumas aplicações devido à sua elevada porosidade e baixa resistência. Por exemplo, não pode ser utilizado como agregado para asfalto e é pouco adequado para sub-base de estradas. Também o betão produzido a partir dos agregados de alvenaria tem 65%-90% menos resistência do que o produzido com agregados naturais. [7]

A alvenaria pode ser utilizada na produção de betão celular, que consiste num betão que contém pó de alumínio que se expande, produzindo um material leve e com propriedades isolantes. Também a fracção 0/4mm obtida após processamento da alvenaria pode ser utilizada em substituição de argila na produção de tijolos, ou como substituto da areia em tijolos de silicato de

sódio.[7]

Madeira

As estruturas em madeira, desde que não estejam danificadas, podem ser reaproveitadas, como por exemplo portas, tábuas e vigas.

Quando danificada, para que a madeira possa ser valorizada são adoptados processos que dependem do seu grau de contaminação. Por exemplo, a madeira que não esteja contaminada pode ser utilizada na pulpagem da produção de papel e cartão e na compostagem. Se a madeira estiver ligeiramente contaminada, pode ser transformada em madeira prensada, através de moagem e da adição de ligantes. A madeira mais contaminada, que contenha cobertura plástica ou que seja prensada, pode ser utilizada na produção de aglomerado ou decomposta por gaseificação, obtendo-se um gás que pode ser utilizado como fonte de energia. [7]

De realçar que quando presente nos agregados reciclados, a madeira constitui um problema se se pretender utilizar estes agregados para produção de betão, na sub-base de estradas (neste caso refere-se ao *tout-venant*, de granulometria 0/40mm) ou como areia industrial para betão (granulometria 0/4mm), para citar apenas alguns exemplos. A madeira não deve estar presente de todo no agregado para asfalto. [7]

Asfalto

O asfalto presente nos RCD pode ser reutilizado na sub-base de estradas, a frio ou a quente. Em utilizações a frio, basta a redução de tamanho do material e a adição do respectivo agente de regeneração. O material obtido é utilizado em vias de comunicação sujeitas a baixas cargas. Em aplicações mais exigentes torna-se necessária a adição de cimento. A quente, podem ser reutilizadas percentagens elevadas de asfalto (até 95%). Contudo, o processo a quente tem a desvantagem de provocar a libertação de Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAP), presentes no material. [7]

Metal

Este material deve ser sujeito a triagem para que o seu valor seja aumentado. Quando não é possível reutilizar o aço tal como é recolhido, este pode ser reciclado para produzir novo metal.

1.4. ESTADO DA ARTE

O fluxo dos RCD apresenta, quer a nível português quer europeu, características que dificultam a sua correcta gestão e tratamento, como sejam:

1. Falta de informação fiável sobre dados quantitativos.

Em Portugal, o sector dos RCD tem vindo a ser negligenciado ao longo dos últimos anos, pelo que não existem dados reais referentes aos quantitativos gerados. Os dados existentes referem-se apenas a estimativas, baseadas em diferentes pressupostos, que indicam uma diversidade de resultados, variando entre 4,4 milhões de toneladas por ano [18] e 7,5 milhões de toneladas por ano [19], por exemplo. A inexistência de dados fiáveis dificulta qualquer intervenção ao nível da quantificação e caracterização do fluxo, o que dificulta a definição de uma estratégia adequada para a sua gestão e tratamento.

No entanto, desde 2007 que os produtores e operadores de gestão de RCD são obrigados a efectuarem registo no Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos (SIRER), prevendo-se a existência, num futuro próximo, de dados fiáveis relativamente a este fluxo de resíduos.

2. Quantidade elevada e heterogeneidade dos RCD.

Apenas na Europa, são geradas aproximadamente 1000 Mt de RCD em cada ano, representando cerca de 32% do total de resíduos gerados. Em Portugal, as estimativas existentes apontam para quantidades igualmente elevadas; por exemplo, o valor estimado para 2008, de 7,5 milhões de toneladas corresponde a 22% do total de resíduos gerados no país. Tendo em consideração o desenvolvimento crescente da actividade da construção civil e a modernização de infra-estruturas já antigas, é de prever que os quantitativos dos RCD continuem a aumentar, dificultando a sua gestão e tratamento. [20]

Para além dos quantitativos elevados, este fluxo caracteriza-se também por uma elevada heterogeneidade, devido à diversidade de actividades envolvidas na construção civil que lhes dá origem e à multiplicidade de matérias-primas, que dependem do local de construção, da época temporal, do clima e das actividades económicas [21]. Esta heterogeneidade implica que seja necessária a existência de uma multiplicidade de operadores envolvidos na sua gestão e tratamento.

3. Presença de resíduos perigosos.

A actividade de construção civil, tal como já foi referido, gera resíduos que são considerados perigosos. As substâncias perigosas envolvidas são, por exemplo, chumbo, asbestos, mercúrio e Polibifenilos Policlorados (PCB) [20]. Os resíduos perigosos aparecem geralmente misturados com os outros resíduos, originando custos elevados na gestão e tratamento da mistura, que podem chegar a ser 20 vezes superiores aos praticados para os resíduos não perigosos [22].

4. Práticas de gestão e tratamento desadequadas.

Em Portugal, até há bem pouco tempo não existia qualquer documento legal específico para este tipo de resíduos. Este facto, aliado ao facto destes resíduos não comportarem problemas de lixiviação, propagação de matérias tóxicas ou inconvenientes de putrefacção, levou a que não existissem medidas concretas para a sua gestão, tratamento e destino final adequados. O cenário presente reflecte assim uma clara deficiência na gestão e tratamento: actualmente estima-se que cerca de 70% destes resíduos tenham destino incerto [19]. Segundo a QUERCUS (Associação Nacional de Conservação da Natureza), estima-se que cerca de 95% dos RCD gerados têm como destino final a deposição em aterro ou são recolhidos por empresas não licenciadas [23], operando a preços bastante competitivos, mas cujo local de descarga dos RCD é difícil identificar, verificando-se, na sua grande maioria, que a descarga dos resíduos é feita em locais impróprios e de maneira ilegal [24]. São assim visíveis, um pouco por todo o país, depósitos ilegais, que dão origem, mais tarde ou mais cedo, a vazadouros de outro tipo de resíduos (resíduos orgânicos, papel e cartão, vidro, madeira, plásticos, etc.), constituindo um problema de saúde pública, degradação da paisagem e contaminação.

Estima-se que a taxa de reciclagem destes resíduos se situe apenas nos 5%, representando 375 mil das 7,5 milhões de toneladas de RCD gerados no país [19].

5. Resistência ao uso de agregados reciclados.

Quando existe valorização dos RCD, o uso dos agregados reciclados (materiais secundários) é comprometido devido à sua heterogeneidade (que depende da matéria-prima utilizada), à dificuldade em manter um fluxo constante, à sua possível contaminação com outros resíduos e, principalmente, à disponibilidade de agregados naturais (materiais primários), que representam uma alternativa fiável a preço baixo. Foram publicadas quatro Especificações Técnicas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), referentes à utilização de agregados reciclados, que podem fomentar a confiança dos utilizadores nestes materiais, incentivando a sua

comercialização.

Para além das questões apresentadas anteriormente na gestão e tratamento dos RCD, o carácter geograficamente disperso e temporário das obras também dificulta o controlo e a fiscalização do desempenho ambiental das empresas do sector. [25]

1.4.1. GESTÃO E VALORIZAÇÃO DE RCD NA EUROPA

Na União Europeia (UE) são gerados 100 milhões de toneladas de RCD por ano, dos quais apenas 28% são aproveitados, e desta percentagem a maior parte é processada ou aplicada em bases e sub-bases de estradas [5].

A Bélgica, a Dinamarca e a Holanda são os países com taxas mais elevadas de reciclagem, situando-se os três acima dos 80% [5]. Quando comparado com Portugal, com uma taxa de reciclagem estimada de 5% [19], é fácil perceber que existe um enorme potencial de valorização nos RCD. Seguidamente é feita uma breve descrição da gestão e valorização deste tipo de resíduos em cada um dos países.

Bélgica

Em termos de quantidade, estima-se que sejam geradas 8 milhões de toneladas de RCD por ano. Os dados de 2000 indicavam que cerca de 45% deste material era processado. A primeira unidade de reciclagem foi estabelecida nos anos 50, encontrando-se hoje em dia a laborar cerca de 90 unidades de reciclagem. As unidades mais avançadas possuem as seguintes etapas e/ou equipamentos: pesagem, pré-crivagem, britador primário, separador electromagnético, crivagem, britador secundário e uma crivagem [7].

A larga maioria dos agregados reciclados é utilizada na construção de estradas, para onde é escoado o betão britado e o asfalto reutilizado. Existe também produção de betão a partir de agregados reciclados de fracção 4/32mm, substituindo integralmente os agregados naturais. [7]

Relativamente à alvenaria, o seu processamento é relativamente barato, no entanto a sua menor qualidade leva a que o mercado se encontre limitado e que as unidades de reciclagem possam recusar a aceitação deste material. No entanto, a fracção 0/56mm pode ser utilizada em aterros e em parques de estacionamento com pavimento não endurecido, e a mistura de alvenaria com betão pode ser usada na sub-base de estradas. [7]

Dinamarca

Os RCD representam, na Dinamarca, de 25 a 50% do total de resíduos produzidos no país. Em 1990, estimou-se que se teriam gerado cerca de 4,5 milhões de toneladas, enquanto que em 1993 este valor era de 2,4 milhões de toneladas. Estima-se ainda que existam cerca de 100 mil a 300 mil toneladas de RCD que não foram declaradas. Os resíduos exclusivamente da demolição representam 70-80% do total dos RCD. [7]

É dada especial importância à demolição selectiva de edifícios e de outras estruturas, sendo que os diferentes materiais são removidos separadamente tanto quanto possível. Apesar deste tipo de demolição apresentar um custo cerca de 30% superior ao da demolição convencional, os custos totais são apenas 17,5% superiores, visto evitar-se a deposição de RCD nos aterros sanitários. As políticas aplicadas influenciam os padrões comportamentais da população, por exemplo, a aplicação de taxas e de coimas, a prática de preços dos agregados reciclados bastante competitivos, e a proibição de depósito em aterros sanitários. [7]

A reciclagem de RCD é prática corrente na Dinamarca, impulsionada pela baixa capacidade dos aterros sanitários. Em 1985, apenas 10% dos RCD eram reciclados, mas projectos de investigação e demonstração elevaram este valor para 80% em 1990. De realçar ainda que estudos efectuados demonstraram que é possível chegar a taxas de reciclagem de até 90%. [7]

Actualmente existem cerca de 10 unidades de reciclagem fixas e 20 unidades móveis que operam nas próprias obras de origem permitindo a reutilização dos materiais no local. A maior parte dos RCD são transformados em asfalto britado, betão britado ou numa mistura destes dois, podendo também obter-se uma mistura de alvenaria e de betão britados, que são utilizados na construção. [7]

Holanda

Actualmente são gerados aproximadamente 14 milhões de toneladas de RCD na Holanda, o que faz deste um dos fluxos de resíduos mais representativos no país. Em comparação, os RSU gerados são da ordem dos 5,5 milhões de toneladas. [7]

O uso dos agregados reciclados é incentivado pelo aumento do custo de deposição dos RCD em aterro sanitário e pela limitação da extracção de agregados naturais. Mais de 90% dos agregados reciclados são utilizados na construção de estradas. O uso destes na produção de betão é reduzido devido aos custos inerentes ao processo. Está a ser investigada a aplicação de betão britado

misturado com alvenaria na produção de tijolos de pedra calcária e de betão celular, mas os requisitos destes materiais são bastante exigentes, o que limita o uso de agregados reciclados. [7]

1.4.2. GESTÃO E VALORIZAÇÃO DE RCD EM PORTUGAL

Em Portugal, segundo o Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, que define o regime geral da gestão dos resíduos, os RCD são definidos como *o resíduo proveniente de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edificações*. Esta definição manteve-se inalterada no Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de Março [25], que define o regime da gestão de resíduos de construção e demolição.

Ao abrigo da Portaria n.º 209/2004, de 3 de Março [26], que define a Lista Europeia de Resíduos (LER), os RCD são genericamente classificados no Capítulo 17 – *Resíduos de Construção e Demolição (incluindo solos escavados de locais contaminados)*, que inclui todos os códigos referentes a este fluxo. No quadro 1.1 são apresentados todos os códigos e designações dos resíduos incluídos neste capítulo.

Até há bem pouco tempo, o fluxo dos RCD era unicamente regulado pela Lei-Quadro de Resíduos, aprovada pelo Decreto-Lei n.º 175/2006, de 5 de Setembro, que estabelece o regime geral da gestão de resíduos. Apenas em 2008 foi publicado o Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de Março [25], que aprova o regime da gestão de resíduos de construção e demolição. Este diploma estabelece o regime das operações de gestão de resíduos resultantes de obras ou demolições de edifícios ou de derrocadas, compreendendo a sua prevenção e reutilização, e as suas operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação.

Este Decreto-Lei contempla os princípios básicos de gestão de resíduos preconizados na Lei-Quadro de Resíduos, como sejam os princípios da auto-suficiência, da prevenção e da redução, bem como a atribuição da responsabilidade da gestão de resíduos a todos os intervenientes no seu ciclo de vida. Fomenta igualmente a reutilização de solos e rochas não contaminados na própria obra de origem, e quando tal não é possível, o seu encaminhamento para outra obra onde possam ser reaproveitados, para utilização na recuperação ambiental e paisagística de explorações mineiras e de pedreiras, na cobertura de aterros ou para deposição em locais devidamente licenciados. Os restantes materiais que não possam ser usados directamente em obra e que sejam RCD devem ser sujeitos a triagem. Também a fragmentação (britagem e corte) de RCD está

sujeita a requisitos mínimos especificados neste diploma. Quanto à deposição em aterro, esta só é permitida após triagem dos RCD. É igualmente exigido, aos produtores e operadores de gestão de RCD, o registo no SIRER (Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos), permitindo deste modo a quantificação e qualificação destes resíduos. [27]

Quadro 1.1 Capítulo 17 da Lista Europeia de Resíduos (adaptado)

Capítulo	17	Resíduos de construção e demolição (incluindo solos escavados de locais contaminados):
Subcapítulo	17 01	Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos:
Código	17 01 01 17 01 02 17 01 03 17 01 06 (*)	Betão. Tijolo. Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos. Misturas ou fracções separadas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos contendo substâncias perigosas.
Subcapítulo	17 02	Madeira, vidro e plástico:
Código	17 02 01 17 02 02 17 02 03 17 02 04 (*)	Madeira. Vidro Plástico. Vidro, plástico e madeira contendo ou contaminados com substâncias perigosas.
Subcapítulo	17 03	Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão:
Código	17 03 01 (*) 17 03 02 17 03 03 (*)	Misturas betuminosas contendo alcatrão. Misturas betuminosas não abrangidas em 17 03 01. Alcatrão e produtos de alcatrão.
Subcapítulo	17 04	Metais (incluindo ligas):
Código	17 04 01 17 04 02 17 04 03 17 04 04 17 04 05 17 04 06 17 04 07 17 04 09 (*) 17 04 10 (*) 17 04 11	Cobre, bronze e latão. Alumínio. Chumbo. Zinco. Ferro e aço. Estanho. Mistura de metais. Resíduos metálicos contaminados com substâncias perigosas. Cabos contendo hidrocarbonetos, alcatrão ou outras substâncias perigosas. Cabos não abrangidos em 17 04 10.
Subcapítulo	17 05	Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem:
Código	17 05 03 (*) 17 05 04 17 05 05 (*) 17 05 06 17 05 07 (*) 17 05 08	Solos e rochas contendo substâncias perigosas. Solos e rochas não abrangidos em 17 05 03. Lamas de dragagem contendo substâncias perigosas. Lamas de dragagem não abrangidas em 17 05 05. Balastros de linhas de caminho de ferro contendo substâncias perigosas. Balastros de linhas de caminho de ferro não abrangidos em 17 05 07.
Subcapítulo	17 06	Materiais de isolamento e materias de construção contendo amianto:
Código	17 06 01 (*) 17 06 03 (*) 17 06 04	Materiais de isolamento contendo amianto. Outros materiais de isolamento contendo ou constituídos por substâncias perigosas. Materiais de isolamento não abrangidos em 17 06 01 e 17 06 03.
Subcapítulo	17 08	Materiais de construção à base de gesso:
Código	17 08 01 (*) 17 08 02	Materiais à base de gesso contaminados com substâncias perigosas. Materiais de construção à base de gesso não abrangidos em 17 08 01.
Subcapítulo	17 09	Outros resíduos de construção e demolição:
Código	17 09 01 (*) 17 09 02 (*) 17 09 03 (*) 17 09 04	Resíduos de construção e demolição contendo mercúrio. Resíduos de construção e demolição contendo PCB (por exemplo, vedantes com PCB, revestimentos de piso à base de resinas com PCB, envidraçados vedados contendo PCB, condensadores com PCB). Outros resíduos de construção e demolição (incluindo misturas de resíduos) contendo substâncias perigosas. Misturas de resíduos de construção e demolição não abrangidos em 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03.

Nota: Os resíduos mencionados com (*) são considerados perigosos, na acepção da alínea b) do artigo 3º do Decreto-Lei nº 239/97.

A prevenção dos RCD começa gradualmente a ser efectuada durante o processo de demolição de estruturas. A título de exemplo, refere-se a demolição do Hotel Estoril-Sol, de 16 andares, com

término em Outubro de 2007, na qual houve desmantelamento de alcatifas, têxteis, detectores automáticos de incêndios e lâmpadas incandescentes, que foram devidamente acondicionados e encaminhados para destino final adequado. Ao mesmo tempo, houve reciclagem da fracção inerte (betão e alvenaria) no local, tendo os respectivos produtos sido encaminhados para reaproveitamento [23]. No total, foi reaproveitado 98% dos RCD [28].

Relativamente à aplicação dos agregados reciclados, em Portugal, foram publicadas em 2006 pelo LNEC quatro Especificações Técnicas. Estas servem como guias para a reciclagem e para a reutilização dos RCD e dos agregados reciclados:

- E 471: Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos.
- E 472: Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central.
- E473: Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligantes de pavimentos.
- E 474: Guia para a utilização de resíduos de construção e demolição em aterro e camadas de leito de infra-estruturas de transporte.

A legislação em vigor (Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de Março) incentiva a utilização destas Especificações de modo a promover a correcta valorização dos RCD.

Da pesquisa efectuada às empresas a operar no sector dos RCD, no âmbito deste trabalho, conseguiu apurar-se que pelo menos 5 empresas procedem efectivamente à valorização/reciclagem de RCD. Destas, foram visitadas a **LOBBE TRANSLICON, Lda.**, a **ECOLABOR, S.A.**, e a **TRIANOVO, Lda.**, das quais se passa a fazer uma breve descrição.

1. LOBBE TRANSLICON, Lda.

A LOBBE TRANSLICON, Lda., foi pioneira na reciclagem de RCD em Portugal, processo que iniciou em 1995. De início, o principal objectivo da empresa seria a comercialização dos agregados reciclados produzidos a partir de RCD, no entanto, face à dificuldade no escoamento destes materiais, a empresa viu-se obrigada a investir na recuperação paisagística. A actividade da LOBBE caracteriza-se assim pelo seu carácter temporário, na qual está envolvida necessariamente maquinaria completamente móvel. [29]

À data da visita (2008) encontrava-se a laborar na zona do Seixal, desde 2003. Nesta zona

existem muitas pedreiras já exploradas ou ainda em exploração, o que poderia representar à partida concorrência aos agregados reciclados produzidos pela LOBBE caso os produtos desta tivessem outro destino que não a reabilitação das próprias pedreiras. [29]

Os RCD utilizados como matéria-prima no processo são recolhidos em obra, sendo taxados à entrada da unidade de acordo com o seu nível de separação: materiais inertes misturados com metais ferrosos e não ferrosos, plásticos mistos, madeira e papel/cartão têm uma tarifa mais elevada do que cada uma destas fracções entregue devidamente separada. [29]

A unidade de reciclagem tem uma capacidade de 200000t/ano, o que corresponde aproximadamente a cerca de 100t/h. Os RCD são pesados à entrada da unidade e é feita igualmente a inspecção visual dos mesmos, de modo a determinar aproximadamente o seu grau de contaminação. [29]

O material inerte contaminado é sujeito a uma triagem grosseira com uma máquina de garras, a montante do processo de reciclagem, enquanto que o material inerte não contaminado entra directamente no processo. [29]

O processo de reciclagem inicia-se com a colocação de todo o material numa tremonha que é dotada de um crivo na zona inferior. Seguidamente é efectuada a separação magnética e triagem manual, em que são removidos o plástico/papel, os metais e a madeira. O restante material, composto na sua maior parte por inertes, é britado num moinho de martelos, regulado de modo a obter material com granulometria 0/5mm. Esta granulometria foi escolhida por ser a mais próxima do material original natural no areeiro. [29]

Após a britagem o material de classe granulométrica 0/5mm obtido é ainda sujeito a um crivo rotativo, ou *trommel*, para que sejam removidas as fracções mais leves de contaminantes presentes (papel e cartão). [29]

Todos os contaminantes removidos são encaminhados para valorização/reciclagem. Só o papel, quando muito contaminado, é depositado directamente em aterro sanitário. [29]

Como resumo, apresenta-se na figura 1.3 um diagrama do processo de reciclagem.

2. ECOLABOR – Transporte e Gestão de Resíduos, Lda.

A ECOLABOR Lda. é uma das mais recentes empresas a operar no mercado dos RCD. Com uma unidade de triagem instalada em Pêro-Pinheiro (Sintra), encontra-se a laborar desde Abril de

2007. Todo o equipamento foi montado de raiz para o tratamento de RCD. [30]

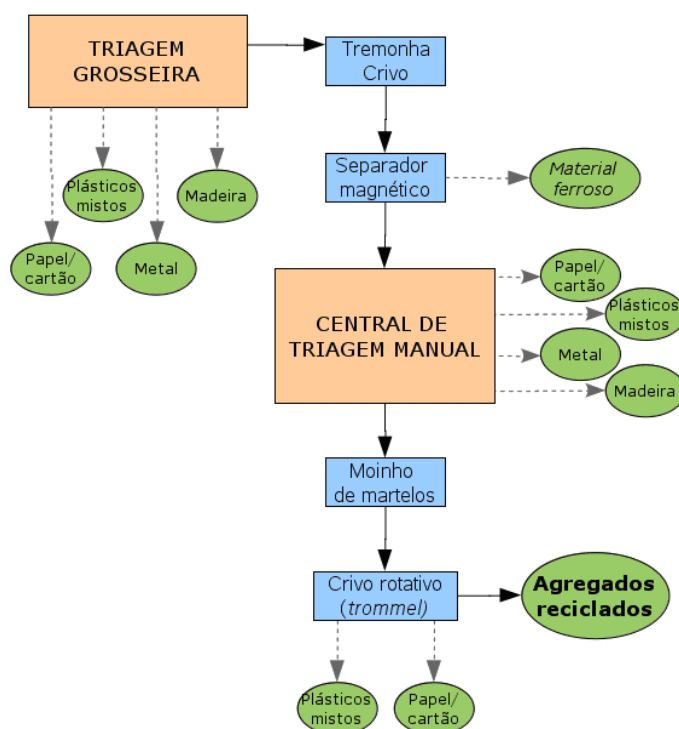


Figura 1.3 Diagrama geral do processo de triagem e reciclagem da LOBBE TRANSLICON.

Os RCD são recolhidos em obra e transportados para a unidade na sua maior parte por operadores privados, existindo tarifas diferentes consoante o material inerte se encontre misturado com outros materiais (metal ferroso e não ferroso, papel/cartão, plásticos mistos, madeira), ou se encontre separado destes. [30]

Os RCD recebidos são constituídos essencialmente por betão, alvenaria e misturas betuminosas. Ao chegarem à unidade, os RCD são pesados e identificados, sendo depois descarregados e sujeitos a triagem grosseira. [30]

Após a triagem grosseira, um crivo rotativo permite a separação de terras à cabeça (fracção 0/1mm). O material remanescente é descarregado numa tremonha, já na estação de triagem e encaminhado através de uma tela transportadora para um classificador de ar onde são separados os materiais mais leves (plásticos mistos e papel/cartão). [30]

O restante material entra na linha de triagem, onde se procede à separação manual de papel/cartão, plásticos mistos, madeira e outros (material muito sujo). O metal é separado no final da linha de triagem, por um separador magnético. [30]

O material inerte livre de contaminantes é britado numa britadeira de maxilas. Na altura da visita às instalações (final de 2007) estava a ser produzido *tout-venant*, de granulometria 0/22mm. [30]

Na figura 1.4 é apresentado um diagrama do processo de triagem e reciclagem de RCD.

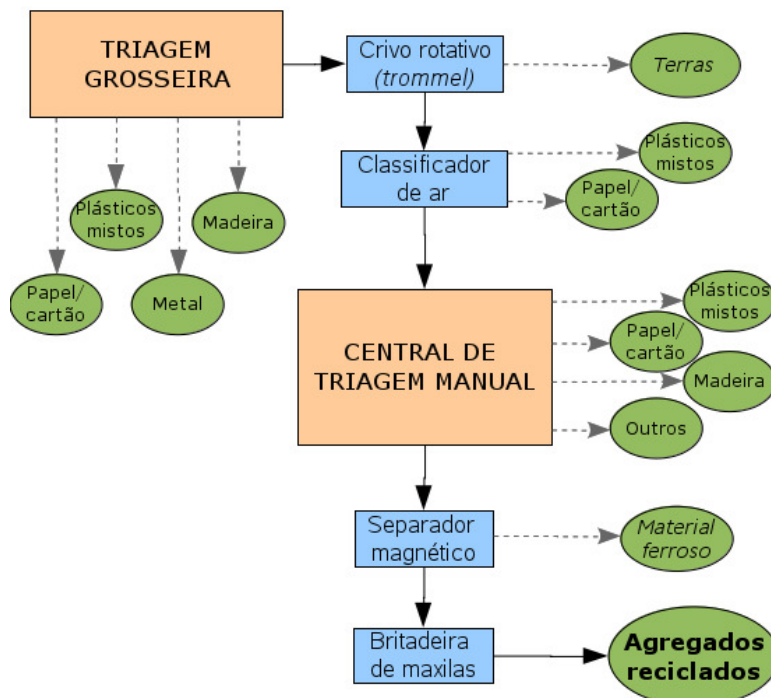


Figura 1.4 Diagrama geral do processo de triagem e reciclagem da ECOLABOR.

Dos contaminantes separados, todos se destinam a valorização, excepto o material que se encontra muito sujo. Não têm existido problemas de escoamento dos agregados reciclados, apesar da unidade estar implantada numa zona industrial onde se comercializam agregados naturais. [30]

3. TRIANOVO – Resíduos de Construção Civil, Lda.

Esta empresa produz, desde 1988, agregados naturais a partir de um maciço rochoso localizado perto de Torres Vedras. Em 2005 iniciou a reciclagem de RCD, aproveitando o equipamento já instalado para a produção de agregados naturais, a montante do qual acrescentou uma central de triagem. [31]

Na unidade são recebidos betão, alvenaria e também misturas betuminosas. Estes RCD são recolhidos em obra, existindo tarifas mais baixas à entrada da unidade para os resíduos que tenham sido separados na origem. [31]

O equipamento instalado tem capacidade cerca de 800t/d, o que corresponde a cerca de 100t/h. O

processo de triagem consiste numa tremonha onde são descarregados os RCD, sendo conduzidos por uma tela transportadora até ao tapete de triagem. Neste, procede-se à separação manual de papel/cartão, plásticos mistos, metal, madeira e outros. Os inertes são depois encaminhados para a reciclagem propriamente dita. [31]

O processo de reciclagem em si inicia-se com a deposição dos RCD numa tremonha que os conduz até um crivo de rolos que permite a separação, à cabeça, de terras que são indesejáveis nos agregados britados e que são utilizadas na reabilitação da pedreira. A britagem é realizada numa britadeira de maxilas, sendo o agregado já britado encaminhado por uma tela transportadora até um moinho de martelos, que permite uma moagem mais fina. [31]

O material moído é sujeito a separação magnética para remoção do material ferroso e posteriormente encaminhado por tela transportadora para uma bateria de crivos. Os agregados reciclados obtidos na crivagem são armazenados em silos. [31]

Como resumo, apresenta-se na figura 1.5 um diagrama de todo o processo de reciclagem.

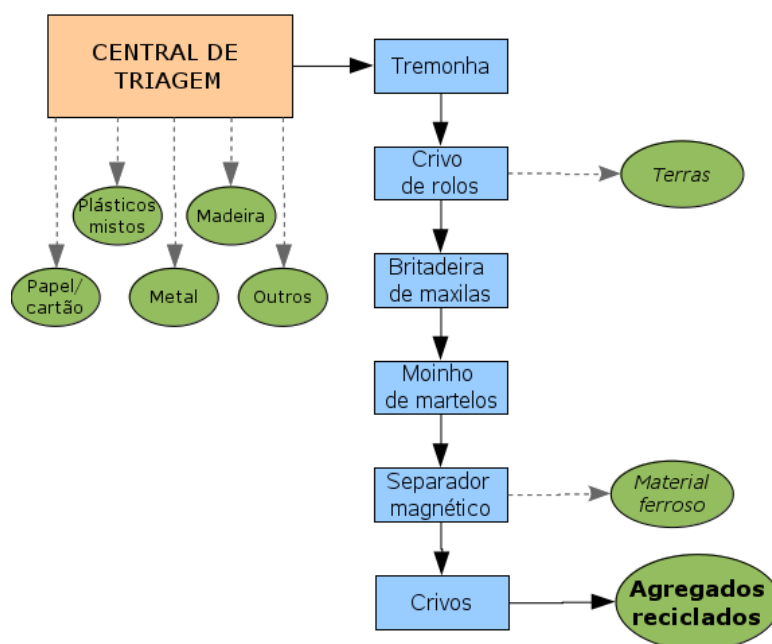


Figura 1.5 Diagrama geral do processo de triagem e reciclagem da TRIANOVO.

Não fugindo ao panorama nacional, também esta empresa tem concorrência de pedreiras que na mesma zona produzem agregados naturais a preços competitivos. [31]

2. CASO DE ESTUDO: PROJECTO REAGIR - RECICLAGEM DE ENTULHO NO ÂMBITO DA GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS

2.1. ENQUADRAMENTO DO PROJECTO

De modo a fazer face a toda a problemática da gestão e valorização de RCD existente em Portugal, a Câmara Municipal de Montemor-O-Novo criou um projecto, denominado Projecto REAGIR – Reciclagem de Entulho no Âmbito da Gestão Integrada de Resíduos.

No concelho de Montemor-O-Novo havia uma proliferação muito acentuada de depósitos ilegais de RCD, o que originava problemas de saúde pública, degradação da paisagem, contaminação ambiental e deterioração da imagem do sector da construção civil. [32]

Neste enquadramento, o projecto REAGIR teve os seguintes objectivos [33]:

- Objectivo geral: *“definir e implementar soluções de gestão inovadoras que promovam a recolha selectiva, a reciclagem e a valorização dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) produzidos na área do concelho, respondendo a um conjunto de problemas que estavam na origem dos depósitos ilegais.”*
- Objectivos específicos:
 - *“Dotar a área do concelho de soluções adequadas para a recolha selectiva de RCD”;*
 - *“Implementar e demonstrar a viabilidade de reciclagem/valorização destes resíduos”;*
 - *“Definir e implementar instrumentos normativos que regulamentem a gestão dos RCD no município, apoiados por acções de fiscalização”;*
 - *“Sensibilizar os produtores destes RCD e as restantes entidades envolvidas na sua gestão para a necessidade de garantir um destino adequado para os mesmos”;*
 - *“Contribuir para reduzir os depósitos ilegais de RCD, bem como para reduzir o seu depósito em aterro”.*

De modo a concretizar estes objectivos, a Câmara Municipal de Montemor-o-Novo candidatou-se, em 2002, ao Programa de Financiamento Europeu “LIFE-Ambiente”, que permitiu cobrir

quase metade do investimento necessário para o projecto. Como parceiros, a Câmara Municipal contou com a colaboração da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Alentejo (CCDR/A), do Instituto dos Resíduos – actual Agência Portuguesa do Ambiente (APA), do Instituto Superior Técnico (IST) e da empresa RTS - Pré-fabricados de Betão, Lda, localizada em Montemor-o-Novo.

O Projecto REAGIR teve a duração de cerca de 3 anos e meio, decorrendo desde Dezembro de 2003 até Julho de 2007, englobando diversas tarefas, relacionadas quer com a gestão, quer com a valorização dos RCD e posterior aplicação dos agregados reciclados, garantido assim um envolvimento em todas as fases do ciclo de vida destes resíduos.[34]

2.2. GESTÃO DE RCD

No âmbito da gestão dos RCD gerados no concelho de Montemor-o-Novo, foi implementado um serviço municipal de recolha/recepção selectiva da fracção inerte dos RCD, numa altura em que apenas existia uma entidade devidamente autorizada para tal em todo o distrito de Évora. Deste modo, garantiu-se a existência de uma alternativa adequada à deposição ilegal de RCD. [35]

O sistema de recolha desenvolveu-se em várias fases, desde a síntese da informação disponível, até à aquisição dos meios necessários para o efeito, tais como camião de recolha, contentores metálicos e *big bags*. Os RCD incluídos no âmbito do Projecto correspondem apenas às fracções inertes, ou seja, os resíduos classificados no Capítulo 17 – Subcapítulo 17 01 da LER:

- 17 01 01 – *Betão*
- 17 01 02 – *Tijolo*
- 17 01 03 – *Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos*
- 17 01 07 – *Misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos não abrangidas em 17 01 06.*

Os restantes resíduos devem ser separados na origem, cabendo ao produtor a responsabilidade pelo seu encaminhamento para destino adequado.

Este sistema restringiu-se apenas à zona do concelho de Montemor-o-Novo e operou de forma gratuita durante toda a duração do Projecto. Ao nível do país, em virtude de abranger tanto os pequenos como os grandes produtores, revelou-se inovador. Das obras registadas, 61% aderiram

ao sistema. [35]

Uma vez que os resultados obtidos foram considerados positivos pela Câmara Municipal, esta decidiu manter o sistema de recolha após o período do Projecto, a título gratuito, sendo de considerar, no futuro, a aplicação de taxas de modo a suportar os custos. [35]

2.3. VALORIZAÇÃO DE RCD

A Unidade Piloto de Reciclagem de Entulho (UPRE) foi construída de raiz na Zona Industrial de Montemor-o-Novo, com o objectivo de *“Testar, à escala real, um processo inovador de reciclagem da fracção inerte dos Resíduos de Construção e Demolição (restos de betão, alvenaria, tijolos e telhas), promovendo a valorização futura destes resíduos.”* [36]

O processo de valorização dos RCD, baseado em operações de reciclagem mecânica, teve início em Abril de 2006 e pode distribuir-se por três fases fundamentais:

1. **Recepção:** Nesta fase, os RCD recebidos são sujeitos a inspecção visual e à classificação de acordo com uma de 3 categorias: (1) “Cinzentos”, que engloba os resíduos compostos maioritariamente por betão, (2) “Vermelhos”, que incluem os resíduos compostos por material cerâmico, telhas, tijolos, e misturas (3) “Pedras”, para os resíduos compostos por mármore e granitos. O veículo é pesado (peso bruto) e é dada indicação do local onde deve ser efectuada a descarga, de acordo com a classificação atribuída (figura 2.1). Após a descarga, é feita uma pré-triagem manual para remoção do material não inerte (contaminantes) e fragmentação, com martelo pneumático, dos blocos de dimensões superiores ao máximo admissível pelo equipamento de reciclagem.
2. **Processo de reciclagem:** Nesta fase procede-se à britagem do material inerte, com separação magnética dos metais ferrosos (que são armazenados à parte) e posterior crivagem e transporte do material fragmentado, de modo a obter agregados reciclados com várias classes granulométricas (figuras 2.2 e 2.3). Relativamente às categorias definidas aquando a recepção dos RCD, os “Cinzentos” e as “Pedras” são britados em simultâneo, enquanto que os “Vermelhos” são britados à parte.
3. **Armazenamento:** Os agregados reciclados são armazenados em parque de acordo com as granulometrias obtidas (figura 2.4).



(a)



(b)

Figura 2.1 Deposição de RCD: a) Vermelhos - Tijolos e telhas e b) Cinzentos – Betão.



(a)



(b)

Figura 2.2 Equipamento de reciclagem: a) Britagem e b) Separação magnética.



(a)



(b)

Figura 2.3 Equipamento de reciclagem: a) Crivagem e b) Transporte.

A Unidade funcionou durante os primeiros 16 meses a título demonstrativo, ao longo dos quais foram recebidas 3977 toneladas de RCD, o que correspondeu a uma média de 249 toneladas por mês e a uma captação de 160 kg/habitante/ano. Destes, mais de metade correspondem a mistura

de materiais, seguindo-se o betão, com 29% do material recolhido. [32]



Figura 2.4 Armazenamento de agregados reciclados.

Foram produzidas 3690 toneladas de agregados reciclados. Durante este período realizou-se igualmente a monitorização de todo o processo, o que permitiu obter dados sobre a quantidade e qualidade dos RCD recebidos, contaminantes presentes nos RCD, eficiência de produção de agregados, custos de operação e problemas de funcionamento e propostas de solução.

Os equipamentos instalados na UPRE foram escolhidos tendo em consideração o carácter piloto do projecto, isto é, são de menor capacidade do que se tratasse de uma instalação industrial, garantindo, ao mesmo tempo, que a capacidade instalada seria suficiente para processar os RCD gerados e que as condições de funcionamento dariam origem a agregados reciclados em quantidade suficiente para proceder a ensaios práticos.

No equipamento de fragmentação - moinho de martelos, de marca Rubble Master® - Compact Recycler, RM 60 LPB600 – procede-se à redução das dimensões dos RCD admitidos na UPRE.

Devido às dimensões da boca, o material de alimentação não deve apresentar dimensões superiores a 500mm. O moinho é composto tem capacidade de 50t/h e é composto por 3 martelos inseridos num rotor. O produto de fragmentação apresenta forma mais ou menos cúbica com dimensões de até cerca de 50mm. O alvo/placa de impacto define a abertura da goela, podendo ser regulada entre 30 e 100mm, sendo recomendada a utilização da abertura mínima. O equipamento é dotado de uma correia de alimentação com 800mm de largura, que conduz o material desde a tremonha de alimentação até ao interior do moinho de martelos. A jusante da fragmentação, o equipamento está igualmente dotado de uma correia de escoamento, com 650mm de largura. [37]

Este moinho está indicado para a britagem de pedra de construção civil, asfalto, tijolos e cimento, sendo igualmente permitida a entrada de aço, com um diâmetro de até 8mm, desde que embutido no material (o equipamento não deve ser alimentado com arames ou peças sólidas de metal). Os finos devem ser separados, usando por exemplo uma pá gradeada, para melhorar a capacidade de britamento e reduzir o desgaste do equipamento. [37]

O separador magnético está acoplado ao moinho de martelos, encontrando-se suspenso sobre a correia de escoamento. Este equipamento consiste num magneto permanente que permite a remoção do aço contido no betão. A distância entre o magneto e a correia de escoamento do material fragmentado pode ser regulada por uma bomba hidráulica, podendo variar entre 21 e 31cm.

O equipamento de classificação granulométrica permite a calibração do material fragmentado não magnético. Os crivos instalados – grades e grelhas – são de dois tipos de abertura. Os crivos – grades - de 31, 22 e 12mm apresentam malha quadrada, enquanto que os crivos de 8 e 4mm – grelhas - apresentam malha rectangular.

2.4. AGREGADOS RECICLADOS

O processo de crivagem permite a obtenção de agregados reciclados calibrados, que são classificados de acordo com o tipo de RCD que lhes deram origem e com as respectivas dimensões – classe granulométrica.

Os agregados reciclados mistos “vermelhos” provêm da britagem de resíduos de construção e demolição de obras particulares, que são constituídos maioritariamente por restos de alvenaria (tijolos, tijoleiras), algum cimento e betão (figura 2.5 a)). Em geral, apresenta uma coloração avermelhada (figura 2.5 b))

Por outro lado, os agregados reciclados “cinzentos” provêm da britagem de resíduos cerâmicos e de betão (figura 2.6 a)). Estes resíduos podem ter origem nos rejeitos da empresa RTS ou provir de obras particulares. Os agregados produzidos uma coloração acinzentada (figura 2.6 b)).

De acordo com o equipamento de crivagem instalado, obtêm-se agregados reciclados calibrados, das classes granulométricas 0/4mm (areia), 4/8mm (bago de arroz), 8/12mm (brita 1), 12/22mm (brita 2), 22/31mm (brita 3), +31mm (brita 4) e 0/31 mm (*tout-venant* - aglomerado de

granulometria extensa).



Figura 2.5 a) RCD “vermelhos” e b) Agregados reciclados “vermelhos”.



Figura 2.6 a) RCD “cinzentos” e b) Agregados reciclados “cinzentos”.

Os agregados reciclados, principalmente as classes 0/4mm, 0/31mm e +31mm, têm estado a ser usados no arranjo de caminhos rurais sujeitos a alagamento. Esta aplicação garante o escoamento dos agregados reciclados, uma vez que a sua utilização é frequente e consome uma grande quantidade de material. A fracção 0/4mm pode igualmente ser utilizada pela Câmara Municipal no enchimento de valas, bem como no assentamento de calçadas e passeios.

A fracção 8/12mm dos agregados reciclados “cinzentos” foi utilizada pela RTS na produção de betão não estrutural.

3. PARTE EXPERIMENTAL

A Unidade Piloto de Reciclagem de RCD de Montemor-O-Novo tem um diagrama de tratamento, que, basicamente, envolve as operações unitárias de britagem, separação magnética e crivagem. O trabalho prático realizado incidiu sobre todas as etapas e equipamentos utilizados, sempre no sentido de melhorar o controlo do processo e a qualidade dos agregados reciclados produzidos, distribuindo-se pelas diversas etapas de processamento conforme se indica na figura 3.1.

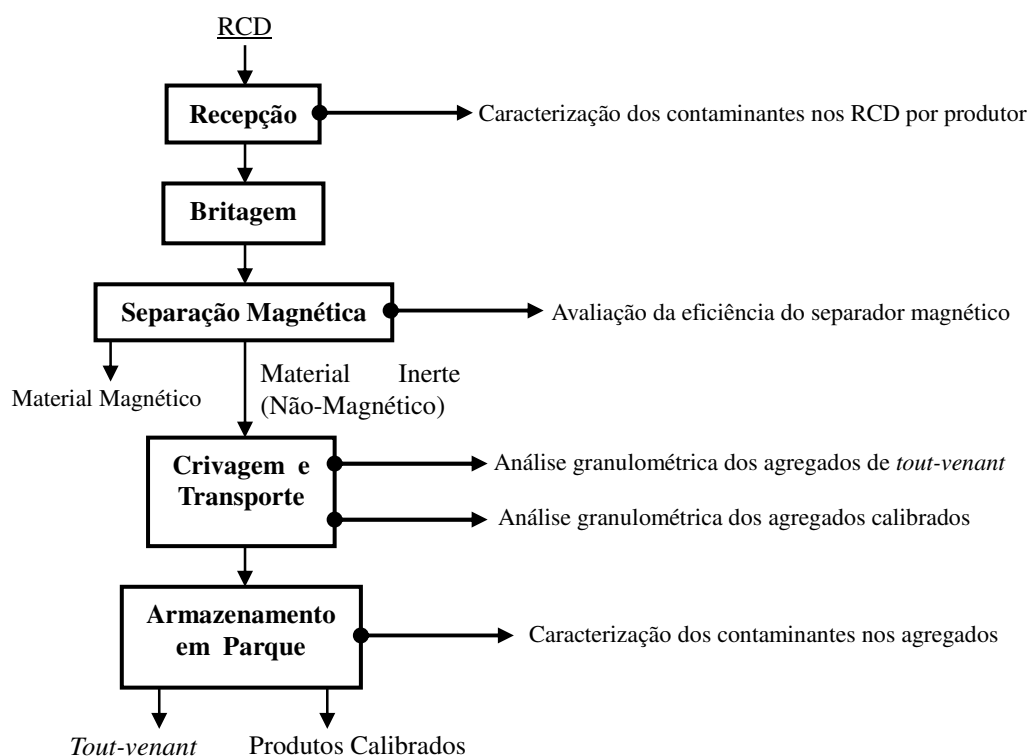


Figura 3.1 Fluxograma da UPRE, indicando o trabalho experimental associado a cada etapa.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES PRESENTES NOS RCD

O material não inerte presente nos RCD e, conseqüentemente, presente nos agregados reciclados produzidos compromete a sua aplicabilidade, uma vez que reduz as suas propriedades técnicas, e, caso estejam envolvidos materiais considerados perigosos, estarão também em causa riscos ambientais [20]. A fim de obviar este problema foi efectuada uma campanha de sensibilização junto dos produtores de RCD do concelho de Montemor-o-Novo, com vista a reduzir a montante da UPRE esses contaminantes. Apesar dessa campanha, foram identificados, por inspecção

visual, contaminantes nos RCD admitidos. Assim, com o objectivo de verificar o nível de cumprimento dessas directrizes de sensibilização, procedeu-se a uma campanha de caracterização dos contaminantes presentes nos RCD admitidos, na perspectiva da sua valorização. Pretendeu-se igualmente obter dados qualitativos e quantitativos dos RCD gerados no concelho de Montemor-o-Novo que pudessem servir de referência para trabalhos e estudos futuros.

Tendo em consideração as condicionantes no terreno e a necessidade de garantir a representatividade das amostras, adoptou-se o procedimento apresentado na figura 3.2.

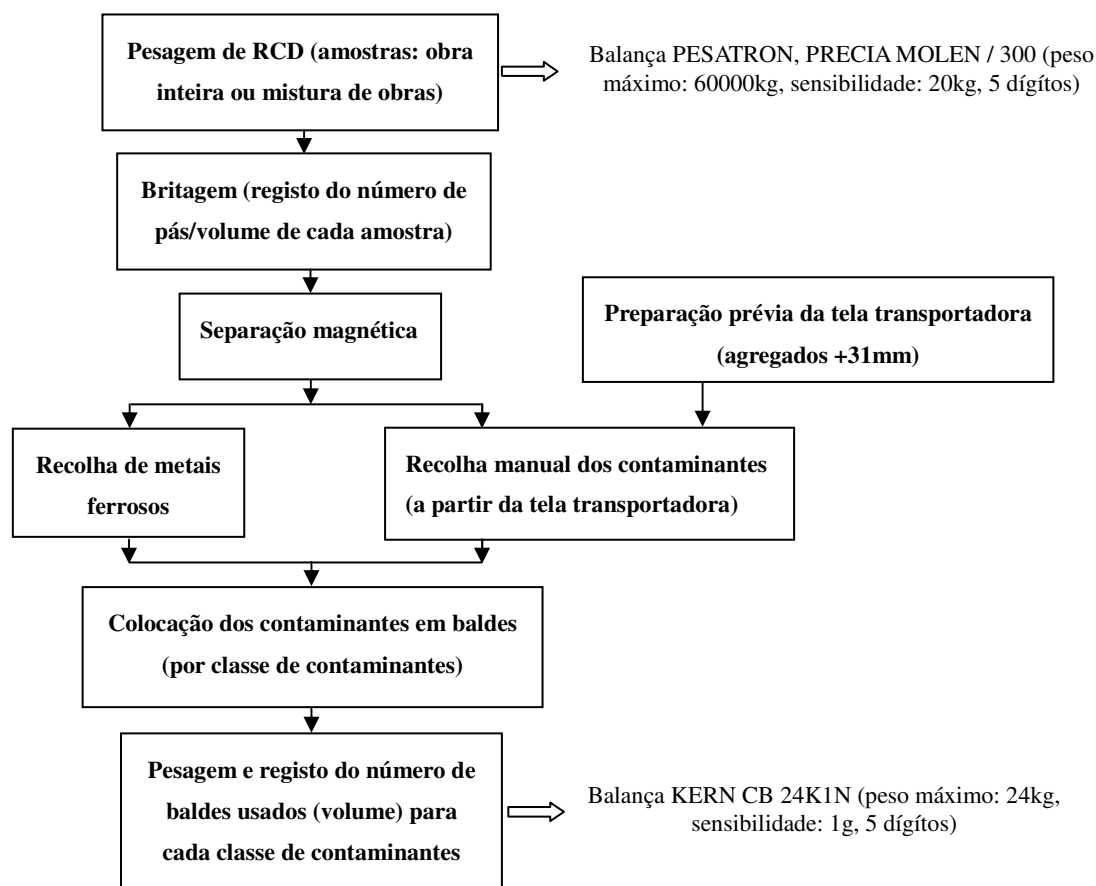


Figura 3.2 Diagrama simplificado do procedimento para determinação dos contaminantes da matéria-prima.

Após as pesagens, construiu-se uma tabela com o peso e o volume de cada contaminante e de cada obra/amostra, o que permitiu determinar a percentagem dos contaminantes em peso e em volume.

Nas figuras 3.3 e 3.4 são apresentadas etapas deste procedimento.



Figura 3.3 a) Crivo de 31mm em funcionamento e b) Recolha manual dos contaminantes.



Figura 3.4 a) Preparação para recolha dos metais e b) Colocação dos contaminantes recolhidos em baldes.

3.2. DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SEPARADOR MAGNÉTICO

Na Unidade de Reciclagem o material, após fragmentação, é sujeito a uma separação magnética, para remoção de metal ferroso. O separador magnético encontra-se por cima da tela transportadora, a uma distância variável. Em condições normais de operação, a distância entre o separador magnético e a tela transportadora mantêm-se constante e regulada para a menor distância possível (21cm). Pequenos incrementos na distância entre o separador magnético e o fluxo de material que passa na tela transportadora podem provocar variações significativas no desempenho da operação de separação magnética.

Com base nestes pressupostos, pretendeu-se identificar a distância entre o separador magnético e a tela transportadora que permitisse obter a mais elevada eficiência de separação de metais ferrosos.

A fim de simular as condições normais de funcionamento da UPRE, nos ensaios para determinação da eficiência da separação magnética usaram-se agregados reciclados da classe granulométrica +31mm, visto que estes são os agregados reciclados que apresentam dimensões mais próximas dos RCD.

Tendo em conta as condicionantes e os meios disponíveis no terreno, adoptou-se o procedimento apresentado na figura 3.5.

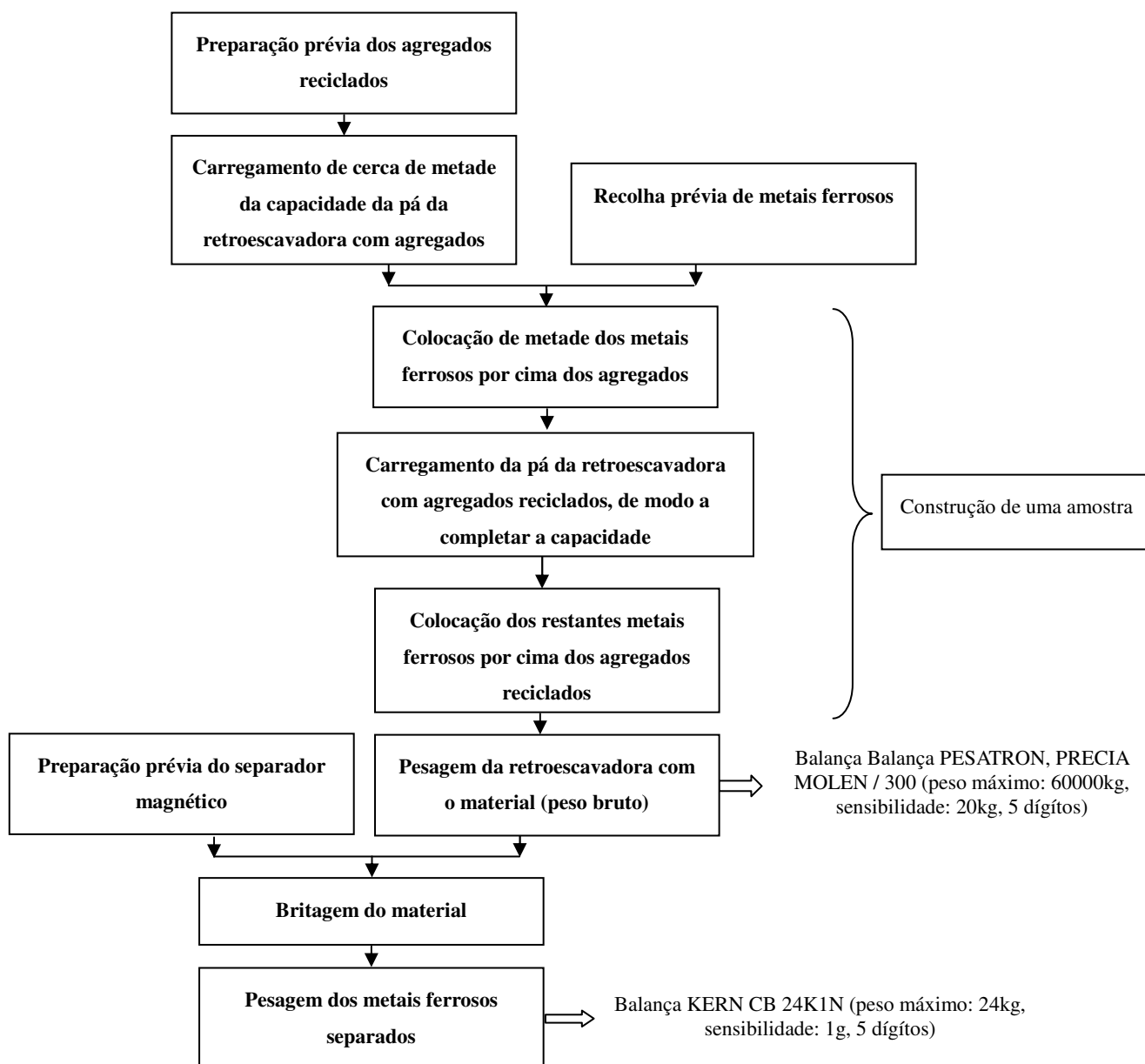


Figura 3.5 Diagrama simplificado para determinação da eficiência de remoção de metais ferrosos.

A preparação prévia dos agregados reciclados consistiu na inspeção visual para remoção dos metais ferrosos, a fim de não se encontrem contaminados antes da fragmentação.

Os metais ferrosos utilizados correspondem a uma quantidade de cerca de 10kg de metais que já tinham sido removidos anteriormente durante a operação normal da Unidade. Foram escolhidos metais de relativamente pequenas dimensões e uniformes.

A preparação prévia do separador magnético consistiu na regulação da distância entre o separador magnético e a tela transportadora para cada uma das distâncias definidas, e na colocação de um *big bag* para receber os metais ferrosos separados.

Tendo em consideração que a distância entre o separador e a tela transportadora varia entre a distância mínima de 21cm e a distância máxima de 31cm, foram definidas seis distâncias: 21cm, 23cm, 25cm, 27cm, 29cm e 31cm. Para cada uma das distâncias definidas, utilizaram-se 4 amostras de material, repetindo-se para cada uma o procedimento descrito.

Nas figuras 3.6 a 3.9 são apresentadas algumas imagens do procedimento.



Figura 3.6 Agregados reciclados utilizados nos ensaios, +31mm: a) “cinzentos” e b) “vermelhos”.



(a)

(b)

Figura 3.7 Metais ferrosos utilizados nos ensaios: a) Metais recolhidos e b) Pesagem de metais.



(a)

(b)

Figura 3.8 Construção de uma amostra: a) Colocação dos metais sobre os agregados, e b) Amostra completa.



(a)

(b)

Figura 3.9 Preparação do equipamento: a) Ajuste da distância entre a tela e o separador e b) Colocação do big bag para recolher os metais separados.

3.3. ESTUDO DOS AGREGADOS RECICLADOS

3.3.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO *TOUT-VENANT*

Segundo o manual de instruções do moinho de martelos, a abertura da goela (distância entre a placa de impacto e os martelos) mínima recomendada é de 30 mm. A abertura da goela do moinho influencia as dimensões dos agregados reciclados que são produzidos, pelo que, ao fazê-la variar, obtêm-se agregados com diferentes distribuições granulométricas. Uma vez que a experiência de aplicação dos agregados reciclados produzidos pela UPRE demonstrou que o *tout-venant* (agregado reciclado com dimensões de 0 a 31 mm) é o mais utilizado, efectuaram-se ensaios de fragmentação de RCD com produção deste material, utilizando a abertura da goela do

moinho de martelos de 30mm.

Para este estudo, optou-se por utilizar betão proveniente da RTS (classificado na UPRE como “cinzentos”), uma vez que este material se apresenta menos contaminado e com composição mais homogénea, o que permite à partida obter *tout-venant* de melhor qualidade. É igualmente necessário e importante para a UPRE conhecer as características deste produto a fim de definir as suas aplicações futuras. O *tout-venant* produzido com “vermelhos”, ao contrário do produzido com “cinzentos”, está já a ser utilizado na reabilitação de caminhos agrícolas.

Tendo como referência as recomendações do Caderno de Encargos “Adições para Misturas com Ligantes Hidráulicos – Pavimentação: Características dos Materiais” [38], efectuou-se a análise granulométrica do material, de acordo com a Norma Portuguesa NP EN 933-1 2000, relativa a Ensaio das Propriedades Geométricas dos Agregados – Parte 1: Método da Peneiração [39]. Esta Norma aplica-se a agregados com densidade entre 2000 e 3000kg/m³. A densidade dos agregados “cinzentos” foi determinada por picnometria de hélio, picnómetro *AccuPyc 1330 v3.03*. A partir dos resultados fez-se o respectivo tratamento estatístico com nível de confiança de 95%, obtendo-se o valor de 2512,4 ± 41,3 kg/m³. Uma vez que este valor está dentro do intervalo requerido, a massa a recolher, para a classe granulométrica 0/31mm, é de 9,5kg por amostra, ou seja, cerca de 50kg para 4 amostras.

O procedimento adoptado envolveu trabalho de campo e trabalho de laboratório. O trabalho de campo foi realizado segundo o diagrama apresentado na figura 3.10.

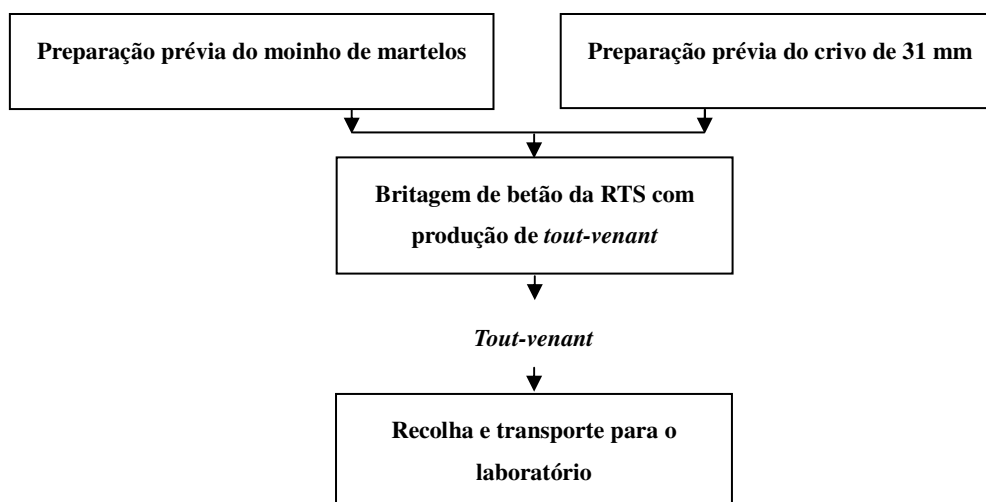


Figura 3.10 Diagrama simplificado do procedimento para produção e recolha de *tout-venant*.

A preparação prévia do moinho de martelos consistiu no ajuste da distância entre a placa de impacto e os martelos para 30mm.

Para a produção do *tout-venant* apenas se permitiu, como é normal neste tipo de agregados reciclados, a passagem do material fragmentado pelo crivo de 31mm, impedindo-se a passagem dos materiais fragmentado para os restantes crivos.

Na figura 3.11 são apresentadas algumas imagens do procedimento.



Figura 3.11 a) Interior do moinho de martelos: a) Placa de impacto e martelos e b) Betão da RTS.

O trabalho de laboratório foi efectuado de acordo com o diagrama apresentado na figura 3.12.

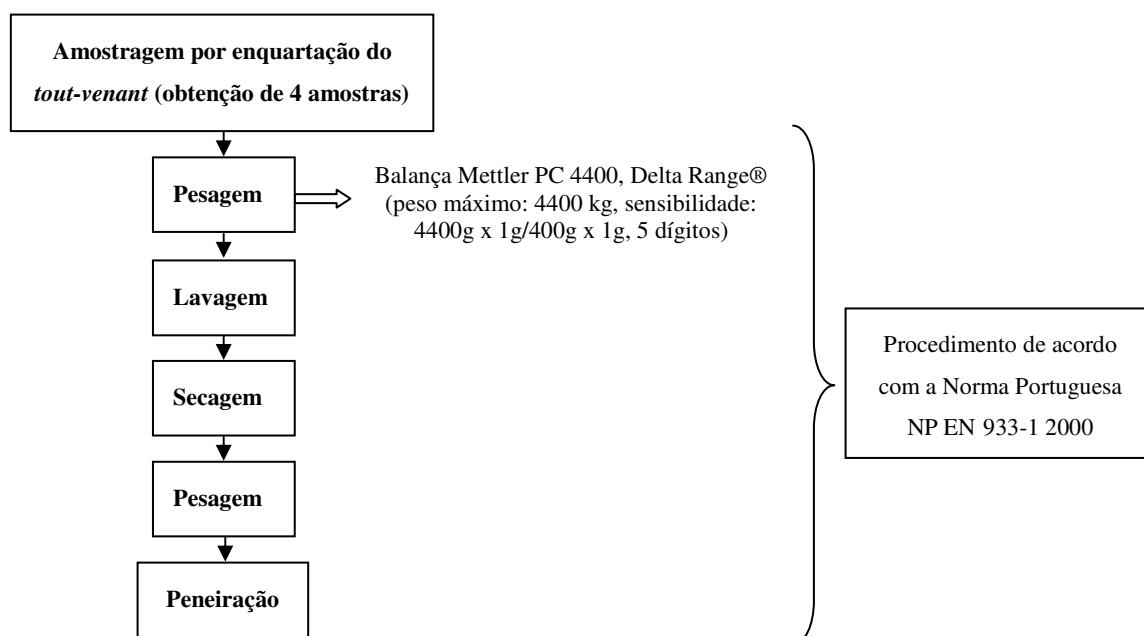


Figura 3.12 Diagrama simplificado do procedimento para análise granulométrica do *tout-venant*.

A secagem das amostras foi efectuada na estufa a 110°C, durante pelo menos 24h. Para a lavagem, uma vez que o crivo de 63µm não estava disponível, foi utilizado um crivo de 75µm. Neste processo utilizou-se um agitador de peneiros de marca *Retsch AS200*, a operar por via húmida, nas seguintes condições:

- Duração da peneiração, para cada amostra: 1min
- Amplitude da peneiração: 0,50mm
- Série de peneiros: 0,075mm; 1,18mm; 3,35mm; 6,7mm; 13,20mm e 26,5mm.

Na peneiração utilizou-se a série de peneiros indicada no Capítulo 14 do Volume V do Caderno de Encargos “Adições para Misturas com Ligantes Hidráulicos – Pavimentação: Características dos Materiais” [38]. Quando não disponíveis em laboratório, foram utilizados outros peneiros de granulometria aproximada. Neste processo utilizou-se o referido agitador de peneiros de marca *Retsch AS200*, a operar por via seca, com tempo e amplitude de peneiração de 10min e 1,00mm, respectivamente, e série de peneiros adequada à classe granulométrica do agregado.

3.3.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS CALIBRADOS

Após as operações de fragmentação e separação magnética, os crivos instalados na UPRE permitem a classificação granulométrica dos agregados reciclados produzidos, obtendo-se produtos calibrados. Para a produção de agregados reciclados dentro das classes granulométricas 0/4, 4/8 e 8/12mm são utilizados crivos de barras, a que corresponde uma malha rectangular, menos precisa do que se fossem crivos de malha quadrada [12]. Com base neste pressuposto, com a análise granulométrica dos agregados calibrados pretende-se conhecer a percentagem de material que se obtém dentro da granulometria desejada com os crivos de barras.

As fracções utilizadas nestes ensaios, quer para os agregados “vermelhos”, quer “cinzentos” foram correspondentes às classes granulométricas 0/4, 4/8 e 8/12mm.

Para a análise granulométrica deste material, utilizou-se, como referido, o procedimento indicado na Norma Portuguesa NP EN 933-1 2000, relativa aos Ensaios das Propriedades Geométricas dos Agregados – Parte 1: Método da Peneiração [39]. Esta Norma aplica-se a agregados com densidade entre 2000 e 3000kg/m³. A densidade dos agregados foi determinada por picnometria de hélio, picnómetro *AccuPyc 1330 v3.03*, nas fracções em análise, cujos resultados se

apresentam nos quadros 3.1 e 3.2, para os agregados reciclados “vermelhos” e “cinzentos”, respectivamente.

Quadro 3.1 Resultados da picnometria de hélio e respectivo cálculo estatístico, para os agregados reciclados “vermelhos”

Fracção (mm)	Massa de cada amostra (g)	Média da densidade (kg/m ³) $\bar{x} = (\sum x_i) / n$	Desvio padrão $S = \sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2] / (n-1)}$	Coefficiente de variação (%) $C = [100 * 2S] / \bar{x}$	Intervalo de confiança IC = $\bar{x} \pm 2S$
0/4mm	6,9960	2518,7	11,1717	0,8871	2518,7 ± 22,3
	7,7640				
	6,9267				
	9,2810				
4/8mm	8,1876	2530,5	29,6973	2,3471	2530,5 ± 59,4
	8,0480				
	8,3450				
	8,2335				
8/12mm	7,2080	2528,0	2,7917	0,2209	2528,0 ± 5,6
	7,7093				
	7,5916				
	6,9888				

\bar{x} – média; x_i – eficiência da amostra i ($i=1,2,3,4$); n – número de amostras; S – Desvio padrão; C – Coeficiente de variação; IC – Intervalo de confiança.

Quadro 3.2 Resultados da picnometria de hélio e respectivo cálculo estatístico, para os agregados reciclados “cinzentos”.

Fracção (mm)	Massa de cada amostra (g)	Média da densidade (kg/m ³) $\bar{x} = (\sum x_i) / n$	Desvio padrão $S = \sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2] / (n-1)}$	Coefficiente de variação (%) $C = [100 * 2S] / \bar{x}$	Intervalo de confiança IC = $\bar{x} \pm 2S$
0/4mm	10,2006	2514,8	6,3522	0,5052	2514,8 ± 12,7
	9,5198				
	9,6663				
	10,2750				
4/8mm	8,7980	2531,7	16,1745	1,2777	2531,7 ± 32,3
	8,8950				
	8,9822				
	8,0990				
8/12mm	9,8845	2490,6	6,6247	0,5320	2490,6 ± 13,2
	9,3993				
	8,4881				
	9,7157				

\bar{x} – média; x_i – eficiência da amostra i ($i=1,2,3,4$); n – número de amostras; S – Desvio padrão; C – Coeficiente de variação; IC – Intervalo de confiança.

Por análise dos resultados, tanto os agregados “vermelhos” como os agregados “cinzentos” apresentam valores de densidade que se situam entre 2000 e 3000kg/m³, o que significa que a Norma Portuguesa referida é aplicável, pelo que a massa total a recolher é indicada no quadro 3.3.

Quadro 3.3 Massa de cada amostra e massa total a recolher de acordo com a NP EN 933-1 2000

Fracção (mm)	Massa de cada amostra (mínimo) (kg)	Massa total (para 4 amostras +1) (kg)
0/4mm	0,2	1,0
4/8mm	0,6	3,0
8/12mm	1,6	8,0

O procedimento adoptado envolveu novamente trabalho de campo e trabalho de laboratório. No trabalho de campo o material para cada uma das fracções foi recolhido por pazada aleatória. Procedeu-se à amostragem por enquadramento de cada uma até obter a quantidade total de material necessária para as quatro amostras a testar laboratorialmente.

O trabalho de laboratório incluiu as etapas apresentadas na figura 3.13.

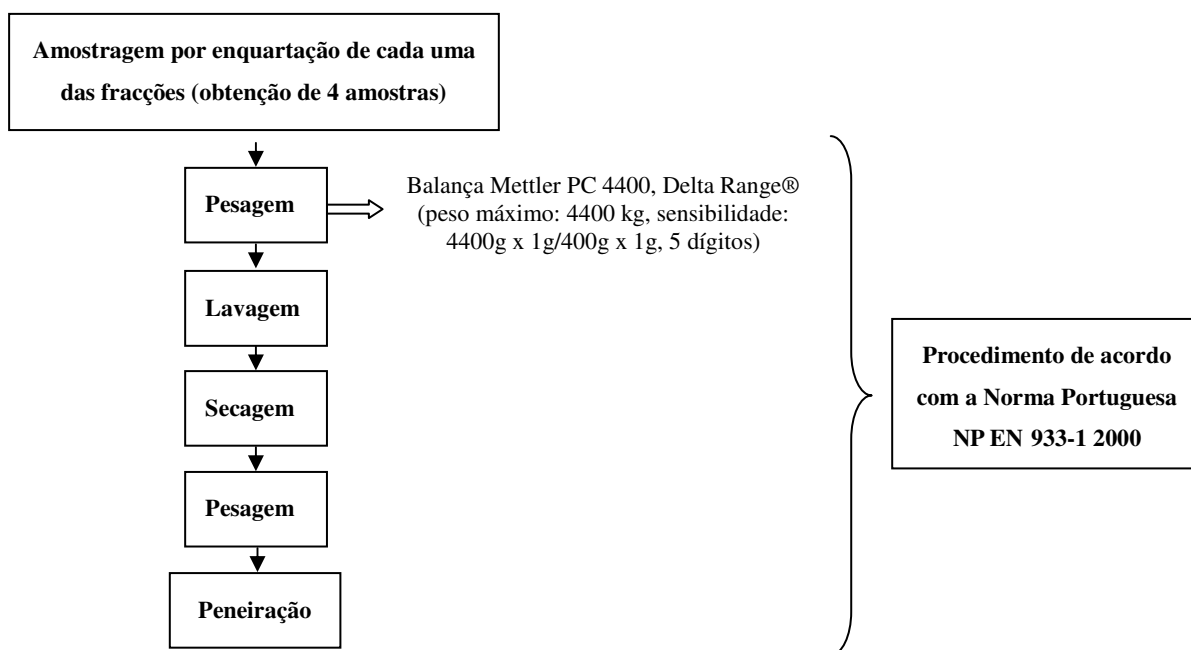


Figura 3.13 Diagrama simplificado do procedimento para análise granulométrica das várias fracções.

A secagem das amostras foi efectuada na estufa a 110°C, durante pelo menos 24h. Para a lavagem foi igualmente utilizado um crivo de 75µm. Neste processo utilizou-se um agitador de peneiros

de marca *Retsch AS200*, a operar por via húmida, nas condições indicadas no quadro 3.4.

Quadro 3.4 Condições de lavagem para os agregados reciclados em análise

Fracção	Duração da peneiração, para cada amostra (min)	Amplitude da peneiração (mm)	Série de peneiros
0/4mm	3	1,00	0,075 mm 1,18 mm
4/8mm	3	1,00	0,075 mm 1,18 mm 3,35 mm
8/12mm	3	1,00	0,075 mm 1,18 mm 3,35 mm 6,7 mm

Para a peneiração utilizou-se de novo agitador de peneiros de marca *Retsch AS200*, a operar por via seca, com tempo e amplitude de peneiração de 10min e 0,50mm, respectivamente, e com uma série de peneiros adequada às dimensões dos agregados em causa.

3.3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES EM AGREGADOS RECICLADOS

Tal como já foi referido, os materiais não inertes que se encontrem presentes nos agregados reciclados comprometem a sua aplicabilidade. Para além da caracterização da matéria-prima (RCD), também se procedeu à caracterização dos contaminantes presentes nas fracções de agregados reciclados “vermelhos” e “cinzentos” das classes granulométricas 0/4, 4/8, 8/12 e 0/31mm. As 3 primeiras fracções foram escolhidas devido à sua facilidade de manuseamento em laboratório, enquanto que a selecção do *tout-venant* deveu-se à experiência de aplicação dos agregados reciclados ter demonstrado que este é o produto mais utilizado e ser considerada a sua caracterização uma mais-valia.

A massa de agregado utilizada na caracterização dos contaminantes de cada classe granulométrica produzida na UPRE respeitou a massa indicada Norma Portuguesa NP EN 933-1 2000, relativa a Ensaio das Propriedades Geométricas dos Agregados – Parte 1: Método da Peneiração [39]. Apesar do objectivo desta norma não estar relacionado com a determinação de contaminantes, considerou-se que a massa das amostras estipulada pela norma também seria representativa para este fim. Assim, a massa requerida para cada uma das amostras esteve de acordo com o indicado no quadro 3.5.

O procedimento adoptado, tal como já se tornou costume neste trabalho inclui trabalho de

campo e trabalho de laboratório. No trabalho de campo a colheita de cada fracção foi efectuada por pazada aleatória, procedendo-se depois a amostragem por enquadramento para obter a quantidade de material necessária aos ensaios laboratoriais.

Quadro 3.5 Massa de cada amostra e massa total a recolher de acordo com a NP EN 933-1 2000

Fracção (mm)	Massa de cada amostra (mínimo) (kg)	Massa total (para 4 amostras +1) (kg)
0/4mm	0,2	1,0
4/8mm	0,6	3,0
8/12mm	1,6	8,0
0/31mm	9,5	47,7

Numa primeira fase, o trabalho de laboratório envolveu as etapas apresentadas na figura 3.14.

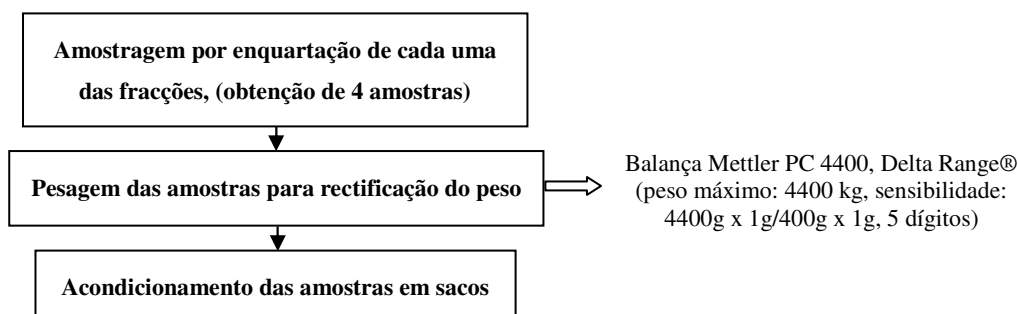


Figura 3.14 Diagrama simplificado de preparação das amostras para caracterização dos contaminantes.

Para criar o procedimento de separação dos contaminantes, por inspecção visual dos agregados recolhidos definiram-se numa primeira abordagem as seguintes classes de contaminantes material magnético, madeira (incluindo ervas, palha, folhas, etc.), plástico, papel (incluindo cartão), vidro, têxteis e outros.

A caracterização dos contaminantes vai basear-se nas propriedades e comportamentos de cada material:

- O uso dum bloco magnético permite separar o material magnético;
- A diferença de densidades torna possível a separação da madeira, plástico, papel e têxteis;
- Para o vidro, foi necessário efectuar inspecção visual, apesar de haver dificuldade em identificar este contaminante, principalmente nas fracções mais finas (0/4mm).

Baseado nestes pressupostos, adoptou-se o procedimento apresentado na figura 3.15.

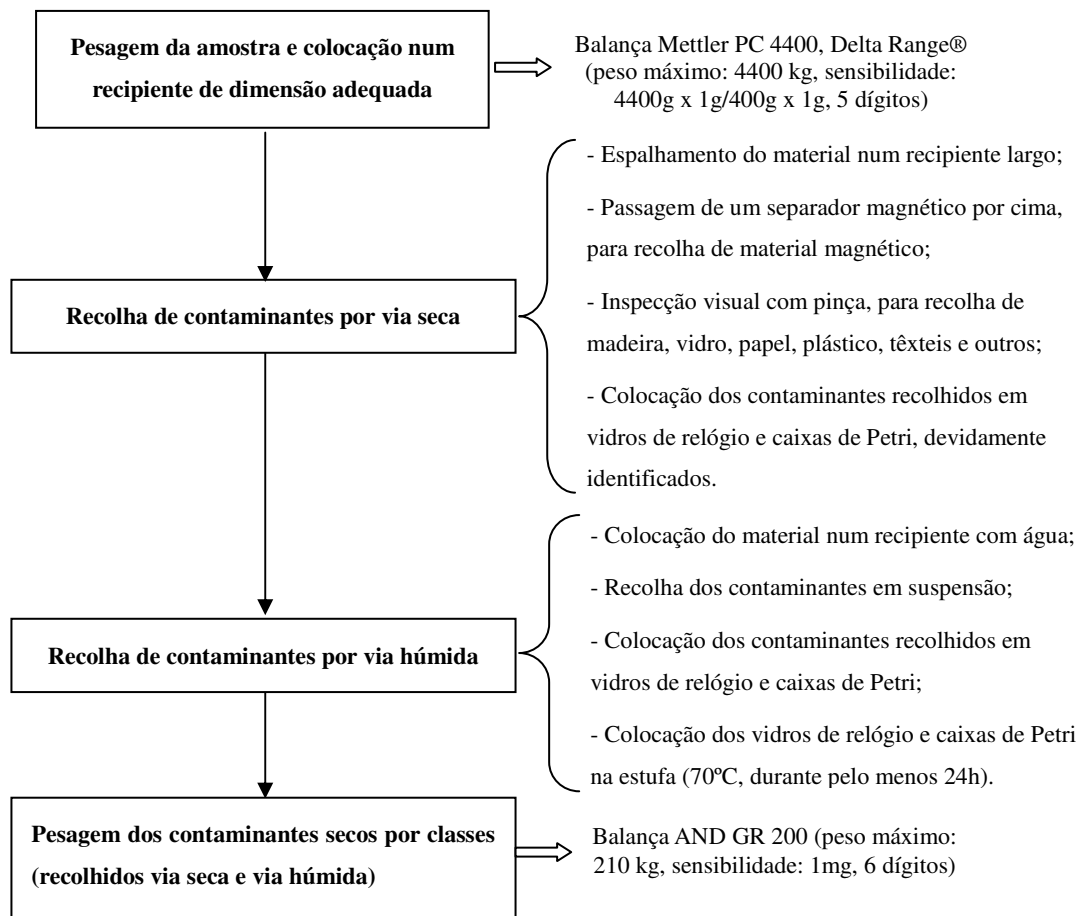


Figura 3.15 Diagrama simplificado do procedimento para determinação dos contaminantes das várias fracções.

Nas figuras 3.16 a 3.20 são apresentadas algumas fotografias de etapas deste procedimento.



(a)



(b)

Figura 3.16 Recolha por via seca nos agregados calibrados: a) Separação magnética e b) Inspeção visual.



(a)



(b)

Figura 3.17 Recolha por via húmida nos agregados calibrados: a) Vários contaminantes em suspensão e b) Transferência de contaminantes recolhidos por via húmida, após estufa.



(a)



(b)

Figura 3.18 Recolha de contaminantes no *tout-venant*: a) Recolha por via seca, b) Recolha dos contaminantes.



(a)



(b)

Figura 3.19 Recolha de contaminantes no *tout-venant*: a) Contaminantes e b) Material e contaminantes na estufa.

3.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES PRESENTES NOS RCD

A caracterização dos RCD decorreu de Janeiro a Maio de 2007, tendo sido abrangido um total de 13 amostras, cada uma correspondendo à totalidade ou a parte dos RCD gerados numa obra (10 obras no total).

O processo utilizado para determinar os contaminantes apresentou as seguintes vantagens e inconvenientes:

Vantagens:

- É garantida a representatividade da amostra, uma vez que se considera o lote por inteiro;
- Utilizam-se os equipamentos disponíveis, sem haver necessidade de adquirir outros (ex.: amostradores manuais ou mecânicos);
- O procedimento é facilmente reproduzível devido à simplicidade do equipamento utilizado.

Inconvenientes:

- Devido ao processo de fragmentação, alguns contaminantes (ex.: madeira, vidro), são reduzidos em tamanho, pelo que pequenas quantidades atravessam facilmente o crivo de 31 mm, não sendo recolhidos manualmente;
- A velocidade da tela transportadora, não tendo a velocidade adequada para a recolha manual, por vezes dificulta a recolha da totalidade dos contaminantes.

Considerou-se que estes inconvenientes são facilmente ultrapassados uma vez que a representatividade da amostra é bastante elevada.

No total, foram caracterizadas 10 obras de vários tipos, tal como apresentado no quadro 3.6.

Na figura 3.11 são apresentadas imagens dos RCD de uma das obras analisadas.

Os contaminantes encontrados foram agrupados em 4 classes diferentes, de acordo com as suas características e com a sua possível valorização. Por exemplo, apesar do papel ser reciclável, no fluxo dos RCD este encontra-se frequentemente sujo (quando não separado na origem), sendo por isso incluído na classe “indiferenciados”. Assim, foram consideradas as classes apresentadas no quadro 3.7.

Quadro 3.6 Obras utilizadas para caracterização dos RCD

Identificação da obra		Tipo de obra	Nº da(s) Amostra(s)
A	Obra particular	Conservação	1 ; 4
B	Obra particular	Conservação	2
C	Obra particular	Remodelação	3 ; 5
D	Obra particular	Conservação	6
E	Mistura de várias obras	Vários	7
F	Obra particular	Desconhecido	8
G	Obra particular	Ampliação e Demolição	9
H	Mistura de várias obras	Vários	10 ; 11
I	Mistura de várias obras	Vários	12
J	Betão da RTS	<i>Não aplicável</i>	13



(a)



(b)

Figura 3.20 Exemplo de uma das obras caracterizadas: a) Vista geral e b) Pormenor de alguns contaminantes.

Quadro 3.7 Classes de contaminantes consideradas na caracterização dos RCD

Classe	Exemplos
Madeira	Tábuas, contraplacado, tacos, troncos
Plásticos Mistos	Tubos, filme, restos de embalagens, fitas, rede de sombra, tomadas
Metais	Armações em aço, arames, cabos, ralos, fechaduras, torneiras, dobradiças, pregos
Indiferenciados	Papel e cartão sujos, têxteis, borrachas, esponjas, fios eléctricos, cortiça, esferovite, luvas, embalagens de resíduos perigosos (tintas, vernizes, colas)

Na figura 3.21 são apresentadas imagens das classes de contaminantes definidas para a caracterização dos RCD.

Os resultados das percentagens dos contaminantes e material inerte, em peso, são ilustrados no quadro 3.8.



Figura 3.21 Classes de contaminantes: a) Madeira, b) Plásticos Mistos, c) Metais e d) Indiferenciados.

Quadro 3.8 Percentagem em peso dos contaminantes (por classes e total por obra) e de inertes (total por obra)

Obras Identificação	Classes de contaminantes (% em peso)				Percentagem total de contaminantes por obra	Percentagem total de inertes por obra
	Madeira	Plásticos mistos	Metais	Indiferenciados		
A	0,0474	0,0095	0,0327	0,0082	0,0978	99,9022
B	0,0375	0,0073	0,0113	0,0147	0,0708	99,9292
C	0,0285	0,0091	0,0392	0,0028	0,0796	99,9204
D	0,1001	0,0210	0,0873	0,0253	0,2337	99,7663
E	0,0431	0,0099	0,0030	0,0164	0,0725	99,9275
F	0,0496	0,0118	0,1042	0,0084	0,1740	99,8260
G	0,0650	0,0088	0,0314	0,0153	0,1205	99,8795
H	0,0382	0,0063	0,0300	0,0161	0,0906	99,9094
I	0,0299	0,0026	0,0295	0,0291	0,0912	99,9088
J	0,0649	0,0060	0,1335	0,0070	0,2113	99,7887
Total por contaminante	0,0483	0,0087	0,0474	0,0159	0,1202	99,879

Com base nos resultados apresentados no quadro 3.8, construíram-se os gráficos ilustrados na figura 3.22.

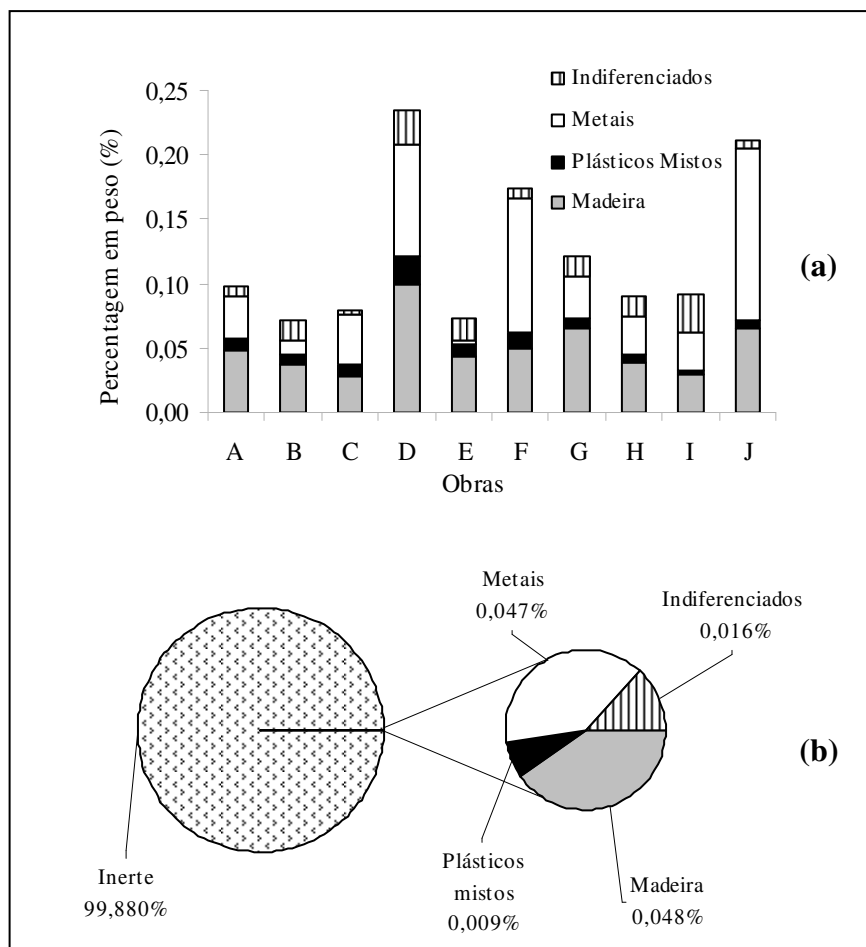


Figura 3.22 Percentagem em peso de contaminantes: a) Para cada obra; b) Em relação à percentagem em peso de material inerte (total para todas as obras).

Os resultados referentes às percentagens dos contaminantes e do material inerte, em volume, são apresentados no quadro 3.9. Com base neste quadro, construíram-se os gráficos apresentados na figura 3.23.

Os resultados apresentados indicam, numa primeira abordagem, que a percentagem total de contaminantes presentes nos RCD das obras sujeitas a caracterização, para o período em causa, é bastante baixa, sendo de apenas 0,1202% em peso e de 0,756% em volume.

Considerando as obras individualmente, a obra mais contaminada, em peso, é a obra identificada como D. Em volume, a obra mais contaminada é a G, seguindo-se a obra D.

A classe com maior percentagem, quer em peso, quer em volume, é a madeira, seguida da dos metais.

Quadro 3.9 Percentagem em volume dos contaminantes (por classes e total de obra) e percentagem em volume de inertes (total por obra)

Obras Identificação	Contaminantes (percentagem em volume)				Percentagem total de contaminantes por obra	Percentagem total de inertes por obra
	Madeira	Plásticos mistos	Metais	Indiferenciados		
A	0,1746	0,1487	0,0905	0,1377	0,5515	99,4485
B	0,1500	0,1500	0,0375	0,2250	0,5625	99,4375
C	0,2188	0,1750	0,1500	0,0356	0,5794	99,4206
D	0,8250	0,4375	0,3000	0,2500	1,8125	98,1875
E	0,3047	0,1348	0,0352	0,1172	0,5918	99,4082
F	0,1875	0,1250	0,6250	0,0938	1,0313	98,9688
G	0,6429	0,3214	0,3750	0,6429	1,9821	98,0179
H	0,1763	0,0750	0,1000	0,1250	0,4763	99,5238
I	0,1369	0,0399	0,1319	0,1198	0,4284	99,5716
J	0,3029	0,1333	0,6034	0,0121	1,0518	98,9482
Total por contaminante	0,2808	0,1505	0,1975	0,1275	0,7563	99,2437

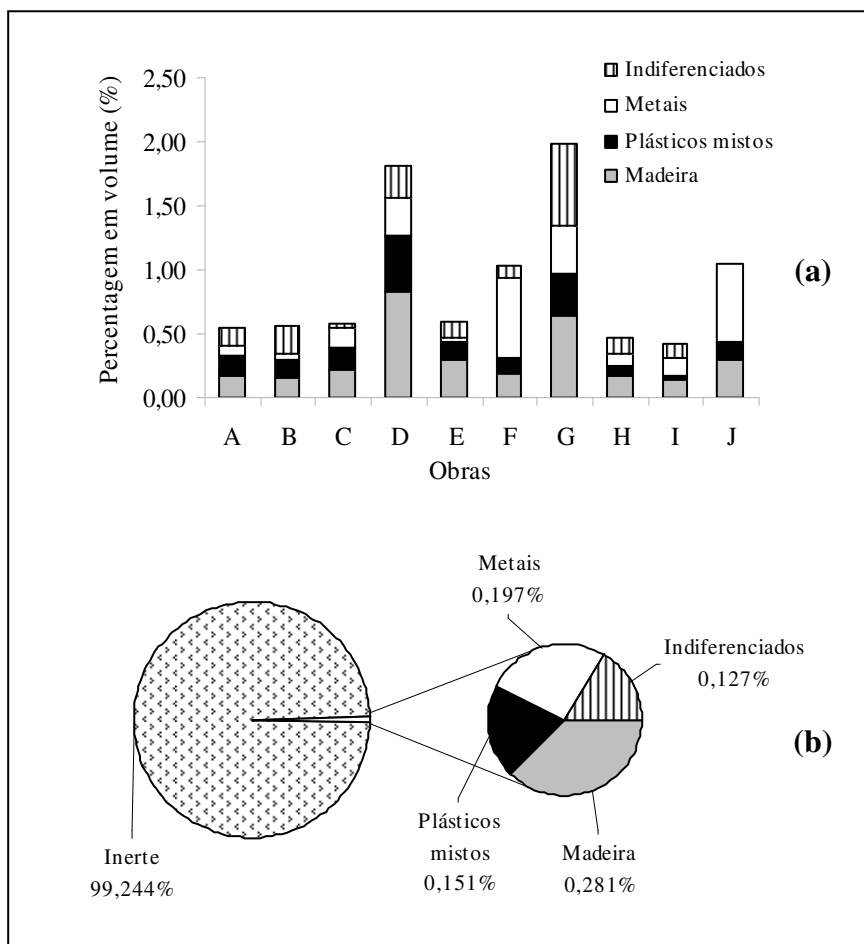


Figura 3.23 Percentagem em volume de contaminantes: a) Para cada obra e b) Em relação à percentagem em peso de material inerte (total para todas as obras).

3.4.2. DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SEPARADOR MAGNÉTICO

Os ensaios decorreram de Agosto a Dezembro de 2007, tendo-se efectuado todos os ensaios previstos inicialmente.

O procedimento adoptado tem as seguintes vantagens e inconvenientes:

Vantagens:

- Utilizam-se os equipamentos disponíveis, sem haver necessidade de adquirir outros;
- O procedimento é facilmente reproduzível devido à sua simplicidade.

Inconvenientes:

- Apesar da inspecção visual feita aos agregados reciclados, alguns metais ferrosos podem não ter sido removidos antes da preparação das amostras (particularmente problemático quando eram usados agregados reciclados “vermelhos”, mais contaminados do que os agregados reciclados “cinzentos”);
- O processo de preparação das amostras é moroso.

O peso dos metais adicionados e removidos, para cada distância entre o separador magnético e a tela transportadora, em cada uma das quatro replicações que foram realizadas são apresentados no quadro 3.10.

Quadro 3.10 Peso dos metais adicionados e removidos para cada distância entre o separador e a tela transportadora

Distâncias (cm)	Metais adicionados (kg)				Metais removidos (kg)			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
31	10,025	10,009	10,015	10,012	4,303	3,439	3,664	4,078
29	10,003	10,018	10,006	10,014	7,610	7,366	6,776	7,950
27	10,015	10,002	10,022	10,011	8,728	9,455	8,739	9,237
25	10,000	10,003	10,014	10,019	7,219	8,894	8,630	9,143
23	10,003	10,016	10,000	10,015	8,684	8,847	8,827	9,310
21	10,005	10,005	10,005	10,020	8,567	8,810	8,827	9,751

A partir dos dados do quadro anterior, determinou-se a eficiência de separação em metal para cada amostra, e o respectivo cálculo estatístico (média, o desvio padrão e o coeficiente de variação e o intervalo de confiança de 95%). Estes resultados são apresentados no quadro 3.11.

Quadro 3.11 Eficiência de separação de metais e respectivos cálculos estatísticos, para cada uma das distâncias

Distância entre o separador e a tela transportadora (cm)	Eficiência de remoção de metais (%)				Média (%) $\bar{x} = (\sum x_i) / n$	Desvio padrão $S = \sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2] / (n-1)}$	Coeficiente de variação (%) $C = [100 * 2S] / \bar{x}$	Intervalo de confiança (%) $\bar{x} \pm 2S$
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4				
31	42,923	34,359	36,585	40,731	38,650	3,884	20,100	38,650 ± 7,769
29	76,077	73,528	67,719	79,389	74,178	4,929	13,291	74,178 ± 9,859
27	87,149	94,531	87,198	92,269	90,287	3,711	8,222	90,287 ± 7,423
25	72,190	88,913	86,179	91,257	84,635	8,552	20,209	84,635 ± 17,102
23	86,814	88,329	88,270	92,961	89,093	2,672	5,997	89,093 ± 5,343
21	85,627	88,056	88,226	97,315	89,806	5,145	11,458	89,806 ± 10,290

\bar{x} – média; x_i – eficiência da amostra i ($i=1,2,3,4$); n – número de amostras; S – Desvio padrão; C – Coeficiente de variação.

A partir dos resultados do quadro 3.11, construiu-se o gráfico apresentado na figura 3.24.

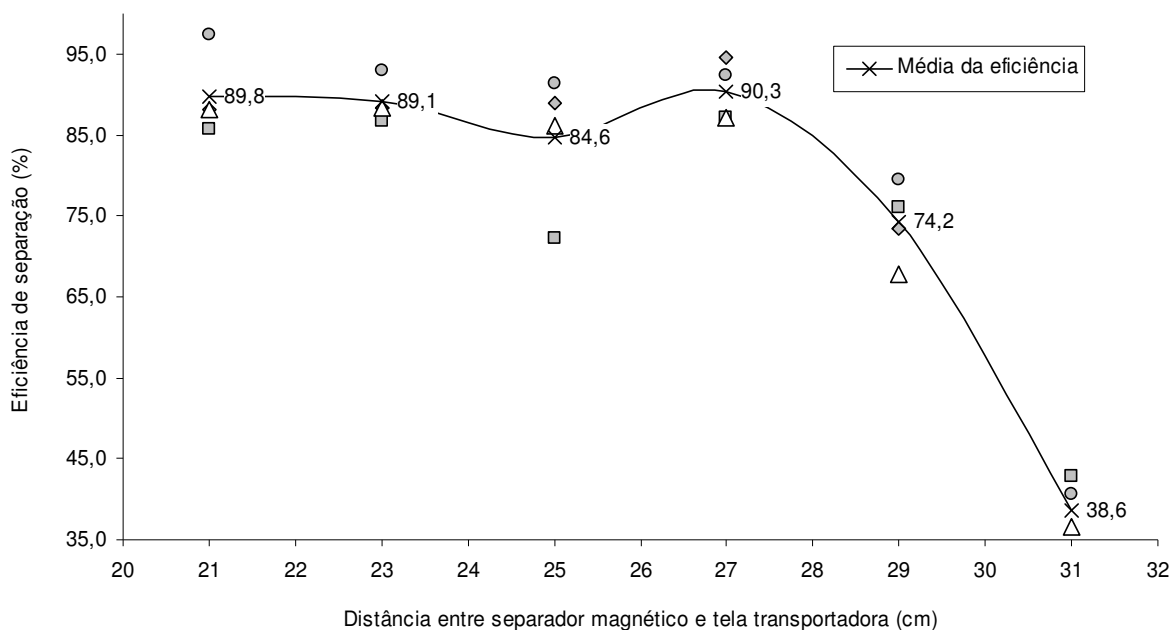


Figura 3.24 Eficiência de separação em função da distância entre o separador e a tela transportadora.

Por análise do gráfico produzido, nas distâncias de 21cm, 23cm, 25cm e 27cm não se nota um decréscimo significativo na eficiência de remoção, variando entre cerca de 85% e 90%. O decréscimo de eficiência só é notório para as distâncias de 29cm e 31cm, sendo de cerca de 74% e de 39%, respectivamente. Aos 31cm a eficiência já é bastante reduzida comparativamente às outras distâncias.

3.4.3. ESTUDO DOS AGREGADOS RECICLADOS

3.4.3.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO *TOUT-VENANT*

A análise granulométrica do *tout-venant* decorreu de Julho a Dezembro de 2008. Devido ao enorme volume de trabalho necessário para tal, apenas foi tratada uma amostra de agregados reciclados de *tout-venant* “cinzentos”.

Para validação dos resultados, a Norma Portuguesa exige que a perda de massa entre a amostra reconstituída após peneiração e a amostra inicial seja inferior ou igual a 1%. Por sua vez, a percentagem de finos é calculada através da fórmula:

A percentagem de finos, por sua vez, é calculada através da fórmula

$$f = \{ [(M_1 - M_2) + P] / M_1 \} * 100 \quad (3.1)$$

Onde:

M_1 Massa seca da amostra, em quilogramas.

M_2 Massa seca do material com granulometria superior a 75 μ m, em quilogramas.

P Massa do material peneirado retido no fundo, em quilogramas.

No quadro 3.12 são apresentados os resultados dos cálculos da percentagem de finos e da respectiva validação de resultados.

Quadro 3.12 Percentagem de finos e validação no *tout-venant*

Parâmetro	<i>Tout-venant</i>
M_1 (kg)	10,54
M_2 (kg)	10,48
P (kg)	0,05
f (%)	1,1
Perda de massa (%)	0,02

A diferença percentual entre a massa reconstituída e a massa inicial é de cerca 0,02%, o que permite validar os resultados obtidos.

O quadro 3.13 apresenta os resultados de análise granulométrica dos agregados reciclados de *tout-venant* e a figura 3.25 ilustra o respectivo histograma e curva cumulativa inferior.

Quadro 3.13 Resultados da análise granulométrica do tout-venant

Classe granulométrica (mm)	Abertura nominal (mm)	Massa		Percentagem cumulativa inferior
		(g)	(%)	
+37,5	37,5	0,0	0,0	100,0
-37,5 +26,5	26,5	512,9	4,9	95,1
-26,5 +13,20	13,20	4374,6	41,8	53,3
-13,20 +9,50	9,50	1616,2	15,4	37,9
-9,50 +4,75	4,75	1791,6	17,1	20,8
-4,75 +2,36	2,36	808,3	7,7	13,1
-2,36 +0,425	0,425	950,6	9,1	4,0
-0,425 +0,160	0,160	310,0	3,0	1,0
-0,160 +0,075	0,075	60,4	0,6	0,5
-0,075		49,07	0,47	

Segundo o histograma, a fracção com maior frequência é a classe granulométrica -26,5+13,20.

De acordo com o Capítulo 14 do Volume V do Caderno de Encargos referente aos “Adições para Misturas com Ligantes Hidráulicos Pavimentação – Características dos Materiais” [38], a composição granulométrica obtida por produção directa deverá respeitar um determinado fuso granulométrico. Como não se dispunha de todos os peneiros indicados na tabela, os valores em falta foram retirados da curva cumulativa inferior da figura 3.25.

Assim, os valores da percentagem acumulada do material que passa, percentagem cumulativa inferior, exigidos pelo Caderno de Encargos e os valores obtidos em laboratório para cada uma das aberturas das malhas de peneiros (calibre das partículas) são apresentados no quadro 3.14.

Quadro 3.14 Comparação dos valores de percentagem cumulativa inferior para o tout-venant analisado

Abertura das malhas de peneiros ASTM	Percentagem cumulativa inferior (%) (Caderno de Encargos)	Percentagem cumulativa inferior (%) (Tout-venant analisado)
37,5 mm	100	100,0
31,5 mm	75-100	97,5
19,0 mm	55-85	73,5
9,5 mm	40-70	37,9
6,3 mm	33-60	26,4
4,75 mm	27-53	20,8
2,00 mm	22-45	11,5
0,425 mm	11-28	4,0
0,180 mm	7-19	1,3
0,075 mm	2-10	0,5

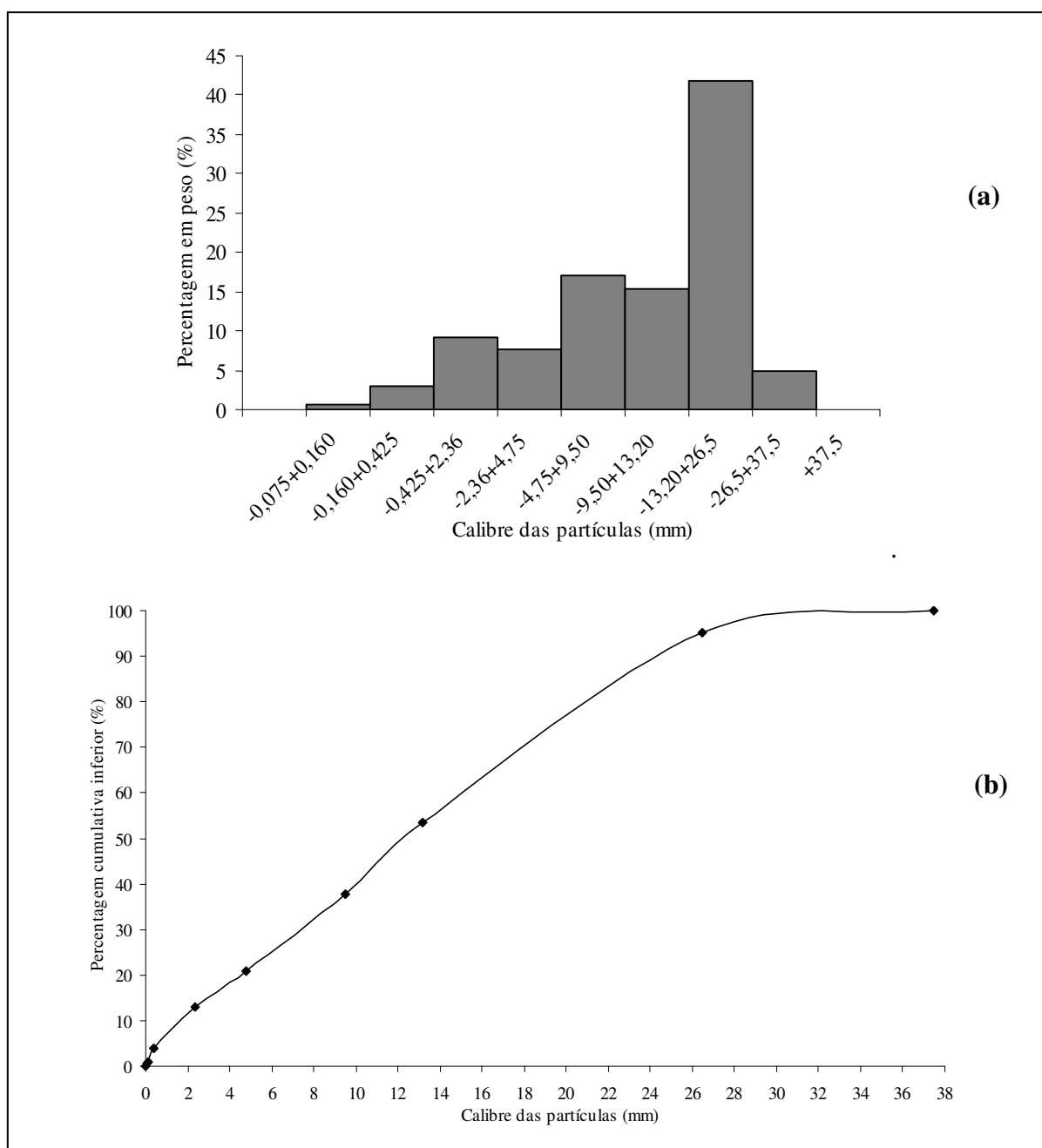


Figura 3.25 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados de *tout-venant* “cinzentos”.

De acordo com os resultados obtidos (quadro 3.14), os valores de percentagem acumulada para as aberturas de 37,5, 31,5 e 19,0mm encontram-se dentro do intervalo requerido pelo Caderno de Encargos para os materiais a ser aplicados como sub-base de estradas, o mesmo não acontecendo para as restantes aberturas. É nítido o défice de granulometria do material nos calibres abaixo de 19,0mm, acentuando-se ainda mais essa diferença nos calibres abaixo de 2,00mm.

3.4.3.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS CALIBRADOS

A análise granulométrica dos agregados calibrados em todas as fracções propostas inicialmente decorreu de Março de 2007 a Novembro de 2008.

Como referido, para validação dos resultados, a Norma Portuguesa exige que a perda de massa da amostra reconstituída após peneiração e a massa da amostra inicial seja inferior ou igual a 1%, e que a percentagem de finos seja calculada através da fórmula (3.1.).

No quadro 3.15 são apresentados os resultados dos cálculos da percentagem de finos, bem como de validação, para os agregados “vermelhos” e para os agregados “cinzentos”.

Quadro 3.15 Resultados dos cálculos da percentagem de finos e da validação dos resultados para os agregados reciclados calibrados “vermelhos” e “cinzentos”

Agregados reciclados calibrados	Parâmetro	“Vermelhos”				“Cinzentos”			
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
0/4	M ₁ (kg)	0,286	0,298	0,301	0,287	0,291	0,303	0,301	0,315
	M ₂ (kg)	0,254	0,265	0,267	0,256	0,275	0,288	0,284	0,299
	P (kg)	0,002	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,002
	f (%)	11,8	11,8	11,4	11,6	5,7	5,4	5,6	6,0
	Perda de massa (%)	0,6	0,5	0,2	0,8	0,9	0,7	0,9	0,4
4/8	M ₁ (kg)	0,660	0,679	0,678	0,660	0,698	0,708	0,728	0,671
	M ₂ (kg)	0,647	0,630	0,656	0,639	0,686	0,683	0,712	0,669
	P (kg)	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	f (%)	2,0	7,5	3,5	3,3	1,9	3,6	2,3	0,4
	Perda de massa (%)	0,3	0,4	0,5	0,6	0,2	0,3	0,4	0,4
8/12	M ₁ (kg)	1,726	1,715	1,777	1,779	2,230	2,120	2,082	1,910
	M ₂ (kg)	1,677	1,678	1,740	1,743	2,229	2,117	2,079	1,907
	P (kg)	0,005	0,003	0,005	0,005	0,002	0,001	0,002	0,001
	f (%)	3,1	2,3	2,4	2,4	0,2	0,2	0,2	0,2
	Perda de massa (%)	0,2	0,2	0,0	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1

Pela análise do quadro 3.15, todos os valores de perda de massa estão abaixo do limite imposto pela Norma Portuguesa (1%), pelo que os mesmos estão validados.

Os resultados da análise granulométrica dos agregados reciclados são apresentados nos quadros 3.16 e 3.17.

Quadro 3.16 Resultados da análise granulométrica para os agregados reciclados calibrados “vermelhos”

Agregados reciclados calibrados	Classe granulométrica (mm)	Abertura nominal (mm)	Massa		Porcentagem cumulativa inferior			
			(g)	(%)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
0/4	+4	4	7,7	3,0	96,4	97,1	97,1	97,3
	-4 +3,35	3,35	6,7	2,4	94,7	94,2	94,2	95,3
	-3,35 +1,7	1,7	48,3	18,6	77,6	75,6	75,6	75,5
	-1,7 +0,850	0,850	57,9	22,5	55,6	52,5	52,5	53,5
	-0,850 +0,425	0,425	64,4	24,8	30,6	27,7	27,7	29,2
	-0,425 +0,300	0,300	25,7	9,7	19,9	18,4	18,4	19,7
	-0,300 +0,150	0,150	30,9	12,1	8,0	6,3	6,3	7,4
	-0,150 +0,075	0,075	17,6	6,5	0,6	0,3	0,3	0,8
	-0,075 +0,063	0,063	0,8	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3
	-0,063		0,8	0,2				
4/8	+9,95	9,5	14,0	2,2	98,1	98,1	98,4	96,8
	-9,95 +6,7	6,7	168,0	25,9	71,0	74,2	72,0	70,7
	-6,7 +4,75	4,57	314,2	48,4	21,4	26,5	22,9	23,6
	-4,75 +4	4	85,4	13,2	9,3	11,5	10,2	10,7
	-4 +3,35	3,35	27,5	4,2	5,6	6,4	5,7	7,0
	-3,35 +1,18	1,18	13,9	2,2	3,4	3,9	3,8	5,1
	-1,18 +0,075	0,075	24,8	3,8	0,1	0,3	0,2	0,2
	-0,075 +0,063	0,063	0,8	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
	-0,063		0,5	0,1				
8/12	+13,20	13,2	2,12	0,12	99,69	100,00	100,00	99,81
	-13,20 +9,50	9,5	518,19	30,33	72,51	64,01	71,10	70,54
	-9,50 +6,7	6,7	1037,00	60,61	11,05	8,12	8,20	8,34
	-6,7 +3,35	3,35	52,68	3,09	7,18	5,12	5,39	5,68
	-3,35 +1,18	1,18	17,75	1,04	5,81	4,26	4,51	4,62
	-1,18 +0,075	0,08	77,65	4,55	0,29	0,16	0,27	0,30
	-0,075 +0,063	0,06	2,12	0,12	0,19	0,08	0,12	0,14
	-0,063		2,26	0,13				

Quadro 3.17 Resultados da análise granulométrica para os agregados reciclados calibrados “cinzentos”

Agregados reciclados calibrados	Classe granulométrica (mm)	Abertura nominal (mm)	Massa		Percentagem cumulativa inferior			
			(g)	(%)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
0/4	+4	4	6,4	2,2	97,9	98,2	97,5	97,5
	-4 +3,35	3,35	14,7	5,1	93,5	93,2	91,2	92,9
	-3,35 +1,7	1,7	72,1	25,1	70,1	66,2	65,8	68,7
	-1,7 +0,850	0,850	70,1	24,3	45,6	42,0	42,3	43,8
	-0,850 +0,425	0,425	72,5	25,1	19,4	17,4	17,9	18,4
	-0,425 +0,300	0,300	22,1	7,7	11,4	10,0	10,4	10,6
	-0,300 +0,150	0,150	19,7	6,8	4,0	3,7	3,3	4,1
	-0,150 +0,075	0,075	9,7	3,4	0,5	0,5	0,0	0,8
	-0,075 +0,063	0,063	0,5	0,2	0,2	0,3	0,0	0,6
	-0,063		0,8	0,3				
4/8	+9,95	9,5	3,8	0,6	99,1	99,4	99,8	99,6
	-9,95 +6,7	6,7	69,0	10,0	89,4	88,4	90,5	89,5
	-6,7 +4,75	4,57	209,8	30,4	62,8	55,7	59,4	58,3
	-4,75 +4	4	138,6	20,1	42,9	35,5	39,3	38,1
	-4 +3,35	3,35	55,0	8,0	35,2	28,0	30,8	30,1
	-3,35 +1,18	1,18	110,2	16,0	18,7	12,9	14,5	14,2
	-1,18 +0,075	0,075	102,9	14,9	0,1	0,2	0,1	0,1
	-0,075 +0,063	0,063	0,5	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
	-0,063		0,5	0,1				
8/12	+13,20	13,2	1,1	0,1	99,2	99,0	98,8	99,0
	-13,20 +9,50	9,5	0,6	0,0	49,3	44,2	41,6	60,0
	-9,50 +6,7	6,7	23,1	1,1	5,7	3,6	3,9	6,6
	-6,7 +3,35	3,35	22,3	1,1	2,9	1,4	1,6	3,2
	-3,35 +1,18	1,18	55,7	2,7	1,5	0,8	0,9	1,6
	-1,18 +0,075	0,08	910,3	43,8	0,1	0,1	0,1	0,1
	-0,075 +0,063	0,06	1053,6	50,2	0,1	0,0	0,1	0,1
	-0,063		20,8	1,0				

Os histogramas e curvas cumulativas inferiores construídos são representados graficamente nas Figuras 3.26 a 3.21. As curvas cumulativas inferiores foram construídas utilizando escala aritmética uma vez que apenas se pretende retirar do gráfico valores distanciados da origem. Não se considerou a hipótese de usar uma escala semi-logarítmica, visto que esta apenas permite a resolução dos valores perto da origem, o que não interessa nesta análise.

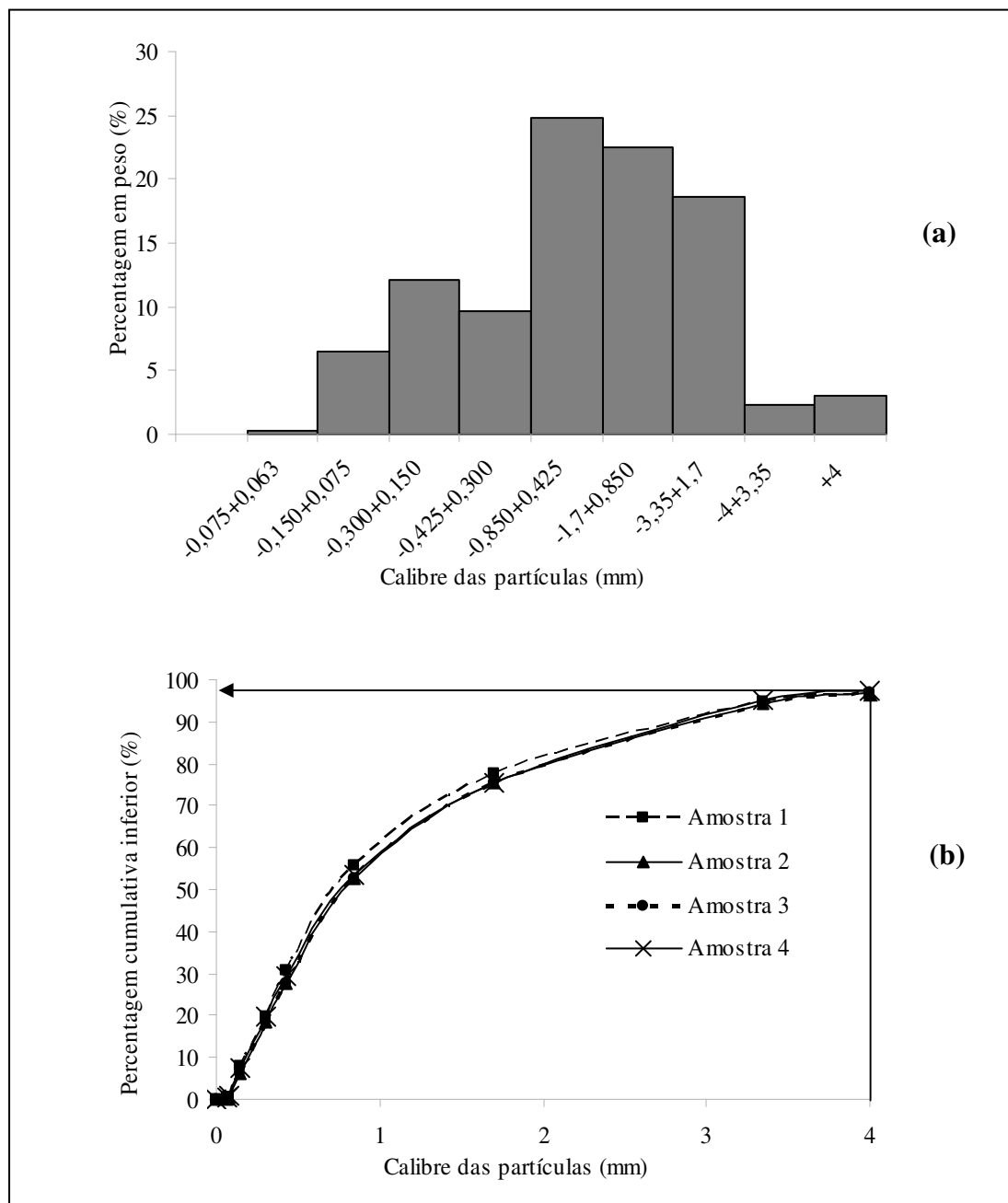


Figura 3.26 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “vermelhos” de classe granulométrica 0/4mm.

Segundo o histograma, a classe granulométrica com maior frequência é a classe $-0,850+0,425$.

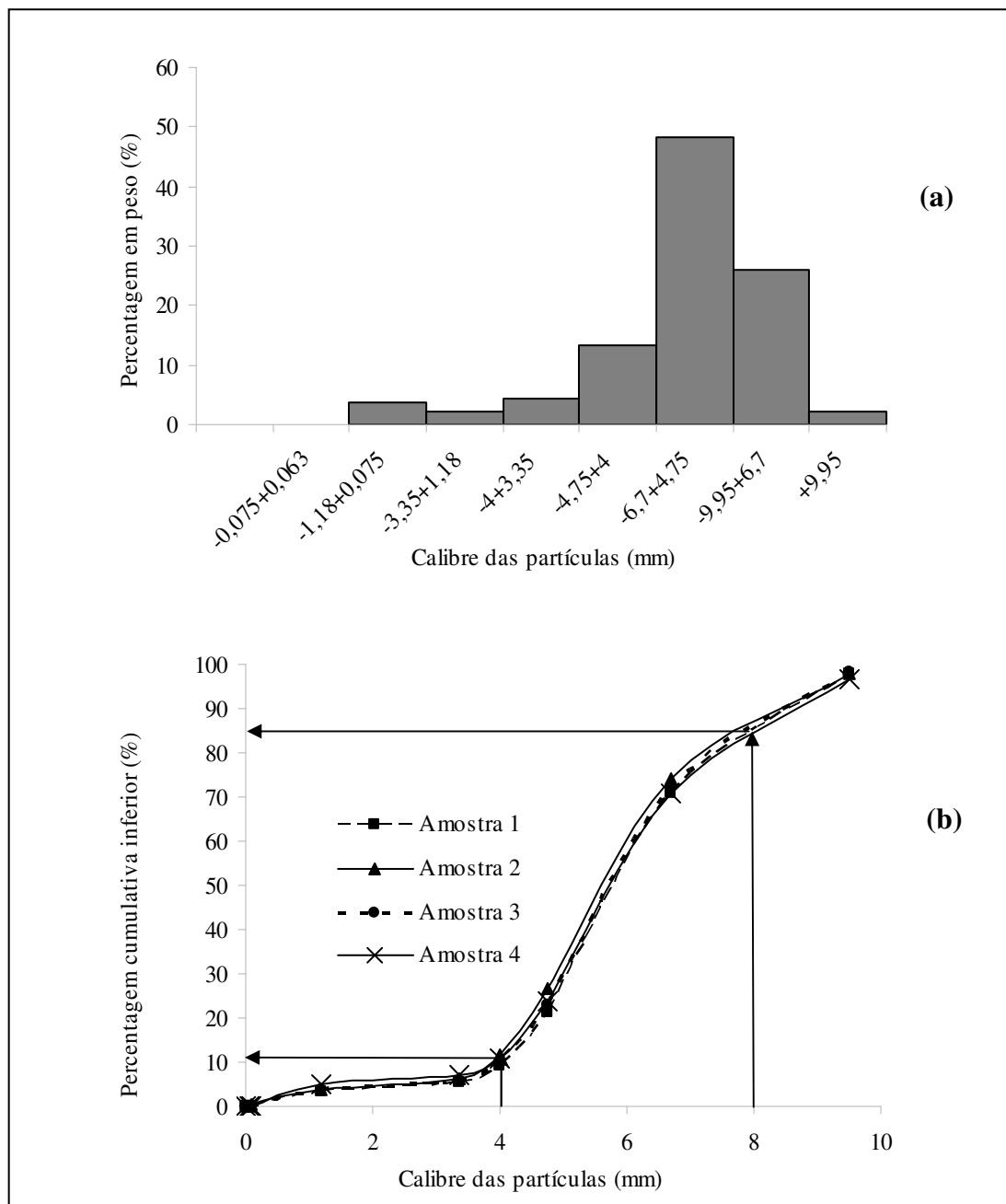


Figura 3.27 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “vermelhos” de classe granulométrica 4/8mm.

A classe granulométrica com maior frequência é a classe $-6,7+4,75$, segundo o histograma ilustrado.

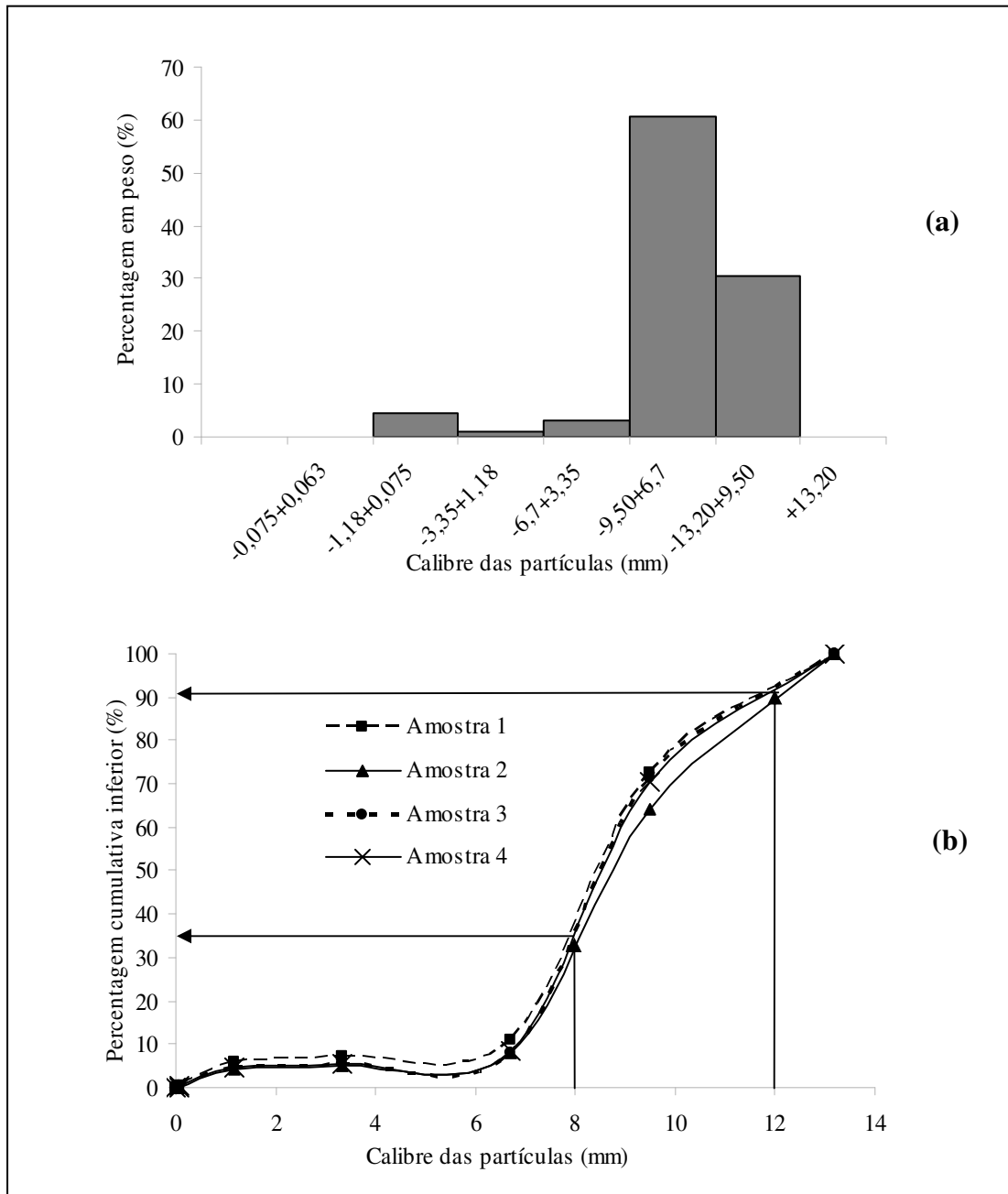


Figura 3.28 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “vermelhos” de classe granulométrica 8/12mm.

Segundo o histograma apresentado, a classe granulométrica com maior frequência é a classe - 9,50+6,7.

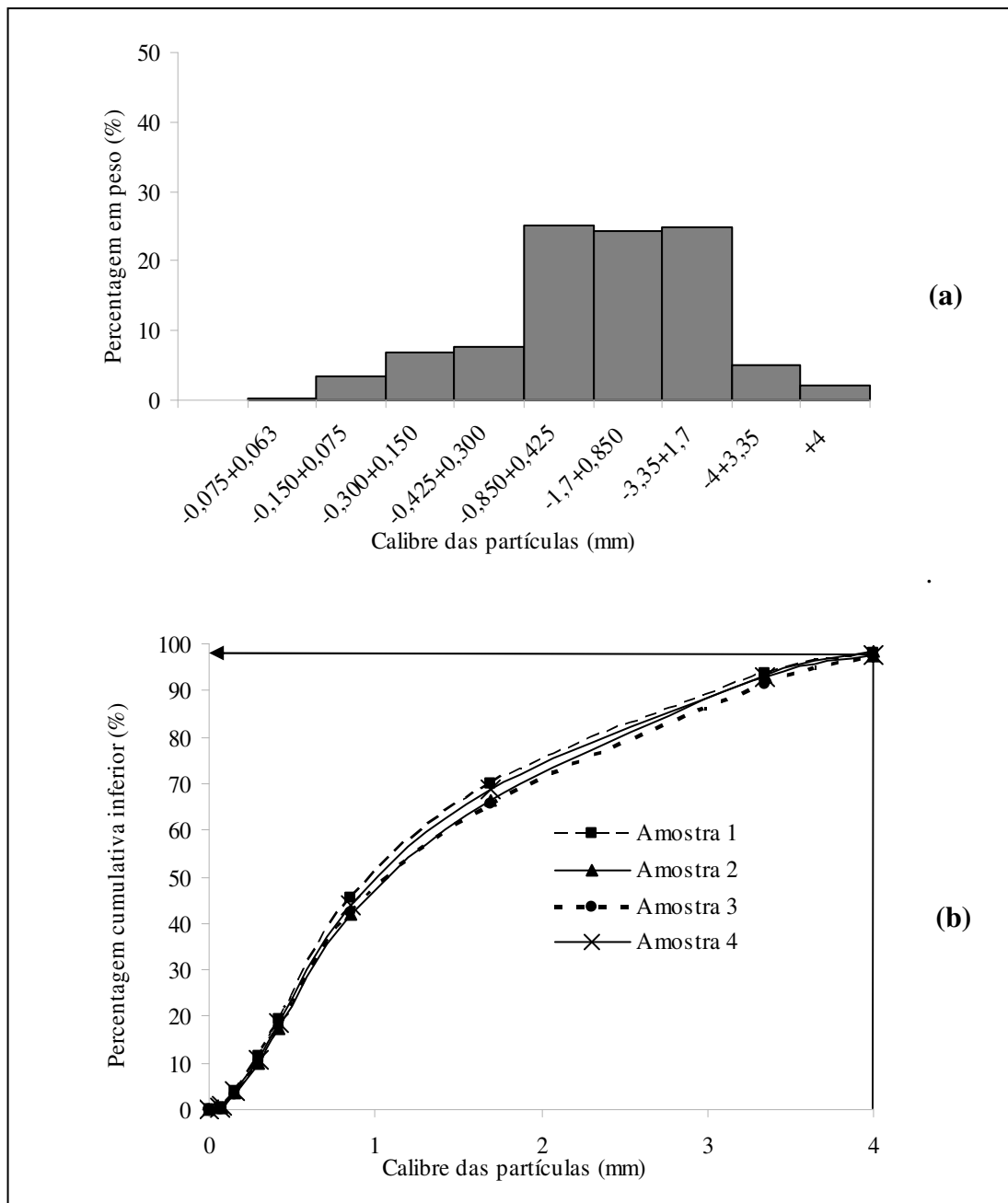


Figura 3.29 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “cinzentos” de classe granulométrica 0/4mm.

De acordo com o histograma, a classe granulométrica com maior frequência é a classe - 0,850+0,425.

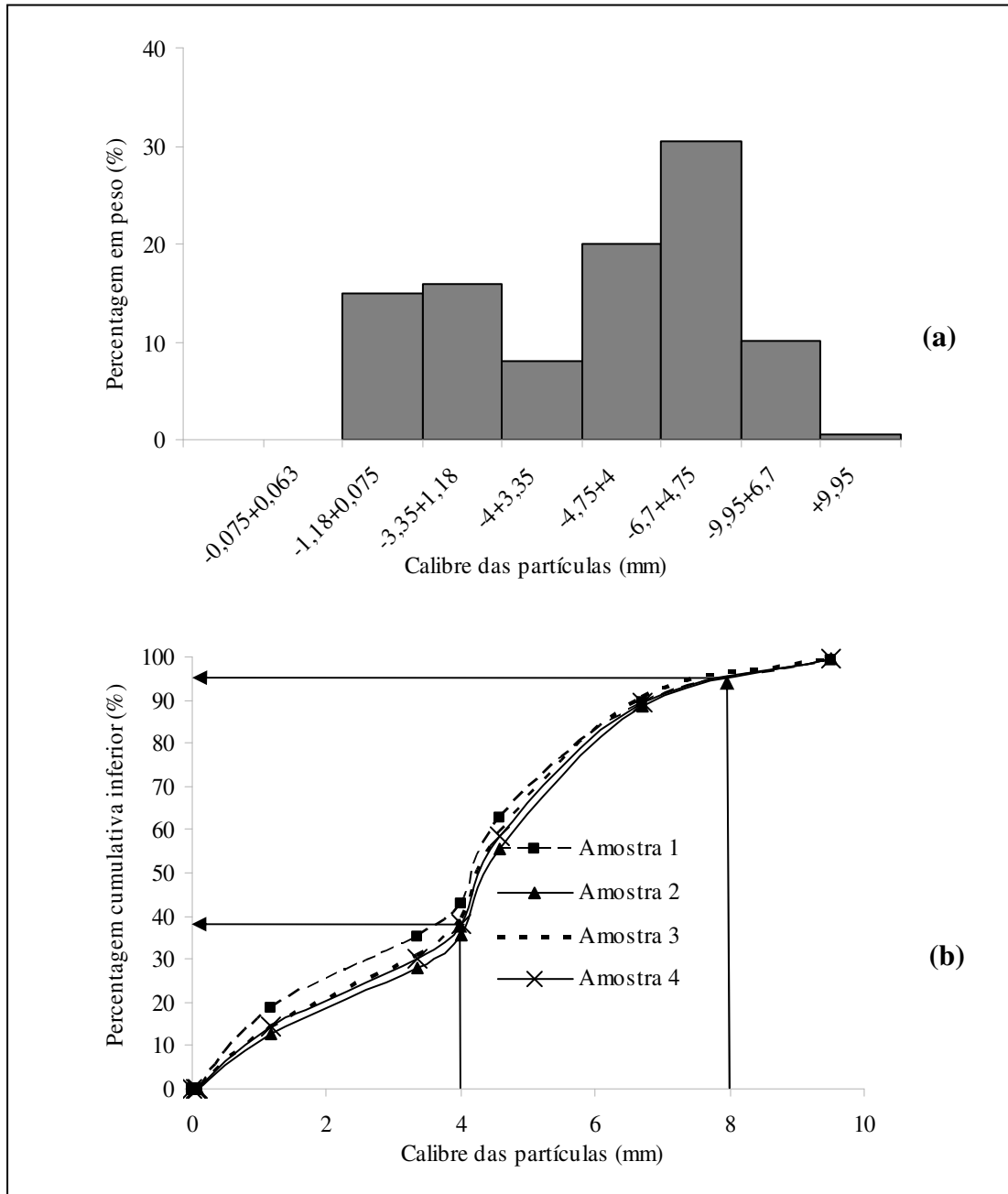


Figura 3.30 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “cinzentos” de classe granulométrica 4/8mm.

De acordo como histograma apresentado, a classe granulométrica com maior frequência é a classe -6,7+4,75.

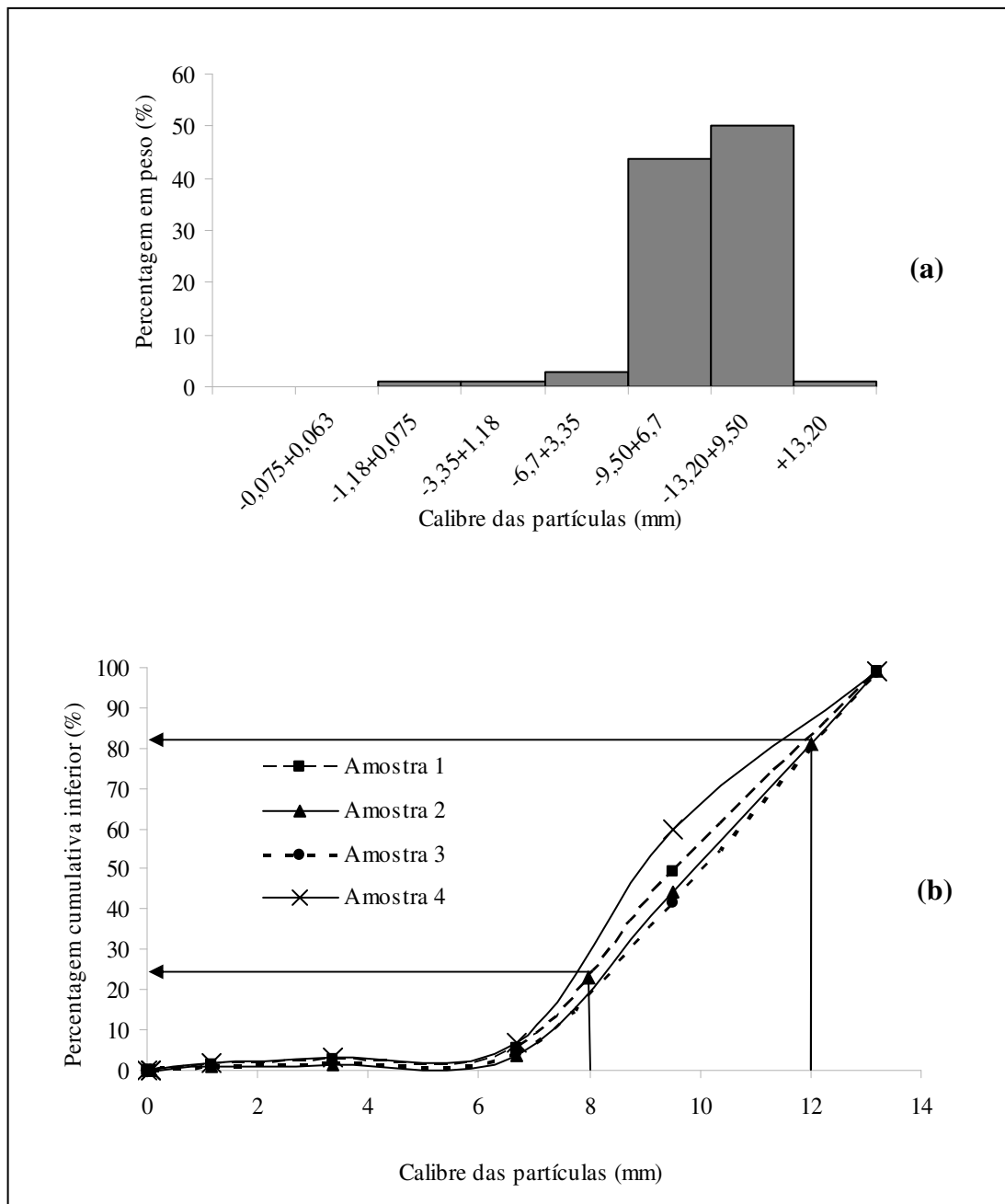


Figura 3.31 a) Histograma e b) Curva cumulativa inferior para os agregados reciclados “cinzentos” de classe granulométrica 8/12mm.

Segundo o histograma apresentado, a classe granulométrica com maior frequência é a classe - 13,20+9,50.

A partir das curvas cumulativas inferiores foi possível determinar, por diferença dos valores das abcissas correspondentes a determinadas granulometrias, a percentagem de agregados reciclados dentro da classe granulométrica desejada. No quadro 3.18 são apresentados os resultados finais

da análise efectuada, com o respectivo intervalo de confiança [40].

Quadro 3.18 Percentagem de agregados dentro da classe granulométrica desejada (agregados reciclados “vermelhos” e agregados reciclados “cinzentos”)

Fracções (mm)	Quantidade de material (%)	
	Agregados reciclados “vermelhos”	Agregados reciclados “cinzentos”
0/4	97,00 ± 0,81	97,80 ± 0,75
4/8	75,54 ± 2,86	56,60 ± 6,28
8/12	55,89 ± 5,80	60,45 ± 11,81

De acordo com os resultados obtidos, para a classe granulométrica 0/4mm, cerca de 97% e 98% do material produzido tem a granulometria esperada, para os agregados reciclados “vermelhos” e “cinzentos”. No caso dos agregados reciclados “vermelhos”, para as classes granulométricas 4/8mm e 8/12mm há nitidamente um decréscimo da percentagem de material, sendo de cerca de 76% e de 56%, respectivamente. Para os agregados reciclados “cinzentos”, existe um decréscimo mais acentuado do que nos agregados reciclados “vermelhos”, para as classes granulométricas 4/8mm e 8/12mm. Por análise do desvio padrão, pode dizer-se que a percentagem de material se mantém aproximadamente constante, para as classes granulométricas 4/8mm e 8/12mm, sendo de 57% e de 61%, respectivamente.

3.4.3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES EM AGREGADOS RECICLADOS

A determinação dos contaminantes nos agregados reciclados decorreu entre Setembro de 2007 e Julho de 2008, para as fracções mais finas (0/4mm, 4/8mm e 8/12mm) e entre Janeiro de 2008 e Junho de 2008, para o *tout-venant* (0/31mm), efectuando-se todos os ensaios inicialmente previstos.

O procedimento adoptado quer para as fracções mais finas, quer para o *tout-venant*, tem as seguintes vantagens e inconvenientes:

Vantagens:

- Utilizam-se equipamentos muito simples e disponíveis no laboratório, sem haver necessidade de adquirir outros;
- Para as fracções mais finas – 0/4mm, 4/8mm e 8/12mm – o procedimento é simples e

relativamente rápido;

- O procedimento é facilmente reproduzível devido à simplicidade do equipamento utilizado.

Inconvenientes:

- Alguns dos contaminantes, só passíveis de separação por inspeção visual, como no caso do vidro, são facilmente confundidos com o material inerte;
- O papel, quando não recolhido por inspeção visual, acaba muitas vezes por se perder quando se procede à imersão em água;
- A madeira, quando imersa durante muito tempo, afunda, pelo que a recolha deste material tem de ser efectuada rapidamente;
- Para a fracção de maior dimensão – 0/31mm – o procedimento torna-se complicado e moroso devido à quantidade de material da amostra, que não permite uma separação tão precisa dos contaminantes.

Os contaminantes encontrados foram caracterizados qualitativa e quantitativa, conforme se segue:

a) Caracterização qualitativa

Por aplicação do procedimento já indicado, foi possível identificar não só os contaminantes definidos previamente mas também outros, tais como carvão, alcatrão, esferovite e metal não ferroso, nas fracções mais finas, e cortiça e poliuretano (PU) no *tout-venant*. Em virtude da sua ocorrência ser bastante frequente nas diversas amostras, optou-se por criar novas classes, ao invés de colocar estes contaminantes na classe denominada pelo termo “outros”. Assim, no total foram consideradas 14 classes, cujas designação e discriminação dos principais materiais identificados são apresentadas no quadro 3.19.

b) Caracterização quantitativa

No quadro 3.20 são sumarizadas as percentagens de contaminantes em cada uma das fracções de agregados reciclados “vermelhos” e “cinzentos”, para as classes granulométricas 0/4mm, 4/8mm e 8/12mm.

Quadro 3.19 Materiais abrangidos por cada classe de contaminantes, nos agregados calibrados e *tout-venant*

Classe	Materiais encontrados
Carvão	Pedaços de carvão, grandes e pequenos.
Cortiça	Pedaços de cortiça para isolamento e/ou pavimento.
Esferovite	Esferas.
Gesso	Placa de gesso.
Madeira	Ervas, palha, pequenos troncos, folhas de sobreiro.
Material magnético	Limalha de ferro, parafuso, espiral de ferro, alvenaria e betão com propriedades magnéticas.
Metal não ferroso	Parafuso.
Mistura betuminosa	Material de isolamento.
Papel	Jornal, papel escrito, cartão.
Plástico	Pedaço de saco, pedaços de plástico rígido.
Poliuretano (PU)	Pedaços de espuma para isolamento.
Têxteis	Fios, pedaços de tecido.
Vidro	Cacos de vidro branco e castanho.
Outros	Búzio, borracha, pena, pedaço de osso.

Quadro 3.20 Percentagem de contaminantes nas fracções analisadas (0/4mm, 4/8mm e 8/12mm)

Classe	Percentagem de contaminantes nas fracções (%)					
	Agregados reciclados “vermelhos”			Agregados reciclados “cinzentos”		
	0/4mm	4/8mm	8/12mm	0/4mm	4/8mm	8/12mm
Carvão	0,000	0,003	0,003	0,004	0,013	0,000
Cortiça	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008
Esferovite	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Gesso	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Madeira	0,171	0,013	0,039	0,006	0,034	0,010
Material magnético	0,146	0,080	0,202	0,091	0,022	0,402
Metal não ferroso	0,000	0,000	0,074	0,000	0,000	0,000
Mistura betuminosa	0,000	0,000	0,006	0,000	0,002	0,000
Papel	0,039	0,000	0,000	0,000	0,004	0,010
Plástico	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Poliuretano (PU)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Têxteis	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
Vidro	0,038	0,026	0,000	0,000	0,000	0,149
Outros	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,010

A figura 3.32 apresenta, em termos de histograma, a representação gráfica da percentagem em peso de contaminantes existente nas fracções dos agregados reciclados calibrados “vermelhos” e “cinzentos”.

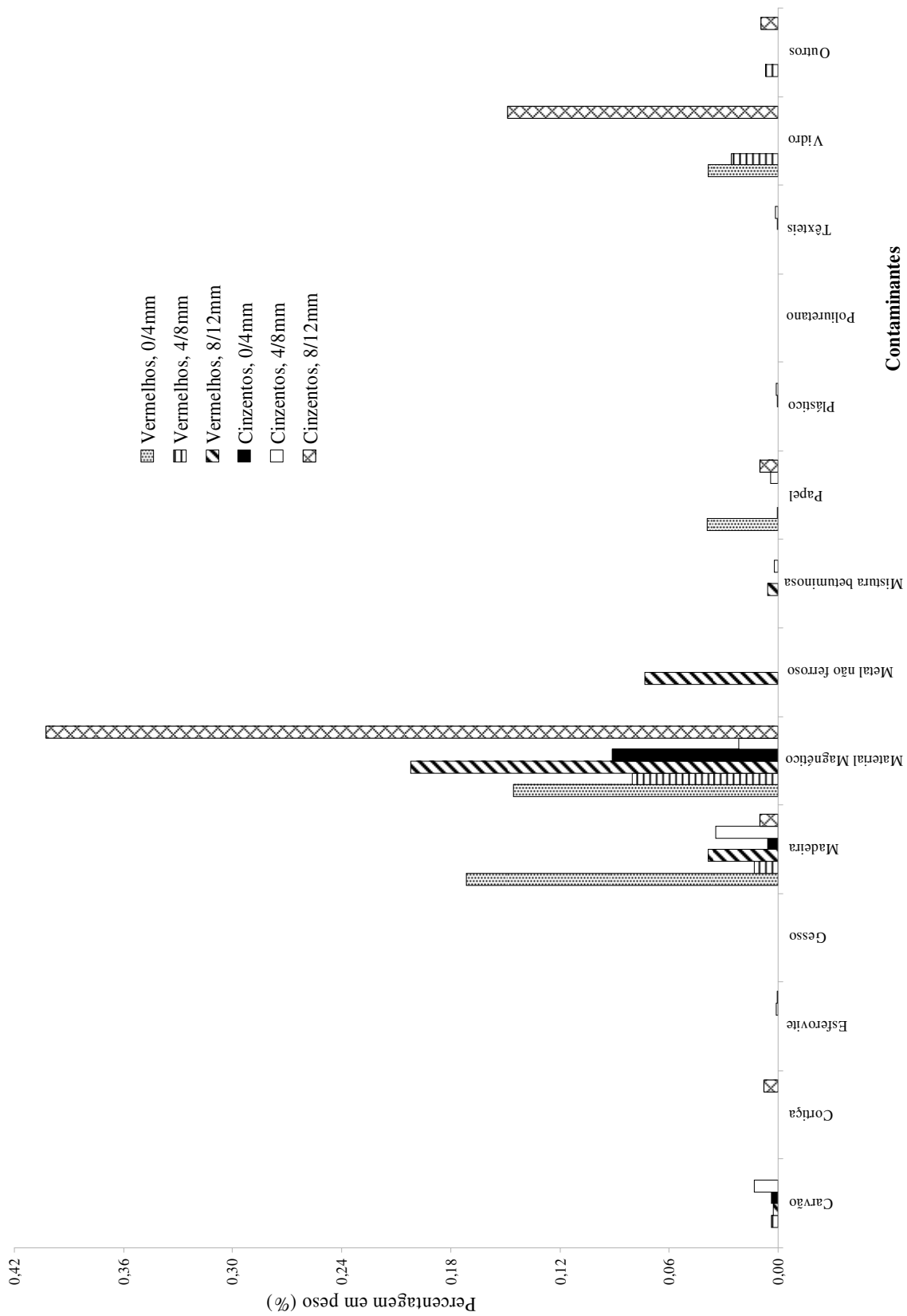


Figura 3.32 Percentagem de contaminantes nos agregados reciclados “vermelhos” e “cinzentos”.

De acordo com a figura 3.32 a classe granulométrica com maior percentagem de contaminantes é a classe 8/12mm dos agregados reciclados “cinzentos”.

No quadro 3.21 são listadas as percentagens de contaminantes nos agregados reciclados “vermelhos” e “cinzentos” do *tout-venant* (fracção 0/31mm).

Quadro 3.21 Percentagem de contaminantes no *tout-venant* (0/31mm)

Classe	Percentagem de contaminantes nas fracções (%)	
	Agregados reciclados “vermelhos”	Agregados reciclados “cinzentos”
	0/31mm	0/31mm
Carvão	0,000	0,000
Cortiça	0,288	0,001
Esferovite	0,000	0,000
Gesso	0,027	0,000
Madeira	0,049	0,023
Material magnético	0,139	0,016
Metal não ferroso	0,000	0,000
Mistura betuminosa	0,000	0,000
Papel	0,010	0,006
Plástico	0,013	0,001
Poliuretano (PU)	0,017	0,000
Têxteis	0,106	0,003
Vidro	0,003	0,000
Outros	0,002	0,000

A figura 3.33 ilustra o respectivo histograma.

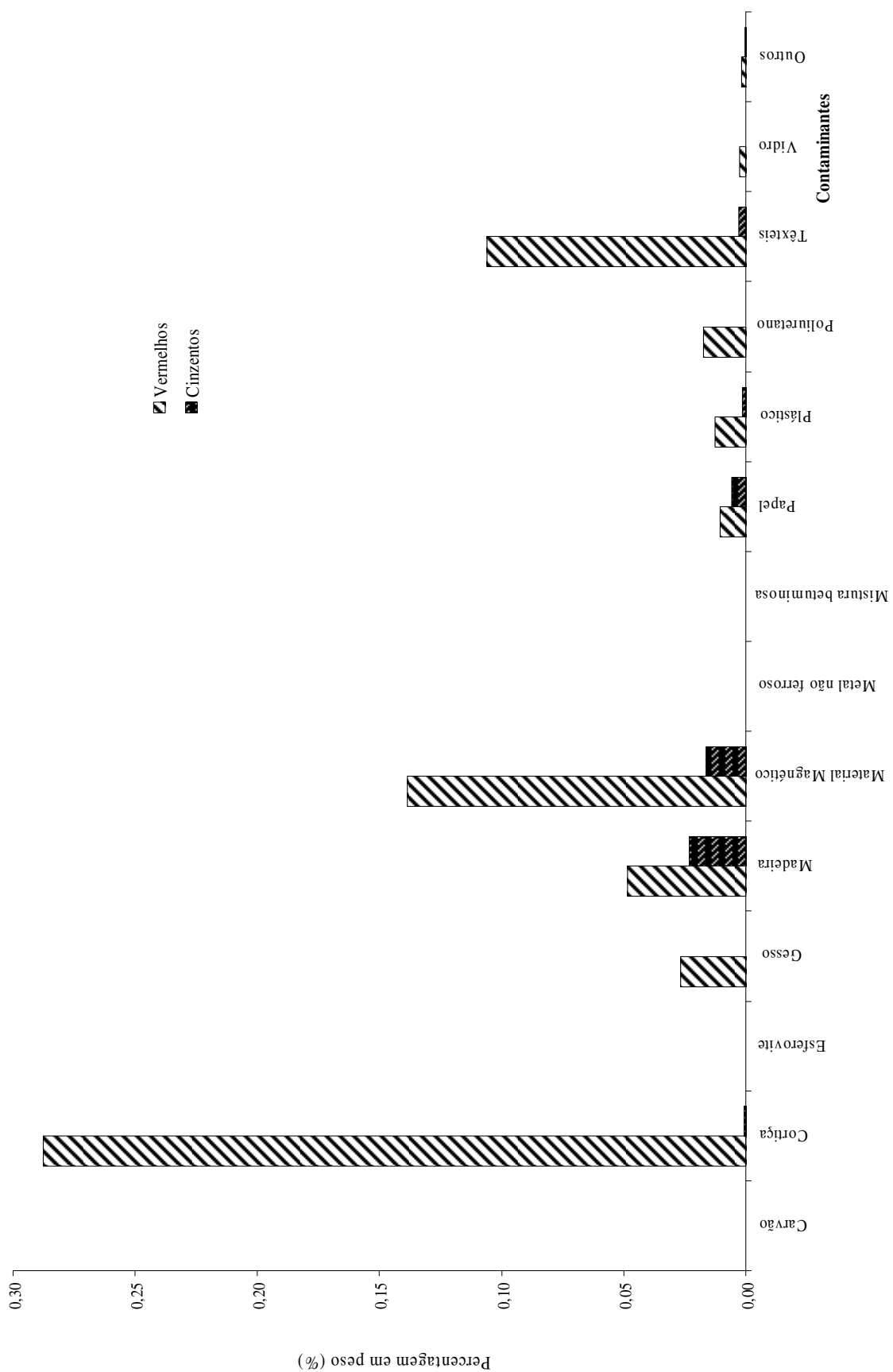


Figura 3.33 Percentagem de contaminantes nos agregados reciclados “vermelhos” e “cinzentos” do *tout-venant*.

No caso do *tout-venant* de agregados reciclados “vermelhos” (figura 3.33), os contaminantes em maior percentagem são a cortiça, o material magnético e os têxteis, enquanto que relativamente ao *tout-venant* de agregados reciclados “cinzentos” os contaminantes em percentagem mais elevada são a madeira, o material magnético e o papel.

As massas de cada contaminante existente no conjunto total dos agregados reciclados calibrados (0/4, 4/8 e 8/12mm), do *tout-venant* (0/31mm) e nos respectivos totais de material inerte estão listados no quadro 3.22.

Quadro 3.22 Contaminantes nas fracções analisadas, em relação à massa total de inertes

Classe	Peso de contaminantes e de material inerte nas fracções (g)	
	0/4mm, 4/8mm, 8/12mm	0/31mm
Carvão	0,1671	0,0000
Cortiça	0,1437	36,0549
Esferovite	0,0117	0,0316
Gesso	0,0000	3,3970
Madeira	1,6489	9,1821
Material magnético	12,5999	18,6968
Metal não ferroso	1,3031	0,0000
Mistura betuminosa	0,1226	0,0000
Papel	0,3151	2,0084
Plástico	0,0087	1,6097
Poliuretano (PU)	0,0000	2,1813
Têxteis	0,0113	13,4603
Vidro	3,0864	0,3415
Outros	0,2475	0,2559
Total de contaminantes	19,6659	87,2194
Total de material inerte	5758,89	24884,57

Os resultados do quadro 3.22, em termos de percentagem em peso, são apresentados graficamente nas figuras 3.34 e 3.35 para os contaminantes existentes nas fracções de agregados reciclados calibrados e no *tout-venant*, respectivamente.

Segundo a figura 3.34, os contaminantes com maior percentagem são o material magnético, o vidro e a madeira.

Nos agregados da figura 3.35, os contaminantes com maior percentagem são a cortiça, o material magnético e os têxteis.

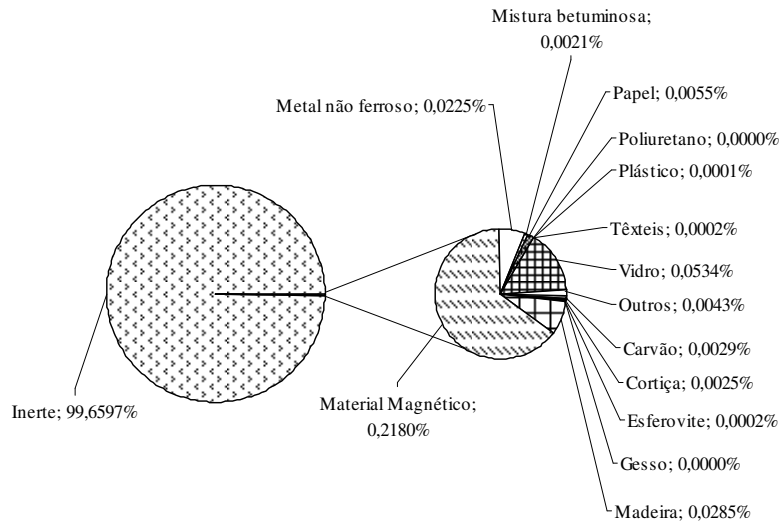


Figura 3.34 Comparação entre a percentagem em peso de contaminantes (real e explodida) e o material inerte nos agregados reciclados calibrados.

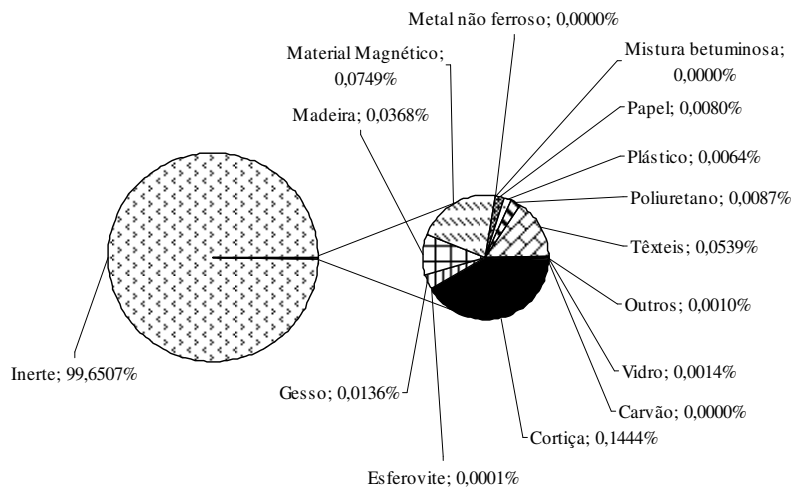


Figura 3.35 Comparação entre a percentagem em peso de contaminantes (real e explodida) e o material inerte nos agregados reciclados de *tout-venant*.

De acordo com os resultados apresentados nas figuras 3.34 e 3.35, a percentagem de contaminantes em peso é bastante baixa, representando menos de 1% em relação ao total de material inerte, tanto para os agregados calibrados como para o *tout-venant*.

4. CONCLUSÕES

A percentagem de contaminantes nos RCD admitidos na UPRE revelou-se muito baixa, o que indicia que a triagem na fonte, nas obras em causa, foi bem sucedida. Não obstante, a triagem dos materiais não inertes deve ser sempre fomentada, uma vez que por enquanto não se procede a uma separação exaustiva destes materiais na UPRE.

Apesar dos RCD provenientes das obras D e G terem maior percentagem de material não inerte quando comparados com os RCD das restantes obras, esta percentagem continua a ser muito baixa.

A presença de madeira nos agregados reciclados pode comprometer a sua aplicação, pelo que, apesar da relativamente baixa percentagem obtida no processo de caracterização, a sua separação junto dos produtores e/ou na UPRE deve ser sempre fomentada, garantindo o seu encaminhamento para destino final adequado. Sugere-se igualmente que campanhas de sensibilização futuras tenham em atenção este facto.

Os metais ferrosos presentes nos RCD são removidos pelo separador magnético, pelo que não são tão problemáticos como a madeira. No entanto, deve igualmente continuar a incentivar-se a sua separação na origem.

Os resultados obtidos na caracterização dos RCD por produtor, admitidos na UPRE, reflectem a realidade de algumas obras no concelho de Montemor-o-Novo, no período em causa e nas condições referidas (após separação de material não inerte na origem). A sua comparação com resultados obtidos noutras regiões e em igual ou diferente período temporal torna-se, portanto, difícil. Não obstante, dado o carácter pioneiro do trabalho realizado e o sucesso alcançado no método de caracterização adoptado, este trabalho foi considerado como uma referência de valor para o desenvolvimento de campanhas de sensibilização dos produtores de RCD e de caracterização futuras.

Os resultados de determinação da eficiência da operação de separação magnética com variação da distância entre o separador magnético e a tela transportadora indicam que os valores de eficiência mais elevada não são necessariamente obtidos com a menor distância. De acordo com estes resultados, a distância entre o separador e a tela transportadora, em condições normais de

operação da UPRE, não deve ultrapassar os 27cm. A partir desta distância, o decréscimo da eficiência é bastante significativo. Notou-se igualmente alguma variabilidade entre os resultados obtidos, nomeadamente com 25cm de distância, pelo que se considera necessário prolongar este estudo com a realização de maior número de ensaios em cada distância.

A caracterização granulométrica do *tout-venant* produzido (utilizando betão da RTS e com goela de britagem de 30mm) permite concluir, numa primeira abordagem, que o material não é adequado para aplicação em sub-base de estradas, em virtude de apresentar um défice muito acentuado na percentagem de material existente nas fracções mais finas. No entanto, como estes resultados se referem apenas a uma amostra, poderão servir como referência para ensaios futuros.

Relativamente à caracterização granulométrica dos agregados reciclados, os resultados observados permitem concluir que na classe granulométrica 0/4mm praticamente todo o material se encontra dentro da fracção granulométrica esperada. O mesmo não acontece com as classes granulométricas de 4/8 e 8/12mm, em que não existe uma calibração precisa, indiciada pela reduzida percentagem de material dentro da gama de calibres esperada. Este facto pode dever-se aos crivos de barras (malha rectangular) usados na UPRE e/ou à desagregação do material durante a realização dos ensaios. Se a futura aplicação deste material exigir uma calibração normalizada precisa, deverá ser realizado maior número de ensaios, e, eventualmente, considerar a substituição dos crivos de barras. Pode igualmente ponderar-se a instalação duma etapa de crivagem, a montante da operação de britagem, para separar as terras originadas pela desagregação do material.

A percentagem de contaminantes presentes nos agregados reciclados em análise é bastante baixa, o que está em concordância com os resultados obtidos para caracterização dos contaminantes na matéria-prima e indicia ter ocorrido uma separação eficiente na origem. Com efeito, esta percentagem não limita, em princípio, a aplicabilidade dos agregados reciclados, embora se recomende uma análise caso a caso, dada a significativa variabilidade dos RCD admitidos na UPRE.

Nos agregados calibrados, o contaminante presente em maior percentagem, em peso, é o material magnético, provavelmente devido à sua densidade, mais elevada do que a dos outros

contaminantes. Este material é também dos que aparece em maior percentagem nos agregados reciclados de *tout-venant*. No entanto, a sua presença não parece problemática, uma vez que se trata, na sua maioria, de uma mistura com quantidade significativa de material inerte com propriedades magnéticas.

A cortiça proveniente do isolamento utilizado em edifícios é o contaminante presente em maior percentagem nos agregados reciclados de *tout-venant*. A sua elevada quantidade, aliada ao facto da cortiça ser um material de baixa densidade, pode justificar a percentagem elevada. Este contaminante reduz a resistência dos agregados reciclados e conseqüentemente limita as suas aplicações, pelo que a sua separação na origem deve ser fomentada (por exemplo, através da demolição selectiva).

Tal como referido para a matéria-prima, estes resultados apenas reflectem a realidade do período temporal em que os ensaios foram realizados.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS

Caracterização dos Contaminantes Presentes nos RCD

- Efectuar campanhas de caracterização ao longo do ano (ou durante mais tempo), com periodicidade bem definida, de modo a poder estudar-se a evolução dos resultados.

Determinação da Eficiência do Separador Magnético

- Efectuar mais ensaios em cada uma das distâncias consideradas, a fim de obter resultados mais rigorosos.

Análise Granulométrica de Agregados Reciclados de *tout-venant*

- Efectuar a análise granulométrica às restantes amostras de *tout-venant* produzido com a abertura de goela de britagem de 30mm, com o objectivo de confirmar, ou não, os resultados obtidos e avaliar a influência desta abertura na qualidade do *tout-venant*, produzido pela UPRE;
- Produzir *tout-venant* com outras aberturas de goela de britagem, a fim de definir qual a abertura que permite obter o material mais adequado para aplicação como sub-base de estradas, de acordo com as directrizes do respectivo Caderno de Encargos;
- Efectuar ensaios não só com o *tout-venant* produzido a partir dos RCD “cinzentos”, mas também com os RCD “vermelhos”, que chegam à UPRE em maior quantidade e que, dada a sua natureza, têm maior quantidade de finos. É no tratamento destes RCD “vermelhos” que se prevê a maior necessidade de instalação da referida etapa de crivagem a montante da britagem.

Análise Granulométrica de Agregados Reciclados Calibrados

- Face aos ensaios e aos resultados já obtidos, não parece existir nada mais a realizar.

Caracterização dos Contaminantes Presentes nos Agregados Reciclados

- Determinar os contaminantes presentes nas classes granulométricas 12/22 e 22/31mm;
- À semelhança do previsto para os RCD admitidos na UPRE, efectuar campanhas de caracterização ao longo do ano (ou durante mais tempo), com periodicidade bem definida, de modo a poder estudar-se a evolução dos resultados ao longo do tempo.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] WIKIPEDIA (2007). “**Civil Engineering**”. http://en.wikipedia.org/wiki/Civil_engineering (Acedido em 24 Dez. 2007)
- [2] CRUZ, L. B. (2005). “**História da Engenharia Civil**”. Documentos das Aulas. Licenciatura em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [3] Portal Empresarial da Maia (2006). “**Breve Descrição do Sector da Construção Civil**”. http://negocios.maiadigital.pt/hst/sector_actividade/construcao_civil/caracterizacao/descricao (Acedido em 24 Dez. 2007)
- [4] Instituto Nacional de Estatística (2007). “**Principais Indicadores: Construção e Habitação**” http://www.ine.pt/portal/page/portal/PORTAL_INE/bddXplorer?indOcorrCod=0000085&Contexto=pi&selTab=tab0 (Acedido em 24 Dez. 2007)
- [5] CEMFOR (2007) “**Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RC&D)**”.
- [6] TCHOBANOGLOUS, G. & KREITH, F. (2002). “**Handbook of Solid Waste Management**”. Second Edition. McGraw Hill Handbooks.
- [7] HENDRIKS, Ch. F. e PIETERSEN, H.S. (2000). “**Sustainable Raw Materials – Construction and Demolition Waste**”. Report 22. RILEM Publications S.A.R.L.
- [8] MIMOSO, P. (2007). “**Gestão de Resíduos de Construção e Demolição**” Ecolabor.
- [9] CUNHA, L. (2005). “**Reciclagem Mecânica**” Documentação de apoio às aulas. Mestrado em Gestão Integrada e Valorização de Resíduos. 2005/2006. Departamento de Ciência dos Materiais. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.
- [10] ROSENQUIST, T. (1974). “**Principles of Extractive Metallurgy**”. McGraw Hill Kogakusha, Ltd. International Student Edition.
- [11] WILLS, B. A. (1998). “**Mineral Processing Technology**”. Butterworth-Heinemann. 6th edition reprinted. Oxford.
- [12] SPOTTISWOOD, D. J. & KELLY, E. G. (1982). “**Introduction to Mineral Processing**”. John Wiley & Sons.
- [13] SCHAEFFLER GROUP (2008). “**Britadeira**”

http://www.schaeffler.com/content.schaeffler.com.br/pt/branches/industry/heavy_industry/mining_and_processing/mining_and_processing_application/processing/crushers/crushers.jsp (Acedido em 14 Jun. 2008)

[14] Mining Basics (2008) ”**Strong Concrete Foundation for Crusher Support**”

http://www.miningbasics.com/html/strong_concrete_foundation_for.php

(Acedido em 14 Jun. 2008)

[15] CORBITT, R. A. (1999). “**Handbook of Environmental Engineering**”. Second edition. McGraw-Hill Handbooks.

[16] HURT, R. e LEE, S. (2001) “**Environmentally Motivated Materials Research**”. MRS - Materials Research Society.

http://lucy.mrs.org/publications/bulletin/2001/nov/Nov01_Intro.pdf

(Acedido em 13 Mai. 2006)

[17] BRITO, J (2006). “**Qualidade dos Agregados Reciclados em Betão e Argamassas**”, Apresentação no Seminário “Gestão Sustentável de RCD”, 10 de Julho de 2006.

[18] RUIVO, J. & VEIGA, J. “**Resíduos de Construção e Demolição: Estratégia para um Modelo de Gestão**”. Trabalho final de curso – Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2004.

[19] P. Malheiro, “**70 por Cento dos Resíduos de Construção e Demolição sem Paradeiro**,” Água & Ambiente – O jornal de negócios do ambiente, 113 (2008).

[20] “**C&D Wastes**,” WARMER BULLETIN – Journal for Sustainable Waste Management, 100 (2005).

[21] LIMA, C. (2002) “**Caracterização dos Resíduos de Construção e Demolição – Triagem e Tratamento**”. Lobbe Translicon, Lda.

[22] A. C. Ferreira, “**Novo Decreto-Lei Valoriza Resíduos de Construção e Demolição**,” Água & Ambiente – O jornal de negócios do ambiente, 110 (2008).

[23] M. Fonseca, “**Novos Pavimentos Nascem das Ruínas do Antigo Hotel Estoril-Sol**,” Água & Ambiente – O jornal de negócios do ambiente, 102 (2007).

[24] Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional –

Inspecção Geral do Ambiente e do Ordenamento do Território (2004). “**Resíduos de Construção e Demolição**”

[25] DECRETO-LEI n.º 46/2008. D.R. n.º 51, Série I. (2008-03-12).

[26] PORTARIA n.º 209/2004. D.R. n.º 53, Série I-B (2004-03-03).

[27] M. S. Silva, “**Resíduos de Construção e Demolição,**” Água & Ambiente – O jornal de negócios do ambiente, 113 (2008).

[28] “**Demolição do Hotel Estoril Sol Passo a Passo,**” Ambinews - Ambigroup, 6 (2008).

[29] LIMA, C., Ex-Responsável pela Área de Ambiente da LOBBE TRANSLICON (Comunicação Pessoal, 23 Novembro 2007)

[30] PESSOA, A., Director Geral da ECOLABOR (Comunicação Pessoal, 30 Novembro 2007)

[31] MARÇAL, P., Sócio Gerente da TRIANOVO (Comunicação Pessoal, 29 Novembro 2007)

[32] Câmara Municipal de Montemor-O-Novo (2008) “**Projecto REAGIR – Enquadramento**” <http://www.cm-montemornovo.pt/reagir/enquadramento.htm> (Acedido Abr. 2008)

[33] Câmara Municipal de Montemor-O-Novo (2008) “**Projecto REAGIR – Objectivos**” <http://www.cm-montemornovo.pt/reagir/objectivos.htm> (Acedido Abr. 2008)

[34] Câmara Municipal de Montemor-O-Novo (2008) “**Projecto REAGIR – Accões e Resultados**” <http://www.cm-montemornovo.pt/reagir/accoes.htm> (Acedido Abr. 2008)

[35] Câmara Municipal de Montemor-O-Novo (2008) “**Projecto REAGIR – Tarefa 2: Sistema Municipal de Recolha Selectiva de Entulhos**” <http://www.cm-montemornovo.pt/reagir/tarefa%202.htm> (Acedido Abr. 2008)

[36] Câmara Municipal de Montemor-O-Novo (2008) “**Projecto REAGIR – Tarefa 4: Unidade Piloto de Reciclagem de Entulho**” <http://www.cm-montemornovo.pt/reagir/tarefa%204.htm> (Acedido Abr. 2008)

[37] Manual de Instruções “**RM60 – Rubble Master Compact Recycler**” (1999)

[38] Caderno de encargos “**Adições para Misturas com Ligantes Hidráulicos**” Volume V: 03 – Pavimentação – capítulo 14. Março 2008.

[39] Comité Europeu de Normalização (1997). “**Norma Portuguesa NP EN 933-1 2000**”.Ensaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Método da peneiração.

[40] MORONEY, M.J (1969). “**Facts from Figures**”. (Tradução Portuguesa, Edições Despertar, Porto) Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex, England, 2nd. Ed..