

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

RECICLAGEM DE ESCÓRIAS DE INCINERAÇÃO DE RSU ATRAVÉS DA INCORPORAÇÃO EM ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO

Fábio Alexandre Pinheiro dos Santos

Orientador: Professor Doutor Manuel Fonseca Almeida (DEMM/FEUP)

Co-Orientador: Professor Doutor Mário Augusto Tavares Russo (ESTG/IPVC)

Data de Entrega: Setembro 2010

Dissertação submetida à Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

<i>CANDIDATO</i>	<i>Fábio Alexandre Pinheiro dos Santos</i>	Código 060508001	
<i>TÍTULO</i>	Reciclagem de escórias de incineração de RSU através da incorporação em argamassas de construção		
<i>DATA</i>	6 de Outubro de 2010		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F103 - 11:00h		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professor Doutor Henrique Manuel C. Martins dos Santos	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Fernando António Portela Sousa Castro	DEM/EEUM
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Manuel Fonseca Almeida	DEMM/FEUP
	<i>Co-orientador</i>	Professor Doutor Mário Augusto Tavares Russo	ESTG/IPVC

“Nem todo o Corintiano é ladrão, mas todo o ladrão é Corintiano”

Nando, Filósofo

Agradecimentos

Um trabalho de investigação na área dos resíduos sólidos é sempre um desafio aliciante, mas também difícil, porque trabalha-se muitas vezes em ambientes agressivos.

A natureza multidisciplinar deste trabalho foi possível graças a valiosas contribuições que gostaria de evidenciar, expressando o meu profundo reconhecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador Doutor Manuel Afonso Magalhães da Fonseca Almeida pela disponibilidade sempre demonstrada nas dúvidas inerentes ao trabalho e pelos conselhos sábios na busca de soluções para as mesmas. Também quero agradecer ao Doutor Mário Augusto Tavares Russo pela ajuda na parte experimental e pela sua experiência no campo laboratorial que ajudou a que este trabalho fosse possível e ainda pela sua amizade que me motivaram a que esta experiência decorre-se num ambiente agradável.

A ESTG do IPVC por me ter dado a oportunidade de realizar alguns dos ensaios nos seus laboratórios.

Quero também agradecer à Engenheira Sílvia Pinho o auxílio nos ensaios que foram necessários efectuar no laboratório. Também especial agradecimento à Engenheira Cláudia Lopes na obtenção de resultados importantes para este trabalho.

Quero agradecer também aos meus amigos que mais me marcaram, o Eduardo Brás, o André Oliveira, o Luís Martins, o Valter Andrade, o Filipe Almeida e o Lúcio Nogueira, por todas as aulas, trabalhos, relatórios, apresentações e exames que fizemos juntos; por coisas que passamos juntos e me vou recordar para sempre, e com o que aprendi com cada um na vossa forma particular de ser.

Aos meus amigos mais chegados, especialmente ao Tiago por ter sido sempre um amigalhão, quero também agradecer sempre o apoio e amizade para comigo, sem vocês seria um bocado mais difícil e por isso o meu sincero obrigado!

À minha família que me incentivou sempre a procurar o melhor para mim e que me deu indicações do trilho para eu seguir.

Por fim, mas não menos importante agradeço à Ângela pelo apoio e incentivo nas horas mais difíceis e pela sua insistência para que nunca desistisse.

Índice

Agradecimentos	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Resumo	xi
Abstract	xi
1. Introdução.....	1
2. Estado da Arte.....	4
2.1. Tecnologia Incineração RSU.....	6
2.2. Incineração na Europa	7
2.3. Tratamento.....	13
2.4. Emissões e Resíduos	14
2.5. Vantagens e desvantagens da Incineração	18
2.6. Custo da Incineração	19
2.7. Caracterização das escórias.....	21
2.8. Caracterização física.....	22
2.9. Composição.....	22
2.10. Propriedades mecânicas	24
2.11. Caracterização química.....	24
2.12. Lixiviação	25
3. Materiais e Métodos.....	26
4. Caracterização das Escórias	28
5. Resultados e Discussão dos Resultados	42
6. Conclusões	48
Bibliografia.....	50
Anexos	52

Índice de Figuras

Figura 1 - Geração de Resíduos por sector	6
Figura 2 - Estrutura hierárquica da gestão de resíduos.....	7
Figura 3 - Evolução do destino final dos RSU em Portugal em Dezembro de 2006 ..	10
Figura 4 - Produção de escórias em Portugal nos últimos anos.	12
Figura 5 - Capitação em escórias nas incineradoras de RSU em Portugal no ano de 2008.....	13
Figura 6 - Instalação de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (IIRSU).....	14
Figura 7 - Elementos emitidos, em percentagem relativa, pelas incineradoras na Europa	18
Figura 8 - Preço médio do tratamento de incineração para materiais não-perigosos nos países membros da Agência Europeia do Ambiente (AEA)	21
Figura 9 - Aspecto das escórias obtidas na LIPOR.	23
Figura 10 - Composição química das escórias.....	25
Figura 11 - Diagrama esquemático do processo de valorização de escórias preconizados na I.T.V.E.	27
Figura 12 - Fabricação dos provetes.....	30
Figura 13 - Molde para colocação da mistura.	31
Figura 14 - Provetes mergulhados em água.	32
Figura 15 - Dispositivo de carga para determinação da resistência à flexão.....	32
Figura 16 - Exemplo de dispositivo para ensaio de resistência à compressão.....	34
Figura 17 - Proвете moído com tamanho inferior a 10 mm.	34
Figura 18 - Exemplo teórico de um recipiente com o suporte de rede	35
Figura 19 - Processo rotativo para obtenção do eluato.	36
Figura 20 - Processo de filtração.	37
Figura 21 - Equipamento de medição do COD.	38
Figura 22 - Equipamento de espectrofotometria de absorção atómica.	40
Figura 23 - Exemplo de uma lâmpada utilizada.	41
Figura 24 - Ensaio de Difraccção de Raio-X.....	42
Figura 25 - Análise granulométrica das escórias da LIPOR.	44
Figura 26 - Ampliação da curva granulométrica, até uma abertura de malha com 5,0 mm.	52

Figura 27 - Na figura da esquerda são apresentados os recipientes antes do ensaio de lixiviação e na figura da direita são apresentados os recipientes após o ensaio de lixiviação.52

Figura 28 - Execução prática do agregado do provete 4.53

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Disposição dos resíduos municipais na Europa no ano 2008	9
Tabela 2 - Características de um processo de incineração.	11
Tabela 3 - Contrapartidas de uma incineradora dedicada	19
Tabela 4 - Classificação das escórias da LIPOR (análise em massa)	23
Tabela 5 - Distribuição volúmica dos provetes.	30
Tabela 6 - Análise granulométrica das escórias.	43
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de flexão e compressão.....	45
Tabela 8 - Resultados da lixiviação.....	47

NOMENCLATURA

Símbolos

CaCO₃ - carbonato de cálcio

CBO₅ - carência bioquímica de oxigénio a 5 dias e 20°C

COT - carbono orgânico total

COO - carbono orgânico oxidável

CO₂ - dióxido de carbono

COV - compostos orgânicos voláteis

CQO - carência química de oxigénio

δ - massa específica

H₂S - sulfureto de hidrogénio

H(%) - teor de humidade dos resíduos

NH₄⁺ - ião amónio

N₂ - azoto gasoso

NO₃⁻ - ião nitrato

NO₂⁻ - ião nitrito

Nkj - azoto Kjeldhal

P-PO₄³⁻ - fósforo associado aos fosfatos

PCB - policlorobifenilos

pH - concentração logarítmica do ião hidrogénio

k - condutividade hidráulica

SO₂ - dióxido de enxofre

SS - sólidos em suspensão

SV - sólidos voláteis

SST - sólidos em suspensão totais

ST - sólidos totais

STV - sólidos totais voláteis

θ - ângulo do plano de inclinação do fundo dos alvéolos para o dreno

θ_i - teor de humidade volúmica numa camada de resíduos

θ_s - teor de humidade volúmica saturada numa camada de resíduos

T - temperatura

Abreviaturas

AS - Aterro sanitário

AEA - Agência Europeia do Ambiente

CNADS - Conselho Nacional do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

DL - Decreto-lei

EPA - Environmental Protection Agency, dos Estados Unidos

ESTG - Escola Superior de Tecnologia e Gestão

IPVC - Instituto Politécnico de Viana do Castelo

ITVE - Instalação e Tratamento da Valorização das Escórias

LER - Lista Europeia de Resíduos

LIPOR - Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto

NRCs - National Resource Conversation Service, United States Department of Agriculture

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

PAA - Programa de acção em matéria de ambiente da UE

PERSU - Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos

RSU - Resíduos sólidos urbanos

UE - União Europeia

VMA - valor máximo admissível

VLR - valor limite recomendável

Resumo

Esta Tese de Mestrado corresponde à avaliação do segundo semestre do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Foi realizado no semestre anterior um trabalho de Seminário, “Estudo sobre as cinzas e escórias de incineração de Resíduos Sólidos Urbanos”, que proporcionou uma pesquisa bibliográfica do tema, e consequente assimilação dos conhecimentos teóricos e fundamentos necessários para aprofundar o tema nesta Tese de Mestrado com a utilização das escórias em argamassas.

Este trabalho de Tese de Mestrado foi desenvolvido em cooperação com a LIPOR. Este contacto permitiu conhecer a empresa, seus processos e equipamentos. A LIPOR disponibilizou toda a informação e materiais necessários para a realização deste trabalho.

A Tese de Mestrado busca uma verificação da possibilidade de utilização de escórias de incineração de Resíduos Sólidos Urbanos como um agregado das argamassas. Foram efectuados ensaios de forma a determinar a utilização de várias percentagens de escórias em argamassas e verificar o comportamento das mesmas, para isso utilizaram-se diferentes quantidades de escórias e analisou-se o seu comportamento ambiental, a sua retracção ou ganho de presa e a sua resistência.

Palavras-chave: escórias, incineração, resíduos sólidos urbanos, argamassa.

Abstract

This Master's thesis corresponds to the evaluation of the second half of Master in Metallurgical Engineering and Materials.

Was carried out in a previous semester of Seminary work “Study on ash and slag from incineration of Municipal Solid Waste” which provided a literature of the subject, and the consequent assimilation of knowledge and theoretical foundations for deepen the theme this Master's thesis with the use of slag in mortars.

This Master's thesis was developed in cooperation with LIPOR. With this contact was possible to know the company, its processes and equipment's. LIPOR released all the information and materials necessary to execute this work.

The Master's thesis seeks a check to the possibility of using slag from incineration of municipal solid waste as an aggregate in the mortar. Were tested to determine the use of various percentages of slag in mortars and verify the behavior of them, for this we used different amounts of slag and analyzed its environmental performance, shrinkage or gain of prey and their resistance.

Key-word: slag, incineration, municipal solid waste, mortar.

1. Introdução

Na Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente e Desenvolvimento de 1992 (Eco92 do Rio de Janeiro, ou a Cimeira da Terra) foi adoptada uma Declaração de Princípios (Agenda 21), onde, no seu capítulo 21, se dá ênfase a: (i) minimização da geração de resíduos; (ii) maximização da reutilização e reciclagem de resíduos com um enfoque ambiental; (iii) estímulo ao tratamento e disposição dos resíduos de modo ambientalmente adequado; e (iv) universalização da cobertura dos serviços de resíduos.

O aumento da produção de resíduos sólidos tem sido uma característica das sociedades industrializadas actuais, cujas consequências não param de crescer. Hoje, mais do que nunca, esta realidade tem de ter um desfecho adequado de modo a garantir o desejado e propalado desenvolvimento sustentável.

Com efeito, o problema patenteado pelos resíduos sólidos urbanos (RSU) como consequência das suas implicações sobre a degradação ambiental e o esgotamento dos recursos naturais torna essencial a procura de soluções adequadas sob o ponto de vista ambiental e social [1].

Como se sabe, a solução mais utilizada em todo o mundo para a deposição de RSU é a deposição no solo em aterros, maioritariamente sanitários nos países desenvolvidos e em lixeiras nos países menos desenvolvidos, com as consequências nefastas para o ambiente facilmente entendidas.

Na Europa, em especial após a publicação de legislação mais rigorosa de preservação do ambiente, a construção de aterros passou a não ser uma solução barata, como no passado, emergindo outras formas de tratar os resíduos, sendo a incineração uma opção de singular interesse e que desperta muitas paixões devido às emissões gasosas que liberta para o ambiente. Este processo tecnológico de tratamento modernizou-se muito nos últimos anos, precisamente para dar resposta às dúvidas ambientalistas, fruto de muita investigação e de exigências legais. Ao reduzir o volume significativamente contribui para a menor pressão sobre a utilização de terrenos, nem sempre disponíveis para a deposição. Os resultados do processo são escórias e energia eléctrica renovável.

No outro lado da linha existe uma indústria consumidora de agregados minerais, a indústria da construção, que só no sector das vias de comunicação necessita de mais de 2 milhões de toneladas por ano, só na Europa, que podem ser substituídas

por escórias, considerando um recurso e não um resíduo, evitando a extracção de recursos naturais.

A conjugação destes factores sugere que a utilização racional de escórias na construção pode ser uma alternativa muito válida e em convergência com as políticas ambientais da União Europeia (EU).

O presente trabalho teve como objectivo geral verificar a aplicabilidade de escórias de RSU como agregado em materiais de construção.

A investigação desenvolvida envolveu um extenso trabalho de campo com objectivos específicos de:

- Analisar a granulometria das escórias para posterior aplicação na construção civil;
- Analisar ao nível mecânico as propriedades dos agregados com incorporação de escórias;
- Analisar ao nível ambiental, através de ensaios de lixiviação, os agregados e os riscos ambientais inerentes à sua utilização.

O principal benefício da incineração de RSU consiste na redução substancial do peso (acima dos 75%) e volume (acima dos 90%) dos mesmos, o que é especialmente importante quando a disponibilidade de terreno para deposição é reduzida. A geração de mais-valias, ou receitas, a partir da produção de energia pode compensar parcialmente o custo da incineração. No entanto, a incineração apresenta alguns inconvenientes, como a geração de resíduos orgânicos não-metálicos e as emissões gasosas. Em relação à gestão dos RSU, os potenciais benefícios da incineração devem ser avaliados tendo em atenção o significativo investimento inicial, os custos de operação e o potencial impacto ambiental [2].

A incineração de RSU produz escórias que são o objecto de estudo deste trabalho. A utilização deste produto em diversas aplicações constitui um imperativo de política ambiental no actual contexto socioeconómico e ambiental.

As propriedades deste material têm sido estudadas, por vezes de forma exaustiva, na expectativa de se encontrarem novas áreas de aplicação; a utilização deste produto pode contribuir de forma importante para a conservação de recursos naturais, diminuição da carga dos aterros e desta forma, aumento da vida útil destes [3].

A classificação destes produtos, segundo a Legislação Europeia, através da Lista Europeia de Resíduos (LER) é feita em 5 categorias, uma vez que estes materiais possuem características complexas e constituem um grupo bastante heterogéneo:

- “19 01 11 - Cinzas e Escórias contendo substâncias perigosas”;
- “19 01 12 - Cinzas e Escórias não abrangidas em 19 01 11”;
- “19 01 13 - Cinzas volantes contendo substâncias perigosas”;
- “19 01 14 - Cinzas volantes não abrangidas em 19 01 13”;
- “19 01 15 - Cinzas de caldeiras contendo substâncias perigosas” [4].

As escórias utilizadas neste trabalho são provenientes da LIPOR II; este material tem uma enorme potencialidade no que diz respeito à valorização como material de construção.

Este trabalho assentou na realização de testes sobre a aplicabilidade das escórias como substituto das argamassas na construção civil; foram realizados testes de resistência e de retracção das argamassas, adicionando uma percentagem de escórias às mesmas.

Relativamente à caracterização laboratorial, o estudo pretendeu não só fazer a validação dos resultados obtidos mas também servir de suporte técnico às aplicações realizadas *in situ*.

A organização do presente trabalho foi dividida da seguinte forma:

- No Capítulo 1 fez-se uma introdução ao tema e abordagens gerais sobre as escórias;
- No Capítulo 2 apresenta-se o estado da arte no que diz respeito às tecnologias de incineração de RSU; a incineração ao nível europeu; o tratamento que vigora em Portugal; as emissões e resíduos que provoca a incineração; as vantagens e desvantagens da incineração; os custos que acarretam; e por fim abordagem geral ao nível físico e químico das escórias;
- No Capítulo 3 e 4 é o dos materiais e métodos em que se explana a abordagem experimental desenvolvida;
- No Capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos e discutem-se os aspectos considerados mais importantes;
- Finalmente, no Capítulo 6, apresentam-se as principais conclusões e algumas sugestões para o prosseguimento da investigação iniciada neste trabalho.

2. Estado da Arte

Uma das tecnologias que muito têm evoluído nos últimos anos e que é utilizada para tratamento dos resíduos sólidos, tanto urbanos como industriais, é a incineração, em especial nos países nórdicos, devido à necessidade de diversificação das fontes energéticas para aquecimento, à densidade populacional elevada e devido à falta de terrenos apropriados para outras soluções (caso da Holanda em que mais de 45% do solo foi conquistado ao mar).

Para o tratamento dos resíduos hospitalares perigosos para a saúde e certos resíduos industriais perigosos é, porventura um dos métodos mais seguros (registam-se experiências com autoclavagem e micro-ondas muito interessantes mas que se julga serem complementares e não concorrentes à incineração).

A incineração tem vantagens na redução dos volumes a depositar em aterros, que pode chegar a 90%, na eliminação de resíduos patogénicos e tóxicos e na produção de energia sob a forma de electricidade ou de vapor de água.

Na gestão integrada dos sistemas de resíduos sólidos, a tecnologia da incineração, apesar de ser uma das últimas soluções preconizadas na hierarquia das opções, continua a ter destaque, pela importância que assume em diversas circunstâncias, como é o caso de Portugal, em que cerca de 20% dos RSU têm esta forma de tratamento final.

Acresce que, com a imposição legal de deposição de resíduos biodegradáveis em aterro, outras formas de tratamento emergem como alternativas e a incineração é uma delas.

Com efeito, segundo o Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU), plano que teve a sua reformulação recente face à necessidade de corrigir as metas e objectivos inicialmente previstos e que não alcançados, muito por conta da utilização de dados nem sempre fiáveis, como constatado pelo Conselho Nacional do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (CNADS) [5]: “Da análise efectuada quanto à implementação dos objectivos descritos no PERSU I, o Conselho constata que se ficou aquém das médias europeias e das metas que aquele estabeleceu, designadamente no respeitante à reciclagem multimaterial e à valorização orgânica. Em contraponto, registou-se uma clara prevalência da solução deposição em aterro, com 2,8 Mt de RSU, cerca de três vezes mais que o objectivo

previamente fixado. Daqui decorrendo que a prevenção (redução e reutilização) e reciclagem, longe da necessária priorização, se quedaram por valores pouco expressivos que, nesta fase, urge recuperar”.

De facto, é fundamental, que num programa de gestão integrada de resíduos os dados sejam precisos.

Só assim se pode cumprir as metas estabelecidas legalmente, designadamente a garantia que os quantitativos previstos tenham um destino adequado, não só nos aterros, mas também na vertente da valorização e na reciclagem multimaterial [6]. A utilização de escórias da incineração de RSU, por exemplo, é uma das alternativas de valorização que contribui para a preservação de recursos naturais [7].

Para tanto, é imperioso o conhecimento da composição química dos RSU para a sua utilização, seja como matéria-prima, seja como combustível. Aliás, a composição química e física dos resíduos é da maior importância para todas as formas de valorização, desde a compostagem até à digestão anaeróbia.

No caso dos aterros, as propriedades físicas dos RSU permitem o dimensionamento dos meios de transporte, as dimensões do aterro propriamente dito, a sua vida útil e a capacidade de geração de biogás passível de utilização em motores de combustão para a produção de energia eléctrica.

Apresenta-se na Figura 1 a distribuição da produção de resíduos por sector de actividade.

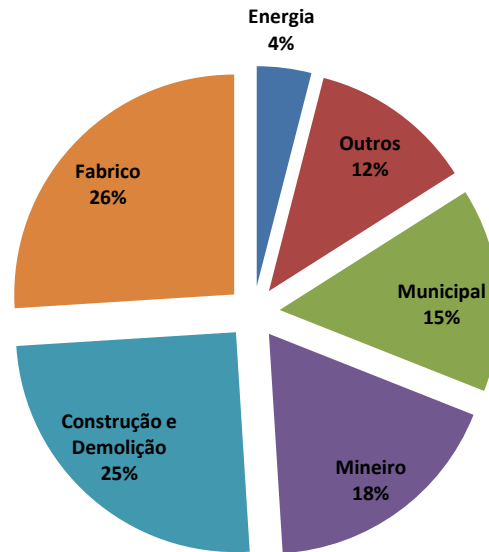


Figura 1 - Geração de Resíduos por sector [8].

Como se pode constatar, o sector urbano contribuirá com cerca de 15% do total produzido, sendo parte tratado em instalações de incineração com produção de energia, em especial nos países nórdicos.

2.1. Tecnologia Incineração RSU

A natureza e a quantidade de emissões da incineração de resíduos dependem largamente de: (i) natureza do resíduo tratado e algumas vezes da execução de um pré-tratamento (p.ex. reciclagem), (ii) a tecnologia usada e (iii) as condições de trabalho nas instalações. O parâmetro mais importante é a temperatura de combustão que deve situar-se entre os 850 °C e os 1100 °C, sendo o limite inferior necessário para assegurar a completa destruição de químicos orgânicos nocivos e o limite superior igualmente necessário para evitar a produção de NO_x inaceitavelmente elevados.

A escolha da tecnologia de incineração depende da combustibilidade do material que é determinada pela sua caracterização sob o ponto de vista líquido, sólido e gasoso; os gases aqui também são considerados. A tecnologia mais indicada pode ser identificada nas especificações do(s) resíduo(s) a tratar. Os resíduos também podem ser queimados em combinação com outros combustíveis existentes em processos industriais, como é o caso da co-incineração [9].

Um incinerador de resíduos não é um forno isolado, mas uma completa instalação industrial que contém grande parte destas características ou mesmo todas estas características:

- Recepção de resíduos;
- Armazenamento e tratamento dos resíduos;
- Combustão no forno;
- Recuperação de calor seguido de vapor e produção de electricidade;
- Controlo de poluição do ar (tratamento dos gases de combustão);
- Tratamento de resíduos (cinzas e águas residuais).

O processo de combustão propriamente dito é executado em vários sub-estágios:

- Secagem;
- Aquecimento e libertação de substâncias voláteis do material combustado;
- Combustão e oxidação de substâncias voláteis;
- Carbonização: combustão de carbono sólido na presença de oxigénio [6].

2.2. Incineração na Europa

Apresenta-se na Figura 2 a hierarquia de gestão de resíduos adoptada nas políticas ambientais da União Europeia [10].



Figura 2 - Estrutura hierárquica da gestão de resíduos [10].

Apesar dos avanços tecnológicos reconhecidos, a incineração de resíduos encontra-se ainda abaixo da prevenção e reciclagem na hierarquia da gestão estratégica de resíduos na Europa, como se pode depreender da Figura 2, sendo exceção os países nórdicos.

Elisabeth Rosenthal questiona porque é que os EUA são relutantes na implementação da moderna incineração como solução para boa parte dos resíduos não passíveis de reciclagem e conclui que a passional luta de ambientalistas turva a racionalidade da decisão, induzindo junto da população que tal tecnologia mataria a reciclagem, mas desenvolve o artigo com o feliz exemplo da Dinamarca [11].

Apresenta-se na Tabela 1 o panorama de gestão dos RSU na Europa.

Tabela 1 - Disposição dos resíduos municipais na Europa no ano 2008 [12].

Países Europeus	Resíduos municipais gerados (kg per capita)	Resíduos municipais incinerados (kg per capita)	Resíduos municipais aterrados (kg per capita)
Dinamarca	802	433	35
Suíça	741	371	0
Suécia	515	250	15
Luxemburgo	701	248	131
Holanda	622	203	7
Alemanha	581	193	3
Noruega	490	184	88
França	543	172	193
Bélgica	493	165	25
Áustria	601	163	19
Euro área (15 países)		129	176
Euro área (16 países)		127	177
EU (15 países)	565	126	188
EU (27 países)	524	102	207
Portugal	477	91	307
Finlândia	522	90	265
Itália	561	69	276
Reino Unido	565	55	308
Islândia	555	54	380
Espanha	575	53	327
Hungria	453	39	333
República Checa	306	34	218
Eslováquia	328	29	250
Irlanda	733	19	440
Eslovénia	459	7	341
Polónia	320	2	228
Estónia	515	1	248
Letónia	331	1	310
Bulgária	467	0	440
Chipre	770	0	672
Grécia	453	0	347
Lituânia	407	0	367
Malta	696	0	648
Roménia	382	0	287
Turquia	428	0	356

Pela Tabela 1 é possível ainda constatar que a produção de RSU em Portugal é de 477 kg per capita, dos quais 91 kg per capita são incinerados e 307 kg per capita são aterrados ou depositados, estes valores vêm ao encontro do que foi dito

anteriormente, que a deposição em aterro continua a ser predominante relativamente ao processo de incineração.

Segundo os dados da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), relativos a 2007, o destino final de 65,5% dos RSU foi o aterro sanitário; de 18,4% foi a incineração; de 9,7% foi a reciclagem e de 6,4% foi a valorização orgânica (compostagem). Como se pode constatar a incineração não se apresenta como o destino principal dos RSU; a deposição em aterro, última solução na hierarquia da gestão de resíduos, apresenta-se como a solução mais proeminente, visto que as restantes soluções de valorização de resíduos não estão implementadas em número suficiente no nosso País. Por outro lado, não deixa de ser relevante que os custos de deposição em aterro ainda são inferiores aos da incineração. Na Figura 3 são apresentados de forma esquemática os dados referentes ao destino final dos RSU no período decorrido entre 2003 e 2006.

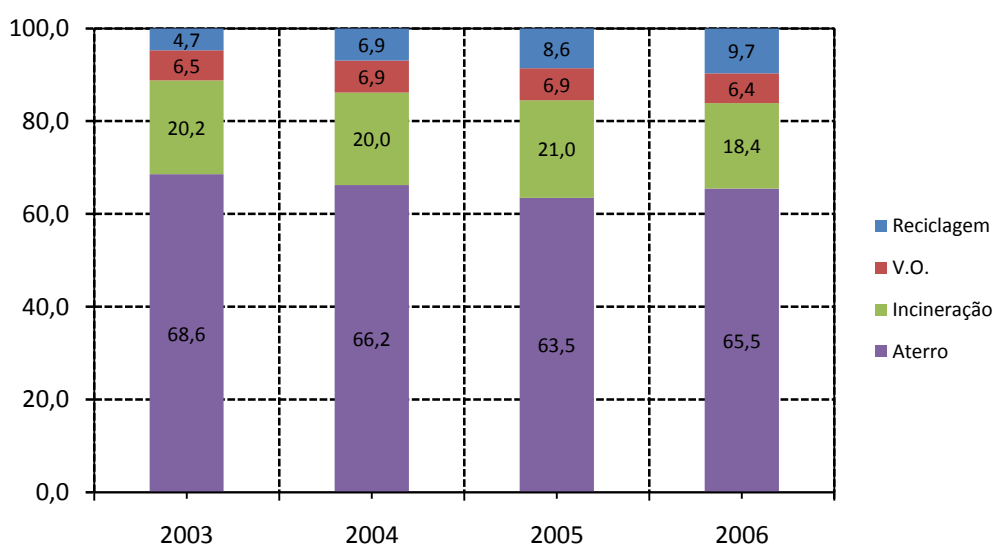


Figura 3 - Evolução do destino final dos RSU em Portugal em Dezembro de 2006 [13].

Relativamente à incineração moderna, voltando ao artigo de Elisabeth Rosenthal do New York Times (NYT), que afirma ser a incineração na Dinamarca responsável pela diminuição da factura energética convertida em petróleo e gás, pela redução das emissões de CO₂ e de dioxinas, em relação ao passado. Com efeito, o país de 5,5 milhões de habitantes tem 29 modernas instalações incineradoras e prevê construir mais 10. Hoje as incineradoras são consideradas de “Waste to Energy Plants” e

gozam de grande respeito e apreço junto das comunidades em que foram implantadas. Na Europa existem 400 instalações de incineração e, a par da Dinamarca, a Alemanha e Holanda são líderes nesta tecnologia e estão a construir mais unidades para responder aos desafios do sector em respeito pelo ambiente [11].

Em contraste, nos EUA, a discussão vai no início, com a comunidade de cientistas a tentar inverter a contaminação pública do discurso ambientalista contrário a esta tecnologia.

Além da incineração, existem outros dois tipos principais de tratamento térmico dos resíduos, isto é, a pirólise e a gasificação. A principal diferença entre eles consiste na utilização ou não do oxigénio na reacção:

- Pirólise - degradação térmica de material orgânico na ausência de oxigénio;
- Gasificação - oxidação parcial;
- Incineração - combustão oxidativa completa [9].

Neste trabalho é focado apenas o processo de incineração, e na Tabela 2 é possível verificar algumas características do processo de incineração.

Tabela 2 - Características de um processo de incineração.

Incineração	
Temperatura de reacção (°C)	800 - 1450
Pressão (bar)	1
Atmosfera	Ar
Produtos obtidos do processo	
Fase gasosa	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂
Fase sólida	Cinzas, escórias
Fase líquida	

As unidades que utilizam o processo de pirólise e gasificação apresentam um sistema base semelhante às que utilizam o processo de incineração, mas diferem significativamente nos detalhes.

A pirólise é o tratamento térmico que apresenta a menor temperatura de reacção de 250 - 700°C; de todos os tratamentos a gasificação é o processo que pode atingir a mais elevada temperatura de reacção, de 1600°C.

Os produtos que se obtêm, quer da gasificação, quer da incineração, são os mesmos, isto é, cinzas e escórias; no processo de pirólise obtêm-se como produtos

cinzas e coque; o processo de pirólise é o único em que se obtêm um produto na fase líquida, a água e produtos para utilização como combustível.

Em Portugal existem 3 entidades gestoras que utilizam o processo de incineração para os resíduos que gerem, **LIPOR** (Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto), **VALORSUL** (Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos da Área Metropolitana de Lisboa (Norte), S.A.) e **Valor Ambiente** (Gestão e Administração de Resíduos da Madeira S.A.).

Apresenta-se na Figura 4 um panorama das produções destas entidades nos últimos anos.

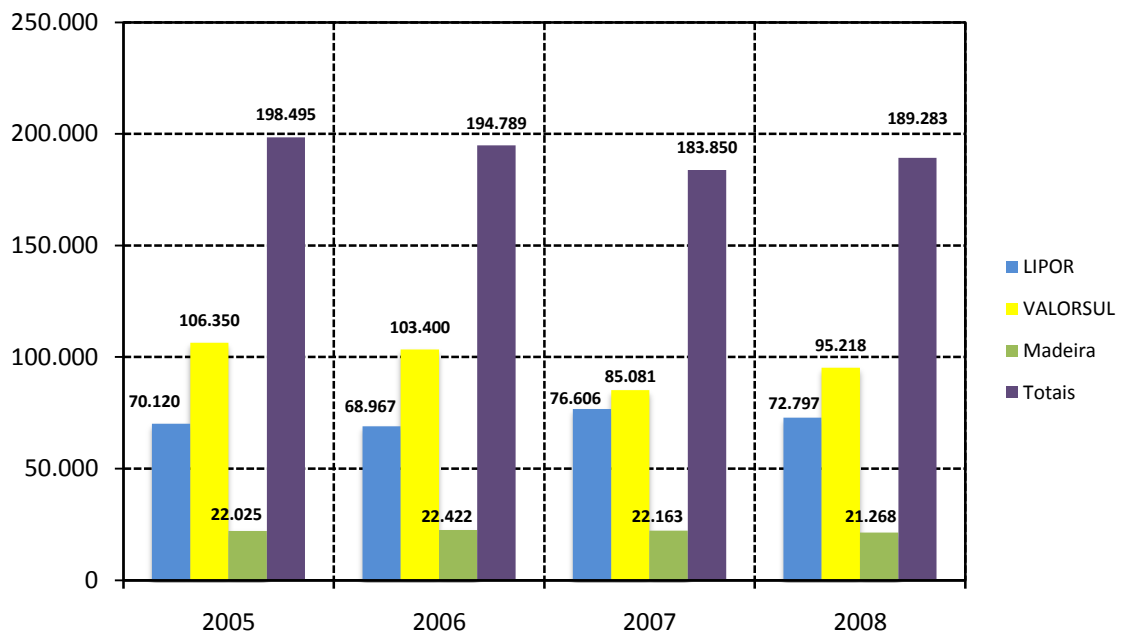


Figura 4 - Produção de escórias em Portugal nos últimos anos.

Apresenta-se na Figura 5 dados da capitação em escórias provenientes dos tratamentos realizados pelas 3 instalações de incineração de RSU em Portugal.

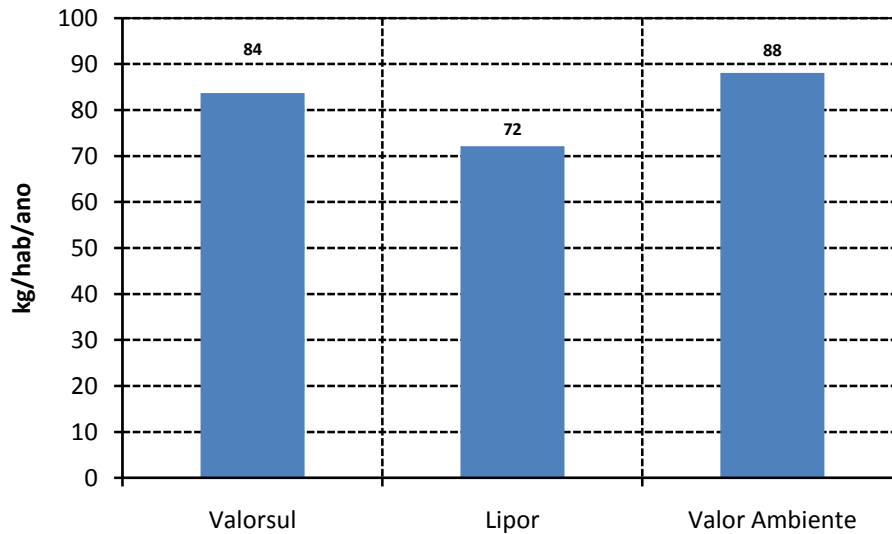


Figura 5 - Capitação em escórias nas incineradoras de RSU em Portugal no ano de 2008.

Da Figura 4 pode constatar-se que a empresa que apresenta maior volume de produção de escórias ao longo dos anos é a VALORSUL, naturalmente devido ao maior número de habitantes por ela servidos. A Valor Ambiente, que abrange o arquipélago da Madeira, e que têm a menor produção de escórias, sensivelmente de 22 mil toneladas apresenta, em contrapartida maior capitação em escórias, relativamente às congéneres do continente (Figura 5), que tanto pode indiciar maior capitação em termos absolutos da produção de RSU, como na forma de gestão ao privilegiar a incineração como solução para os seus resíduos. No entanto, não nos podemos esquecer que as regiões insulares têm problemas particulares no que tange à gestão de resíduos.

2.3. Tratamento

O tratamento das escórias que se utiliza nas incineradoras portuguesas consiste num arrefecimento por projecção de água, sendo estas posteriormente encaminhadas sobre um crivo vibratório para a remoção de elementos mais grossos, que são maioritariamente metálicos. Estes vão ter como destino final a indústria recicladora onde poderão ser utilizados noutras áreas de actividade. A fase seguinte do processo consiste em sujeitar as escórias a um campo magnético para remoção dos elementos mais grossos, e estes, mais uma vez, são encaminhados

para a indústria recicladora. A última fase do tratamento é o armazenamento das escórias para estas serem arrefecidas e secas [14].

Outro tratamento possível consiste na utilização de um sistema do tipo semi-húmido, que é constituído por reactores de grande capacidade, e utiliza-se uma solução aquosa de hidróxido de cálcio e carvão activado para remover componentes ácidos, metais pesados, compostos organoclorados e filtros de mangas para retenção das partículas. É feita uma injeção duma solução de ureia na câmara de combustão para minimização das emissões de óxido de azoto, antes de estes serem libertados para a atmosfera [15].

Na Figura 6 é possível observar a instalação de queima de RSU da Madeira em que são apresentadas todas as etapas do processo até à obtenção de escórias e cinzas.

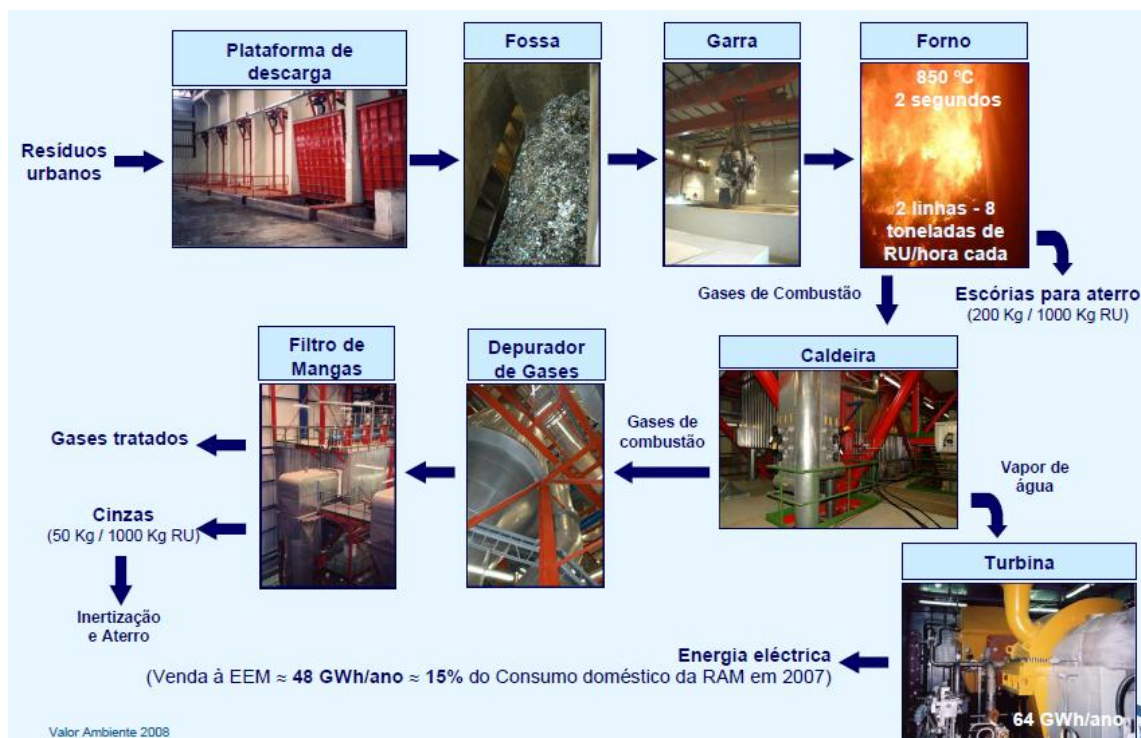


Figura 6 - Instalação de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (IIRSU) [16].

2.4. Emissões e Resíduos

A combustão decompõe termicamente a matéria através da oxidação, desse modo reduz e minimiza o volume de resíduos, e destrói a sua patogenicidade juntamente com a toxicidade associada aos compostos orgânicos. Isto pode ser aplicado a resíduos industriais, municipais ou perigosos em que está comprovado que estes

contêm material orgânico uma vez que são as substâncias orgânicas primárias que sofrem e sustentam a oxidação térmica.

Depois da combustão, os resíduos são convertidos em CO₂, água, cinzas e pequenas quantidades de uma vasta gama de voláteis e resíduos sólidos (p.ex. CO, fuligem, ...). Dependendo da composição inicial do resíduo (e algumas vezes do combustível utilizado para suportar a combustão), os compostos vão conter quantidades diferentes de halogéneos, enxofre, azoto e metais. Estes são perniciosos para a atmosfera e altamente controlados (limite de emissões). Assim, para cumprir as regulamentações, as incineradoras têm de estar equipadas com dispositivos apropriados, tais como, precipitadores, unidades de filtragem e membranas. A natureza e a quantidade de emissões vão depender em larga medida da natureza dos resíduos, mas também das condições de combustão (propriedades físicas dos resíduos, nível de oxigénio presente, turbulência, temperatura, duração, etc.). Uma boa combustão tem de obedecer aos seguintes critérios: minimização das incrustações nas caldeiras e corrosão e reduzida emissão de substâncias orgânicas indesejáveis.

Além da água, existem essencialmente quatro tipos de emissões para a atmosfera no processo de incineração de resíduos:

- Gases: CO, CO₂, NO_x, SO₂, HCl, HF;
- Poeiras minerais: cinzas volantes;
- Metais pesados: Pb, Cu, Hg, Cd, Ni, As, etc.;
- Moléculas orgânicas: PAH e outros hidrocarbonetos, Dioxinas/Furanos, carbonatos orgânicos voláteis, etc.

O tratamento de gases é efectuado para reduzir todas estas emissões perniciosas para o ambiente. Os gases, como noutras instalações de combustão, podem contribuir para o aquecimento global, acidificação e em pequena extensão para a depleção da camada de ozono. Estes gases também têm efeitos na saúde humana (p.ex. irritação pulmonar pela inalação de óxidos de enxofre) e na corrosão das caldeiras de incineração. O principal perigo das moléculas orgânicas libertadas pelos gases de combustão consiste nos seus potenciais efeitos na saúde humana (p.ex. compostos orgânicos voláteis). Estes efeitos podem ser sentidos directamente ou indirectamente pela bioacumulação e biomagnificação através da cadeia alimentar, e são difíceis de quantificar (p.ex. dioxinas). Contudo, os

compostos orgânicos podem ser destruídos quer por calor, fotodegradação ou biodegradação. De qualquer modo, é necessária uma oxidação completa para eliminação destes compostos orgânicos.

Os metais pesados também apresentam interesse devido à sua toxicidade para os humanos e ecotoxicidade. Contudo, para estes exercerem a sua toxicidade têm de estar biodisponíveis. Por exemplo, o chumbo dissolvido na água pode exercer a sua neurotoxicidade enquanto o cádmio e o crómio das ligas de aço usadas no mobiliário não apresentam perigo para a saúde pública porque estes dois elementos estão “fixos” e não estão biodisponíveis. De qualquer maneira, ao contrário das moléculas orgânicas, os metais pesados não podem ser destruídos. Todos os esforços devem ser então centrados para evitar a presença destes metais pesados nos resíduos, mas aquela fracção que não pode ser evitada, os metais pesados presentes têm de voltar ao ambiente numa forma não-biodisponível, isto é, não respirável e não lixiviável. Uma forma de evitar estes problemas é o uso de um pré-tratamento e uma classificação de forma a parar tanto quanto possível a entrada de metais pesados nos fornos ou incineradoras. Durante o processo de incineração dos resíduos, uma parte dos metais pesados é libertado pelos gases e outra parte fica no estado sólido (escórias, cinzas, etc.). A captura destes metais é usualmente executada na etapa do tratamento de gases de combustão levando a um carácter de perigosidade deste mesmo tratamento. A imobilização das poeiras, cinzas e escórias recolhidas depois da combustão pode ser realizada, mas acarreta custos elevados.

As poeiras minerais muito finas (cinzas volantes) e, em particular fracção PM10 (partículas inferiores a 10 μm), constituem um problema principalmente para os pulmões se inaladas, sendo assim estas têm de ser capturadas e fixadas. À excepção dos gases, todos os outros contaminantes emitidos pelos gases de combustão estão ligados entre si e formam partículas devido às suas propriedades electrostáticas e de absorção. As cinzas são um tipo de poeira mineral mais grosseiro que é removido do fundo dos fornos.

Se as condições do processo permitiram uma eficiente combustão, os resíduos sólidos vão conter uma porção pouco significativa de matéria orgânica mas vão concentrar a maior parte dos metais pesados que entraram no processo. O principal problema ambiental a resolver neste caso é a remobilização (em particular a

lixiviação) dos metais pesados. Por isso, a utilização destes materiais para construção de estradas ou para aterro não deve permitir a sua lixiviação. A fixação destes metais pesados pode ser efectuada por vitrificação, sinterização ou fixação em blocos de concreto. Esta última técnica é muito usada em aterros para fixação das cinzas volantes. Nas cimenteiras, a fracção não-volátil dos metais que entram no processo ficam ocluídas e fixam-se ao clínquer (p.ex. chumbo) e os metais voláteis tais como o mercúrio e o tálio têm de ser capturados nos gases de combustão. O cimento naturalmente contém níveis diversos de metais pesados desde a matéria-prima e há estudos que indicam que existe uma lixiviação mínima de metais pesados nos blocos de cimento. Assim, a imposição da entrada de metais pesados nos resíduos não aparenta levantar sérios problemas. Contudo, isto não pode ser considerado como uma entrada livre de altos níveis de metais pesados e aqui é que reside a controvérsia entre incineradoras e cimenteiras. Um melhor conhecimento dos métodos de lixiviação normalizados seguido de medidas sólidas de segurança ambiental é necessário nesta área.

Considerando a diversidade de resíduos e tecnologias, de uma forma geral é difícil comparar as emissões de gases. Contudo, algumas regras importantes devem ser consideradas:

- Quanto mais elevada a temperatura do processo, maior a produção de NO_x ;
- Quanto mais elevada a quantidade de enxofre na entrada (resíduos, matérias-primas), maior a produção de óxidos de enxofre (isto pode ser diferente nas cimenteiras). O mesmo acontece para os metais pesados voláteis como o mercúrio;
- Quanto melhor a combustão (de acordo com a regra dos 3T: tempo, temperatura e turbulência) menor será a fuligem e o carbono orgânico nos gases de combustão;
- Quanto mais elevada a temperatura de combustão e mais rápido o arrefecimento dos gases de combustão abaixo dos $200\text{ }^\circ\text{C}$, menor será a quantidade de dioxinas formadas [6].

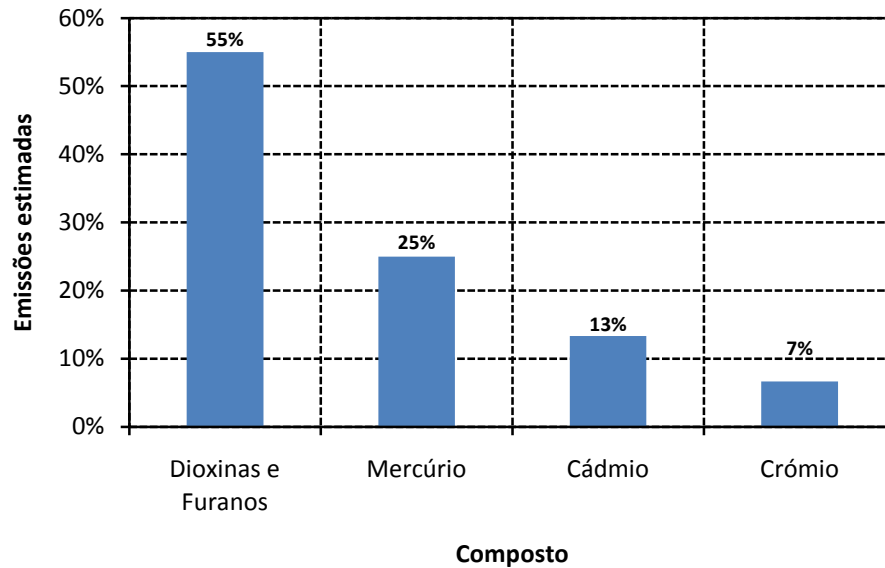


Figura 7 - Elementos emitidos, em percentagem relativa, pelas incineradoras na Europa [17].

A Figura 7 apresenta a participação relativa das emissões das instalações de incineração comparadas com o total de emissões na Europa incluindo recursos naturais. Estes dados baseiam-se nos resultados dos 38 países europeus.

2.5. Vantagens e desvantagens da Incineração

As vantagens gerais da incineração de resíduos são a “higienização” e redução do volume de resíduos, a habilidade para lidar com resíduos perigosos e não-perigosos (embora esta seja em instalações diferentes e muitas vezes é proibida pelas incineradoras de queimar os dois tipos de resíduos, como por exemplo na França) e a possibilidade de recuperação de energia. O grande senão deste processo é a sua propensão para poluir a atmosfera e normalmente a geração de resíduos perigosos (Tabela 3) [6].

Tabela 3 - Contrapartidas de uma incineradora dedicada [6].

Vantagens	Desvantagens
Rápida inertização dos resíduos	Problemas de operação abaixo das capacidades dos fornos
Redução do volume acima dos 90%	Cinzas, escórias e resíduos de gases de combustão devem ser eliminados, muitas vezes como resíduos perigosos, geralmente por deposição em aterro
Não necessita pré-tratamento	No caso da recuperação de energia, a eficiência média de produção de energia é de apenas metade da combustível e das centrais eléctricas de carvão (na ordem dos 20% em vez dos 40%). Novas centrais são melhores (30%) e a eficiência total pode atingir os 75% num sistema combinado de calor e energia, mas a aplicação destes sistemas ainda se mantém limitadas
Podem estar localizadas perto de grandes centros de geração de resíduos, e portanto uma menor necessidade de transporte comparando com a aterragem e facilita a possibilidade de aquecimento urbano	Elevados investimentos de operação e muito tempo até que a incineradora se torne operacional
Ao contrário dos aterros, não produz metano	Uma vez instalada, cria uma grande inércia de decisão na gestão dos resíduos devido ao elevado investimento que envolve a necessidade de um abastecimento a longo prazo para preencher a capacidade instalada.
Recuperação de sucatas ferrosas e não-ferrosas em muitas incineradoras	
Recuperação de energia na maior parte das incineradoras. Neste caso, os resíduos substituem os combustíveis fósseis	
Segurança a longo prazo na gestão dos resíduos	
Baixa sensibilidade às variações da entrada	

2.6. Custo da Incineração

O custo de incineração é difícil de quantificar, isto acontece porque existem variações de múltiplos factores entre os diversos países: os tamanhos das fábricas de incineração, a idade das mesmas, as normas ambientais que se aplicam, a tecnologia usada, as entradas de dinheiro pela venda de energia, etc. Contudo, com a harmonização das normas a nível Europeu, a acontecer nos próximos anos, estas diferenças poderão ser minimizadas podendo assim fazer-se uma quantificação mais exacta sobre o custo da incineração nos diversos países europeus.

A tendência para um controlo cada vez mais apertado sobre as emissões de gases leva a que haja um aumento significativo nos custos da incineração. Alguns industriais consideram que existe um aumento excessivo do custo da incineração comparando com os benefícios ambientais que daí advém. Contudo, o custo da incineração parece estar a chegar ao seu máximo, e em alguns casos com tendência para descer. Nalgumas instalações mais avançadas como as dos países do norte da Europa, a maior parte do investimento é feito na limpeza dos gases de combustão: tipicamente 1/3 para os fornos e caldeiras e 2/3 para a limpeza dos gases de combustão. Este não é o caso em países como o Reino Unido, França ou Espanha, onde os custos actuais na limpeza dos gases de combustão chegam a atingir só cerca de 20% do custo dos fornos. Isto pode dever-se à diferença nas tecnologias usadas, os sistemas mais recentes serão mais baratos e mais eficientes. Até agora, as receitas nas vendas de energia ou na recuperação de materiais continua limitada, mesmo em países como o Reino Unido ou a Itália que subsidiam electricidade a partir dos resíduos. Isto significa os custos da construção e operação das incineradoras de resíduos continuam a ser elevados. Para os resíduos industriais, geralmente as indústrias cobrem a totalidade do custo de tratamento e deposição dos seus resíduos. Curiosamente, o aumento do custo de incineração nem sempre resulta num aumento do preço do serviço de incineração de resíduos. Por exemplo, na Alemanha existem incineradoras de resíduos dedicadas que têm políticas de preço muito agressivas e que muitas vezes têm ajuda por parte de autoridades regionais. De notar que no limite as soluções ambientais levam quase sempre a uma diminuição de eficiência no potencial de recuperação de energia. A Figura 8 apresenta o custo estimado para a incineração de resíduos sólidos urbanos nalguns países europeus [6].

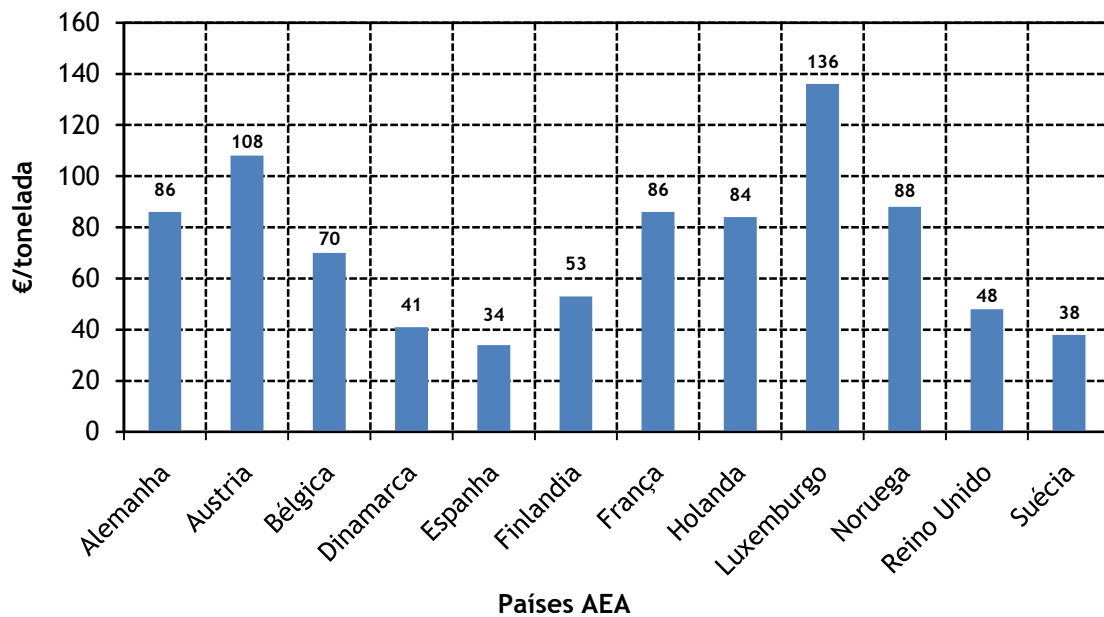


Figura 8 - Preço médio do tratamento de incineração para materiais não-perigosos nos países membros da Agência Europeia do Ambiente (AEA) [18].

2.7. Caracterização das escórias

A caracterização de um qualquer material depende da forma como se apresenta e dos objectivos a que a sua aplicação se propõe.

As escórias apresentam um aspecto granular, com potencialidades para serem aplicadas na construção civil, sendo a caracterização deste material em tudo semelhante à que é efectuada para os solos e para os agregados correntes. Como este material é um resíduo é necessário também fazer a caracterização do ponto de vista ambiental a que estará associado a sua utilização.

No trabalho de Nicolau *et al.*, as escórias foram objecto de uma caracterização aprofundada, sendo apresentadas as suas características físicas e químicas; no aspecto físico foram efectuadas identificações visuais dos principais constituintes, análise granulométrica e determinação das propriedades mecânicas; a caracterização química consistiu numa análise semi-quantitativa dos principais compostos presentes nas escórias. Foi também tido em conta o aspecto ambiental com avaliação do seu potencial contaminante, através de ensaios de lixiviação normalizados [19].

Sendo o resíduo mais significativo da queima dos RSU, as características das escórias vão depender do próprio processo de combustão como também da matéria-prima da combustão, isto é, os RSU. O material utilizado neste trabalho provinha da LIPOR, os RSU produzidos nos municípios da LIPOR são constituídos por materiais combustíveis - papel e cartão, materiais fermentáveis, plásticos e numa menor percentagem, têxteis e madeira de embalagem - e por uma fracção inorgânica - vidro, metais e outros, entre os quais materiais de construção. Os principais componentes das escórias corresponderam essencialmente à fracção de materiais não combustíveis, embora pudessem conter porções visíveis de matéria orgânica, dependendo do grau de eficiência da combustão [15]. As escórias possuíam uma massa heterogénea no aspecto e na dimensão dos seus constituintes, de cor acinzentada com um teor de humidade de 20%. Do ponto de vista físico, este material era bem granulado, bastante poroso e friável, apresentando, no entanto, resistência e estabilidade razoável quando devidamente compactado. No que diz respeito à composição química, os principais elementos presentes eram o silício, oxigénio, ferro, cálcio, alumínio, sódio, potássio e carbono, representando 80-90% da composição total [15].

2.8. Caracterização física

Dos diversos parâmetros que necessitam ser avaliados, os mais importantes são:

- Identificação visual do material;
- Análise granulométrica;
- Determinação das propriedades mecânicas;
- Ensaio de lixiviação;
- Análise ambiental.

2.9. Composição

Uma classificação visual de escórias obtidas na LIPOR, no seu estado fresco, mostrou que estas eram constituídas essencialmente por uma mistura heterogénea de matéria mineral, vidro, metais ferrosos e não ferrosos e também alguns vestígios de matéria orgânica [15]. Outra observação efectuada neste trabalho foi a

de que a constituição das escórias varia em função da sua granulometria. (Figura 9).



Figura 9 - Aspecto das escórias obtidas na LIPOR.

Na Tabela 4 é apresentada uma classificação das escórias no que diz respeito aos seus constituintes e dimensões.

Tabela 4 - Classificação das escórias da LIPOR (análise em massa) [19].

Constituintes (%)	Dimensões (mm)						Total
	> 12,5	12,5 a 9,5	9,5 a 6,3	6,3 a 4,76	4,76 a 2,36	< 2,36	
Vidro ¹	4,98	7,16	10,48	4,53	5,34	0,20	32,69
Metais	0,49	0,16	0,28	0,53	1,17	3,99	6,62
Matéria mineral ²	3,80	3,60	3,07	2,43	8,41	39,33	60,64
Matéria orgânica	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05

¹ A percentagem pode ser mais elevada devido à dificuldade na separação do vidro na fracção fina.

² Constituída essencialmente por areia, pedra, material cerâmicos e escória propriamente dita.

Os resultados obtidos revelaram percentagens elevadas de vidro nas fracções superiores a 2,36 mm e que existe uma distribuição mais ou menos regular dos metais em todas as fracções. O valor real de matéria orgânica é mais elevado do que o valor apresentado, uma vez que as amostras analisadas foram retiradas de um conjunto de escórias lavadas, e em que os inqueimados podem ter sido previamente removidos no processo de lavagem [15]. O teor em inqueimados é um

indicador fiável da eficácia da queima no processo de incineração e relaciona-se com a matéria orgânica existente constituída fundamentalmente por matérias carbonáceas de quantificação visual difícil. O processo para caracterizar o teor em inqueimados consiste na calcinação do resíduo a 500 °C durante 4 horas, registando-se então a massa perdida. Os valores obtidos nos laboratórios que apoiam o funcionamento da Central de Incineração da LIPOR apresentam valores quase sempre inferiores a 3%, nunca ultrapassando os 5%; este valor é geralmente considerado como o limite a partir do qual a queima deixa de ser considerada eficiente, devendo as escórias correspondentes ser obrigatoriamente maturadas ou depositadas em aterro [15]. Outro aspecto a considerar é o teor em água das escórias, o qual é directamente dependente do seu estado: se fresco ou maturado. As escórias estudadas neste trabalho são escórias frescas, e o seu teor em água apresentou-se algo elevado, na ordem dos 22%.

2.10. Propriedades mecânicas

A resistência do agregado é um parâmetro fundamental quando se pretende aplicações estruturais; a avaliação desta pode ser realizada à custa de ensaios de flexão e de compressão, tendo por base a NP EN 196-1 Método de ensaio de cimentos, Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.

2.11. Caracterização química

A gestão dos resíduos assenta fundamentalmente na sua caracterização química, visto que é a composição química que condiciona a classificação destes como resíduos como perigosos ou não. Assim, mesmo que os aspectos físicos e mecânicos sejam promissores uma composição química desfavorável pode condicionar a sua utilização.

Tal como foi referido anteriormente as escórias que não contenham substâncias perigosas foram classificadas como resíduos não perigosos segundo a LER, com o código 19 01 12.

Assim, resíduos que contêm elevadas percentagens de metais pesados ou sais terão de ser geridos convenientemente para não apresentarem risco quando utilizados; um aspecto importante é a libertação destes elementos para o exterior.

As escórias analisadas no trabalho de Nicolau *et al.* correspondiam a um produto à base de silicato de cálcio, contendo alumínio e ferro, estes provavelmente sob a forma de óxidos ligados aos de silício e de cálcio [19]. Na Figura 10 é apresentada a composição química destas escórias [15].

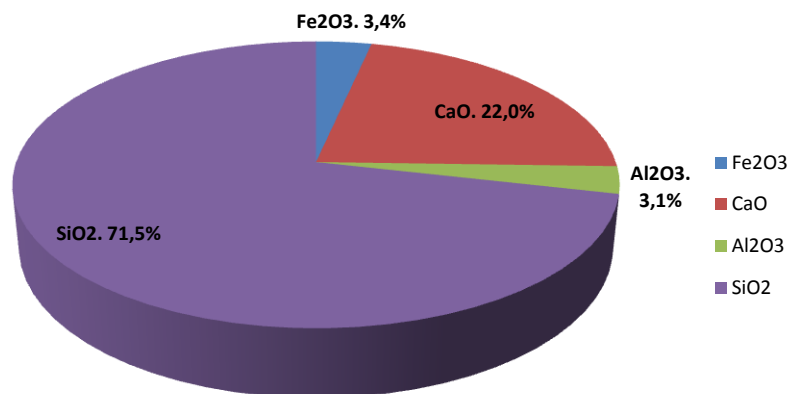


Figura 10 - Composição química das escórias.

2.12. Lixiviação

A aplicação de escórias, visto tratar-se de um resíduo, deve incluir a avaliação do impacto ambiental que lhe está associado. A principal preocupação na utilização das escórias está relacionado com a possibilidade de permitir a mobilização de elementos nocivos - metais pesados, sais ou poluentes orgânicos - que vão contaminar a sua envolvente. No aspecto particular da aplicação deste material em argamassas, é a solubilidade de elementos perigosos nas águas de percolação devidas às precipitações que deve ser avaliada.

No que diz respeito à utilização das escórias existe ainda uma falha na legislação nacional, logo é evidente que é necessário proceder a alguma regulamentação com base em ensaios de lixiviação, tal como é verificado em outros países europeus. A regulamentação tem como principal objectivo o acautelar do risco ambiental da utilização destes resíduos, simulando a mobilização dos contaminantes em condições geralmente mais exigentes do que aquelas em que serão aplicadas. Tal como foi dito, existem regulamentações europeias em que são apresentados alguns

tipos de ensaio, dependendo a escolha fundamentalmente da regulamentação em vigor, do objectivo da avaliação e do tipo de resíduo.

3. Materiais e Métodos

O material usado no presente trabalho foi proveniente da incineradora de RSU da LIPOR e os ensaios laboratoriais foram realizados na FEUP e na ESTG/IPVC.

De seguida é apresentada uma breve descrição do processo tecnológico da incineração e do tratamento dado às escórias nas incineradoras portuguesas de RSU. As escórias são normalmente objecto de tratamento de inertização e extracção de metais ferrosos e não ferrosos tendo em vista a sua valorização material.

A valorização das escórias engloba um conjunto de actividades esquematicamente representadas na Figura 11.

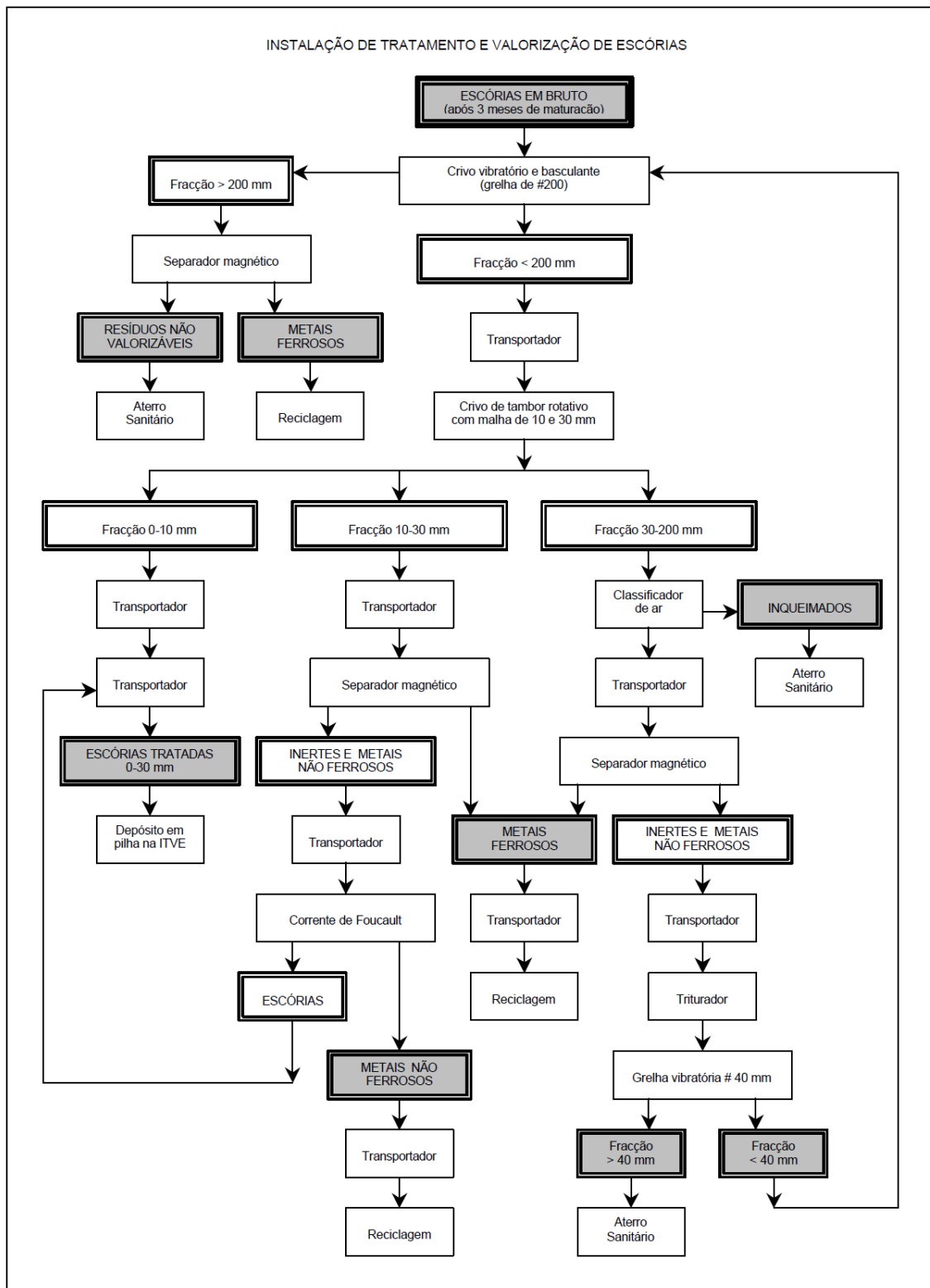


Figura 11 - Diagrama esquemático do processo de valorização de escórias preconizados na I.T.V.E. [20]

4. Caracterização das Escórias

Análise granulométrica

A primeira etapa do trabalho consistiu na análise granulométrica das escórias. O procedimento utilizado baseou-se na Norma Portuguesa (NP) 1379 - Inertes para argamassas e betões - Análise granulométrica, tendo sido necessários os seguintes equipamentos e utensílios: [21].

- Peneiros de rede de malha quadrada com as seguintes aberturas nominais (NP - 1458): 37,5 mm, 19,0 mm, 12,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm , 150 μm , 75 μm ¹;
- Balança com limite de erro $\pm 0,1\%$ da massa a determinar;
- Estufa para secagem a 105 °C - 110 °C.

A análise foi efectuada segundo as seguintes etapas:

- Secagem da amostra a 105 °C - 110 °C até massa constante²;
- Peneiração da amostra através dos crivos e peneiros indicados anteriormente, começando pelo de abertura máxima até abertura mínima;
- Agitação manual dos peneiros, submetendo-os a movimentos oscilatórios de translação e rotação;
- Pesagem do material retido em cada peneiro, incluindo as partículas retidas nas malhas e do material que passou através do peneiro de menor abertura;
- Uma perda de material em quantidade superior a 0,5% da massa inicial da amostra implicou a repetição do ensaio.

A distribuição percentual é obtida através do quociente entre a massa das partículas retidas nos peneiros e massa inicial da amostra. De realçar que este procedimento pressupõe que as partículas têm a mesma massa volúmica ou que a distribuição de partículas com massas volúmicas diferentes seguem a mesma lei de

¹ Os peneiros indicados são definidos na ASTM Standard E 11-70 e correspondem aos peneiros de aberturas nominais de 38,1 mm, 19,0 mm, 12,7 mm, 4,76 mm, 2,38 mm, 1,19 mm, 0,595 mm, 0,297 mm, 0,149 mm e 0,074 mm, anteriormente considerados na Norma ASTM E 11-61.

² Considera-se atingida a massa constante quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 4h, for inferior a 0,1% da massa determinada.

variação qualquer que seja a sua dimensão [19]. A fracção de inerte retida num determinado peneiro, em percentagem, corresponde a:

$$\frac{m_2}{m_1} \times 100$$

m_1 - massa da amostra seca;

m_2 - massa do material retido num determinado peneiro.

Elaboração dos provetes

1. Dimensões dos provetes

Os provetes foram elaborados com forma prismática apresentando dimensões de 25 mm x 25 mm x 280 mm.

2. Moldagem dos provetes

Inicialmente estabeleceu-se o traço base V/V dos materiais utilizados na fabricação das argamassas para a moldagem dos provetes (cimento, areia, escória e água), conforme se apresenta na Tabela 5, sendo 3 deles realizados apenas com cimento e areia, para servir de termo de comparação.

Após o amassamento da argamassa, mantendo constante o teor água/cimento, moldaram-se os provetes introduzindo a argamassa no respectivo compartimento do molde sendo estendida uniformemente ao longo do mesmo e socado e vibrado para evitar a formação de bolhas de vazios, sendo depois executado o alisamento à colher da superfície dos provetes. Por último procedeu-se à marcação dos provetes [22].

Tabela 5 - Distribuição volumétrica dos provetes.

Provete	Volume			Rácio Água/cimento
	Cimento	Areia	Escória	
1	1	3		0,57
2	1	3		0,57
3	1	3		0,57
4	1	2	1	0,57
5	1	2	1	0,57
6	1	2	1	0,57
7	1	1	2	0,57
8	1	1	2	0,57
9	1	1	2	0,57
10	1		3	0,57
11	1		3	0,57
12	1		3	0,57
13	1	2	2	0,57
14	1	2	2	0,57
15	1	2	2	0,57

Foram realizados 3 provetes para cada amostra.

Na Figura 12 é possível observar a elaboração dos provetes, para colocação posterior no molde (Figura 13).



Figura 12 - Fabricação dos provetes.



Figura 13 - Molde para colocação da mistura.

3. Manuseamento e conservação antes da desmoldagem

Foi colocado uma placa de madeira sobre o molde para que esta não reagisse com o cimento; esta placa media aproximadamente 600 mm x 350 mm x 10 mm. O molde com todas as amostras foi preservado em lugar fresco e seco por 24 horas antes de se proceder à desmoldagem e colocação dos provetes em vasilha dentro da água. Foi imediatamente tapado, devidamente identificado e colocado numa sala de onde foi retirado apenas para a realização da desmoldagem.

4. Desmoldagem dos provetes

A desmoldagem foi efectuada de forma a não deteriorar os provetes; para a realização da desmoldagem foi necessário recorrer a um martelo de borracha de forma a facilitar o processo de desmoldagem. Visto que estes provetes iriam ser utilizados para ensaios com idades superiores a 24h, a desmoldagem teve de ser efectuada 20h depois da moldagem.

Depois de efectuada a desmoldagem, os provetes foram convenientemente marcados e posteriormente conservados em água.

5. Conservação dos provetes em água

Os provetes foram mergulhados imediatamente, horizontalmente, em água (Figura 14), sendo colocados de forma a que a água tenha o livre acesso às seis faces dos provetes; os provetes foram colocados com 5 mm de distância entre eles. Foi utilizada água potável para o enchimento inicial do recipiente e o tempo de cura dos provetes foi de 3 dias [22].



Figura 14 - Provetes mergulhados em água.

Ensaio de flexão e compressão

A terceira etapa consistiu na realização de ensaios de flexão e de compressão. A execução deste procedimento foi efectuada pelo Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e teve por base a norma NP EN 196-1 - Método de ensaio de cimentos, Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.

Para a determinação da resistência à flexão, foi usado um método de carga concentrado a meio vão (Figura 15).

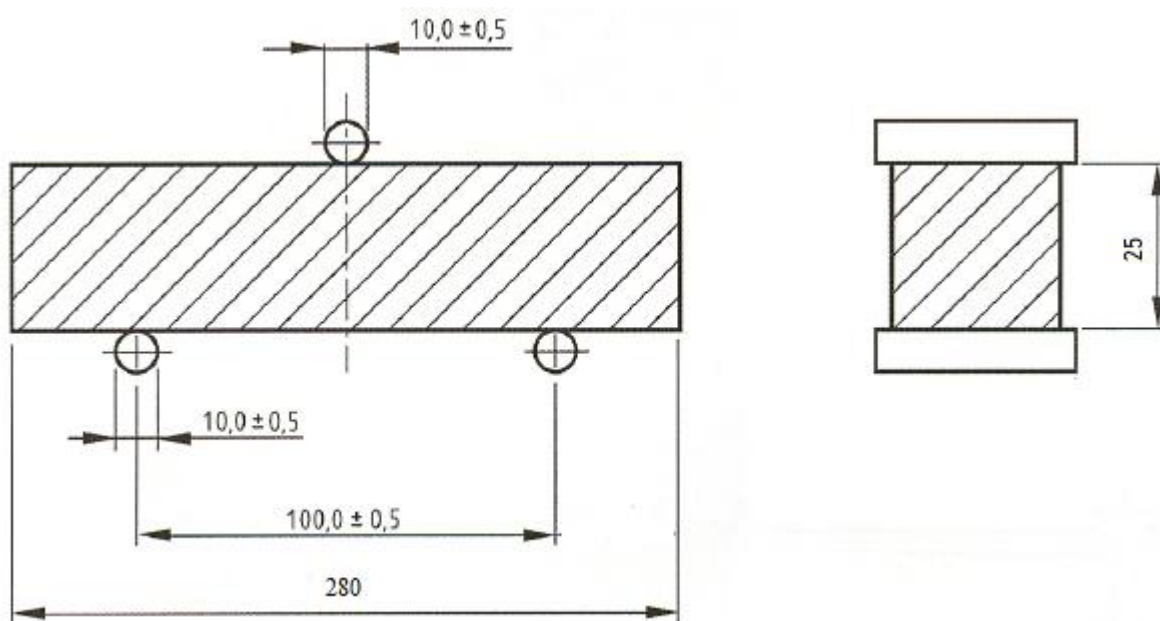


Figura 15 - Dispositivo de carga para determinação da resistência à flexão [22].

O prisma foi colocado na máquina de flexão com uma face lateral de moldagem sobre os cilindros de apoio e o eixo longitudinal perpendicular aos apoios. Foi aplicada uma carga vertical no meio do cilindro de carga sobre a face lateral oposta do prisma, sendo a velocidade aumentada uniformemente em 50 ± 10 N/s, até à rotura.

Para determinação da resistência à flexão recorreu-se à seguinte fórmula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

onde:

R_f é a resistência à flexão, em MPa;

b é o lado da secção quadrada do prisma, em mm;

F_f é a carga aplicada ao centro do prisma na rotura, em N;

l é a distância entre apoios, em mm.

Depois de realizado o ensaio de flexão, o provete ficou dividido em duas partes, uma dessas foi utilizada para a determinação da resistência à compressão. Os semi-prismas foram submetidos ao ensaio de compressão sobre as faces laterais do molde, com a ajuda do equipamento apresentado na Figura 16; foram centrados lateralmente em relação aos pratos da máquina a $\pm 0,5$ mm e longitudinalmente de modo que a base do prisma ficasse saliente em relação aos pratos ou às placas auxiliares cerca de 10 mm. A carga foi aumentando uniformemente à velocidade de 2400 ± 200 N/s durante toda a aplicação, até à rotura. A resistência à compressão, R_c em MPa, é dada pela seguinte fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{625}$$

onde:

R_c é a resistência à compressão, em MPa;

F_c é a carga máxima na rotura, em N;

625 é a área dos pratos ou das placas auxiliares em mm^2 (25 mm x 25 mm).

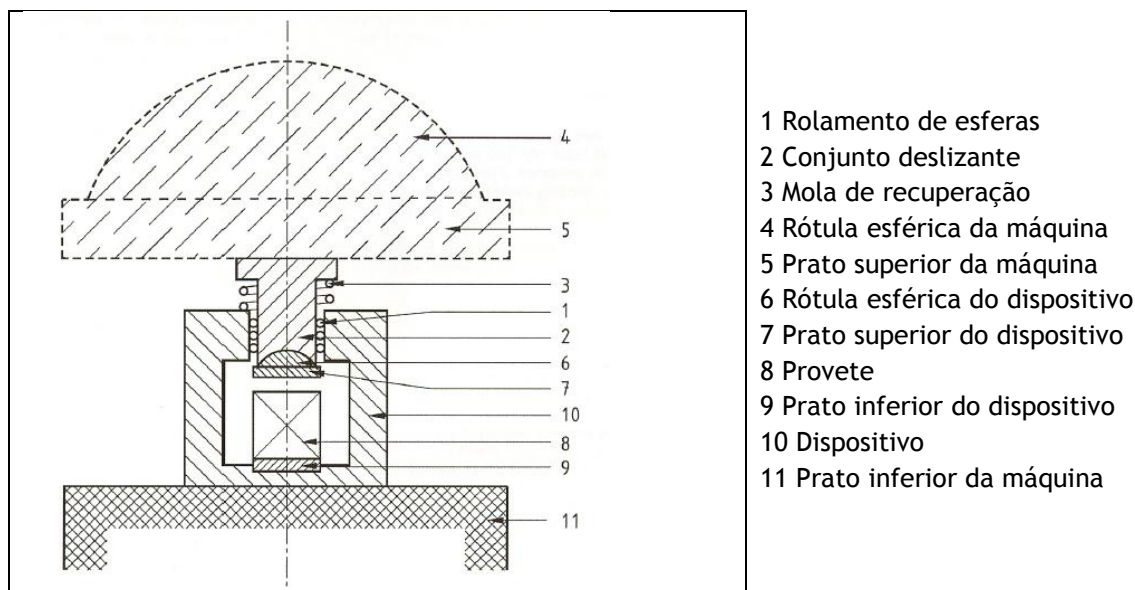


Figura 16 - Exemplo de dispositivo para ensaio de resistência à compressão [22].

Ensaio de Lixiviação

A quarta etapa consistiu num ensaio de lixiviação das escórias. Inicialmente, foi necessário fragmentar a parte resultante do ensaio de compressão para obter fragmentos com um tamanho inferior a 10 mm, tal como é apresentado na Figura 17.



Figura 17 - Provette moído com tamanho inferior a 10 mm.

Para executar este procedimento recorreu-se à norma BS EN 12457-2 de 2002: Caracterização dos Resíduos - Lixiviação - Teste de conformidade de lixiviação dos resíduos granulares e lamas [23]. O princípio deste ensaio consiste em colocar o agregado a ensaiar numa rede inserida num recipiente e lixiviado (Figura 18). Neste trabalho a razão líquido/sólido foi de 10:1 (em massa) e o tempo de lixiviação de

24h. A água foi agitada mecanicamente. De notar que durante o ensaio só o lixiviante foi agitado e não o material sólido.

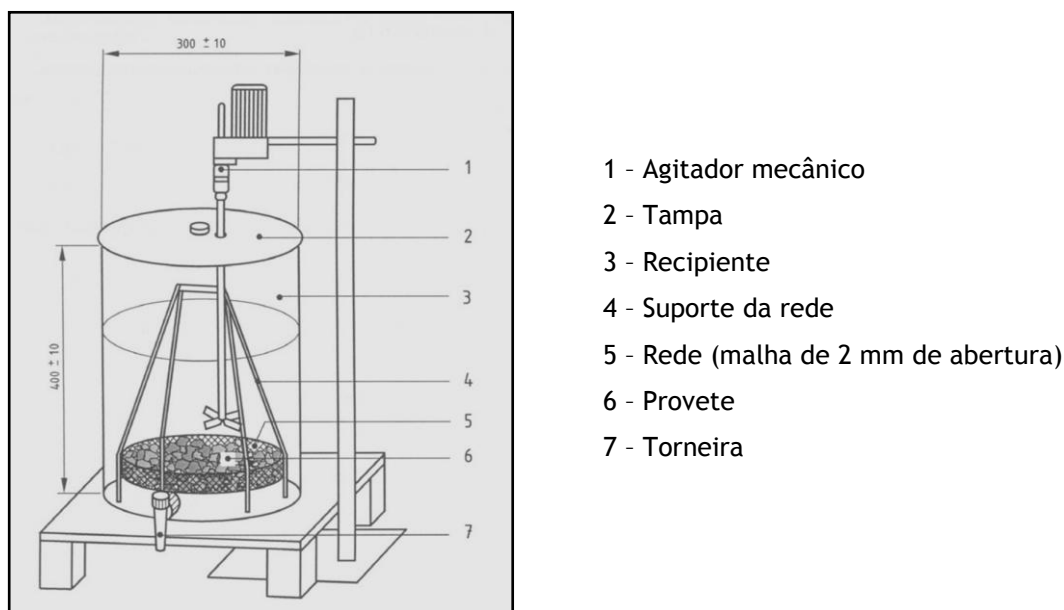


Figura 18 - Exemplo teórico de um recipiente com o suporte de rede [24].

Este método baseia-se no princípio que, durante o período de ensaio, se atinge o equilíbrio entre as fases líquida e sólida. O resíduo sólido é então retirado, sendo posteriormente determinadas as propriedades do eluato³ usando métodos desenvolvidos para a análise de águas adaptados à análise dos eluatos.

Neste trabalho foram utilizados os seguintes aparelhos e utensílios:

1. Balança, capacidade de 2 kg com uma exactidão de 0,1 g;
2. Termómetro, com um intervalo de medida entre 0 °C a 50 °C e uma exactidão de 1 °C para medir a temperatura do ar e do lixiviante;
3. Centrifugadora;
4. Recipiente para a lixiviação;
5. Equipamento de filtração, sistema de filtração a vácuo (entre 2,5 a 5 bar);
6. Filtros de membrana com poros de 0,45 µm.
7. Recipiente de plástico, em peça única, com as dimensões exteriores, altura de (400 ± 10) mm e diâmetro de (300 ± 10) mm, e os seguintes componentes:

³ Solução resultante após o processo de lixiviação de um material sólido em contacto com um lixiviante.

- a) Tampa;
- b) Agitador mecânico.

Foi também utilizada:

- Água destilada

O procedimento seguido para o ensaio de lixiviação (realizada à temperatura ambiente, 20 °C a 25 °C) foi o seguinte:

1. Pesagem da amostra seca até perfazer 100 g;
2. Colocação de 1 litro de água destilada no recipiente onde irá ocorrer o processo de lixiviação;
3. Colocação dos 100 gramas da amostra com 1 litro de água;
4. Fecho do recipiente de lixiviação;
5. Colocação do recipiente de lixiviação na centrífuga, conforme é apresentado na Figura 19;



Figura 19 - Processo rotativo para obtenção do eluato.

6. Regulação do motor do agitador a uma velocidade de 60 rot/min;
7. Após 24 h \pm 10 min foi desligado o agitador e retirada a quantidade de eluato pretendida para análise;
8. As partículas ficaram suspensas no lixiviante para sedimentação durante 10 min e então foi retirado o eluato do recipiente;

9. Filtração do eluato utilizando papel de filtro com poros de 0,45 μm e com auxílio de um depurador Venturi.

Determinação do Carbono Orgânico Dissolvido (COD)

O primeiro parâmetro analisado no ensaio de lixiviação foi o COD, este corresponde ao carbono orgânico que permanece na amostra depois de filtrada com um filtro de 0,45 μm (Figura 20). Para obtenção desta amostra foi necessário recorrer aos seguintes equipamentos e materiais:

- 100 ml de amostra;
- Funil;
- Kitasato;
- Filtro de 0,45 μm ;
- Depurador de Venturi;
- Equipamento TOC-V Total Organic Carbon Analyzer da Shimadzu (Figura 21).



Figura 20 - Processo de filtração.

Na Figura 21 é apresentado o equipamento de ensaio utilizado para obtenção do valor do COD; este equipamento faz a combustão do carbono existente na amostra a 700 $^{\circ}\text{C}$ da qual resulta o CO_2 que é então determinado através de infravermelhos.



Figura 21 - Equipamento de medição do COD.

O procedimento para a determinação do COD foi executado em três etapas:

1. Filtração do eluato com papel de filtro de 0,45 µm;
2. Análise através do equipamento de TOC;
3. Conversão do valor obtido através do equipamento de TOC de mg/l para mg/kg.

Para conversão do valor obtido no equipamento de TOC foi necessário recorrer à seguinte dedução:

Valor obtido no equipamento em mg/l → 100 ml

x → 1000 ml

$$x = \frac{1000 \text{ ml} \times \text{valor obtido no equipamento em mg/l}}{100 \text{ ml}}$$

Em que:

100 ml foi a quantidade de amostra obtida depois do processo de filtração;

1000 ml foi a quantidade usada no processo de lixiviação.

Determinação de metais

Para a determinação dos metais foi necessário o equipamento de espectrofotometria de absorção atômica presente no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM).

Este equipamento é utilizado para determinação qualitativa e quantitativa de metais; este método utiliza como princípio a absorção da radiação ultravioleta por parte dos electrões. Os electrões ao sofrerem um salto quântico, depois de devidamente excitados por uma fonte de energia, esta pode ser à chama de um gás e um comburente (acetileno a 3000 °C), no caso da espectroscopia de absorção atômica de chama, devolve a energia recebida pelo meio, voltando assim para a sua camada orbital de origem.

A energia devolvida na forma de um fóton de luz absorve a radiação ultravioleta emitida por uma fonte específica (cátodo oco) do elemento químico que se pretende determinar. Desta forma, os electrões que estão contidos na solução, e que vão sofrer um salto quântico e que não pertencem ao mesmo elemento que constitui o cátodo oco que vai ser utilizado, não será capaz de causar interferência, isso porque os electrões apenas absorverão radiação com comprimento de onda referente ao elemento químico do qual fazem parte.

Foi necessário fazer soluções padrão para utilizar como comparação na determinação dos valores dos metais estudados. Para a realização de soluções padrão recorreu-se aos seguintes materiais:

- Pipeta;
- Pompe;
- Balão volumétrico de 50 ml;
- Água destilada.

Estes materiais foram necessários para fazer a diluição das soluções padrão. Estas têm uma concentração de 1000 ppm, ou 1000 mg/l, e foi necessário diluir esta concentração para valores que variaram entre 1 a 10 ppm.

Utilizou-se a seguinte fórmula para determinação da quantidade necessária para diluir às concentrações das soluções padrão:

$$C_i \times V_i = C_f \times V_f \rightarrow V_i = \frac{C_f \times V_f}{C_i}$$

C_i - concentração inicial: 1000 ppm;

V_i - volume inicial: valor que se pretende determinar;

C_f - concentração final: valor que varia entre 1 a 10 ppm;

V_f - volume final: 50 ml;

Os procedimentos para execução das soluções padrão dos metais estudados foram:

1. Determinar o volume inicial das soluções padrão;
2. Retirar das soluções padrão com concentração de 1000 ppm o volume inicial determinado anteriormente;
3. Colocar num balão volumétrico de 50 ml e perfazer com água destilada até aos 50 ml;
4. Agitar a solução;

Depois de elaboradas as soluções padrão com ppm que variavam entre 1 e 10 ppm foi necessário colocar estas novas soluções no equipamento de espectrofotometria de absorção atômica AA - 6200 Atomic Absorption Flame Emission Spectrophotometer da Shimadzu (Figura 22) e proceder a uma curva de calibração.



Figura 22 - Equipamento de espectrofotometria de absorção atômica.

As lâmpadas (Figura 23) utilizadas para este trabalho foram de:

- Cádmio, Cd;
- Crómio, Cr;
- Cobre, Cu;
- Ferro, Fe;
- Molibdénio, Mo;
- Níquel, Ni;
- Chumbo, Pb;
- Zinco, Zn.



Figura 23 - Exemplo de uma lâmpada utilizada.

O procedimento para determinação dos metais foi composto por 4 etapas:

1. Inserção das lâmpadas dos respectivos metais no equipamento;
2. Colocação das soluções padrão no equipamento de espectrofotometria de absorção atómica;
3. Execução das curvas de calibração a partir das soluções padrão;
4. Colocação das amostras resultantes do ensaio de lixiviação no equipamento.

5. Resultados e Discussão dos Resultados

No presente capítulo serão apresentados os resultados experimentais dos diversos procedimentos efectuados com vista à utilização das escórias em argamassas.

Difracção Raio-X (DRX)

A difracção de Raio-X foi efectuada na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do IPVC, no laboratório de Cerâmica, através de um equipamento de difractometria de RX da marca Philips X'Pert. Este ensaio determina a estrutura cristalina, fases e textura em poeiras e pós numa gama de temperatura que varia entre os 77 K e 1800 K.

Apresenta-se na Figura 24 um gráfico com o resultado obtido no respectivo ensaio de DRX, realizado em escórias frescas e sem tempo de maturação.

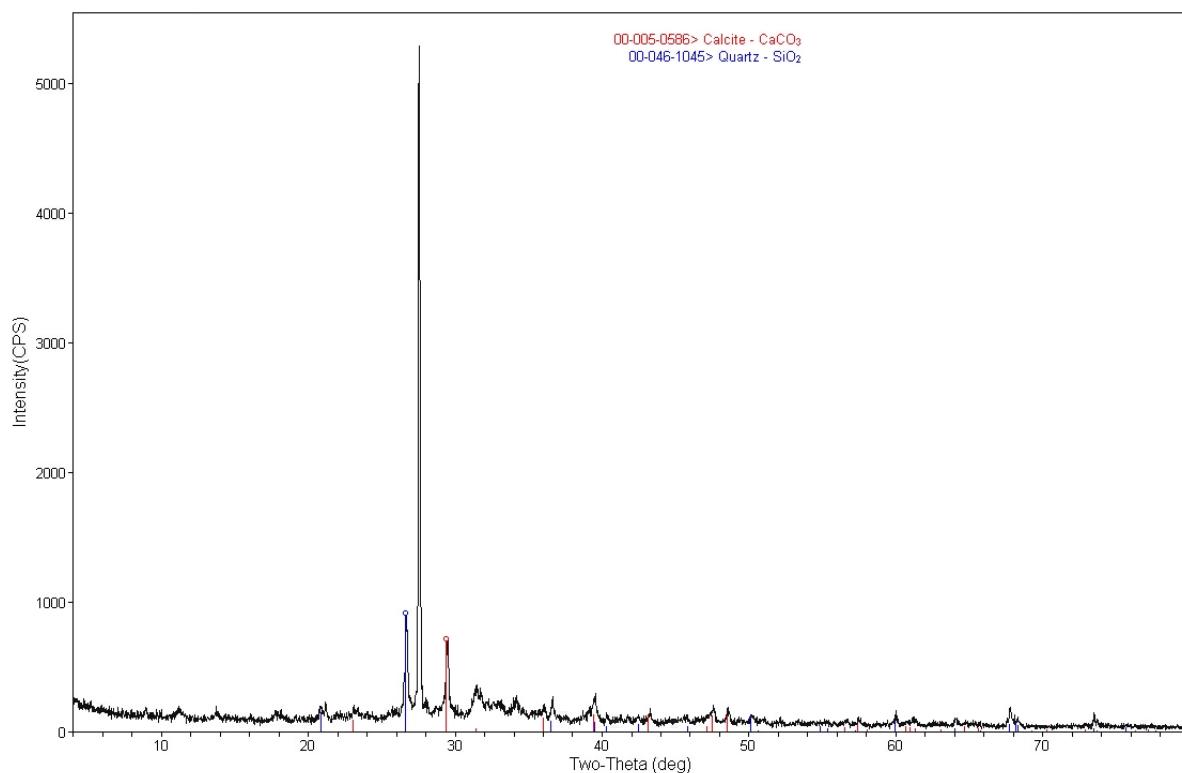


Figura 24 - Ensaio de Difracção de Raio-X.

Pela análise da Figura 24 é possível verificar que existe um pico de intensidade aos 28 two-theta degrees. Este pico de intensidade deve-se às elevadas concentrações

de SiO_2 (quartzo) e de CaCO_3 (calcite) de uma amostra de escórias que sugere a natureza das mesmas. Estes resultados não estão de acordo com aqueles obtidos no trabalho realizado por Nicolau *et al.*, segundo o qual, as escórias ensaiadas eram à base de quartzo (71,5%), óxido de cálcio, CaO (22,0%), óxido de ferro, Fe_2O_3 (3,4%) e óxido de alumínio, Al_2O_3 (3,1%).

Granulometria

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos através da análise granulométrica das escórias utilizadas no presente trabalho.

Tabela 6 - Análise granulométrica das escórias.

Abertura de Malha (mm)	Resíduo no peneiro		Passados Acumulados (%)	Retidos Acumulados (%)
	g	%		
38,1	27,0	2,7%	97,3%	2,7%
19,0	30,6	3,1%	94,2%	5,8%
12,7	42,5	4,2%	90,0%	10,0%
4,76	160,6	16,1%	73,9%	26,1%
2,38	186,5	18,6%	55,3%	44,7%
2,0	249,2	24,9%	30,4%	69,6%
0,595	288,0	28,8%	1,6%	98,4%
0,297	15,7	1,6%	0,0%	100,0%
0,150	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
0,075	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
Fundo	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
Total	1000,0			

Na Tabela 6 o termo “Passados Acumulados” diz respeito à percentagem total de agregados que passam através do peneiro; o termo “Retidos Acumulados” refere-se à percentagem total de agregado retido no peneiro. É possível também observar que aproximadamente 45% das escórias ficam retidas até ao peneiro com uma abertura de malha 2,38 mm. Uma vez que abaixo de 4,76 mm, inclusivé, se classifica o material como um agregado fino (areia) e acima deste valor como um agregado grosso, conclui-se então que existe uma divisão quase equitativa de agregado fino e agregado grosso na amostra analisada.

Na Figura 25 é apresentada a curva granulométrica referente às escórias frescas ensaiadas neste trabalho.

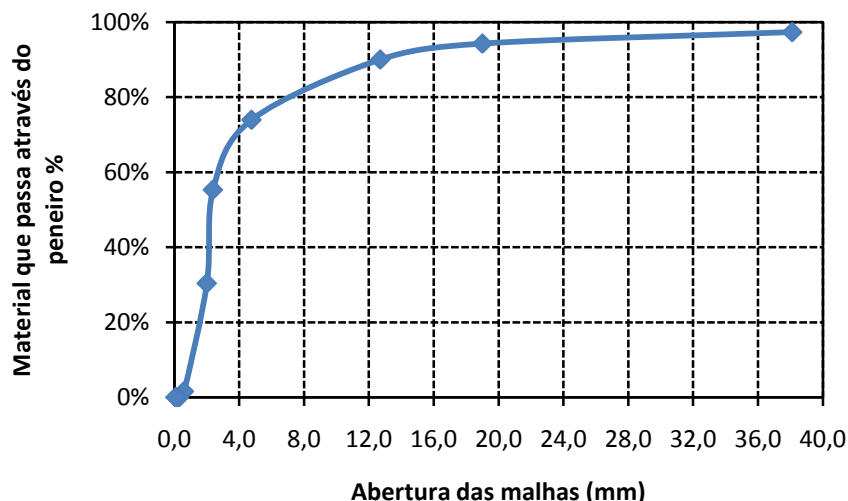


Figura 25 - Análise granulométrica das escórias da LIPOR.

A análise da Figura 25 permite verificar que as escórias frescas apresentam uma curva granulométrica bem distribuída e relativamente extensa.

Pela análise da Tabela 6 é possível concluir que não existe material com dimensão inferior a 150 μm , logo também não existe material com dimensão inferior a 75 μm . Este valor apresenta-se como importante porque a existência de material com esta dimensão seria um condicionante para a utilização deste material como agregado. Comparando com o trabalho realizado por Nicolau *et al.*, o material estudado nesse trabalho tinha uma elevada percentagem de material com dimensão inferior a 75 μm . Segundo o mesmo trabalho existia uma proporção de aproximadamente 10% de material com as dimensões inferiores a 75 μm .

O material utilizado para a fabricação dos provetes para posterior utilização em ensaios de flexão e compressão foi o material com dimensão de 2 mm.

Resistências Mecânicas

As resistências mecânicas determinadas consistiram na resistência à flexão e à compressão, como foi dito anteriormente, cujos valores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de flexão e compressão.

Provete	Massa (g)	Idade (dias)	Flexão		Compressão				
			Carga de Rotura (N)	Resistência à Flexão, R_f (MPa)	Carga de Rotura (N)		Resistência à Compressão, R_c (MPa)		Resistência à Compressão média R_c
1	454,9	20	588	5,6	7500	5196,1	12,0	8,3	10,2
4	409,8	20	441	4,2	7254,9	7745,1	11,6	12,4	12,0
7	362,2	20	392	3,8	5784,3	6372,5	9,3	10,2	9,7
10	369,3	20	343	3,3	4215,7	4166,7	6,8	6,7	6,7
14	372,9	20	245	2,3	3970,6	4215,7	6,4	6,8	6,5

A NP EN 197-1: Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes recomenda que se realize uma comparação entre os valores obtidos nestes ensaios com os cimentos de Portland. Para tanto, os provetes 1, 2 e 3 foram o padrão de comparação, executados apenas com areia e cimento de Portland. Na referida norma os valores de resistência à compressão variam consoante o tempo dos provetes, sendo que o valor máximo de resistência à compressão se atinge aos 28 dias. Neste trabalho os ensaios foram realizados com provetes com idade de 20 dias, no entanto, tendo em atenção que o objectivo é a avaliação da resistência e aplicabilidade de escórias em argamassas de construção em substituição de agregados naturais, por comparação com argamassas tradicionalmente utilizadas, é suficiente fazerem-se as comparações com provetes executados nas mesmas condições, como foi o caso [25].

De acordo com a referida norma os valores de resistência à compressão situam-se entre os 32,5 MPa até aos 52,5 MPa (para 28 dias); estes valores são consideravelmente superiores aos apresentados neste trabalho, mesmo tendo em linha de conta que os provetes ensaiados neste trabalho tinham 20 dias.

Os valores apresentados na referida norma dizem respeito a betões, sendo que em Portugal não existe nenhuma norma que faça alusão aos valores recomendados para argamassas. A consulta de algumas normas europeias, como é o caso das normas francesas e holandesas, em que existem normas no que diz respeito aos valores de resistência à compressão de argamassas indicam que os valores situam-se entre os 16 MPa até aos 20/22 MPa (para 28 dias); segundo Tabela 7 é possível

concluir que os valores estão próximos daqueles apresentados nas referidas normas.

Os provetes 1 e 4 foram aqueles que apresentam resultados de resistência à compressão mais elevados. Esperava-se que o provete 1 (padrão) apresentasse uma resistência mais elevada, uma vez que não tinha qualquer escória, teoricamente um material menos nobre que areia de rio utilizada.

No entanto o provete 4 apresentou uma resistência praticamente igual ao padrão, que sugere que a substituição da areia por escória em traços de 1:3, substituindo 1/3 da areia por escória não altera a resistência da argamassa. Como seria de esperar à medida que se foi aumentando a quantidade de escória os valores da resistência à compressão diminuem. No caso do provete 7, cujo traço (cimento:areia:escória) foi de 1:1:2, a diminuição foi de 5%. Já no caso dos provetes 10 e 14, com traços 1:0:3 (sem areia) e 1:2:2, a diminuição da resistência foi superior a 30%, porém compreensível, pois no primeiro caso foi substituída toda a areia e no segundo, a concentração de cimento na mistura foi menor 25% que nos traços típicos de 1:3 (cimento:agregado).

Assim, pode concluir-se que em traços típicos de argamassas cerca de 1/3 da areia pode ser substituída por escória com granulometria de areia, sem alterar as propriedades de resistência.

No caso português, onde se estima que o consumo de areia e saibro em construção civil seja em média de 87 milhões de toneladas por ano (INE), dos quais cerca de 50% será areia, a utilização da totalidade de escórias produzidas no país em substituição da areia, não representaria mais do 0,42% do total, muito inferior ao potencial de cerca de 30% demonstrado no presente trabalho.

Pode concluir-se que o destino da grande maioria das escórias produzidas nas 3 incineradoras em Portugal poderia deixar de ser os aterros de apoio adjacentes às instalações e serem utilizadas na construção civil.

Lixiviação

Na Tabela 8 são apresentados os resultados dos ensaios de lixiviação.

Tabela 8 - Resultados da lixiviação.

Provete (c:a:e)	1	4	10	Valor Limite (mg/kg)	
	1;3;0	1;2;1	1;0;3	Inerte	Não perigoso
Cr	0	0	0,5	0,5	20
Cd	0	0	0	0,04	2
Cu	0	1,7	17,8	2	50
Fe	0	0	0	-	-
Mo	2,6	5,1	8,7	0,5	10
Ni	0	0	0	0,4	10
Pb	0	0,1	0,2	0,5	10
Zn	0	3,2	3,3	4	50
COD	145	177	424	500 (a)	1000

(c:a:e) = razão cimento;areia;escória base v/v

mg/kg de matéria seca - L/S (*) = 10 l/kg

O 0 significa um valor inferior ao limite de detecção.

(a) Se o resíduo não satisfizer este valor relativamente ao COD ao seu próprio valor de pH, este poderá ser alternativamente verificado com L/S = 10 l/kg e a um pH entre 7,5 e 8,0. O resíduo pode ser considerado conforme aos critérios de admissão para COD se o resultado dessa determinação não exceder 500 mg/kg (está disponível um projecto de método baseado na prEN 14429).

O primeiro parâmetro determinado foi o COD; este revelou-se abaixo dos valores limite impostos pelo DL 183 de 2009 (500 mg/kg), no que diz respeito à utilização de material inerte em argamassas de construção. O valor mais elevado de COD correspondeu ao provete 10, que apresentava a proporção (escória:cimento) mais elevada. Este resultado está de acordo com o esperado, a utilização apenas de escória faz com que o COD seja mais elevado. Em sentido contrário, o provete 1, que não tem como constituinte as escórias apresentou o valor mais baixo de COD dos 3 provetes ensaiados. O provete 4 apresentou 177 mg/kg, um valor bastante inferior ao máximo admissível.

Também sob o ponto de vista das emissões por lixiviação a escória nas percentagens ensaiadas passa no teste.

Os ensaios realizados aos provetes de argamassa nos traços (1:3:0); (1;2;1) e (1;0;3), revelaram que cumprem os limites para serem considerados como inertes, com excepção para o parâmetro Mo. No entanto, pode constatar-se também o traço padrão (provete 1) que não contém escória, apresenta uma concentração de Mo no eluato superior ao limite.

Se analisarmos os valores limite para a lixiviação de resíduos não perigosos, a concentração de Mo passa a 10 mg/kg, abaixo da exibida pelos 3 provetes.

Assim, pode concluir-se que sob o ponto de vista ambiental as argamassas contendo uma parte de escória apresentam características adequadas à sua aplicação em condições normais na construção civil.

6. Conclusões

Este trabalho foi realizado com o intuito de avaliar a viabilidade do escoamento de escórias de incineração em argamassas de construção. Foram realizados alguns ensaios para verificar a possibilidade desta aplicação. Os principais ensaios realizados foram a análise granulométrica, ensaios mecânicos, quer de flexão, quer de compressão e por fim ensaios de lixiviação.

A análise granulométrica foi efectuada para avaliar a composição granulométrica das escórias da LIPOR; estas apresentaram uma granulometria uniforme, tal como é apresentado noutros trabalhos já realizados.

Em relação aos ensaios mecânicos pode concluir-se que a incorporação de escórias em argamassa não altera a capacidade de resistência quando é feita a 30% da areia. No que tange à resistência destas argamassas, como já referido, constatou-se que são passíveis de utilização, pois exibem valores praticamente iguais aos da argamassa típica, em ensaios em idênticas condições. A trabalhabilidade e aderência a parâmetros verticais e tectos foi idêntica à da argamassa de cimento e areia, concluindo-se pela sua adequabilidade como material de construção mais nobre que a sua aplicação apenas em sub-bases de estradas ou aterros, com a vantagem de substituir um agregado extraído ao rio, que por isso não alimenta as praias com areia necessária à sua manutenção.

Relativamente aos ensaios ambientais, neste caso realizados através do ensaio de lixiviação, foi possível verificar que mesmo o provete com quantidade total de escórias e consequentemente o valor mais elevado de COD, apresenta um valor compatível com utilização como material inerte em argamassas.

O objectivo do presente trabalho era avaliar a aplicação de escórias pré-tratadas na construção civil. Com os resultados obtidos julga-se que de facto as escórias podem ser aplicadas como material de construção e não depositadas em aterro,

com as óbvias vantagens de não mobilizar espaço nos aterros e valorizar o resíduo da operação de tratamento (incineração), para além de contribuir para conservar recursos naturais.

Assim, a escória de incineração de RSU, poderia ser totalmente absorvida pela indústria da construção civil.

Em trabalhos futuros, recomenda-se que sejam avaliadas outras das propriedades das escórias tendo em vista a sua valorização como material de construção, por exemplo, em construção de painéis de isolamento térmico ou na área de ambiente, na fabricação de agregados para leitos de sistemas de tratamento de esgotos, dada a sua capacidade de absorção e aderência de filmes biológicos.

Bibliografia

- [1] OCDE. Environmental Performance Reviews. 2nd Cycle. 2009
- [2] OCDE. Working Group on Waste Prevention and Recycling. Improving Recycling Markets. September 2005.
- [3] Recycling magazine. Incineration slag is a valuable building material. 2010.
- [4] Diário da República. Portaria n.º 209/2004. 3 de Março de 2004.
- [5] Conselho Nacional do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (CNADS) - “Apreciação Sumária do PERSU II - Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos”. 18 de Janeiro de 2007.
- [6] Laurent Bontoux. The incineration of waste in europe: issues and perspectives. Institute for prospective technological studies Seville. March 1999.
- [7] Helena L. Dias, Escórias da Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos: Alternativas de Gestão, FEUP, p. 81 - 106, 1997.
- [8] Eurostat. Statistics in Focus. Environment and Energy. 2009.
- [9] Prasad, Neeraj. Mostafa, Ahmed. Pinnoi, Nat. Municipal Solid Waste Treatment Technologies and Carbon Finance. World Bank. 2008.
- [10] Lystbaek, Christian. Municipal solid waste treatment in the EU. Aarhus University. Pág. 2. 2004.
- [11] Elisabeth Rosenthal. Europe Finds Clean Energy in Trash, but U.S. lags. Disponível em <http://www.nytimes.com/2010/04/13/science/earth/13trash.html>. Abril 2010.
- [12] Eurostat. Statistics Database. Environment and Energy - Waste Statistics. Disponível em http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database
- [13] Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG) - Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC) - Sociedade Ponto Verde (SPV), Resíduos Sólidos Urbanos em Portugal - Estudo da valorização da componente orgânica, 2008.
- [14] PROET - Projectos, Engenharia e Tecnologia, S.A., Memória Descritiva do Projecto de uma Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos dos Municípios de Amadora, Lisboa, Loures e Vila Franca de Xira, Volume I - Peças Escritas, Lisboa, Novembro 1996.

- [15] LIPOR - Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto, Valorização de escórias resultantes da incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, 2002.
- [16] Valor Ambiente - Gestão e Administração de Resíduos da Madeira, S.A., A Gestão dos Resíduos na Região Autónoma da Madeira, 2008.
- [17] Umweltbundesamt/TNO, 1997. The Atmospheric Emission Inventory of Heavy Metals and Persistent Organic Pollutants for 1990, Berlin.
- [18] Agência Europeia do Ambiente. Custo de Incineração na Europa. 1998.
- [19] Vaz Nicolau, Luís Miguel F.S. Valorização de Escórias Resultantes da Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos - Relatório Técnico. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Estruturas. Março 2002.
- [20] - Barros, J. R. e Lopes, M. G. - Estudo da utilização de escórias de RSU na construção de pavimentos” projecto de investigação no “Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil”.
- [21] Instituto Português da Qualidade. Norma Portuguesa (NP) 1379 - Inertes para argamassas e betões - Análise granulométrica. 1976.
- [22] Instituto Português da Qualidade. Norma Portuguesa (NP) 196-1 - Métodos de ensaio de cimentos, Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. 2006.
- [23] British Standard Institute (BSI). EN 12457-2:2002. Characterisation of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges. Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction). 2002.
- [24] Instituto Português da Qualidade. Norma Portuguesa (NP) 1744-3 - Ensaio das propriedades químicas dos agregados. Parte 3: Preparação de eluatos por lixiviação dos agregados. 2005.
- [25] Instituto Português da Qualidade. Norma Portuguesa (NP) 197-1 - Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. 2001.

Anexos

Imagem ampliada da curva granulométrica.

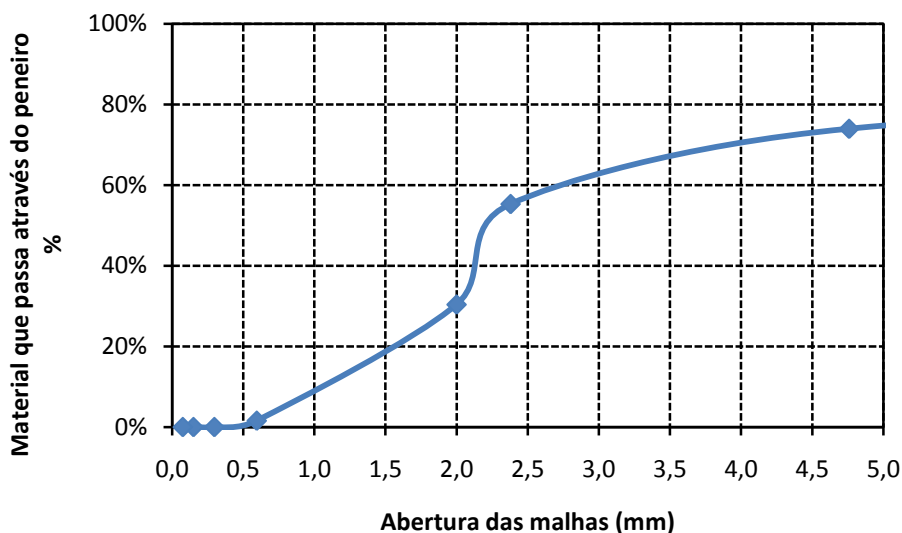


Figura 26 - Ampliação da curva granulométrica, até uma abertura de malha com 5,0 mm.

Na Figura 27 é possível verificar os recipientes onde foi executado o ensaio de lixiviação, é possível observar que na figura da direita o agregado está depositado no fundo do recipiente, e após a agitação durante 24, figura da esquerda, o agregado (fase sólida) já está misturado com a água (fase líquida).



Figura 27 - Na figura da esquerda são apresentados os recipientes antes do ensaio de lixiviação e na figura da direita são apresentados os recipientes após o ensaio de lixiviação.

Na Figura 28 foi executada uma aplicação prática com do agregado do provete 4 (areia:escória, 2:1).



Figura 28 - Execução prática do agregado do provete 4.