



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Cerâmica  
2010 e do Vidro

**Marco Gonçalves  
Lopes**

## **RECICLAGEM DE ESCÓRIAS DE INCINERAÇÃO DE RSU COMO AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO**







**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Cerâmica  
2010 e do Vidro

**Marco Gonçalves  
Lopes**

## **RECICLAGEM DE ESCÓRIAS DE INCINERAÇÃO DE RSU COMO AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais (2º ciclo de Bolonha), realizado sob a orientação científica do Doutor João António Labrincha Batista, Professor associado com agregação do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro, co-orientação do Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e supervisão de estágio da Engenheira Luísa Filipa Mendonça Rodrigues, Valor Ambiente, S.A.





## **O júri**

Presidente

**Prof. Doutora Ana Maria Bastos Da Costa Segadães**  
Professora associada com agregação na Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor João António Labrincha Batista (Orientador)**  
Professor associado com agregação na Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro De Sousa Ferreira (Co-orientador)**  
Professor associado na Universidade de Aveiro

**Doutor António Santos Silva**  
Investigador auxiliar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, aos meus pais e namorada.

Aos professores Doutor João Labrincha e Doutor Victor Ferreira pela incansável orientação e ensinamento.

À Engenheira Filipa Rodrigues pela boa recepção e integração na Empresa e ajuda na realização do estudo.

A todos os colaboradores da Valor Ambiente, S.A., em especial aos técnicos de laboratório, Doutor Filipe Fernandes, Doutora Catarina Carvalho e Gonçalo Sousa, por toda a ajuda e disponibilidade. Também à Engenheira Ana Rita e ao Engenheiro Sérgio Pedro pela ajuda e cedência de material para a realização do estudo.

À Valor Ambiente, S.A., pela oportunidade que me proporcionou e os meios que me disponibilizou para a realização do estudo.

A todos os colaboradores do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro e do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro pela sua ajuda e disponibilidade.

Ao LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pela cedência de normas indispensáveis à realização do estudo.

Ao LREC, Laboratório Regional de Engenharia Civil, pela colaboração na realização de ensaios essenciais à conclusão do estudo.

A todos os colaboradores do LREC, em especial ao Eng.º Miguel Correia e ao Eng.º César Lourenço, pela ajuda e orientação na realização dos ensaios.



**Palavras-chave**

Escórias, incineração, RSU, pavimentação, construção civil.

**Resumo**

O principal objectivo deste trabalho foi o estudo da potencialidade das escórias provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos como agregado em trabalhos de engenharia civil, nomeadamente em argamassas e betões, e em pavimentação rodoviária.

Foram efectuados vários ensaios segundo as directrizes da norma portuguesa NP EN 13242 de 2005, intitulada "Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária", para caracterizar e categorizar o material.

No final os resultados foram comparados com valores de agregados utilizados nas aplicações acima mencionadas. Verificou-se que existem algumas semelhanças, havendo porém alguns parâmetros divergentes, podendo comprometer o desempenho da construção.

Foram feitas formulações com argamassa, onde o agregado foi substituído parcialmente pelas escórias. Verificou-se uma diminuição pouco significativa das resistências à flexão e à compressão. Por outro lado, há um aumento muito significativo no tempo de início de presa. A retracção de todos os provetes é da ordem dos 0,167%.

Nas misturas betuminosas, com a substituição dos agregados por escórias, verificou-se a diminuição das baridades, da porosidade e da deformação. Houve aumento da estabilidade.



**Keywords**

Bottom ash, incineration, MSW, road paving, cement mortars.

**Abstract**

The main objective of this work was to study the potential of the bottom ash from the incineration of municipal solid waste as aggregate in civil engineering works, particularly in mortar and concrete, and road paving formulations.

Several tests were conducted under the guidelines of the Portuguese standard NP EN 13242 (2005), entitled "Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction", to characterize and categorize the material. Characteristics were compared with those of natural aggregates commonly used in the aforementioned applications. It was found that there are some similarities between them, although some detected differences deserve further adaptation steps of the waste and then the study of the performance of formulations where it was used.

Two mortar formulations were prepared, where the aggregate was partially replaced by the bottom ash. The curing time tends to increase by the use of the waste. Hardened mortars tend to be low resistant (compression and flexural strength), but differences are minor. The shrinkage upon curing of all samples is similar (about 0.167%).

In bituminous mixtures, the substitution of natural aggregates by the bottom ash tends to decrease the porosity and deformation, meaning an increase of stability.

This way, the work proves that the use of the bottom ash is technologically feasible, after some minor pre-treatment operations that are easy to implement.





# Índice Geral

<b>CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO</b>	1
1.1. Objectivo	3
1.2. Enquadramento	3
1.2.1. Incineração	3
1.2.1.1. Processo de incineração	4
1.2.1.2. Escórias	7
1.2.2. Apresentação da Empresa de estágio	8
1.2.3. ETRS da Meia Serra	10
1.2.3.1. IIRSU	11
1.2.3.1.1. Descrição técnica do processo (IIRSU)	12
1.3. Agregados	22
1.3.1. Agregados na construção civil	22
1.3.2. Agregados na construção rodoviária	23
<b>CAPÍTULO II. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	27
2.1. Amostragem e redução	29
2.2. Requisitos geométricos	33
2.2.1. Dimensão dos agregados	33
2.2.2. Análise granulométrica e teor de finos	34
2.2.3. Índice de achatamento	36
2.2.4. Qualidade dos finos	38
2.3. Requisitos físicos	41
2.3.1. Resistência à fragmentação – coeficiente de Los Angeles	41
2.3.2. Resistência ao desgaste – coeficiente micro-Deval	41

2.3.3. Massa volúmica e absorção de água	43
2.4. Requisitos químicos	44
2.4.1. Sulfatos solúveis em meio ácido	44
2.4.2. Enxofre total	45
2.4.3. Cloretos	45
2.4.4. Presença de inqueimados e teor de humidade	46
2.5. Ensaio adicionais	46
2.5.1. Determinação de fases cristalinas	46
2.5.2. Caracterização química	46
2.6. Formulação de argamassas e misturas betuminosas	47
2.6.1. Formulação de argamassa	47
2.6.2. Formulação de mistura betuminosa	51
<b>CAPÍTULO III. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b>	57
3.1. Requisitos geométricos	59
3.1.1. Dimensão dos agregados	59
3.1.2. Análise granulométrica e teor de finos	60
3.1.3. Índice de achatamento	64
3.1.4. Qualidade dos finos	64
3.2. Requisitos físicos	65
3.2.1. Resistência à fragmentação – coeficiente de Los Angeles	65
3.2.2. Resistência ao desgaste – coeficiente micro-Deval	65
3.2.3. Massa volúmica e absorção de água	66
3.3. Requisitos químicos	66
3.3.1. Sulfatos solúveis em meio ácido, enxofre total e teor de cloretos	66

3.3.2. Presença de inqueimados e teor de humidade	67
3.4. Ensaio adicionais	68
3.4.1. Determinação de fases cristalinas	68
3.4.2. Caracterização química	70
3.5. Comparação com agregados comuns	71
3.5.1. Agregados para a construção civil	71
3.5.2. Agregados para a pavimentação rodoviária	74
3.6. Formulação de argamassas e misturas betuminosas	75
3.6.1. Formulação de argamassa	75
3.6.2. Formulação de mistura betuminosa	77
<b>CAPÍTULO IV. CONCLUSÃO</b>	81
4.1. Conclusão	83
4.2. Reflexão final	85
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	87
<b>ANEXOS</b>	93
Anexo I	95
Anexo II	97
Anexo III	100
Anexo IV	103
Anexo V	106
Anexo VI	108
Anexo VII	110
Anexo VIII	113

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.1</b> – <i>Três tipos de câmara de combustão com diferentes direcções dos gases de combustão e de RSU. Esquerda – Corrente unidireccional; Centro – Contracorrente; Direita – Corrente média.</i>	6
<b>Figura 1.2</b> – <i>Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos da Meia Serra.</i>	10
<b>Figura 1.3</b> – <i>Instalação de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos.</i>	11
<b>Figura 1.4</b> – <i>Cais de descarga.</i>	12
<b>Figura 1.5</b> – <i>Garra da fossa de resíduos.</i>	12
<b>Figura 1.6</b> – <i>Introdução dos resíduos no sistema de alimentação.</i>	13
<b>Figura 1.7</b> – <i>Êmbolo de alimentação.</i>	13
<b>Figura 1.8</b> – <i>Tubulares do interior da caldeira (parte superior) para a produção de vapor.</i>	14
<b>Figura 1.9</b> – <i>Atomizador de leite de cal (esquerda); atomizador colocado na parte superior do depurador (centro); depurador visto da base (direita).</i>	15
<b>Figura 1.10</b> – <i>Filtro de mangas (esquerda); mangas de tecido (centro); parte inferior das mangas (direita).</i>	16
<b>Figura 1.11</b> – <i>Descarga de cinzas inertizadas (esquerda) e aterro de cinzas (direita).</i>	17
<b>Figura 1.12</b> – <i>Interior do transportador de arrasto (esquerda) e tremonhas de escórias finas situadas abaixo da grelha de rolos e acima do transportador de arraste (direita).</i>	17
<b>Figura 1.13</b> – <i>Extractor de escórias.</i>	18
<b>Figura 1.14</b> – <i>Correias transportadoras.</i>	18
<b>Figura 1.15</b> – <i>Correias transportadoras (esquerda), edifício de escórias e transporte para aterro de escórias (direita).</i>	19
<b>Figura 1.16</b> – <i>Queimador de ignição.</i>	19
<b>Figura 1.17</b> – <i>Diagrama de funcionamento da Instalação de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos da Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos da Meia Serra.</i>	21
<b>Figura 1.18</b> – <i>Características gerais a exigir dos agregados.</i>	24
<b>Figura 1.19</b> – <i>Máquina de Los Angeles para a realização do ensaio de desgaste de agregados.</i>	25
<b>Figura 1.20</b> – <i>Máquina tipo para o ensaio de Los Angeles.</i>	25

<b>Figura 2.1</b> – <i>Colher de secção rectangular.</i>	30
<b>Figura 2.2</b> – <i>Pilha de agregado cónica – Edifício de escórias da ETRS.</i>	31
<b>Figura 2.3</b> – <i>A) Esquerda - Esquartelamento com duas diagonais; B) Direita – Separação e rejeição de dois quartos.</i>	31
<b>Figura 2.4</b> – <i>Esquartelador.</i>	32
<b>Figura 2.5</b> – <i>Utilização do esquartelador. (LREC)</i>	32
<b>Figura 2.6</b> – <i>Lavagem das escórias num peneiro com abertura de malha de 63 <math>\mu\text{m}</math>.</i>	34
<b>Figura 2.7</b> – <i>Série de peneiros utilizada na análise granulométrica. A) Esquerda – LREC; B) Direita – Laboratório da Valor Ambiente.</i>	35
<b>Figura 2.8</b> – <i>Requisitos gerais dos peneiros de barras.</i>	36
<b>Figura 2.9</b> – <i>Peneiro de barras utilizado na determinação do índice de achatamento. (LREC)</i>	37
<b>Figura 2.10</b> – <i>Mancha de suspensão em papel de filtro com a presença de auroféria azul, indicativo da presença de azul-de-metileno excedente.</i>	39
<b>Figura 2.11</b> – <i>Equipamentos utilizados na realização do ensaio de azul-de-metileno.</i>	39
<b>Figura 2.12</b> – <i>Medição de <math>h_1</math> e <math>h_2</math> na determinação do teor equivalente de areia.</i>	40
<b>Figura 2.13</b> – <i>Esquema de um equipamento típico para a determinação do coeficiente micro-Deval.</i>	42
<b>Figura 2.14</b> – <i>Equipamento utilizado para a determinação do coeficiente micro-Deval. (LREC)</i>	43
<b>Figura 2.15</b> – <i>Determinação da massa volúmica das escórias pelo método do picnómetro.</i>	44
<b>Figura 2.16</b> – <i>Moldes utilizados na preparação dos provetes de argamassa (esquerda). Enchimento dos moldes (direita). (LREC)</i>	48
<b>Figura 2.17</b> – <i>Aparelho utilizado na realização de ensaios de resistência à compressão e à flexão. (LREC)</i>	49
<b>Figura 2.18</b> – <i>Aparelho utilizado no Método de Vicat. (LREC)</i>	49
<b>Figura 2.19</b> – <i>Molde utilizado na elaboração de provetes para a determinação da retracção. (LREC)</i>	50
<b>Figura 2.20</b> – <i>Aparelho utilizado nas medidas de retracção dos provetes de argamassa. (LREC)</i>	50
<b>Figura 2.21</b> – <i>Representação gráfica do fuso granulométrico e das curvas das formulações preparadas.</i>	53

<b>Figura 2.22</b> – <i>Moldes utilizados na produção de provetes para o método Marshall. (LREC)</i>	54
<b>Figura 2.23</b> – <i>Martelo de compactação. (LREC)</i>	54
<b>Figura 2.24</b> – <i>Provetes elaborados para o ensaio Marshall.</i>	55
<b>Figura 2.25</b> – <i>Equipamento utilizado no ensaio Marshall. (LREC)</i>	56
<b>Figura 3.1</b> – <i>Material retido acima do peneiro de 16 mm.</i>	60
<b>Figura 3.2</b> – <i>Distribuição granulométrica das escórias – 1 a 5 de Março de 2010 (Valor Ambiente).</i>	61
<b>Figura 3.3</b> – <i>Análise granulométrica das escórias – 17 a 21 de Maio de 2010. (LREC)</i>	63
<b>Figura 3.4</b> – <i>Escórias após lavagem dos finos.</i>	63
<b>Figura 3.5</b> – <i>Teor de sulfatos solúveis em meio ácido, de enxofre total e de cloretos.</i>	67
<b>Figura 3.6</b> – <i>Difractograma de raios X das escórias (amostra 1).</i>	69
<b>Figura 3.7</b> – <i>Difractograma de raios X das escórias (amostra 2).</i>	69
<b>Figura 3.8</b> – <i>Tempo de início de presa das formulações de argamassa.</i>	76
<b>Figura 3.9</b> – <i>Retracção dos provetes de argamassa.</i>	77
<b>Figura 3.10</b> – <i>Baridade aparente e baridade máxima teórica dos provetes das misturas betuminosas.</i>	78
<b>Figura 3.11</b> – <i>Porosidade dos provetes das misturas betuminosas.</i>	78
<b>Figura 3.12</b> – <i>Estabilidade dos provetes das misturas betuminosas.</i>	79
<b>Figura 3.13</b> – <i>Deformação dos provetes das misturas betuminosas.</i>	79

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1.I</b> – <i>Processos térmicos de incineração. RDF (refuse-derived fuel) – RSU misturado com carvão ou combustível líquido (aumentando assim o seu poder calorífico) e compactado.</i>	4
<b>Tabela 1.II</b> – <i>Composição de escórias (% em peso de óxidos) provenientes da incineração de RSU de duas empresas diferentes, determinada pelo método de fluorescência de raio-X.</i>	7
<b>Tabela 2.I</b> – <i>Requisitos presentes na norma NP EN 13242 de 2005 e as respectivas normas com os procedimentos normalizados.</i>	29
<b>Tabela 2.II</b> – <i>Aberturas quadradas dos peneiros para especificar as dimensões dos agregados.</i>	33
<b>Tabela 2.III</b> – <i>Massa dos provetes de ensaio em função da máxima dimensão D, para agregados de densidade compreendida entre 2000 kg/m<sup>3</sup> e 3000 kg/m<sup>3</sup>.</i>	34
<b>Tabela 2.IV</b> – <i>Correspondência dos peneiros de barras com as fracções das partículas di/Di.</i>	37
<b>Tabela 2.V</b> – <i>Formulação de argamassas com substituição de areia por escórias (15% e 30% em peso).</i>	48
<b>Tabela 2.VI</b> – <i>Formulação das misturas betuminosas.</i>	52
<b>Tabela 3.I</b> – <i>Análise granulométrica das escórias – 1 a 5 de Março de 2010 (Valor Ambiente).</i>	61
<b>Tabela 3.II</b> – <i>Análise granulométrica das escórias – 17 a 21 de Maio de 2010 (LREC).</i>	62
<b>Tabela 3.III</b> – <i>Valores do índice de achatamento das escórias.</i>	64
<b>Tabela 3.IV</b> – <i>Teor equivalente de areia das escórias.</i>	64
<b>Tabela 3.V</b> – <i>Valores de resistência ao desgaste – coeficiente de micro-Deval.</i>	65
<b>Tabela 3.VI</b> – <i>Massa volúmica das escórias.</i>	66
<b>Tabela 3.VII</b> – <i>Variação temporal do teor de humidade e da percentagem de inqueimados nas escórias.</i>	68
<b>Tabela 3.VIII</b> – <i>Composição química das escórias, em percentagem ponderal de óxidos, determinada por espectroscopia de fluorescência de raios-X.</i>	70
<b>Tabela 3.IX</b> – <i>Resumo das propriedades ensaiadas nas escórias.</i>	72
<b>Tabela 3.X</b> – <i>Algumas propriedades exigidas aos agregados utilizados em betões e argamassas.</i>	72
<b>Tabela 3.XI</b> – <i>Propriedades dos agregados para Camadas de misturas betuminosas a quente – Camada de base.</i>	74

<b>Tabela 3.XII</b> – <i>Propriedades do agregado britado de granulometria extensa a tratar com cimento e aplicar em misturas de sub-base.</i>	75
<b>Tabela 3.XIII</b> – <i>Resultados obtidos nos ensaios de flexão e compressão efectuados aos provetes de argamassa.</i>	76
<b>Tabela A.I</b> – <i>Análise granulométrica da areia utilizada na formulação da argamassa.</i>	107
<b>Tabela A.II</b> – <i>Análise granulométrica dos agregados utilizados na formulação da mistura betuminosa.</i>	107
<b>Tabela A.III</b> – <i>Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de referência.</i>	109
<b>Tabela A.IV</b> – <i>Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes com 10% de escórias.</i>	109
<b>Tabela A.V</b> – <i>Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes com 20% de escórias.</i>	109
<b>Tabela A.VI</b> – <i>Limites gerais para a granulometria.</i>	111
<b>Tabela A.VII</b> – <i>Tolerâncias da granulometria típica do agregado de granulometria extensa.</i>	111
<b>Tabela A.VIII</b> – <i>Categorias para os valores máximos do teor de finos.</i>	111
<b>Tabela A.IX</b> – <i>Categorias para os valores máximos do índice de achatamento.</i>	111
<b>Tabela A.X</b> – <i>Categorias para os valores máximos do coeficiente Los Angeles.</i>	112
<b>Tabela A.XI</b> – <i>Categorias para os valores máximos da resistência ao desgaste por atrito.</i>	112
<b>Tabela A.XII</b> – <i>Categorias para o valor máximo do teor de sulfatos solúveis em ácido.</i>	112
<b>Tabela A.XIII</b> – <i>Categorias para os valores máximos do teor de enxofre total.</i>	112
<b>Tabela A.XIV</b> – <i>Características dos agregados utilizados nas misturas betuminosas (Prebel).</i>	114



# Capítulo I



*Introdução*

---



## **1.1. Objectivo**

Este trabalho teve por objectivo o estudo da potencial aplicação de escórias provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos como agregados em argamassas e betões ou em pavimentação rodoviária. O estudo foi realizado segundo as directrizes da norma portuguesa NP EN 13242 de 2005 e os ensaios decorreram na Universidade de Aveiro, no laboratório da Empresa e no Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), Madeira. As escórias são provenientes de uma unidade industrial da Região Autónoma da Madeira, Valor Ambiente S.A., que faz a gestão do sistema de transferência, triagem, tratamento e valorização dos resíduos do arquipélago. Numa segunda fase foi feito um estágio na Empresa.

## **1.2. Enquadramento**

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é um problema crescente, tanto nos países desenvolvidos como em vias de desenvolvimento, particularmente onde existe uma elevada densidade populacional.

A descarga de RSU em lixeiras é interdita, quer por razões de saúde pública, quer por razões ambientais. Mesmo que estas razões não fossem tomadas em conta, o que seria inaceitável, bastaria a área ocupada pelos resíduos para fazer abandonar esta solução. [1]

### **1.2.1. Incineração**

Com vista a reduzir as quantidades de resíduos conduzidas a aterro sanitário, o processo de tratamento por incineração tem ganho importância como uma parte essencial na estratégia de gestão integrada dos RSU. Este processo tem como objectivo a eliminação dos RSU através da sua combustão controlada, minimizan-

do o volume de produtos finais a conduzir a aterro. Estes produtos, cinzas e escórias, são, em peso, cerca de 20% dos RSU incinerados. [1]

### 1.2.1.1. Processo de incineração

Uma central de tratamento de RSU por incineração é constituída pelo incinerador, pelos sistemas de alimentação de resíduos, de combustão e de ar, bem como por equipamentos e dispositivos de controlo, de registo e de vigilância podendo ter, ou não, a recuperação do calor produzido por combustão.

A incineração envolve processos térmicos com o objectivo de reduzir os RSU, transformando-os quer em produtos reutilizáveis (materiais e energia), quer em materiais inertes, facilmente armazenáveis (refugo) (Tabela 1.1). A redução esperada dos RSU resultante destes processos é da ordem de 90% em volume e 80% em peso. [1]

**Tabela 1.1** – *Processos térmicos de incineração. RDF (refuse-derived fuel) – RSU misturado com carvão ou combustível líquido (aumentando assim o seu poder calorífico) e compactado. [1]*

Processo	Produto da conversão	Pré-tratamento
<b>Combustão</b>	Energia sob a forma de vapor Electricidade	Inexistente RDF
<b>Gaseificação</b>	Gás pouco energético	Separação da parte orgânica Redução da dimensão das partículas RDF
<b>Oxidação húmida</b>	Ácidos orgânicos	Separação da parte orgânica Redução da dimensão das partículas RDF
<b>Transformação do vapor</b>	Gás medianamente energético	Separação da parte orgânica Redução da dimensão das partículas RDF
<b>Pirólise</b>	Gás medianamente energético Fuel líquido Fuel sólido	Separação da parte orgânica Redução da dimensão das partículas RDF
<b>Hidrogaseificação</b>	Gás medianamente energético Fuel líquido	Separação da parte orgânica Redução da dimensão das partículas RDF

O mais generalizado destes processos é o da combustão, pois permite a transformação de resíduos de natureza variada, no estado em que são recolhidos (não sofrem quase nenhuma alteração e/ou pré-tratamentos antes da combustão).

A incineração por combustão pode ser definida como a transformação dos RSU em produtos sólidos, líquidos e gasosos, com libertação de energia calorífica.

A energia produzida pela combustão é armazenada, em parte, nos resíduos da combustão e, por outro lado, transmitida por convecção, radiação e condução ao sistema de incineração, ao combustível de alimentação e aos resíduos. [1]

Ao nível sólido recuperam-se escórias e cinzas e ao nível gasoso são emitidos, principalmente,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Outros gases, tais como HF,  $\text{SO}_2$ , HCl e  $\text{NH}_3$ , são produzidos devido às variações da quantidade dos elementos contidos nos RSU que não cumprem as condições ideais de combustão completa. Ainda podem ser emitidos COT (compostos orgânicos totais) e CO, que dependem essencialmente das condições de queima.

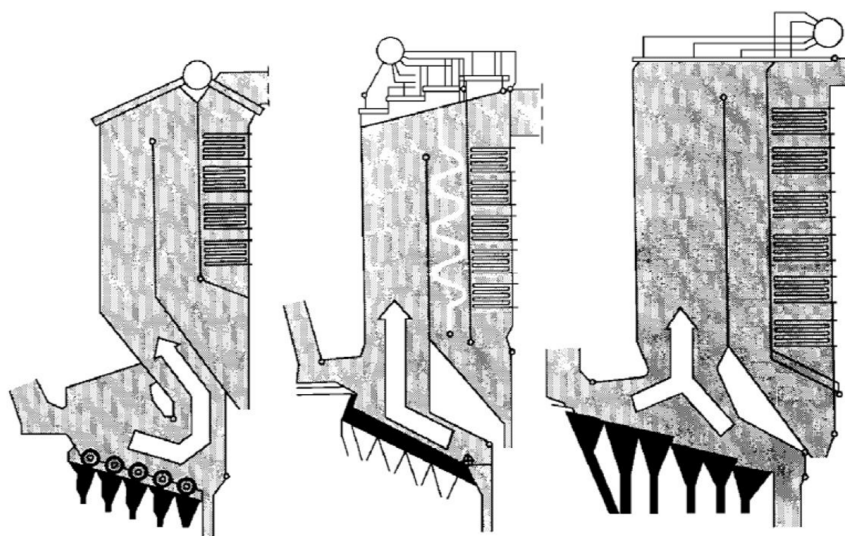
Tendo em consideração a quantidade de oxigénio em jogo na combustão, tem-se:

- Combustão estequiométrica – combustão completa;
- Combustão com excesso de ar – combustão completa com adição de ar;
- Combustão com falta de ar – gaseificação ou combustão incompleta.

Devido às variações do poder calorífico dos RSU, de forma a garantir uma combustão completa, é necessário efectuar o processo com uma taxa de ar de 40% a 100% superior à das condições estequiométricas (que varia segundo o tipo de RSU e o tipo de incinerador). Todavia, pode-se aproveitar o excesso de ar na câmara de combustão para ajudar a satisfazer a regra dos três T: temperatura, tempo

e turbulência. Com efeito, o excesso de ar permite regularizar a temperatura e melhorar a mistura dos RSU (turbulência).

- Temperatura – A temperatura não deve ser inferior a 850 °C para evitar as emissões de odores. Uma temperatura superior a 980 °C permite minimizar as emissões de dioxinas, furanos e outras partículas orgânicas; [1]
- Tempo – O tempo necessário a uma combustão completa dos RSU depende, essencialmente, do design da câmara de combustão. Podem ser distinguidos três tipos segundo a direcção dos gases de combustão em relação à direcção dos RSU: corrente unidireccional; contracorrente e corrente média (Figura 1.1). O tempo de permanência, segundo a legislação em vigor, não deve ser inferior a dois segundos; [2]
- Turbulência – A turbulência garante uma oxidação homogénea e mais eficiente de todos os resíduos. Esta pode ser optimizada através da injeção de ar na câmara de combustão ao nível da camada de resíduos a queimar, tendo em atenção que a pressão dentro dessa câmara deve ser inferior à pressão atmosférica, para impedir a saída dos gases pelos alçapões de controlo ou pelo orifício de entrada dos RSU. [1]



**Figura 1.1** – Três tipos de câmara de combustão com diferentes direcções dos gases de combustão e de RSU. Esquerda – Corrente unidireccional; Centro – Contracorrente; Direita – Corrente média. [2]

### 1.2.1.2. Escórias

Da incineração resultam dois subprodutos principais. Com uma massa de cerca de 80% do total, as escórias são o subproduto mais significativo, sendo a fracção restante constituída por cinzas volantes. Estas quantidades significativas de escórias ainda têm como principal destino os aterros, cuja disponibilidade começa a ser limitada. À medida que a quantidade de RSU e os volumes de escórias resultantes aumentam, cresce a necessidade de desenvolver novas aplicações para a reutilização destes materiais. [3-5]

As escórias são uma mistura altamente heterogénea de metais ferrosos e não ferrosos, cerâmicos, vidro, outra matéria não combustível e orgânica residual. Esta composição está directamente relacionada com a composição do lixo que é incinerado e com as fontes dos vários elementos dos RSU. Têm sido publicados trabalhos que referem a composição química das escórias. Verifica-se, de um modo geral, reduzida variabilidade composicional, independentemente da origem dos RSU e do processo de incineração (Tabela 1.II). [6]

**Tabela 1.II** – *Composição de escórias (% em peso de óxidos) provenientes da incineração de RSU de duas empresas diferentes, determinada pelo método de fluorescência de raios X. [6]*

Óxidos	VALORSUL	LIPOR II	VALOR AMBIENTE
<b>SiO<sub>2</sub></b>	52.0	52.2	42.5
<b>CaO</b>	14.0	13.6	21.2
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6.8	6.8	7.3
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	6.0	3.6	6.3
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.9	7.7	7.9
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	5.5	2.9	6.1
<b>MgO</b>	2.0	3.0	2.6
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2.0	2.2	1.3
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.5	0.7	1.3
<b>PbO</b>	0.35	-	0.16
<b>ZnO</b>	0.3	-	0.3
<b>MnO</b>	0.1	0.1	0.1
<b>Perdas por ignição</b>	5.5	7.2	-

A eliminação e a reutilização dos subprodutos de incineração têm sido objecto de vários estudos. Para enfrentar as consequências da elevada produção de escórias, os governos europeus encorajaram o uso destes resíduos como agregados reciclados, não só para evitar o uso de matérias-primas naturais não renováveis, como para prevenir a ocupação e criação de aterros. Assim, diversas aplicações foram encontradas para as escórias de incineração de RSU. A prática mais generalizada é a reutilização como agregado para bases rodoviárias (camada de sub-base), que está sujeita a requisitos estritos, definidos de acordo com normas em vigor. Outra forma de reutilizar estes resíduos é como agregado em betão ou argamassas. Alguns estudos mostram que a substituição da areia por mais de 50% de escórias não afecta a durabilidade e resistência do betão. Outros investigadores estudaram a reutilização das escórias como substituto do cimento, onde percentagens até 15% foram consideradas aceitáveis. [5] Outros estudos apontaram também para a potencial utilização destes resíduos na elaboração de materiais vitrocerâmicos, através da fusão e posterior tratamento térmico de misturas bem definidas. [4]

### **1.2.2. Apresentação da Empresa de estágio**

A Valor Ambiente – Gestão e Administração de Resíduos da Madeira, S.A., adiante designada por Valor Ambiente, foi criada pelo Decreto Legislativo Regional n.º 28/2004/M, de 24 de Agosto, no contexto de uma política ambiental definida pelo Governo Regional da Madeira.

A esta sociedade anónima, de capitais exclusivamente públicos, foi concedida a exploração e manutenção do sistema de transferência, triagem, tratamento e valorização de resíduos sólidos da Região Autónoma da Madeira, adiante designado por Sistema, em regime de serviço público e de exclusividade. O contrato de



concessão foi outorgado com a Região a 23 de Dezembro de 2004, por um prazo de 25 anos.

A empresa é responsável pela gestão do Sistema e de todas as suas instalações, isto é, por assegurar, de forma regular, contínua e eficiente, a transferência, a triagem, o tratamento e a valorização dos resíduos produzidos. [7]

A concessão atribuída à Valor Ambiente tem por objectivo não só a operação e manutenção do Sistema, como também a concepção e construção das infra-estruturas e equipamentos necessários à sua plena implementação e integração.

De modo a proceder à gestão sustentável dos resíduos, o Sistema é constituído por cinco instalações:

- Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos (ETRS), no sítio da Meia Serra do concelho de Santa Cruz;
- Centro de Processamento de Resíduos Sólidos (CPRS), na ilha do Porto Santo;
- Estação de Transferência da Zona Oeste (ETZO), no sítio da Meia Légua do concelho da Ribeira Brava;
- Estação de Transferência da Zona Leste (ETZL), no sítio do Porto Novo do concelho de Santa Cruz;
- Estação de Triagem da Madeira (ET), no sítio do Porto Novo do concelho de Santa Cruz.

As diversas instalações permitem, de modo adequado e ambientalmente correcto, otimizar o transporte dos resíduos recolhidos, proceder à valorização multimaterial através do envio de resíduos recolhidos selectivamente para reciclagem e proceder à valorização energética e orgânica dos resíduos recolhidos indiferenciadamente. [7]

### 1.2.3. ETRS da Meia Serra

A ETRS da Meia Serra constitui a principal infra-estrutura do sistema e integra soluções de valorização, tratamento e destino final de resíduos existentes na Região. É composta por várias instalações de tratamento de resíduos sólidos, das quais se pode destacar pela sua importância:

- Instalação de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos – IIRSU;
- Instalação de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos – ICRSU;
- Instalação de Incineração de Resíduos Hospitalares e de Matadouros – IIRHM;
- Aterros.

A ETRS é constituída também por uma série de edifícios e instalações de apoio, tais como: básculas/portaria, oficinas e armazéns, uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), um edifício administrativo, um edifício social e de apoio, uma estação elevatória do Ribeiro Serrão, um sistema de detecção e combate a incêndios, uma plataforma de armazenagem, trituração e acondicionamento de pneus e, por fim, uma prensa enfardadora de metais. A Figura 1.2 mostra a vista aérea da Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos da Meia Serra. [8]



**Figura 1.2** – Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos da Meia Serra. [8]

### 1.2.3.1. IIRSU

A instalação de incineração de resíduos sólidos urbanos constitui a principal infra-estrutura de tratamento de resíduos da ETRS. Esta instalação consiste em duas linhas de tratamento, cada uma com capacidade para processar 8 toneladas de RSU/hora, com recuperação de energia. A instalação está preparada para a sua ampliação no futuro, com mais uma linha de incineração de igual capacidade. Na Figura 1.3 pode ser visualizada a instalação de incineração de resíduos sólidos urbanos.



**Figura 1.3** – *Instalação de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos.*

A tecnologia utilizada consiste na queima de RSU sem qualquer tratamento ou separação prévia, através de um incinerador de grelha Dusseldorf, constituído por 6 rolos. A energia resultante da queima dos resíduos é recuperada em caldeiras, onde é produzido vapor a 38,8 bar e a 400 °C, que alimenta uma turbina para a produção de energia eléctrica (cerca de 50 GWh nas condições normais). Parte dessa energia é consumida internamente, para accionamento dos diversos equipamentos, sendo exportados para a rede eléctrica pública cerca de 38 a 40 GWh. [9]

### 1.2.3.1.1. Descrição técnica do processo (IIRSU)

O processo inicia-se com a entrada das viaturas de recolha que entram no cais de descarga e descarregam os resíduos num dos seis pontos de descarga da fossa de resíduos (Figura 1.4). A ponte rolante da fossa de resíduos encarrega-se da movimentação dos resíduos dentro da fossa, através de uma das duas garras existentes (Figura 1.5). As tarefas mais importantes, nesta etapa, são o desimpedimento dos pontos de descarga na fossa, o empilhamento, mistura e homogeneização dos resíduos. Os resíduos volumosos são levados ao triturador. Os resíduos misturados e homogeneizados são posteriormente introduzidos no sistema de alimentação de resíduos pela ponte rolante (Figura 1.6). O sistema de alimentação doseia e introduz os resíduos na grelha de rolos por intermédio do êmbolo de alimentação (Figura 1.7). Além disso existe uma comporta de selagem na tremonha do sistema de alimentação, destinada à separação das zonas da fossa e da grelha de rolos para assegurar a protecção contra incêndios.



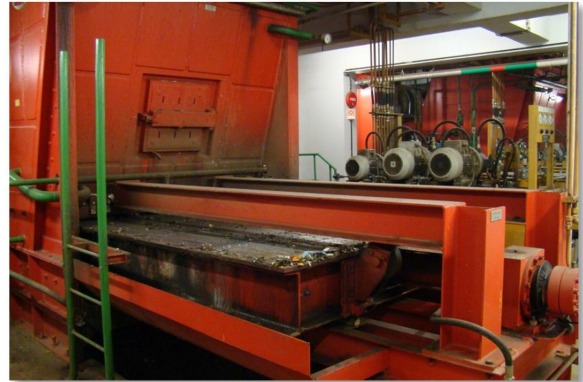
**Figura 1.4** – Cais de descarga.



**Figura 1.5** – Garra da fossa de resíduos.



**Figura 1.6** – *Introdução dos resíduos no sistema de alimentação.*



**Figura 1.7** – *Êmbolo de alimentação.*

A comporta possui um bloqueio automático que cumpre com os requisitos legais e assegura que a alimentação de resíduos só ocorre depois de atingida a temperatura mínima de 850 °C no fim da zona de pós-combustão da caldeira. A alimentação é interrompida se um dos valores de emissão controlados em contínuo for excedido, devido a uma avaria ou falha nos sistemas de tratamento de gases.

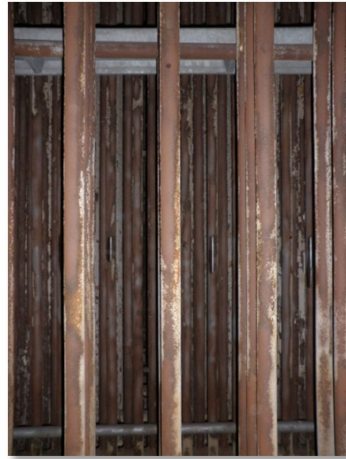
A quantidade de oxigénio a introduzir depende, em primeiro lugar, da natureza e do aspecto dos resíduos e actua no processo de incineração como combustível. No entanto, o oxigénio, introduzido sob a forma de ar, é também necessário ao arrefecimento da grelha de rolos. A introdução adequada do ar de combustão na câmara é efectuada mediante o seu fornecimento dividido em ar primário, secundário e gases de recirculação, constituindo o sistema de ar de combustão.

O ar primário é aspirado da fossa de resíduos, evitando assim a libertação de odores para o exterior, e introduzido nas várias zonas, nomeadamente por entre ranhuras existentes nos rolos, de acordo com o decurso da combustão. Os gases libertados requerem uma mistura turbulenta para assegurar uma combustão completa. Esta mistura poderá ser efectuada pelos gases de recirculação, entrando o oxigénio ainda não transformado do ar primário em contacto com os componentes



ainda não completamente queimados dos gases libertados. Outra possibilidade de mistura é a utilização de ar secundário, que é injectado na zona de estreitamento da passagem da câmara de combustão para o primeiro passo da caldeira. [10]

Os gases de combustão são arrefecidos na caldeira e geram vapor (Figura 1.8).



**Figura 1.8** – Tubulares do interior da caldeira (parte superior) para a produção de vapor.

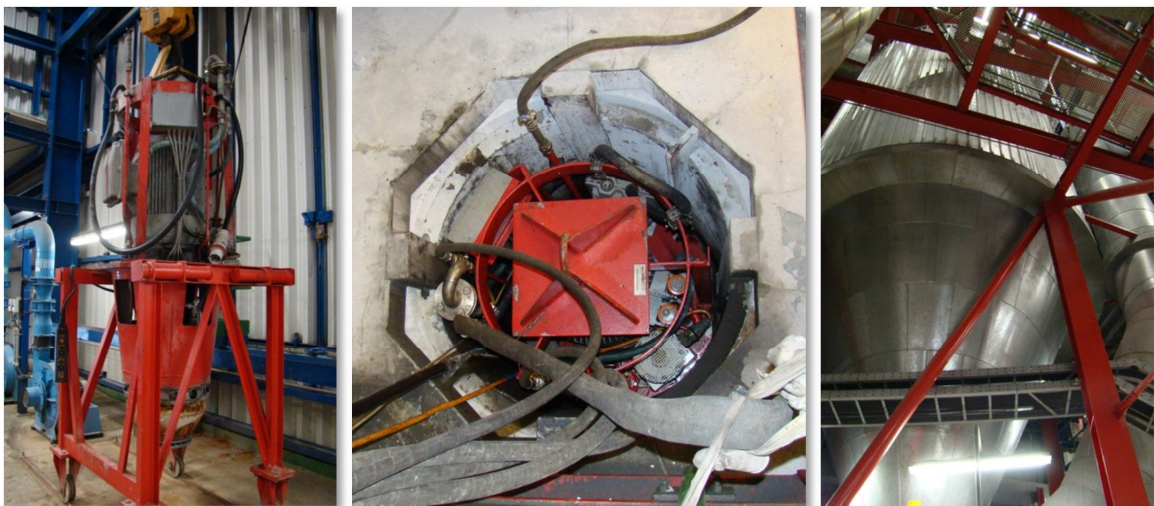
Para vencer a perda de pressão ao longo de toda a linha de incineração, e para a regulação da depressão na câmara de combustão, existe um ventilador de tiragem induzida a montante da entrada dos gases de combustão na chaminé, sendo toda a instalação operada em depressão.

Os gases de recirculação são retirados a jusante do ventilador de tiragem induzida. Para o reaquecimento dos gases de recirculação existe um permutador térmico instalado a jusante da tubuladura de admissão, operado com água quente da caldeira.

A construção da caldeira de circulação natural foi seleccionada de tal forma que a primeira corrente de radiação assegura a zona de incineração residual para os gases de combustão gerados na incineração dos resíduos, a uma temperatura

superior a 850 °C e um tempo de permanência superior a 2 segundos em todas as condições de operação, de acordo com os requisitos legais estabelecidos. Esta temperatura garante a combustão completa e adequada dos resíduos e a eliminação quase total das dioxinas e furanos.

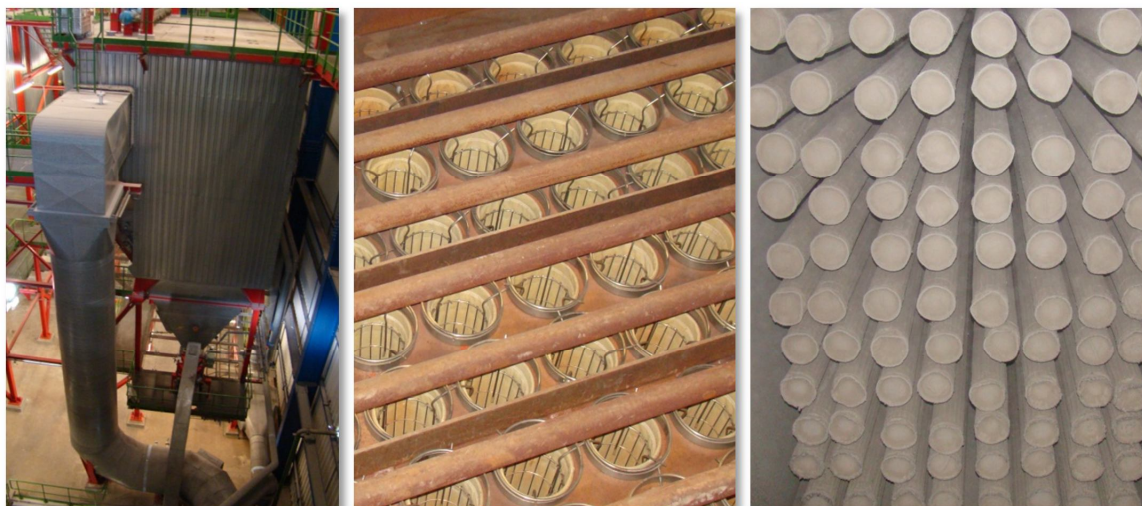
Os gases resultantes da combustão são, inicialmente, depurados no interior da caldeira, através da injeção de uma solução de ureia para redução das emissões de NO<sub>x</sub> a uma temperatura aproximada de 850 °C a 950 °C. Os gases também são depurados à saída da caldeira, num depurador semi-húmido (Figura 1.9), onde são transformados através de neutralização com uma suspensão de cal viva, carvão activado e água, designada por leite de cal.



**Figura 1.9** – Atomizador de leite de cal (esquerda); atomizador colocado na parte superior do depurador (centro); depurador visto da base (direita).

Os gases nocivos contidos no gás de combustão, tais como HCl, HF, SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub> são transformados na sua forma salina, com o auxílio do absorvente hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), e são retirados do sistema na forma de uma substância sólida. O carvão activado é adicionado para promover a adsorção de metais pesados, das combinações gaseiformes de mercúrio, das dioxinas e dos furanos. [10]

O sistema de tratamento de gases completa-se com um filtro de mangas (Figura 1.10), que retém praticamente a totalidade das partículas arrastadas pelos gases, antes destes serem libertados para a atmosfera através da chaminé. Este filtro de mangas é constituído por 4 compartimentos com mangas de tecido.



**Figura 1.10** – Filtro de mangas (esquerda); mangas de tecido (centro); parte inferior das mangas (direita).

Os gases de combustão descontaminados são eliminados através da chaminé para o meio ambiente. Os gases libertados pela chaminé cumprem os requisitos do Decreto Lei n.º 85/2005, de 28 de Abril, que transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2000/76/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de Dezembro, relativa à incineração de resíduos.

As cinzas volantes produzidas na caldeira são extraídas pelo sistema de extracção de cinzas da caldeira. As cinzas resultantes de todo o processo são inertizadas através de mistura de cimento e água e posteriormente levadas para o aterro de cinzas (Figura 1.11).





**Figura 1.11** – Descarga de cinzas inertizadas (esquerda) e aterro de cinzas (direita).

As escórias são descarregadas na extremidade inferior da grelha de rolos para um extractor submerso. As escórias finas caídas através da grelha de rolos são recolhidas por transportadores de arrasto (Figura 1.12) submersos e transportadas para o extractor (Figura 1.13). [10]



**Figura 1.12** – Interior do transportador de arrasto (esquerda) e tremonhas de escórias finas situadas abaixo da grelha de rolos e acima do transportador de arraste (direita).



**Figura 1.13** – *Extractor de escórias.* [2]

Um processo cíclico de compressão empurra as escórias arrefecidas pelo banho de água para as correias transportadoras do sistema de transporte e armazenamento de escórias (Figura 1.14).



**Figura 1.14** – *Correias transportadoras.*

As escórias são levadas pelas correias transportadoras para o edifício de escórias, onde é retirada a sucata ferrosa através de separadores magnéticos. Posteriormente as escórias são levadas para o aterro de escórias (Figura 1.15).



**Figura 1.15** – *Correias transportadoras (esquerda), edifício de escórias e transporte para aterro de escórias (direita).*

Cada linha de incineração é independente, ou seja, contém todos os dispositivos necessários ao processamento completo dos RSU.

As operações de arranque e paragem da IIRSU estão dotadas de um queimador de ignição no painel frontal da câmara de combustão (Figura 1.16) e um queimador auxiliar no primeiro passo de radiação da caldeira.



**Figura 1.16** – *Queimador de ignição.*

O primeiro queimador aquece a câmara de combustão durante o arranque, até esta atingir a temperatura necessária para iniciar a combustão de resíduos. No caso da energia contida nos resíduos não ser suficiente para manter a temperatura mínima requerida na câmara de combustão, o queimador auxiliar fornece combustão de apoio.

A Figura 1.17 mostra o diagrama geral de funcionamento da instalação de incineração de resíduos sólidos urbanos. [10]



Reciclagem de escórias de incineração de RSU como agregados para a construção

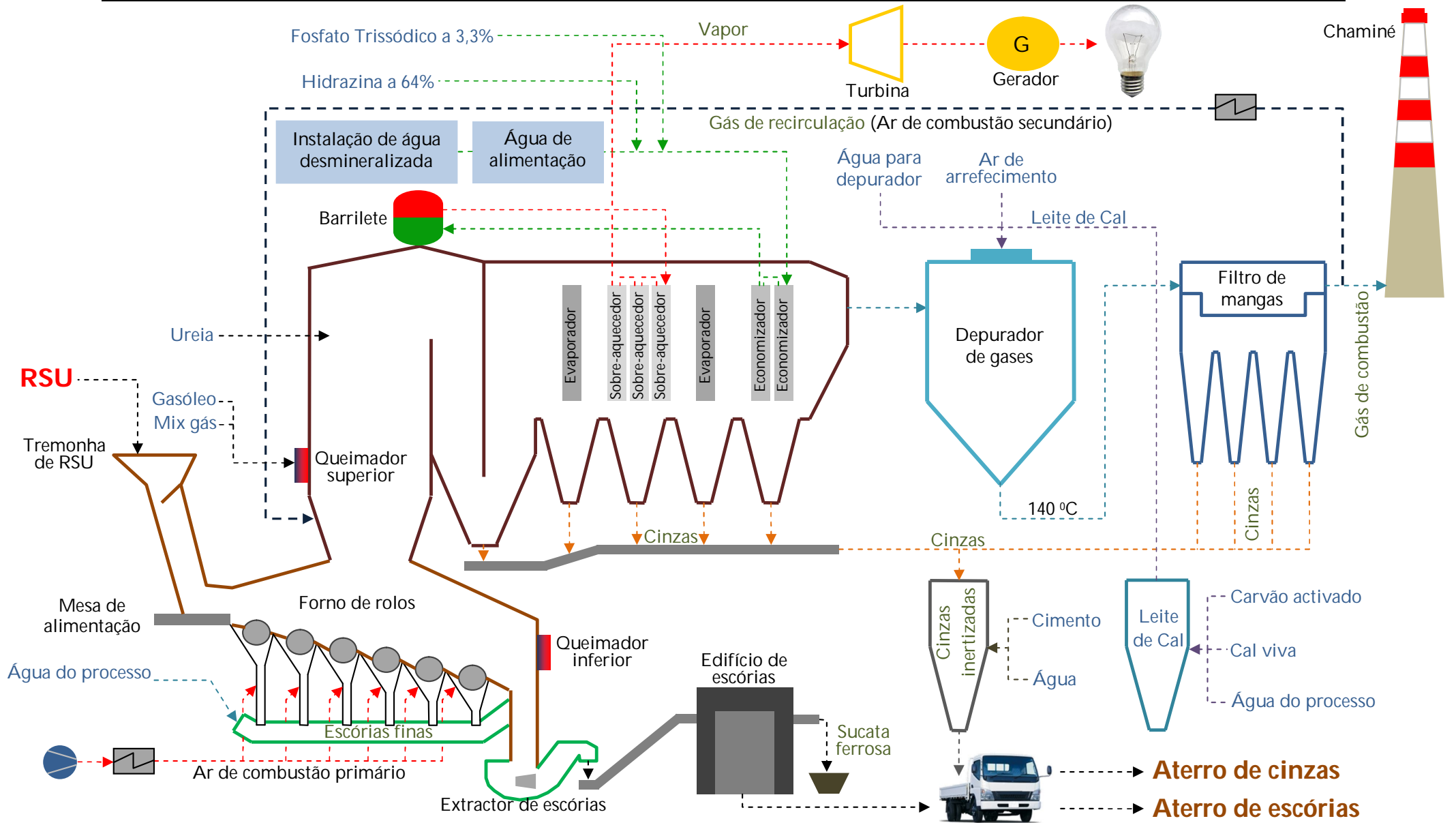


Figura 1.17 – Diagrama de funcionamento da Instalação de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos da Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos da Meia Serra.

## 1.3. Agregados

### 1.3.1. Agregados na construção civil

A argamassa e o betão são materiais constituídos pela mistura, devidamente proporcionada, de agregados, ligante hidráulico, água e, se necessário, adjuvantes. O ligante reage com a água endurecendo e a mistura adquire coesão e resistência que lhe permite servir como material de construção.

O objectivo deve ser o uso da maior quantidade possível de agregados, tal que as suas partículas sejam aglomeradas pela pasta de cimento. Para tal, devem usar-se partículas de granulometria variável e ampla, desde areia fina até agregados com dimensões grosseiras, de modo a haver um melhor empacotamento e diminuir a quantidade de cimento necessária. [11]

O agregado deriva normalmente de rochas naturais: depósitos arenosos ou fragmentação de granitos e calcários. Podem usar-se também agregados artificiais, especialmente concebidos para tal (caso da argila expandida) ou provenientes de operações de reciclagem de determinados materiais. As dimensões granulométricas variam geralmente entre 0,1 mm e 20 cm. [11]

As propriedades exigidas a um agregado, usado para produzir betões e argamassas, são de natureza geométrica, física e química. Estas podem afectar profundamente o comportamento das misturas. O teor e natureza das impurezas presentes (matéria orgânica, partículas argilosas, etc.) afectam o desempenho do material. A matéria orgânica pode impedir uma normal hidratação do ligante e alterar o desenvolvimento da resistência mecânica do betão ou da argamassa. Quando se usam agregados provenientes do mar, a presença de sais solúveis (cloreto de sódio e sulfato de magnésio) deve ser minimizada. Além do aparecimento de manchas salinas, pode haver diminuição da velocidade de presa do cimento. Em betão pré-esforçado, a presença destes sais é crítica (em particular os iões de cloro), porque pode provocar corrosão dos cabos de aço. [12]

Como atrás se disse, a distribuição granulométrica das partículas de agregado deve assegurar o preenchimento de vazios que o cimento não preenche na mistura. Esta acção é assegurada pela fracção fina. No entanto, o uso de elevadas percentagens de agregados finos pode induzir consequências indesejadas, nomeadamente a deterioração da ligação da pasta de cimento ao material inerte, com reflexos óbvios no desempenho mecânico, em particular perante esforços de tracção e flexão. [12]

Todas estas propriedades são definidas nas normas em vigor e pelos construtores, como será descrito mais adiante.

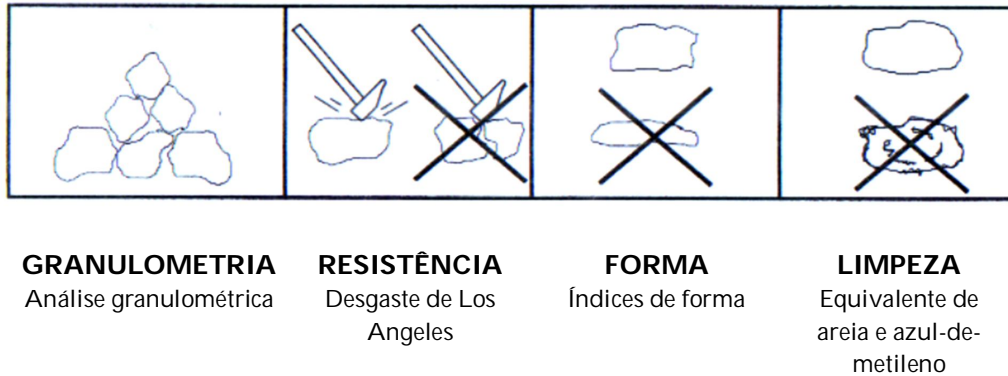
### **1.3.2. Agregados na construção rodoviária**

A utilização de agregados tem como objectivo a formação de um esqueleto pétreo que resista à acção do tráfego, sendo a sua resistência devida ao rearranjo dos grãos. O material agregado que constitui as misturas betuminosas para pavimentação rodoviária corresponde geralmente a 90-95% do seu peso, ou 75-85% em volume.

A escolha adequada dos materiais (agregados, filler e ligante) e a optimização das proporções desses mesmos materiais têm que garantir uma mistura com:

- estabilidade dimensional, de modo a resistir às acções do tráfego sem evidenciar deformações;
- porosidade mínima após compactação, de modo a permitir um ligeiro aumento da densidade quando entra em serviço, sob a acção do tráfego pesado, para evitar refluxo de betume ou perda de estabilidade;
- trabalhabilidade, de modo a permitir uma eficiente colocação e compactação do material;
- durabilidade. [13]

Em termos genéricos, quando se utiliza um determinado material granular no fabrico de misturas betuminosas há que determinar certas características fundamentais (Figura 1.18): granulometria e forma das partículas, resistência ao desgaste e à fragmentação, limpeza, estado de adesão ao ligante, entre outras. [13]



**Figura 1.18** – Características gerais a exigir dos agregados. [13]

A granulometria dum agregado deve ser a adequada, isto é, deve originar a obtenção de um esqueleto que distribua convenientemente as cargas em profundidade. Esta característica consegue-se com arranjo adequado dos grãos do material. Na prática e como atrás se disse, usam-se agregados de granulometria distinta, partículas finas e grosseiras, de modo a obter uma curva de distribuição granulométrica dentro dos limites de um fuso pré-definido (curvas granulométricas correspondentes ao limite superior e inferior pré-definidos). Esta curva deve ter perfil semelhante ao expresso pela curva granulométrica média do fuso ou, pelo menos, semelhante a uma das curvas limite que formam esse fuso. A curva de distribuição granulométrica é de grande importância para aferir da possível falta de partículas com determinada dimensão. [13]

A elevada resistência mecânica obtém-se por recurso a materiais duros e resistentes ao choque e ao atrito, que ocorre entre as suas próprias partículas, e ao desgaste produzido pelo tráfego na superfície do pavimento. Em geral, esta resis-



tência avalia-se pelo ensaio de desgaste na máquina de Los Angeles (Figura 1.19 e 1.20) seguindo um procedimento normalizado. [13]



Figura 1.19 – Máquina de Los Angeles para a realização do ensaio de desgaste de agregados.

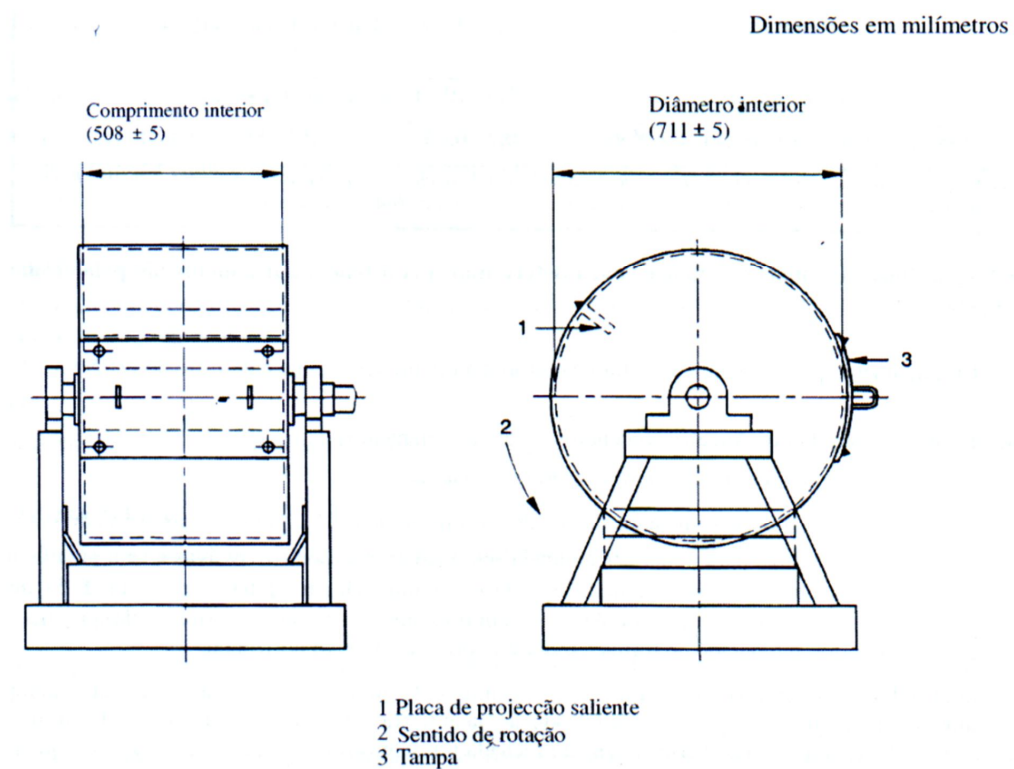


Figura 1.20 – Máquina tipo para o ensaio de Los Angeles. [14]

A forma das partículas de agregado deverá ser aproximadamente cúbica, não sendo aconselhável a utilização de partículas lamelares ou alongadas, que são mais frágeis. A forma caracteriza-se pelos índices de forma.

Os agregados deverão estar livres de impurezas (argila, matéria orgânica, etc.) que podem reduzir o atrito entre os grãos e gerar variações volumétricas com a água ou, ainda, dificultar o envolvimento pelos ligantes. O grau de limpeza mede-se pela determinação do teor equivalente de areia ou, mais eficazmente, pela adição de azul-de-metileno. [13]

Finalmente, exige-se uma boa adesividade dos agregados ao betume. Quanto melhor for a afinidade química do agregado para com o betume, mais difícil será separá-lo do agregado. Para medir a maior ou menor dificuldade com que a água separa o betume em contacto com o agregado e, portanto, medir a adesividade em condições de funcionamento severas, usam-se dois métodos. Um consiste numa inspecção visual do agregado revestido com ligante, para verificar qual a percentagem daquele que ficou sem revestimento após um certo tempo de imersão em água em condições normalizadas. Outro método, mais objectivo, consiste em ensaiar à compressão provetes cilíndricos de mistura betuminosa imersos em água durante um certo tempo, comparando os resultados com os obtidos sobre amostras semelhantes não sujeitas a imersão. A redução de resistência (em geral não deve exceder 25%) é a grandeza usada para quantificar a adesividade obtida.

As características necessárias para que agregados possam constituir camadas de pavimentos rodoviários são habitualmente expressas em Cadernos de Encargos das obras promovidas pelas administrações rodoviárias. [13]

# Capítulo II



*Procedimento Experimental*

---



Este estudo foi efectuado segundo as directrizes da norma portuguesa NP EN 13242 de 2005, "Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária". Esta norma especifica as propriedades de agregados não ligados obtidos a partir do processamento de materiais naturais, artificiais ou reciclados para a utilização em materiais tratados com ligantes hidráulicos e materiais não tratados, para aplicações em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária. [15] A norma obriga ao cumprimento dos requisitos mencionados na Tabela 2.I. Os ensaios são realizados de acordo com procedimentos normalizados, de acordo com normas em vigor (indicadas à frente de cada requisito na Tabela 2.I). De acordo com o resultado de cada ensaio, o material é categorizado segundo tabelas presentes na norma supracitada.

**Tabela 2.I** – Requisitos presentes na norma NP EN 13242 de 2005 e as respectivas normas com os procedimentos normalizados. [15]

Requisitos geométricos		Requisitos químicos		Requisitos físicos	
Ensaio	Norma	Ensaio	Norma	Ensaio	Norma
<b>Dimensão dos agregados</b>	NP EN 13242 de 2005	<b>Sulfatos solúveis em meio ácido</b>	EN 1744-1 de 1998, secção 12	<b>Coefficiente de Los Angeles</b>	NP EN 1097-2 de 2002, secção 5
<b>Granulometria</b>	NP EN 933-1 de 2000	<b>Enxofre total</b>	EN 1744-1 de 1998, secção 11	<b>Coefficiente de micro-Deval</b>	NP EN 1097-1 de 2002
<b>Índice de achatamento</b>	NP EN 933-3 de 2002	<b>Presença de matéria orgânica</b>	---	<b>Massa volumétrica das partículas e absorção de água</b>	NP EN 1097-6 de 2003, secção 7, 8 e 9
<b>Teor de finos</b>	NP EN 933-1 de 2000	<b>Cloretos</b>	EN 1744-1 de 1998, secção 7		
<b>Qualidade dos finos</b>	NP EN 933-8 e 9 de 2002				

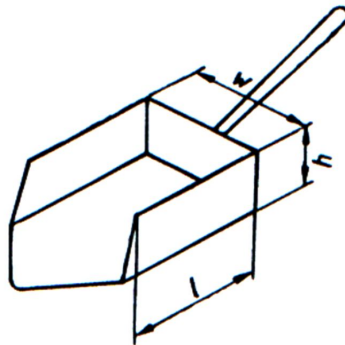
## 2.1. Amostragem e redução

A amostragem foi efectuada segundo a norma NP EN 932-1 de 2002, que refere que a amostragem deve ser feita tendo em conta os seguintes parâmetros:

- O tipo de agregado;

- O objectivo da amostragem e propriedades a serem ensaiadas;
- Identificação dos pontos de amostragem;
- A massa aproximada das tomas;
- O número de tomas;
- O equipamento de amostragem a ser utilizado.

O equipamento para amostragem deve estar de acordo com os parâmetros descritos na norma. A colher de recolha da amostra, representada na Figura 2.1, deve ter uma largura  $w$  não inferior a três vezes a maior dimensão dos agregados do lote e, em caso algum, menor que 10 mm.



**Figura 2.1** – Colher de secção rectangular. [16]

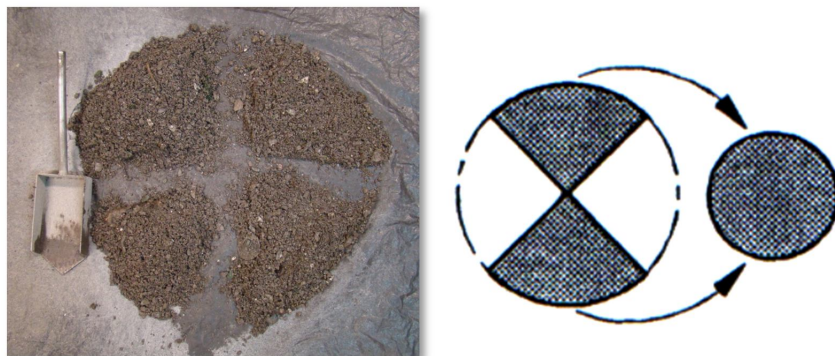
As escórias, no final do processo, caem de uma extremidade de uma correia transportadora fixa, formando uma pilha cónica, como mostra a Figura 2.2. Para que a amostragem seja significativa, é feita em quatro tomas na base da pilha e outras quatro no topo da pilha. A massa da amostra depende do tipo de ensaio e da maior dimensão tolerável para o agregado.



**Figura 2.2** – *Pilha de agregado cônica – Edifício de escórias da ETRS.*

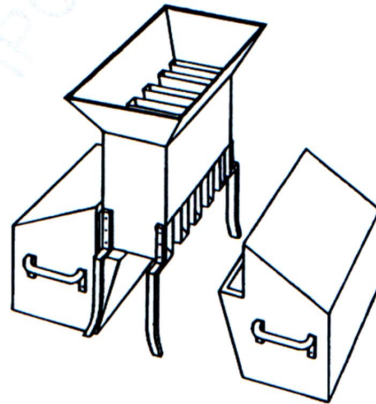
A redução da amostra pode ser feita de duas formas, por esquarteamento manual ou utilizando um esquarteador.

Na empresa é utilizado o esquarteamento manual. A amostra integral deve ser misturada e amontoada de maneira a formar um cone, virando-a com a pá até formar novo cone. Esta operação deve ser repetida três vezes. Para formar os cones, cada pazada deve ser depositada no topo do novo cone, de forma a que a distribuição das partículas seja uniforme. O terceiro cone deve ser espalmado até formar um monte achatado com uma espessura e diâmetro uniforme. O monte achatado é esquarteado com duas diagonais que se cruzam em ângulos rectos (Figura 2.3A). Os dois quartos opostos são desprezados, colocando a restante amostra numa nova pilha (Figura 2.3B). Este processo de mistura e esquarteamento é repetido até que se obtenha a amostra com a dimensão necessária.



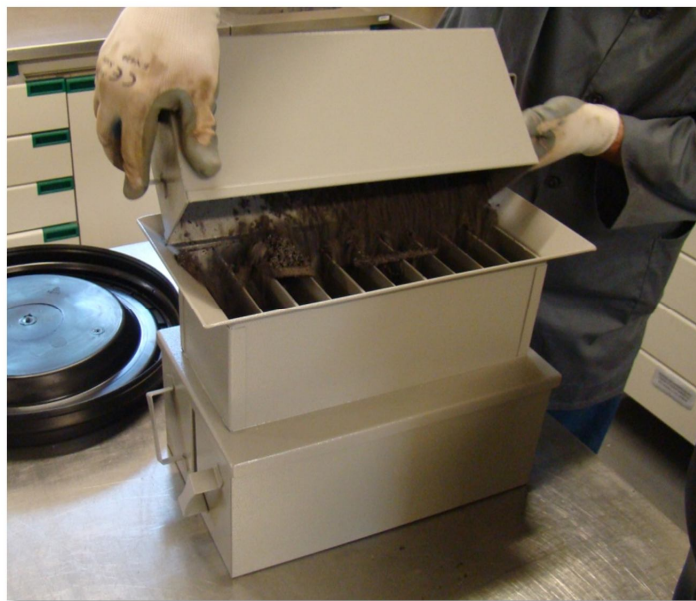
**Figura 2.3** – A) *Esquerda - Esquarteamento com duas diagonais; B) Direita – Separação e rejeição de dois quartos.* [16]

No LREC é utilizado um esquartelador (Figura 2.4). Este equipamento deve conter um número par de ranhuras, nunca inferior a oito.



**Figura 2.4** – Esquartelador. [16]

A amostra integral é colocada num dos recipientes do esquartelador e posteriormente despejada sobre a linha central do esquartelador (Figura 2.5). Os agregados presentes num dos dois recipientes que se encontram na base do esquartelador são ignorados. Esta operação é repetida até que seja atingida a dimensão desejada para a amostra laboratorial. [16]



**Figura 2.5** – Utilização do esquartelador. (LREC)



## 2.2. Requisitos geométricos

### 2.2.1. Dimensão dos agregados

O primeiro parâmetro a ser determinado é a dimensão dos agregados. A dimensão máxima tolerável determina a amostragem para todos os restantes ensaios. Esta determinação é feita por peneiração, utilizando telas com aberturas indicadas na Tabela 2.II. Pode ser utilizada a série base, combinação da série base com a série 1 ou série base com a série 2. Não deve combinar-se a série 1 com a série 2.

**Tabela 2.II** – Aberturas quadradas dos peneiros para especificar as dimensões dos agregados. [15]

Série base (mm)	Série base mais série 1 (mm)	Série base mais série 2 (mm)
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5,6 (5)	-
-	-	6,3 (6)
8	8	8
-	-	10
-	11,2 (11)	-
-	-	12,5 (12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4	-
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
-	56	-
63	63	63
-	-	80
-	90	-

A dimensão do agregado foi expressa como  $d/D$ , sendo  $d$  a abertura do peneiro inferior e  $D$  a abertura do peneiro superior onde o agregado fica retido. As dimensões do agregado devem ter uma razão  $D/d$  não inferior a 1,4. [15]

## 2.2.2. Análise granulométrica e teor de finos

A análise granulométrica foi efectuada segundo a norma NP EN 933-1 de 2000.

Como já foi referido no ponto anterior, a massa da amostra depende da máxima dimensão  $D$  do agregado (Tabela 2.III).

**Tabela 2.III** – Massa dos provetes de ensaio em função da máxima dimensão  $D$ , para agregados de densidade compreendida entre  $2000 \text{ kg/m}^3$  e  $3000 \text{ kg/m}^3$ . [17]

Máxima dimensão $D$ (mm)	Massa do provete (mínimo) (kg)
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
$\leq 4$	0,2

Depois da amostragem e redução da amostra, como descrito no ponto 2.1, o material deve ter massa superior ao valor indicado na Tabela anterior, sem no entanto ser fixo ou pré-definido.

A amostra é colocada numa estufa a  $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  até ser atingida massa constante (durante um período de 24h). Depois de arrefecida, a amostra é pesada e registada a massa como  $M_i$ . O material é depois lavado e crivado num peneiro de  $63 \text{ }\mu\text{m}$  (Figura 2.6). A lavagem deve continuar até que a água se torne límpida. Este passo tem como objectivo a lavagem das partículas mais finas que tendencialmente aderem às partículas grosseiras.



**Figura 2.6** – Lavagem das escórias num peneiro com abertura de malha de  $63 \text{ }\mu\text{m}$ .

O material com granulometria superior a 63  $\mu\text{m}$  é colocado novamente na estufa a  $110\pm 5$   $^{\circ}\text{C}$  até ser atingida massa constante (durante um período de 24h). Depois de arrefecido, o material é pesado e registada a massa como  $M_2$ .

A peneiração é efectuada utilizando a seguinte série de peneiros (Figura 2.7 A) (aberturas quadradas em milímetros): 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 5,6; 8; 11,2; 16; 22,4; e 31,5.



**Figura 2.7** – Série de peneiros utilizada na análise granulométrica. A) Esquerda – LREC; B) Direita – Laboratório da Valor Ambiente.

Uma vez terminada a peneiração, a fracção de agregado que fica retida em cada peneiro é registada como  $R_i$ . O material retido no fundo é registado como  $P$ .

A percentagem de material retido em cada peneiro é calculada em relação à massa original seca  $M_1$ , pela equação seguinte:

$$\text{Percentagem de material retido} = \frac{R_i}{M_1} \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

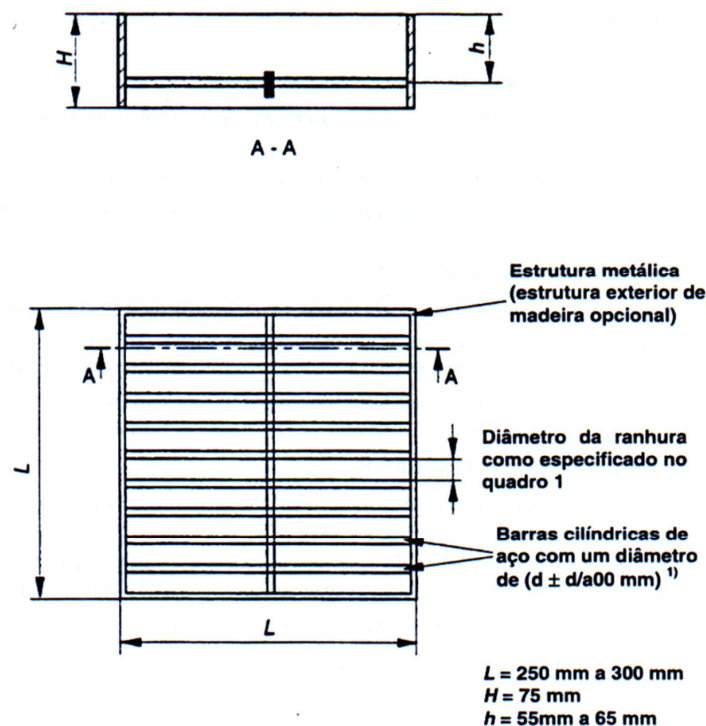
O teor de finos é determinado pela percentagem de material que passa pelo peneiro de 63  $\mu\text{m}$ . Para isso têm que ser tidos em conta os finos retirados na lavagem. A percentagem de finos ( $f$ ) é calculada utilizando a equação seguinte: [17]

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

### 2.2.3. Índice de achatamento

A massa da amostra a usar depende da dimensão máxima do agregado, como especificado na Tabela 2.III. Depois da amostragem e redução da amostra, o material é colocado numa estufa a  $110 \pm 5$  °C até ser atingida massa constante (durante um período de 24h).

A seguir realizam-se duas operações de peneiração. A primeira é efectuada com peneiros de malha quadrada, havendo separação em várias fracções  $d_i/D_i$ . Cada fracção é depois crivada em peneiros de barras (Figuras 2.8 e 2.9) que possuem ranhuras paralelas com espaçamento  $D_i/2$ . A correspondência dos peneiros de barras com as fracções  $d_i/D_i$  encontra-se na Tabela 2.IV.



<sup>1)</sup> A amplitude de diâmetro usual é de 5 mm 15 mm dependendo do diâmetro da ranhura

Figura 2.8 – Requisitos gerais dos peneiros de barras. [18]



**Figura 2.9** – Peneiro de barras utilizado na determinação do índice de achatamento. (LREC)

**Tabela 2.IV** – Correspondência dos peneiros de barras com as frações das partículas  $d_i/D_i$ . [18]

Fracção da partícula $d_i/D_i$ (mm)	Diâmetro da ranhura nos peneiros de barras (mm)
63/80	40±0,3
50/63	31,5±0,3
40/50	25±0,2
31,5/40	20±0,2
25/31,5	16±0,2
20/25	12,5±0,2
16/20	10±0,1
12,5/16	8±0,1
10/12,5	6,3±0,1
8/10	5±0,1
6,3/8	4±0,1
5/6,3	3,15±0,1
4/5	2,5±0,1

O índice de achatamento ( $FI$ ) corresponde à massa total de partículas que passam nos peneiros de barras, expressa em percentagem da massa total seca de partículas ensaiadas, com granulometria compreendida entre 4 mm e 80 mm, calculada através da seguinte equação:

$$FI = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{Equação (3)}$$

$M_1$  é a soma das massas de agregado de cada uma das fracções granulométricas e  $M_2$  é a soma das massas de cada uma das fracções granulométricas que atravessa o peneiro de barras correspondente, com ranhuras paralelas com espaçamento  $D_i/2$ . [18]

#### 2.2.4. Qualidade dos finos

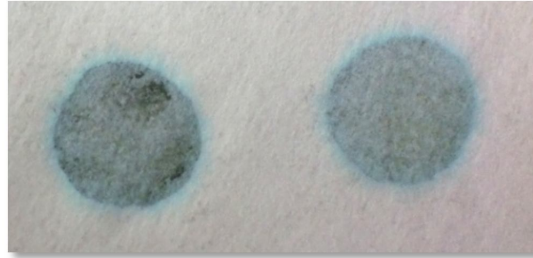
Para determinar o grau de impurezas do agregado e verificar se este apresenta sensibilidade à água, foi realizado o ensaio de azul-de-metileno e o ensaio de equivalente de areia.

O primeiro foi realizado segundo as directrizes da norma NP EN 933-9 de 2002. Este ensaio consiste na adsorção de azul-de-metileno pelas partículas finas do agregado (com tamanho inferior a 0,075 mm). Neste ensaio ocorre a permuta iónica entre os catiões presentes na superfície das partículas finas (cálcio, sódio, magnésio, entre outros) e os catiões resultantes da dissociação da molécula de azul-de-metileno em solução aquosa. O valor de azul-de-metileno define, de forma eficaz, o maior ou menor grau de limpeza do agregado ou a existência de fracções sensíveis à água. [13]

Incrementos de uma solução de azul-de-metileno são sucessivamente adicionados a uma suspensão em água da amostra. A adsorção da solução corante pelo provete, após a adição de cada porção ou incremento de solução é verificada pela existência de manchas num papel de filtro, de modo a detectar a presença de corante livre (auréola azul). Quando se verificar a presença de corante livre (Figura 2.10), o valor de azul-de-metileno ( $MB$ ) é calculado através da equação seguinte:

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad \text{Equação (4)}$$

Onde  $M_i$  é a massa do provete (200 g de fracção 0/2 mm) e  $V_1$  é o volume total de solução corante adicionado, em mililitros. [19]



**Figura 2.10** – Mancha de suspensão em papel de filtro com a presença de auréola azul, indicativo da presença de azul-de-metileno excedente.

A Figura 2.11 mostra a montagem experimental usada neste ensaio.



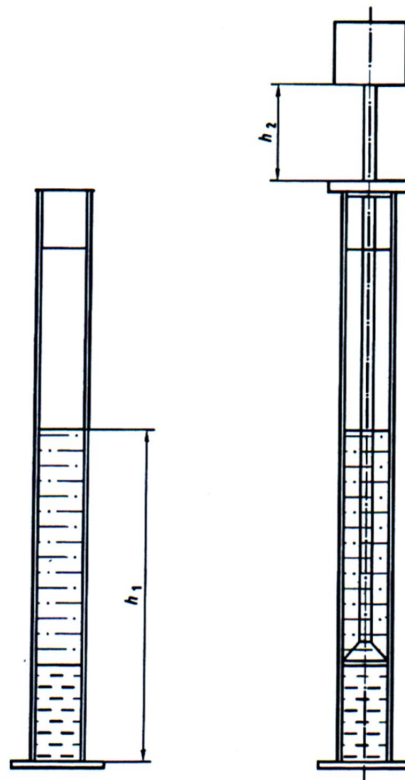
**Figura 2.11** – Equipamentos utilizados na realização do ensaio de azul-de-metileno.

O ensaio de determinação do teor equivalente de areia foi realizado segundo as directrizes da norma NP EN 933-8 de 2002. Este ensaio possibilita a avaliação da quantidade de matéria muito fina, aferindo com rapidez o grau de limpeza do agregado. [13]

A amostra, com uma massa de 120 g e granulometria 0/2 mm, é colocada numa proveta cilíndrica juntamente com uma pequena quantidade de uma solução flocculante (a preparação encontra-se no Anexo I). A mistura é agitada e de seguida é adicionada mais solução flocculante diluída (solução de lavagem), forçando as partículas mais pequenas a entrar em suspensão. Passados 20 minutos, o valor de equivalente de areia (SE) é determinado pela altura do sedimento ( $h_2$ ) expresso como percentagem da altura total do material flocculado ( $h_1$ ) na proveta cilíndrica (Figura 2.12), utilizando a equação seguinte: [20]

$$EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad \text{Equação (5)}$$

O ensaio é realizado sobre duas amostras. No final é calculada a média dos resultados obtidos em cada proveta.



**Figura 2.12** – Medição de  $h_1$  e  $h_2$  na determinação do teor equivalente de areia. [20]



## 2.3. Requisitos físicos

### 2.3.1. Resistência à fragmentação - coeficiente de Los Angeles

O ensaio para a determinação do coeficiente de Los Angeles tem como princípio fazer rodar, num tambor rotativo (Figura 1.19 e 1.20), uma amostra de agregado com uma carga de esferas de aço. No final é feita uma peneiração num crivo de 1,6 mm para calcular a quantidade de agregado retido. Este ensaio é realizado segundo as directrizes da norma NP EN 1097-2 de 2002.

A amostra de agregado deve ter granulometria compreendida entre 10 mm e 14 mm, obedecendo a uma das duas distribuições seguintes:

- 1) 60% a 70% passante a 12,5 mm, ou;
- 2) 30% a 40% passante a 11,2 mm.

A amostra, com uma massa de  $5000 \pm 5$  g, é colocada no tambor juntamente com as esferas. Posteriormente a máquina entra em rotação até completar 500 voltas, a uma velocidade de rotação constante entre 31 e 33 rpm.

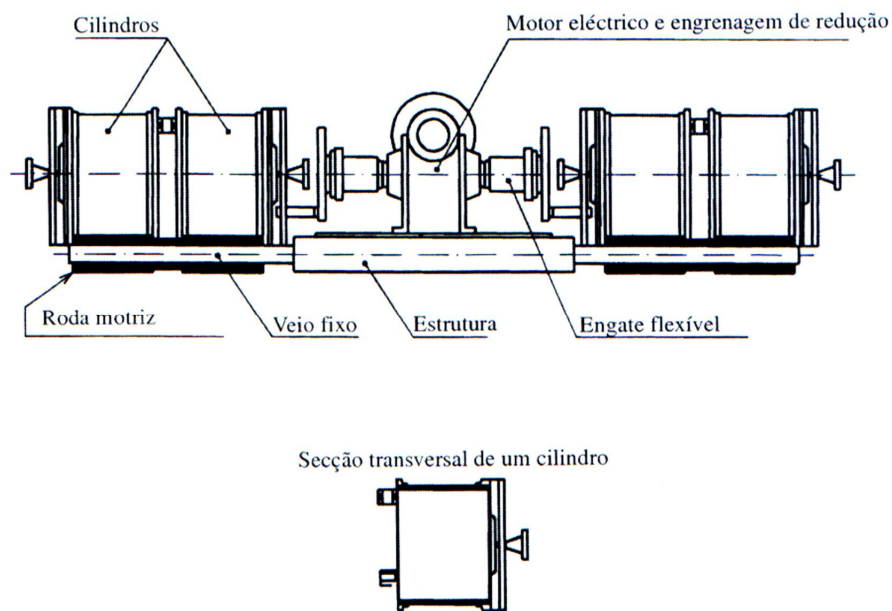
No final, o agregado é lavado e peneirado no crivo de 1,6 mm. Depois de seco, a fracção retida é pesada e é registada a massa  $m$  (em gramas).

O coeficiente de Los Angeles ( $LA$ ) é calculado pela equação seguinte: [14]

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad \text{Equação (6)}$$

### 2.3.2. Resistência ao desgaste - coeficiente de micro-Deval

O ensaio consiste na medição do desgaste produzido pela fricção entre os agregados e uma carga de esferas de aço, num cilindro rotativo (Figura 2.13). Este ensaio foi realizado segundo as directrizes da norma NP EN 1097-1 de 2002.



**Figura 2.13** – Esquema de um equipamento típico para a determinação do coeficiente micro-Deval. [21]

As amostras a ensaiar devem ser lavadas e ter granulometria compreendida entre 10 e 14 mm. A distribuição granulométrica deve respeitar um dos seguintes requisitos:

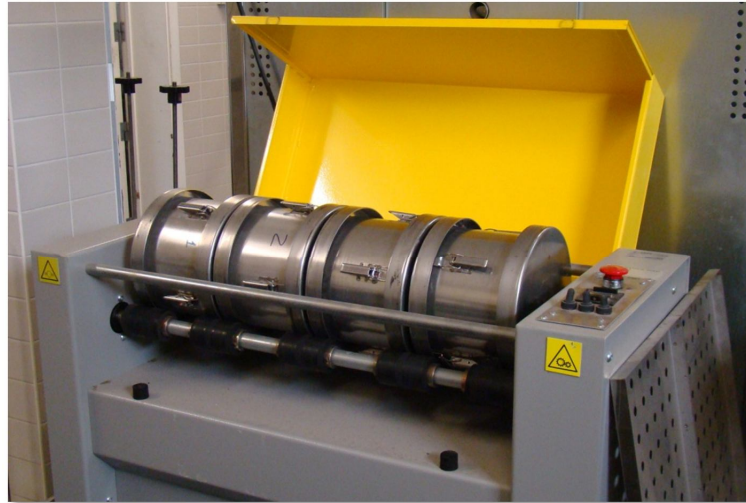
- 1) 60% a 70% passante a 12,5 mm, ou;
- 2) 30% a 40% passante a 11,2 mm.

A amostra deve ser dividida em duas fracções, com massa de  $500 \pm 2$  g cada uma. Cada fracção é colocada num cilindro (Figura 2.14) e são adicionadas esferas de aço até se obter uma carga de  $5000 \pm 5$  g. Antes de iniciar o ensaio são adicionados  $2,5 \pm 0,05$  L de água a cada cilindro. A máquina é colocada em rotação a uma velocidade de  $100 \pm 5$  rpm e o ensaio completa-se ao fim de  $12000 \pm 10$  voltas. Depois o conteúdo de cada cilindro é lavado e crivado a 1,6 mm e colocado a secar separadamente. Depois de seco, o agregado retido no peneiro é pesado e é registada a massa  $m$  em gramas.

O coeficiente de micro-Deval ( $M_{DE}$ ) é calculado pela equação seguinte:

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5} \quad \text{Equação (7)}$$

Calcula-se a média dos valores registados em cada cilindro. [21]



**Figura 2.14** – Equipamento utilizado para a determinação do coeficiente micro-Deval. (LREC)

### 2.3.3. Massa volúmica e absorção de água

A massa volúmica do agregado foi calculada a partir da razão entre a massa e o volume. A massa é determinada pela pesagem da amostra após secagem em estufa. O volume é determinado a partir da massa e água deslocada, aferida com um picnómetro (Figura 2.15). A massa volúmica ( $\rho$ ) é calculada pela equação 8.

$$\rho = \frac{(M_2 - M_1)}{[V - (M_3 - M_2)]/\rho_w} \quad \text{Equação (8)}$$

$M_1$  é a massa do picnómetro e funil (g);  $M_2$  é a massa do picnómetro, funil e provete elementar seco (g);  $M_3$  é a massa do picnómetro, funil, provete elementar e água (g);  $V$  é o volume do picnómetro (mL); e  $\rho_w$  é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio (Mg/m<sup>3</sup>).

A absorção de água corresponde ao aumento da massa de uma amostra de agregado seco em estufa devido à penetração da água nos poros acessíveis (aber-

tos) da estrutura, mas assegurando que a superfície está seca. A absorção de água é calculada pela equação 9.

$$WA(\%) = \frac{(M_4 - M_5)}{M_5} \times 100 \quad \text{Equação (9)}$$

$M_4$  é a massa do agregado saturado com superfície seca (g) e  $M_5$  é a massa do agregado seco em estufa (g).

Estas determinações foram efectuadas segundo as directrizes da norma NP EN 1097-6 de 2003. [22]



**Figura 2.15** – Determinação da massa volúmica das escórias pelo método do picnómetro.

## 2.4. Requisitos químicos

### 2.4.1. Sulfatos solúveis em meio ácido

A determinação dos sulfatos foi feita gravimetricamente. Os iões  $SO_4^{2-}$  são extraídos da amostra de agregado pela adição de ácido clorídrico concentrado. Depois estes iões são precipitados pela adição de cloreto de bário e pesados na forma de sulfato de bário ( $BaSO_4$ ).

O conteúdo de sulfatos é expresso em percentagem da massa total da amostra de agregado. Este ensaio foi efectuado segundo as directrizes da norma EN 1744-1 de 1998, secção 12 (o procedimento encontra-se no Anexo II). [23]

### 2.4.2. Enxofre total

Esta análise resulta do tratamento da amostra de agregado com ácido nítrico e com bromo, para converter qualquer forma de enxofre em iões sulfato. O ácido nítrico vai reduzir qualquer forma de enxofre ( $S$ ,  $S^{2-}$ ,  $SO_3^{2-}$ ) e o bromo vai oxidar estas formas reduzidas em  $SO_4^{2-}$ . Posteriormente estes iões são precipitados através da adição de cloreto de bário e pesados na forma de sulfato de bário ( $BaSO_4$ ).

O conteúdo total de enxofre é expresso em percentagem da massa total da amostra de agregado. Este ensaio foi efectuado segundo as directrizes da norma EN 1744-1 de 1998, secção 11 (o procedimento encontra-se no Anexo III). [23]

### 2.4.3. Cloretos

A determinação de cloretos começa com a lixiviação de uma amostra de agregado. Este passo faz com que os iões de cloro sejam solubilizados. A análise do lixiviado é baseada no método de Volhard, onde um excesso de nitrato de prata é adicionado ao lixiviado para reagir com os iões cloro, formando um precipitado de cloreto de prata. Posteriormente, o nitrato de prata que não reage é eliminado por reacção com uma solução padrão de tiocianato de potássio, usando solução de alúmen férrico [ $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ ] como indicador. Ocorre a formação de tiocianato de prata (castanho pálido).

O teor de cloretos é expresso em termos de ião cloro, em percentagem da massa total da amostra de agregado. Este ensaio foi efectuado segundo as directrizes da norma EN 1744-1 de 1998, secção 7 (o procedimento encontra-se no Anexo IV). [23]

#### **2.4.4. Presença de inqueimados e teor de humidade**

As amostras de agregado passam inicialmente por um processo de secagem em estufa a uma temperatura de  $110 \pm 5$  °C, durante um período de 24h. A perda de massa traduz o teor de humidade. Posteriormente, as amostras são colocadas em cadinhos e colocadas em mufla, que se encontra à temperatura de  $550 \pm 5$  °C, permanecendo aí três horas. A perda de massa relativamente ao valor medido após secagem traduz a quantidade de inqueimados.

### **2.5. Ensaio adicionais**

#### **2.5.1. Determinação de fases cristalinas**

As fases cristalinas presentes nas escórias foram identificadas por difracção de raios X (DRX), utilizando um aparelho Rigaku Grigerflex D/Max-Série C, à temperatura ambiente, com radiação Cu  $K\alpha$ , com uma velocidade de leitura de  $0,2$  ° s<sup>-1</sup>. O teste foi realizado com valores de  $2\theta$  compreendidos entre 4-80 °.

#### **2.5.2. Caracterização química**

A análise química dos elementos presentes foi determinada por espectroscopia de fluorescência de raios X. Para a preparação da amostra utilizaram-se aproximadamente 5 g de material que foi prensado a frio, na forma de pastilhas. O espectrómetro utilizado nos ensaios foi o X'UNIQUE II, Philips. Foi utilizada uma voltagem de 40 KV com uma corrente de 70 mA e 60 KV com 40 mA, para os elementos maiores e menores respectivamente, e uma radiação Rh  $K\alpha$ .

## 2.6. Formulação de argamassas e misturas betuminosas

Como antes se indicou, as escórias são essencialmente constituídas por componentes inorgânicos de morfologia granular, podendo substituir solos ou agregados naturais (gravilhas e areias) em certas aplicações. Uma das possibilidades é a elaboração de camadas de impermeabilização de aterros, mas pode também alargar-se a trabalhos de pavimentação, incluindo bases granulares e misturas com ligantes betuminosos; agregados em misturas cimentícias, nomeadamente blocos de betão e elementos pré-fabricados *in situ*; agregados em trabalhos marítimos, tais como recifes artificiais ou elementos de protecção do litoral; etc.

Foram elaboradas formulações de argamassa e de mistura betuminosa, onde os agregados utilizados foram substituídos parcialmente por escórias.

### 2.6.1. Formulação de argamassa

Nas argamassas foram feitas três formulações, uma de referência, onde não houve a adição de escórias, e duas com substituição da areia por escórias, em 15% e 30% em massa. Avaliou-se o efeito na resistência mecânica das amostras contendo escórias, relativamente à de uma amostra de referência (sem escória). Avaliou-se também a retracção dos provetes de argamassa e o tempo de início de presa.

Em primeiro lugar foi efectuada uma análise granulométrica à areia (Tabela A.I do Anexo V) e posteriormente foi feita uma peneiração às escórias para recolher uma fracção granulométrica semelhante à da areia a substituir. A Tabela 2.V mostra as formulações testadas.

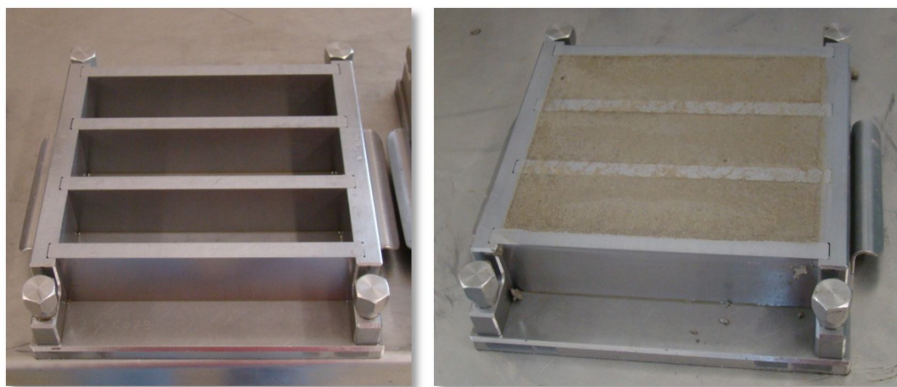
**Tabela 2.V** – *Formulação de argamassas com substituição de areia por escórias (15% e 30% em massa).*

	Referência	0,15	0,30
Massa de material (g)	1800,00	1800,00	1800,00
Areia (g)	1350,00	1147,50	945,00
Ligante (Cimento Portland 32,5)	450,00	450,00	450,00
Água (g)	405,00	405,00	405,00
Escória (g)	-	202,50	405,00

A granulometria das escórias foi inferior a 1 mm. O traço utilizado foi de 1:3 (em massa), ou seja, uma medida de cimento para três medidas de agregado. A razão água/cimento foi de 0,9, devido à granulometria reduzida da areia utilizada que absorve muita água.

O espalhamento das argamassas foi avaliado visualmente devido à falta de equipamento de medida.

Foram depois preparados três provetes de cada formulação, utilizando os moldes ilustrados na Figura 2.16, de geometria prismática com 40 mm x 40 mm x 160 mm.



**Figura 2.16** – *Moldes utilizados na preparação dos provetes de argamassa (esquerda). Enchimento dos moldes (direita). (LREC)*

Os provetes foram desmoldados ao fim de 24 horas e depois curados num tanque com água a  $20 \pm 1,0$  °C. As amostras foram depois caracterizadas em ensaios

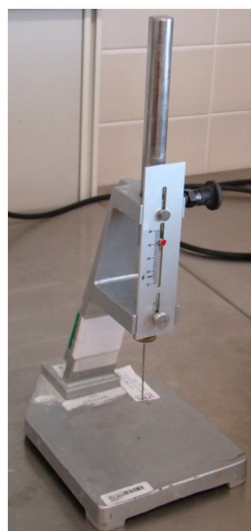


mecânicos, de resistência à compressão e à flexão, ao fim de 7 dias e 28 dias de cura, no equipamento da Figura seguinte. Este ensaio foi efectuado segundo as directrizes da norma NP EN 196-1 de 2006. [24]



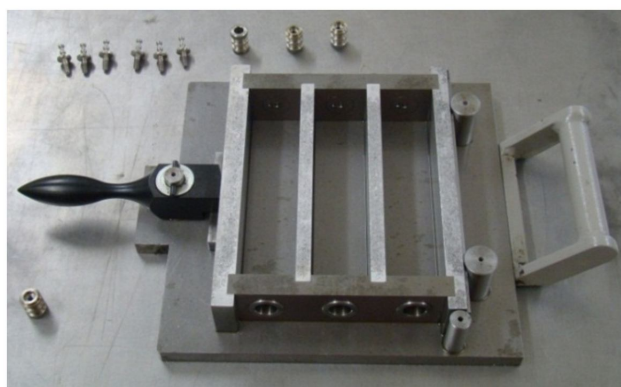
**Figura 2.17** – *Aparelho utilizado na realização de ensaios de resistência à compressão e à flexão. (LREC)*

Para determinação do início de presa foi utilizado o Método de Vicat, descrito na norma NP EN 196-3 de 2006. Este ensaio tem como objectivo avaliar a influência das escórias em relação ao aumento ou diminuição do tempo até ao princípio da presa. O equipamento utilizado encontra-se na Figura 2.18. [25]

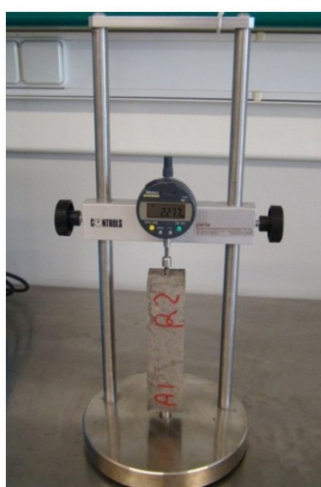


**Figura 2.18** – *Aparelho utilizado no Método de Vicat. (LREC)*

Para a realização do ensaio de retracção foram utilizadas as mesmas formulações presentes na Tabela 2.V. Moldaram-se três provetes para cada formulação, utilizando os moldes da Figura 2.19, de geometria prismática com 40 mm x 40 mm x 160 mm, com pinos nas extremidades. Os moldes contendo as argamassas são colocados numa câmara húmida ( $95\pm 5\%$  e  $20\pm 2$  °C) e mantidos durante 48 horas antes de serem desmoldados. Após desmoldagem é feita a primeira medida, de referência, no aparelho representado na Figura 2.20. As restantes medidas para a determinação da retracção são efectuadas após 7, 14 e 28 dias de cura. Este ensaio foi realizado segundo a norma prEN 1015-13 de 1995. [26]



**Figura 2.19** – Molde utilizado na elaboração de provetes para a determinação da retracção. (LREC)



**Figura 2.20** – Aparelho utilizado nas medidas de retracção dos provetes de argamassa. (LREC)

## 2.6.2. Formulação de mistura betuminosa

A formulação de uma mistura betuminosa deve conter no mínimo quatro frações granulométricas de agregado. Estas frações devem ser crivadas e misturadas de forma a ajustar a granulometria, em proporções tais que obedecem às exigências da fórmula em estudo. Foi adoptado o fuso granulométrico de uma mistura betuminosa a quente com características impostas a camadas de base com menor exigência, com designação *AC 32 base ligante (MB)*. [13 e 29] Para formular a mistura, foi primeiramente determinada a granulometria de quatro frações de agregados (Tabela A.II do Anexo V). A seguir foi ajustada a percentagem de cada fração, incluindo as escórias, para que a curva de distribuição granulométrica da mistura respeitasse os limites do fuso granulométrico exigido. Foram feitas três formulações, uma de referência, onde não houve a adição de escórias, e duas com substituição dos agregados por escórias, em 10% e 20% em massa (Tabelas A.III, A.IV e A.V do Anexo VI). Foram produzidos 3 provetes para cada formulação, cada provete com uma massa aproximada de 1250g. O teor de betume utilizado foi de 5% em massa. Os agregados utilizados foram disponibilizados pela Prebel, Sociedade Técnica de Pré-fabricação e Construção, S.A..

As formulações resultantes encontram-se na Tabela 2.VI. A Figura 2.21 mostra as curvas correspondentes aos limites inferior e superior do fuso granulométrico, a curva média do fuso e a distribuição granulométrica das formulações preparadas.

Tabela 2.VI – Formulação das misturas betuminosas.

Amostra	Betume (g)	Agregados				
		Brita 2 (g)	Brita 1 (g)	Pó de pedra (g)	Areia (g)	Escórias (g)
Referência		<b>1197,0</b> (28,0%)	<b>1325,3</b> (31,0%)	<b>769,5</b> (18,0%)	<b>983,3</b> (23,0%)	<b>0,0</b> (0,0%)
10% de escórias	<b>225,0</b> (5,0%)	<b>1026,0</b> (24,0%)	<b>1325,3</b> (31,0%)	<b>598,5</b> (14,0%)	<b>897,8</b> (21,0%)	<b>427,5</b> (10,0%)
20% de escórias		<b>1068,8</b> (25,0%)	<b>1026,0</b> (24,0%)	<b>641,3</b> (15,0%)	<b>684,0</b> (16,0%)	<b>855,0</b> (20,0%)

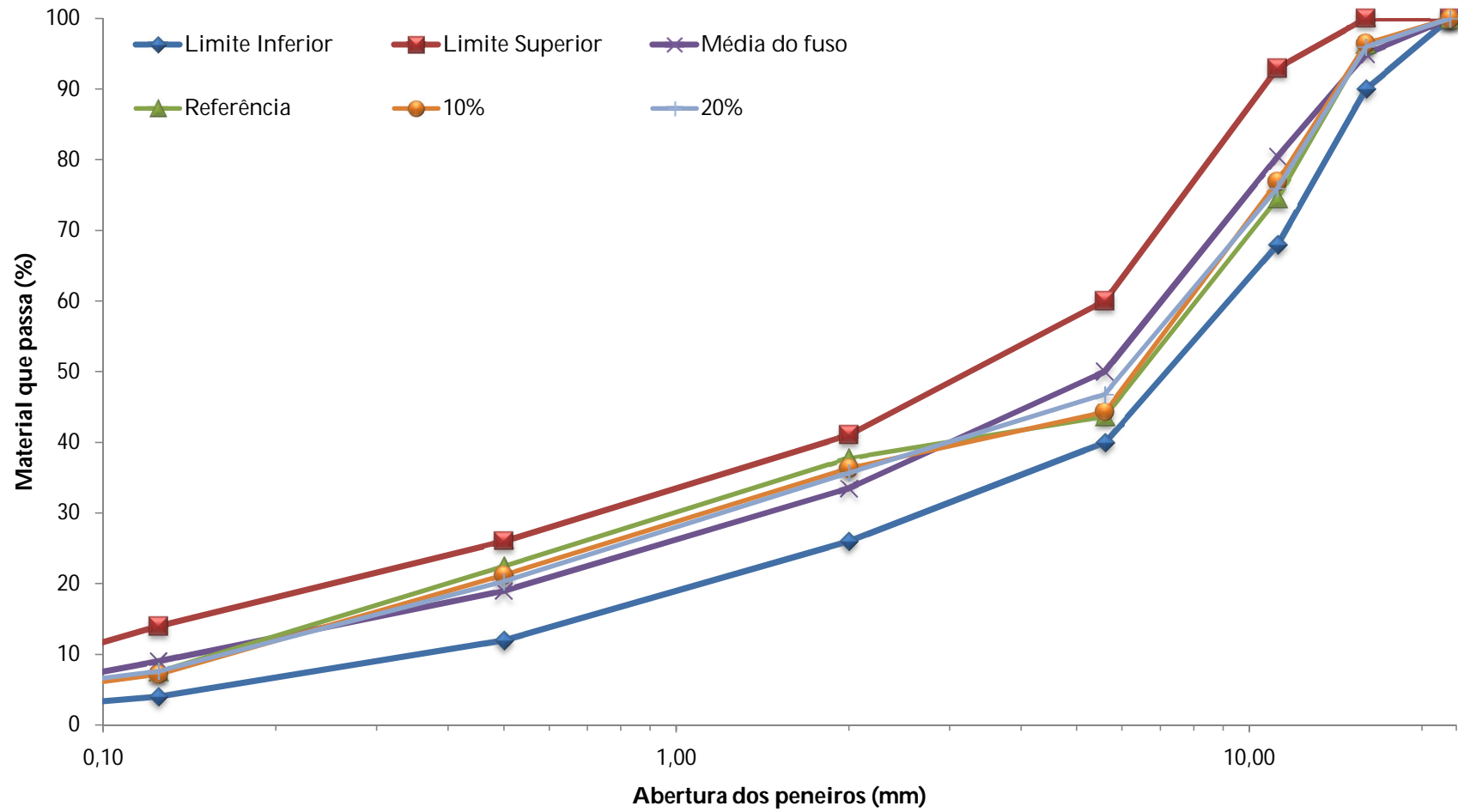


Figura 2.21 – Representação gráfica do fuso granulométrico e das curvas das formulações preparadas.

A caracterização das misturas betuminosas foi feita utilizando o método Marshall, segundo a norma NP 142 de 1968. Este método fornece indicações sobre a resistência que uma mistura betuminosa oferece à compressão e à deformação, através da aplicação de forças.

Os agregados utilizados são aquecidos em estufa entre 175 °C a 190 °C durante uma hora e, posteriormente, misturados com betume, também aquecido em estufa entre 120 °C e 140 °C, durante cerca de 45 minutos. A mistura dos agregados deve ser feita com rapidez e com uma manga de aquecimento, para que a temperatura da mistura nunca seja inferior a 110 °C. Depois de enchido o molde (Figura 2.22) com 1250 g de mistura, são aplicadas 50 pancadas de cada lado do provete com um martelo de compactação (Figura 2.23). No final os provetes são desmoldados e arrefecidos à temperatura ambiente (Figura 2.24). [27]



**Figura 2.22** – Moldes utilizados na produção de provetes para o método Marshall. (LREC)



**Figura 2.23** – Martelo de compactação. (LREC)



**Figura 2.24** – *Provetes elaborados para o ensaio Marshall.*

Depois dos provetes se encontrarem secos, antes da realização do ensaio Marshall, estes são pesados e posteriormente são colocados num cesto de rede suspenso e são novamente pesados imersos em água. Estas pesagens vão dar a baridade aparente, segundo a equação seguinte:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde  $\rho$  é a baridade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ),  $m_1$  é a massa do provete seco (g) e  $m_2$  é a massa do provete imerso em água (g). [28]

Para a determinação da força de rotura (ou estabilidade) e da deformação, os provetes são colocados em primeiro lugar em banho-maria durante cerca de 20 minutos, à temperatura de  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , e posteriormente são ensaiados no equipamento da Figura 2.25. [27]





Figura 2.25 – Equipamento utilizado no ensaio Marshall. (LREC)

O cálculo da baridade máxima teórica foi feito utilizando a equação seguinte:

$$\rho_{max} = \frac{1}{\frac{p_b}{100 \times \rho_b} + \frac{p_a}{100 \times \rho_a}} \quad \text{Equação (11)}$$

Onde  $\rho_{max}$  é a baridade máxima teórica ( $\text{g/cm}^3$ ),  $p_b$  é a percentagem de betume na mistura,  $\rho_b$  é a massa volúmica do betume ( $0,96 \text{ g/cm}^3$ ),  $p_a$  é a percentagem de mistura de agregados e  $\rho_a$  é a massa volúmica da mistura de agregados ( $\text{g/cm}^3$ ).

A porosidade dos provetes é determinada pela seguinte equação:

$$P = \frac{\rho_{max} - \rho}{\rho_{max}} \times 100 \quad \text{Equação (12)}$$

Onde  $P$  é a porosidade (%),  $\rho_{max}$  é a baridade máxima teórica ( $\text{g/cm}^3$ ) e  $\rho$  a baridade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ).



# Capítulo III



*Apresentação e Discussão de Resultados*

---



De acordo com as definições de agregado que se encontram na norma NP EN 12620 de 2005, as escórias utilizadas neste estudo estão mais próximas da definição de agregado artificial.

“Agregado de origem mineral resultante de um processo industrial compreendendo modificações térmicas ou outras.” [15]

Alguns dos ensaios presentes na norma de referência não foram realizados. O índice de forma e a percentagem de superfícies esmagadas e partidas no agregado grosso, descritos nas normas EN 933-4 de 2008 e NP EN 933-5 de 2002, respectivamente, não foram determinados devido à composição das escórias e à sua morfologia. Em relação à percentagem de superfícies esmagadas e partidas no agregado grosso, tendo em conta o processo gerador e uma análise visual, acredita-se que as partículas presentes estão incluídas na categoria de partículas esmagadas ou partidas. Já no caso da resistência à fragmentação por impacto, não houve a possibilidade de realizar o ensaio devido à falta de equipamento.

### **3.1. Requisitos geométricos**

#### **3.1.1. Dimensão dos agregados**

Após efectuar uma peneiração, utilizando peneiros da série base em conjugação com os da série 1, verificou-se que a máxima dimensão do agregado é de 16 mm. O material que fica retido acima do peneiro de 16 mm é constituído essencialmente por metais, pedaços de vidro e cerâmicos e inqueimados (Figura 3.1), que representam uma percentagem residual.



**Figura 3.1** – *Material retido acima do peneiro de 16 mm.*

A condição imposta pela norma NP EN 13242 de 2005 de que  $D/d > 1,4$  foi verificada, dado que o peneiro de maior dimensão tem uma abertura de malha de 16 mm e o peneiro de menor dimensão tem abertura de malha de 0,063 mm. Pela Tabela A.VI do Anexo VII pode-se concluir que as escórias objecto de estudo são categorizadas como sendo um agregado de granulometria extensa, categoria  $G_A 85$ .

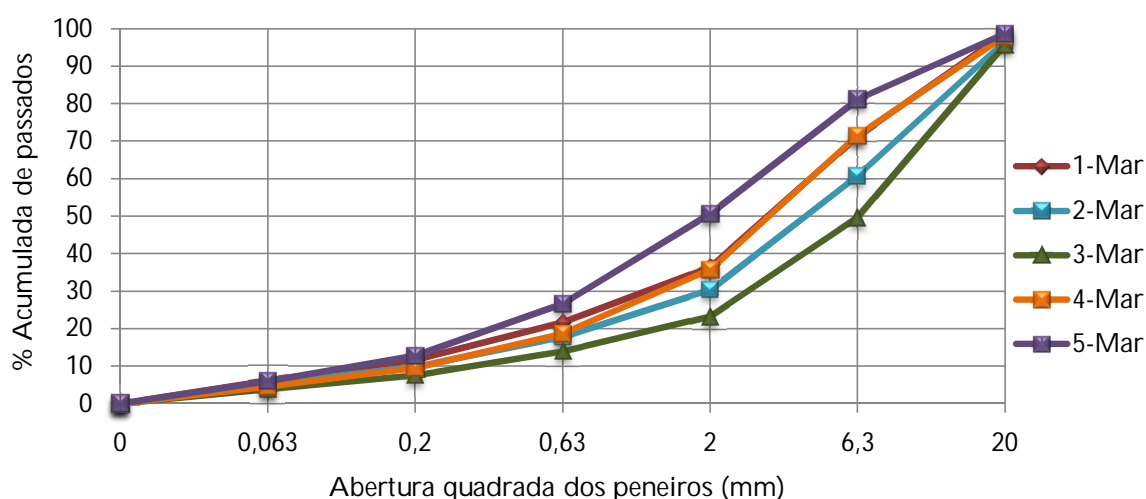
### **3.1.2. Análise granulométrica e teor de finos**

Aferiu-se a granulometria das escórias e estudou-se a influência das condições de queima e das condições de acondicionamento/atmosféricas em termos dimensionais. Parte dos ensaios foram efectuados no laboratório da Valor Ambiente, utilizando uma série de peneiros que não estão de acordo com as normas (Figura 2.7 B). Os restantes ensaios foram efectuados no LREC, com peneiros normalizados (Figura 2.7 A).

Nos primeiros ensaios granulométricos verificou-se uma grande dispersão de resultados (Tabela 3.1 e Figura 3.2).

**Tabela 3.1** – Análise granulométrica das escórias – 1 a 5 de Março de 2010 (Valor Ambiente).

Abertura (mm)	% Acumulada Passada					Média (%)
	1-Mar	2-Mar	3-Mar	4-Mar	5-Mar	
20	99	97	96	98	99	97,5±1,5
6,3	71	61	50	72	81	66,9±15,8
2	36	30	23	36	51	35,2±13,6
0,63	22	18	14	19	27	19,7±6,3
0,2	12	10	8	10	13	10,3±2,6
0,063	6	5	4	5	6	5,1±1,1
0	0	0	0	0	0	0,0±0,0



**Figura 3.2** – Distribuição granulométrica das escórias – 1 a 5 de Março de 2010 (Valor Ambiente).

Esta variação está directamente relacionada com a natureza dos RSU e com as condições de queima e acondicionamento. Neste período verificou-se um aumento de humidade devido ao mau tempo. Este aumento de humidade afasta as condições de queima dos valores ideais, obrigando a um accionamento mais frequente dos queimadores para assegurar combustão completa dos resíduos. O facto de os RSU terem muita humidade dificulta também o deslocamento dentro da caldeira, havendo com frequência o entupimento do extractor de escórias. A forma de resolver este problema é colocando mais resíduos na câmara de combustão,

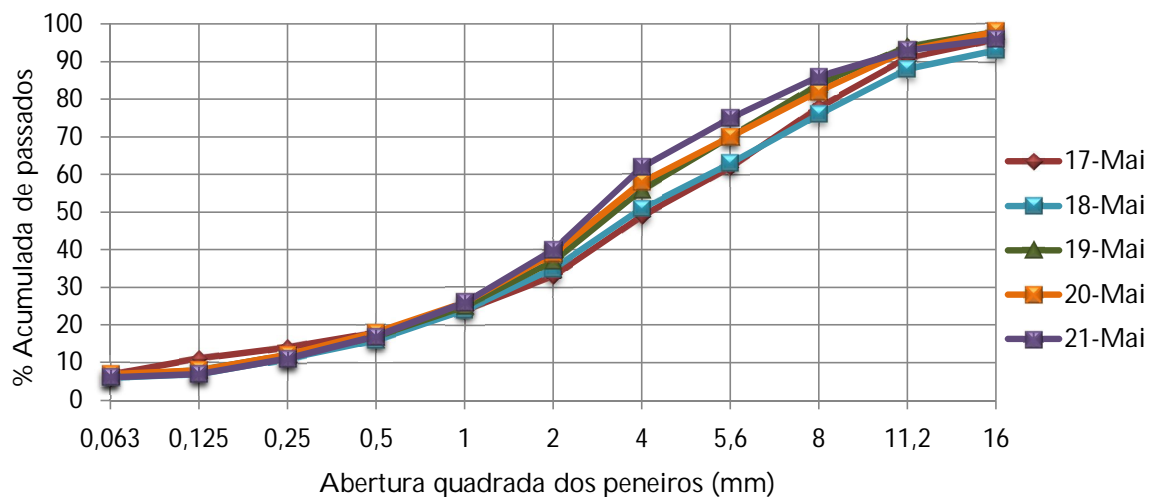
obrigando as escórias a saírem do extractor. Isto faz com que a combustão não seja completa e, conseqüentemente, provoca grande variação na granulometria das escórias.

Outro factor que pode influenciar a granulometria das escórias é o facto de haver adição de resíduos triturados. Isto acontece quando os resíduos são muito volumosos, o que impossibilita a sua introdução na tremonha que alimenta a incineradora. A introdução do triturado gera partículas mais finas. Esta introdução é aleatória, não havendo horas nem dias específicos para ocorrer. O triturado não tem uma influência muito relevante, como pode ser visualizado no conjunto de ensaios apresentados a seguir.

Os últimos ensaios efectuados envolveram escórias geradas em condições de queima mais próximas das ideais, reflectindo-se na superior constância granulométrica, como pode ser verificado na Tabela 3.II e na Figura 3.3.

**Tabela 3.II - Análise granulométrica das escórias – 17 a 21 de Maio de 2010 (LREC).**

Abertura (mm)	% Acumulada passada					Média (%)
	17-Mai	18-Mai	19-Mai	20-Mai	21-Mai	
16	96	93	98	98	96	96,2±2,5
11,2	91	88	94	93	93	91,8±3,0
8	78	76	84	82	86	81,2±5,0
5,6	62	63	70	70	75	68,0±6,5
4	49	51	56	58	62	55,2±6,5
2	33	35	37	39	40	36,8±3,5
1	24	24	25	26	26	25,0±1,0
0,5	18	16	17	18	17	17,2±1,0
0,25	14	11	12	12	11	12,0±1,5
0,125	11	7	8	8	7	8,2±2,0
0,063	6,8	6	6,5	6,9	6,1	6,5±0,5



**Figura 3.3** - Análise granulométrica das escórias – 17 a 21 de Maio de 2010 (LREC).

Tendo em conta apenas as análises granulométricas efectuadas às escórias obtidas sob condições de queima próximas das ideais, pode concluir-se que em termos de tolerância granulométrica típica (Tabela A.VII do Anexo VII), as escórias pertencem à categoria  $GT_{A10}$ . O teor de finos oscila entre 6% e 6,9%. Segundo a Tabela A.VIII do Anexo VII as escórias englobam-se na categoria  $f_1$ .

Fazendo uma análise visual ao material, verificou-se que há presença de muito vidro, algum material cerâmico e metais (Figura 3.4). Isto foi comprovado pela análise de FRX, que detectou a presença de teores elevados de  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ , como será discutido adiante.



**Figura 3.4** – Escórias após lavagem dos finos.

### 3.1.3. Índice de achatamento

Este ensaio foi realizado no LREC e os resultados obtidos estão indicados na Tabela 3.III.

**Tabela 3.III – Valores do índice de achatamento das escórias.**

Fracção granulométrica $d_i/D_i$ (mm)	Índice de achatamento por fracção <b>FI<sub>i</sub></b> (%)
16/20	70
12,5/16	39
10/12,5	29
8/10	23
6,3/8	17
5/6,3	11
4/5	9
Índice de achatamento <b>FI</b> (%)	<b>22</b>

De acordo com a Tabela A.IX do Anexo VII, as escórias pertencem à categoria  $FI_{35}$ .

### 3.1.4. Qualidade dos finos

No ensaio de azul-de-metileno foram adicionados 5 mL de solução até se notar uma auréola azul, indicativa da presença de corante livre. Utilizando a equação 4, o valor de  $MB$  é de 0,3 g de corante por kg de amostra.

Os resultados obtidos no ensaio de determinação do teor equivalente de areia estão presentes na Tabela 3.IV.

**Tabela 3.IV – Teor equivalente de areia das escórias.**

	Amostra 1	Amostra 2
$h_1$ (mm)	189	195
$h_2$ (mm)	170	164
<b>EA (%)</b>	<b>89,9</b>	<b>84,1</b>
	Média (%)	
	<b>87</b>	



O elevado valor do teor equivalente de areia indica que as escórias possuem reduzida quantidade de impurezas, comprovado pelo valor de azul-de-metileno, que se apresenta baixo. O valor de *EA* é também indicativo da ausência de plasticidade do material, normalmente conferida pela fracção argilosa.

## 3.2. Requisitos físicos

### 3.2.1. Resistência à fragmentação – coeficiente de Los Angeles

Este ensaio foi realizado no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. As escórias não obedeciam a nenhuma das duas distribuições exigidas no procedimento, por isso foi necessário “desenhar” a amostra para ensaio. A amostra final teve a seguinte distribuição: 30% a 40% passante no peneiro de 11,2 mm.

O valor obtido para o coeficiente de Los Angeles foi de 50. Segundo a Tabela A.X do Anexo VII, as escórias pertencem à categoria  $LA_{50}$ .

### 3.2.2. Resistência ao desgaste – coeficiente de micro-Deval

Este ensaio foi realizado no LREC. Tal como no ensaio anterior, foi necessário “preparar” uma amostra para ensaio, com distribuição granulométrica semelhante. Os resultados encontram-se na Tabela 3.V.

**Tabela 3.V** – Valores de resistência ao desgaste – coeficiente de micro-Deval.

Tipo de ensaio	Fracção granulométrica	$M_{DE}$ (provete elementar)	$M_{DE}$
Húmido	14-11,2-10	17	17
		16	

De acordo com a Tabela A.XI do Anexo VII, as escórias pertencem à categoria  $M_{DE20}$ .

### 3.2.3. Massa volúmica e absorção de água

Os valores obtidos para a massa volúmica estão indicados na Tabela 3.VI. Os cálculos foram efectuados utilizando a equação 8.

**Tabela 3.VI – Massa volúmica das escórias.**

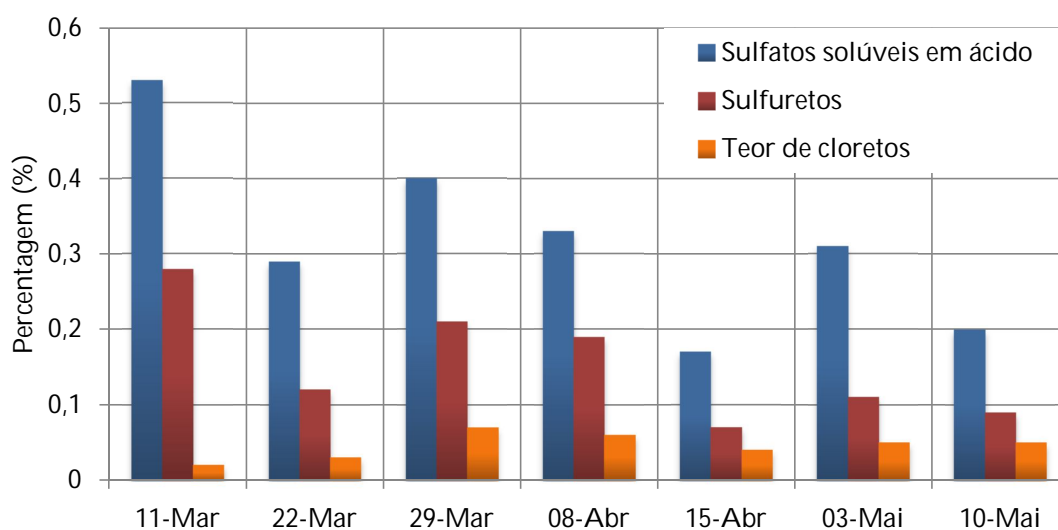
	Amostra 1	Amostra 2
$T_{\text{água}} (^{\circ}\text{C})$	14,50	14,50
$\rho_w (\text{Mg}/\text{m}^3)$	1,00	1,00
$V (\text{mL})$	377,67	374,73
$M_1 (\text{g})$	172,99	187,44
$M_2 (\text{g})$	306,58	348,07
$M_3 (\text{g})$	629,20	654,98
$\rho (\text{Mg}/\text{m}^3)$	<b>2,42</b>	<b>2,37</b>
	Média ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )	
	<b>2,40</b>	

A absorção de água, para uma massa de agregado saturado de 608,11 g e uma massa de agregado seco de 509,07 g, utilizando a equação 9, resultou igual a 19,5%.

## 3.3. Requisitos químicos

### 3.3.1. Sulfatos solúveis em meio ácido, enxofre total e teor de cloretos

Na determinação destes parâmetros verificou-se alguma flutuação de resultados, como pode ser visualizado na Figura 3.5. Este fenómeno está directamente relacionado com a composição dos RSU.



**Figura 3.5** – Teor de sulfatos solúveis em meio ácido, de enxofre total e de cloretos.

Verifica-se que a percentagem de enxofre total acompanha a variação do teor de sulfatos solúveis em meio ácido. O teor de cloretos não sofre grande flutuação, sendo inferior a 0,1%.

Devido a estas flutuações é difícil categorizar estas escórias no que respeita à percentagem de sulfatos solúveis em meio ácido e ao teor de enxofre total. Mas tendo em conta os valores máximos para cada determinação, e segundo as Tabelas A.XII e A.XIII do Anexo VII, no que respeita aos sulfatos, as escórias pertencem à categoria  $AS_{0,8}$ , enquanto que são englobadas na categoria  $S_1$  em termos de teor de enxofre.

### 3.3.2. Presença de inqueimados e teor de humidade

Esta análise foi efectuada diariamente e as amostras foram retiradas por turnos, ou seja, por dia foram efectuadas três análises. Os resultados são expressos em médias mensais e por turnos (Tabela 3.VII).

**Tabela 3.VII** – *Variação temporal do teor de humidade e da percentagem de inqueimados nas escórias.*

Mês	Turnos	% Humidade			% Inqueimados		
		Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
Março 2010	1	17,13	25,80	10,20	3,07	5,20	1,70
	2	14,53	21,22	9,12	2,40	4,30	1,10
	3	12,62	18,22	8,56	2,11	4,30	1,20
	4	17,47	23,01	11,84	2,88	5,20	1,70
Abril 2010	1	14,36	18,44	8,61	2,42	3,30	1,60
	2	12,43	19,20	4,72	2,08	3,10	1,00
	3	11,79	16,22	5,86	2,28	3,30	1,10
	4	14,42	20,27	6,98	2,62	4,20	1,10
Maio 2010	1	13,65	18,08	10,08	2,56	3,50	1,60
	2	12,84	17,96	9,38	2,19	3,00	1,10
	3	12,15	20,32	10,68	2,17	3,40	1,60
	4	14,50	20,32	10,68	2,41	3,60	1,20

Como era de esperar, a humidade das escórias é maior nos períodos chuvosos. Isto acontece porque o tapete transportador de escórias é descoberto na zona de transição entre o edifício de incineração e o edifício de recepção/armazenamento de escórias. Nestes períodos, os resíduos a incinerar também possuem maior humidade, o que dificulta o processo de queima e gera teor superior de inqueimados, ainda que o aumento seja reduzido.

### 3.4. Ensaios adicionais

#### 3.4.1. Determinação de fases cristalinas

Os difractogramas de raios X revelaram picos de reduzida intensidade, como pode ser verificado nas Figuras 3.6 e 3.7. Este resultado traduz reduzida cristalinidade das fases formadas ou remanescentes.

As fases encontradas foram: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ); calcite ( $\text{CaCO}_3$ ); wustite ( $\text{FeO}$ ); anidrite ( $\text{Ca(SO}_4$ )); alumínio (Al) e antofilite ( $\text{Mg}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ). O desvio de linha de base confirma o carácter amorfo/vítreo do material. Não foi possível identificar

todos os picos, ou porque correspondem a fases não coerentes com a análise química (ver FRX) ou por terem intensidade muito baixa.

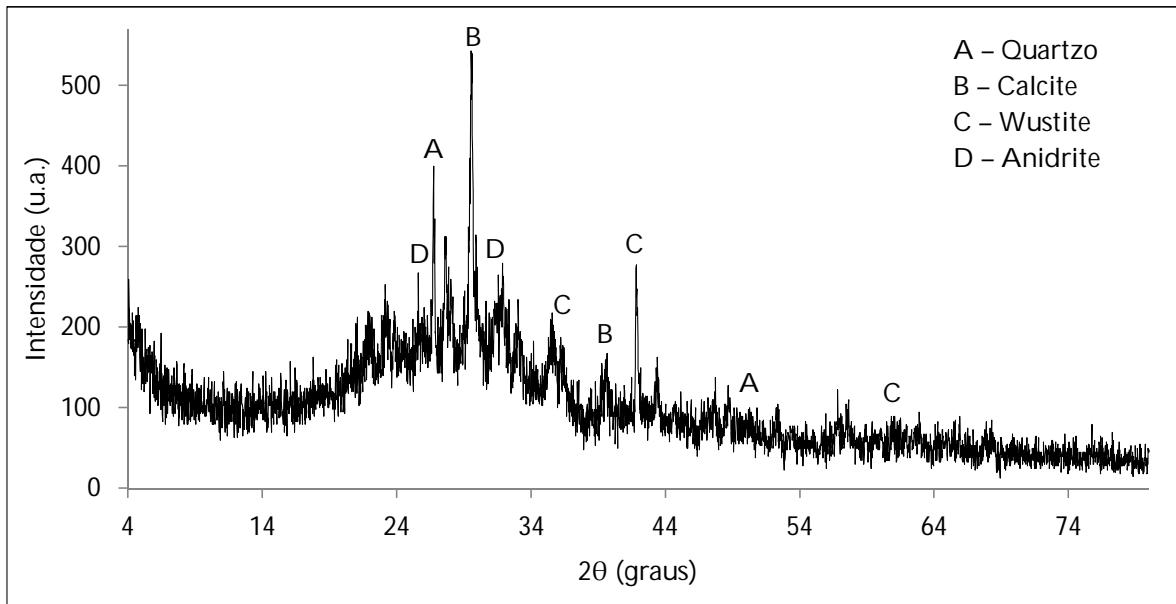


Figura 3.6 – Diffractograma de raios X das escórias (amostra 1).

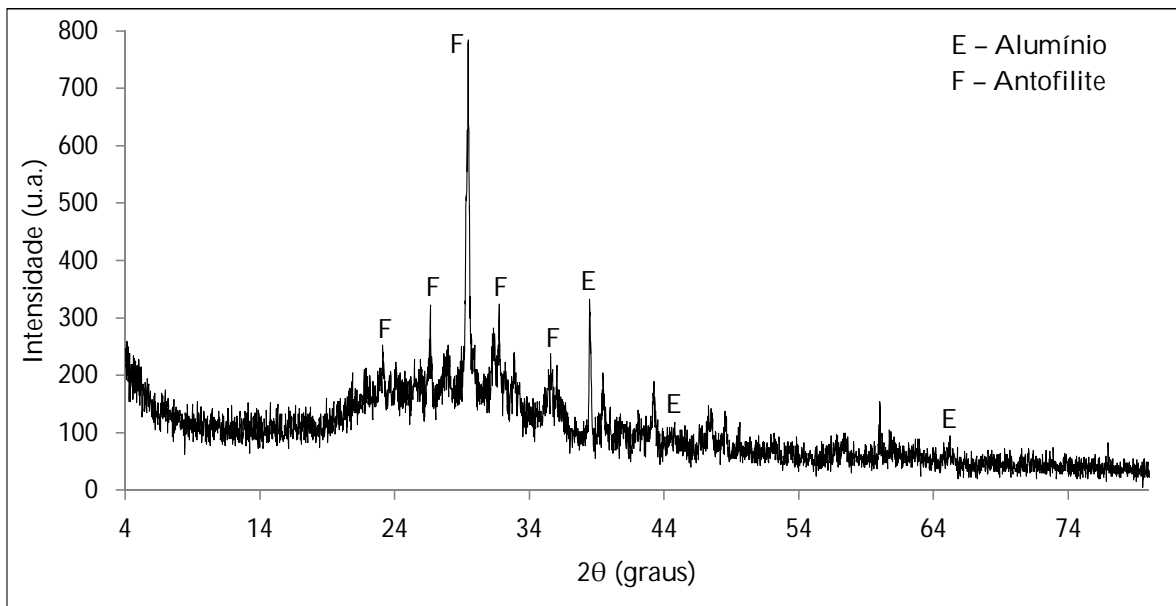


Figura 3.7 – Diffractograma de raios X das escórias (amostra 2).

### 3.4.2. Caracterização química

A caracterização química foi efectuada em duas amostras de escórias. Os resultados encontram-se na Tabela seguinte.

**Tabela 3.VIII** – Composição química das escórias, em percentagem ponderal de óxidos, determinada por espectroscopia de fluorescência de raios X.

Amostra 1			Amostra 2		
Óxidos	%	Erro absoluto (%)	Óxidos	%	Erro absoluto (%)
SiO <sub>2</sub>	41	0,2	SiO <sub>2</sub>	42,5	0,1
CaO	22,5	0,1	CaO	21,2	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,02	0,05	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,86	0,05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,21	0,04	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,31	0,04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,24	0,03	Na <sub>2</sub> O	6,29	0,05
Na <sub>2</sub> O	5,94	0,05	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,08	0,03
MgO	2,54	0,02	MgO	2,63	0,02
SO <sub>3</sub>	1,6	0,02	SO <sub>3</sub>	1,5	0,02
K <sub>2</sub> O	1,33	0,03	K <sub>2</sub> O	1,32	0,03
TiO <sub>2</sub>	1,32	0,03	TiO <sub>2</sub>	1,25	0,03
Cl	1,11	0,01	Cl	0,98	0,01
ZnO	0,345	0,003	ZnO	0,323	0,003
CuO	0,219	0,005	CuO	0,182	0,005
PbO	0,162	0,002	PbO	0,158	0,002
BaO	0,118	0,001	BaO	0,12	0,001
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,117	0,006	MnO	0,097	0,004
MnO	0,098	0,005	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0835	0,004
SrO	0,0557	0,001	SrO	0,0517	0,001
SnO <sub>2</sub>	0,0362	0,001	ZrO <sub>2</sub>	0,0471	0,004
ZrO <sub>2</sub>	0,0296	0,001	SnO <sub>2</sub>	0,0278	0,001
NiO	0,0239	0,002	NiO	0,0167	0,001
Rb <sub>2</sub> O	0	0	Rb <sub>2</sub> O	0,00743	0,001

A Tabela 3.VIII mostra que o material é maioritariamente composto por SiO<sub>2</sub>, mas os teores de CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e Na<sub>2</sub>O são também relevantes. Em quantidades mais reduzidas detecta-se MgO, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> e Cl. Componentes menores tais como ZnO, CuO, PbO, BaO e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foram estimados em percentagens inferiores a 1%.

### 3.5. Comparação com agregados comuns

#### 3.5.1. Agregados para a construção civil

Os agregados utilizados em betões e argamassas podem ser classificados segundo a origem, as dimensões das partículas e o peso específico aparente.

Segundo a origem existem:

- Naturais – os que já se encontram com a sua forma na natureza: areia e cascalho;
- Industrializados – os que têm composição “construída”, obtida por processos industriais. Nestes casos, a matéria-prima pode ser: rocha, escória de alto-forno, entre outras;
- Reciclados – os que resultam do processamento de material inorgânico anteriormente usado na construção.

Segundo as dimensões existe:

- Fino: as areias, naturais ou britadas, com partículas de menores dimensões que passa no peneiro de 4 mm;
- Grosso: o godo, de origem sedimentar, e o rolado, calhau ou seixo.

Conforme a massa volúmica do material que constitui as partículas, os agregados podem ser classificados em leves, médios/normais e pesados. [30 e 31]

Os agregados são geralmente o componente maioritário das argamassas e betões. Qualquer variação na sua qualidade tem um efeito considerável nas propriedades finais do material. A natureza inerente aos agregados, como a baixa inércia química, o baixo coeficiente de expansão térmica e durabilidade são importantes, mas a forma e a dimensão das partículas têm uma influência essencial. Ou-

tro aspecto importante é a percentagem e tipo de contaminantes presentes, que por sua vez dependem do local de extracção.

Como tal, estes agregados têm que seguir requisitos presentes em normas, nomeadamente a NP EN 13139 de 2005, "Agregados para argamassas", e a EN 12620 de 2002 + A1 de 2008, "Agregados para betão".

Na Tabela seguinte está presente o resumo das propriedades estimadas nas escórias de RSU.

**Tabela 3.IX – Resumo das propriedades das escórias.**

<b>Propriedade</b>	<b>Categoria</b>
Dimensão do agregado	$G_A 85$
Tolerâncias da granulometria típica	$GT_{A10}$
Teor de finos	$f_f$
Índice de achatamento	$FI_{35}$
Azul-de-metileno	0,3 g de corante por kg de amostra
Equivalente de areia	87%
Coeficiente Los Angeles	$LA_{50}$
Coeficiente micro-Deval	$M_{DE20}$
Massa volúmica das partículas	2,40 Mg/m <sup>3</sup>
Absorção de água	19,5%
Sulfatos solúveis em ácido	$AS_{0,8}$
Enxofre total	$S_i$
Teor de cloretos	< 0,1%

Na Tabela 3.X estão presentes alguns requisitos exigidos aos vários agregados utilizados em betões e argamassas.

**Tabela 3.X – Algumas propriedades exigidas aos agregados utilizados em betões e argamassas.**

<b>Propriedade</b>	<b>Categoria</b>
Coeficiente Los Angeles	≤ 50%
Absorção de água	≤ 5%
Teor de finos	1)
Teor de cloretos	2)
Sulfatos	3)



- 1) O teor de finos vai variar consoante a granulometria do agregado. Para a areia natural e para a brita é exigido um teor de finos igual ou inferior a 3%, para a areia britada igual ou inferior a 10% e para o godo terá de ser igual ou inferior a 2%.
- 2) O teor de cloretos dos inertes deve ser somado ao teor de cloretos dos restantes constituintes do betão ou argamassa, para que o teor por massa de cimentos seja inferior a 1%, 0,4% e 0,2% no caso do betão simples, armado e pré-esforçado, respectivamente.
- 3) O teor de sulfatos dos inertes deve ser somado aos correspondentes teores determinados nos outros componentes do betão ou argamassa (com excepção do cimento) e o valor final não deve exceder percentagens em massa da mistura, que dependem do tipo de cimento utilizado. Para o cimento tipo I e II tem um limite de 0,5%, tipo III de 1% e para o tipo IV 2%.

Em relação à granulometria dos agregados, é definido que a máxima dimensão  $D$  não deve exceder:

- $\frac{1}{4}$  da menor dimensão do elemento estrutural;
- A distância livre entre as barras da armadura diminuída de 5mm;
- 1,3 vezes a espessura do recobrimento das armaduras.

Tendo em conta estes requisitos, verifica-se que, de um modo geral, as escórias têm características favoráveis para este tipo de aplicações, excepto em relação à absorção de água que tem um valor muito superior ao exigido. Em relação ao teor de sulfatos, que no caso das escórias foi determinado como sulfatos solúveis em meio ácido, as escórias possuem um teor que impossibilita, à partida, a aplicação com cimentos tipo I e II.

### 3.5.2. Agregados para a pavimentação rodoviária

Por definição, os agregados para misturas betuminosas devem ser constituídos por materiais pétreos britados, provenientes da exploração de pedreiras e/ou de seixiras, incluindo ou não areia natural e outros produtos minerais. A homogeneidade das características é uma condição essencial para que qualquer material possa ser aplicado continuamente.

Como tal, as escórias têm que cumprir com os mesmos requisitos exigidos aos agregados comuns neste tipo de aplicações. Na Tabela 3.XI estão presentes as propriedades exigidas aos agregados para aplicação em camadas de misturas betuminosas a quente, mais propriamente numa camada de base.

**Tabela 3.XI** – *Propriedades dos agregados para camadas de misturas betuminosas a quente – camada de base. [29]*

<b>Propriedade</b>	<b>Categoria</b>
Azul-de-metileno	$MB_{F10}$
Índice de achatamento	$FI_{30}$
Coefficiente Los Angeles	$LA_{40}$
Coefficiente micro-Deval	$MD_{E25}$
Massa volúmica	A declarar
Absorção de água	$\leq 2\%$

Comparando com as propriedades das escórias, Tabela 3.IX, estas têm algumas características que satisfazem os requisitos: coeficiente de micro-Deval e ensaio de azul-de-metileno. No entanto, a maioria das propriedades não respeita as exigências e o seu uso, sem uma correcta aferição prévia e controlo, pode comprometer o desempenho das misturas. Em particular, a percentagem da absorção de água ultrapassa, em muito, o valor limite estipulado.

Tomando por base aplicações em camadas de pavimentação menos exigentes, como é o caso da camada de sub-base (propriedades presentes na Tabela 3.XII)

preparada com ligante hidráulico, verifica-se maior conformidade com as exigências. Apenas o teor de sulfatos solúveis em ácido se desvia do valor estipulado

**Tabela 3.XII** – *Propriedades do agregado britado de granulometria extensa a tratar com cimento e aplicar em misturas de sub-base. [29]*

Propriedade	Categoria
Equivalente de areia	$SE \geq 40\%$
Azul-de-metileno	$MB \leq 2,5 \text{ g/kg}$
Índice de achatamento	$FI_{35}$
Coefficiente Los Angeles	$LA_{45}$
Coefficiente micro-Deval	$MD_{E35}$
Massa volúmica	A declarar
Absorção de água	A declarar
Teor de sulfatos solúveis em ácido	$AS_{0,2}$
Enxofre total	$S \leq 1\%$

No caso de agregados naturais utilizados em camadas não ligadas de sub-base, os requisitos são muito semelhantes aos anteriores, respondendo as escórias aos requisitos estabelecidos.

### 3.6. Formulação de argamassas e misturas betuminosas

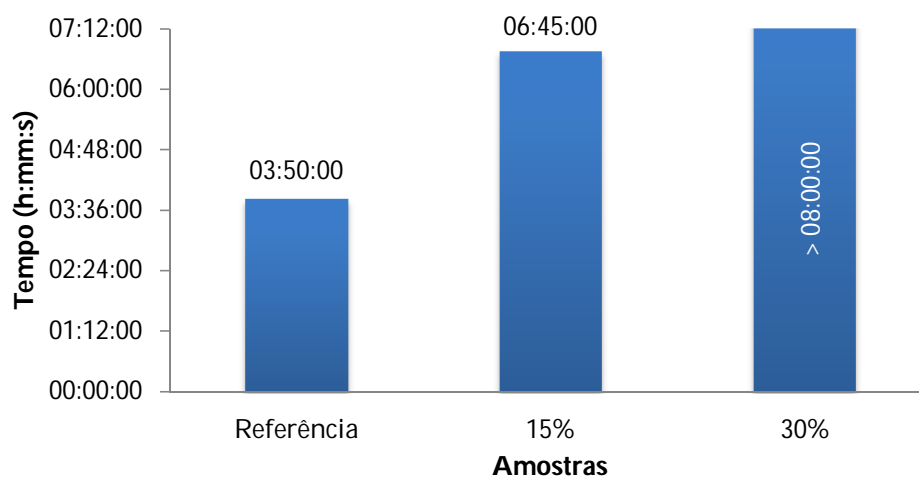
#### 3.6.1. Formulação de argamassa

A Tabela 2.V mostra as formulações testadas.

A adição de escórias na produção da argamassa não alterou significativamente a trabalhabilidade, tornando a mistura ligeiramente mais “suave”.

Com a adição de escórias verificou-se um aumento acentuado no tempo de início de presa, principalmente com a substituição de 30% dos agregados por escórias (Figura 3.8), na qual não foi possível efectuar a leitura porque ultrapassou as 8 horas. Isto pode ser explicado pela presença de sulfatos nas escórias, que retardam a presa. Os cloretos presentes nas escórias, que tendem a acelerar o processo de

presa, existem em quantidade reduzida. Outro factor influente pode ser a presença de finos, que é superior nas escórias.



**Figura 3.8** – Tempo de início de presa das formulações de argamassa.

A Tabela 3.XIII mostra os resultados obtidos nos ensaios de flexão e compressão com os provetes das diferentes formulações. Os valores resultam da média de três provetes.

**Tabela 3.XIII** – Resistência à flexão e compressão dos provetes de argamassa.

	Tempo de cura	Referência	15% escórias	30% escórias
Flexão (MPa)	7 dias	1,9	2	1,8
	28 dias	2,9	2,6	2,7
Compressão (MPa)	7 dias	8,6	8,1	7,6
	28 dias	13,8	12,4	12,1

Em relação ao ensaio de flexão verificou-se que a resistência não sofreu alterações significativas. A resistência à flexão das misturas com escórias tende a crescer mais lentamente com o tempo de cura em relação à referência.

No ensaio de compressão verificou-se que houve diminuição da resistência, embora não muito acentuada. Esta diminuição pode dever-se à diferença de gra-

nulometria entre a areia e a escória, provocando um deficiente empacotamento das partículas.

No ensaio de retracção (Figura 3.9) verificou-se que os valores não são muito elevados. Tendo em conta que o comprimento inicial dos provetes foi de 160 mm, a retracção dos provetes de referência foi de 0,171%; dos provetes com substituição de 15% da areia por escórias foi de 0,164% e dos provetes com substituição de 30% da areia por escórias foi de 0,165%.

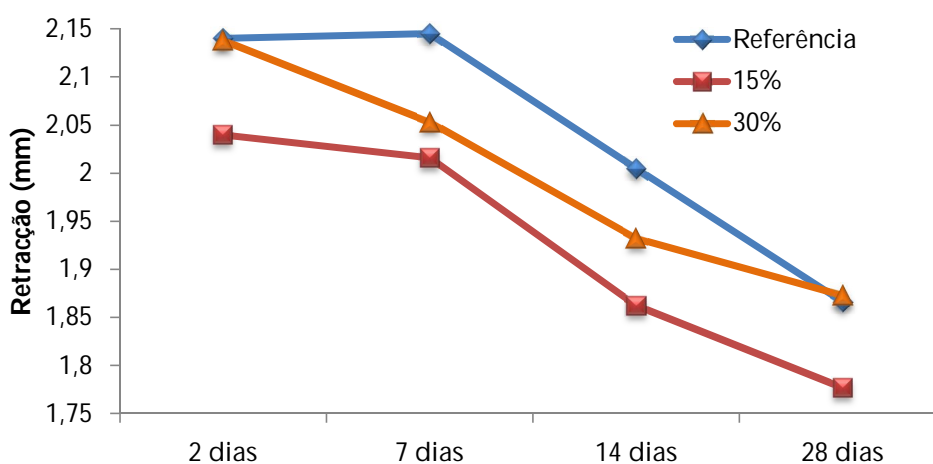
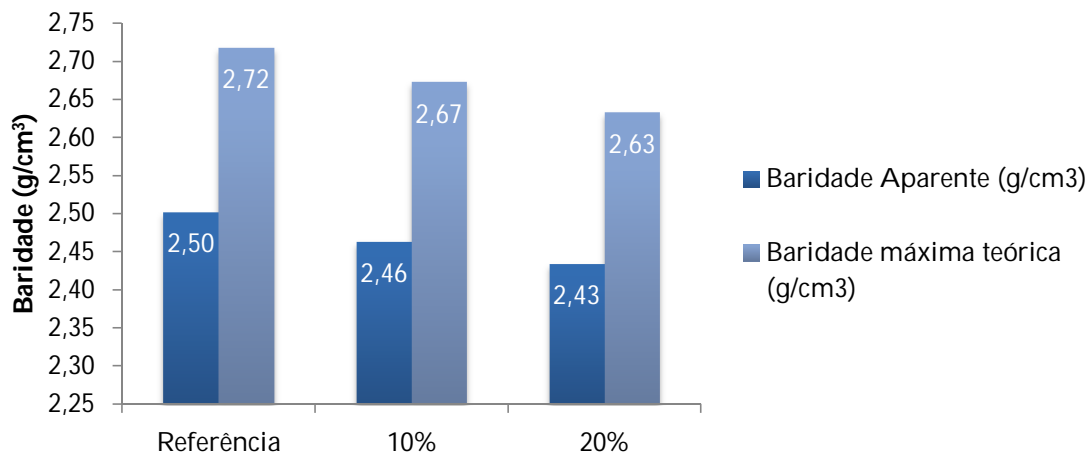


Figura 3.9 – Retracção dos provetes de argamassa.

### 3.6.2. Formulação de mistura betuminosa

Os resultados da caracterização das misturas betuminosas foram obtidos pela média de três provetes de cada formulação.

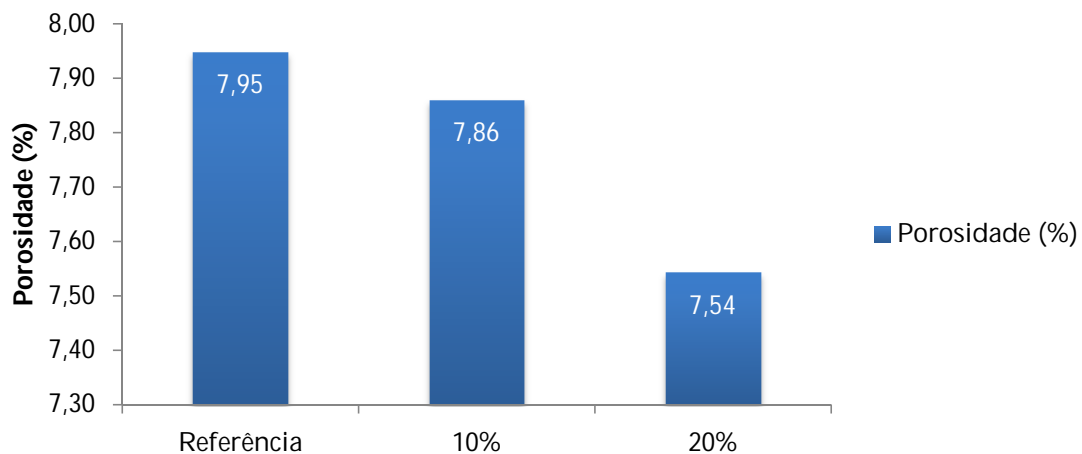
Em relação às baridades aparente e máxima teórica, houve uma diminuição com a substituição dos agregados pelas escórias (Figura 3.10). Isto deve-se ao facto das escórias possuírem uma massa volúmica inferior à dos agregados, como pode ser visualizado nas fichas técnicas dos agregados (Tabela A.XIV do Anexo VIII).



**Figura 3.10** – Baridade aparente e baridade máxima teórica dos provetes das misturas betuminosas.

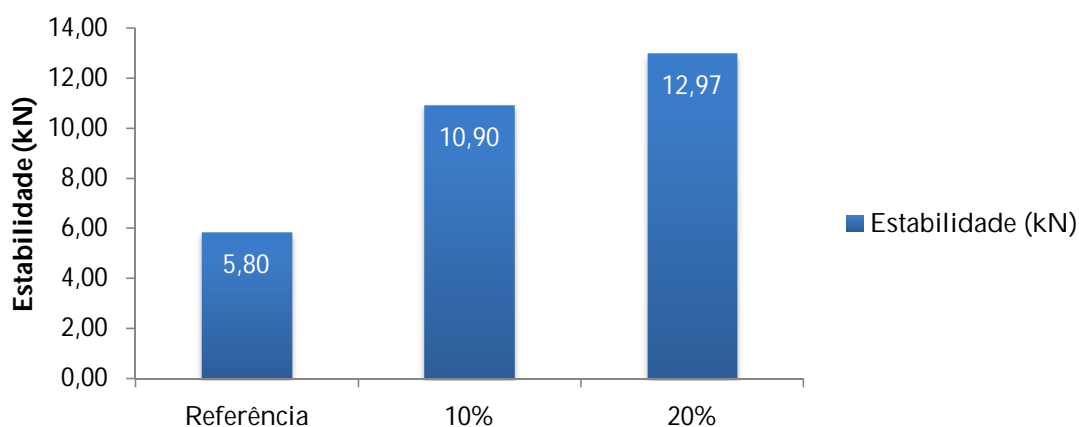
A diferença entre as duas baridades está relacionada com a porosidade, resultante do processo de compactação dos provetes e da geometria dos agregados, principalmente das britas, que possuem uma geometria angular, o que dificulta o empacotamento das partículas.

Verificou-se também uma diminuição da porosidade com a adição das escórias (Figura 3.11), devido a um melhor empacotamento conferido por estas.



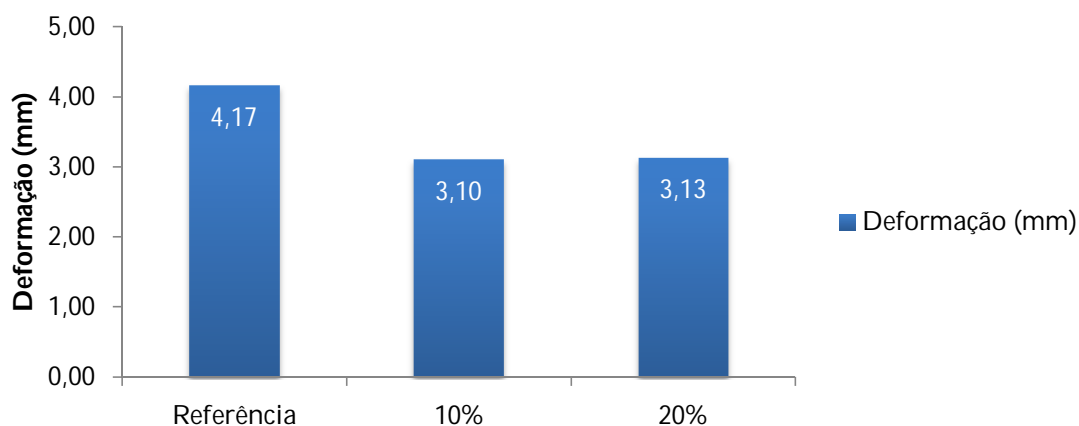
**Figura 3.11** – Porosidade dos provetes das misturas betuminosas.

Em relação à estabilidade, esta tende a aumentar significativamente com a incorporação de escórias (Figura 3.12), que conferem também uma melhor trabalhabilidade à mistura betuminosa. O valor reduzido das amostras de referência esteve relacionado com a dificuldade de obter um bom empacotamento e uma mistura homogênea, devido à geometria das britas, como já foi mencionado anteriormente.



**Figura 3.12** – Estabilidade dos provetes das misturas betuminosas.

Verificou-se que há uma diminuição ligeira na deformação quando há adição das escórias (Figura 3.13), sinónimo de um ligeiro aumento da rigidez dos provetes.



**Figura 3.13** – Deformação dos provetes das misturas betuminosas.





# Capítulo IV



*Conclusão*

---



## 4.1. Conclusão

O estado final das escórias depende de factores inerentes ao processo, mas não só, também depende de factores externos, nomeadamente das condições meteorológicas e outras condições adversas, tais como a sazonalidade dos resíduos. Isto obriga a uma monitorização mais regular das características, para que a sua aplicação seja viável.

Em relação à aplicação em argamassas, este material apresentou bom comportamento no que diz respeito à resistência à compressão e à flexão. Por outro lado, a adição de escórias provocou um aumento acentuado do tempo de início de presa. Isto obriga a que a substituição dos agregados por escórias seja feita em quantidades reduzidas, neste caso inferiores a 15%. Outra desvantagem é a necessidade de ser efectuada uma crivagem, para que a granulometria seja idêntica à do agregado a substituir. Este passo torna o processo mais caro.

Nas misturas betuminosas, as escórias não substituem um tipo de agregado em particular, mas sim várias fracções granulométricas dos diferentes agregados que constituem a mistura betuminosa, para que o fuso granulométrico seja respeitado. Nesta aplicação o desempenho dos provetes foi satisfatório, melhorando significativamente a estabilidade e diminuindo a porosidade. As escórias não sofreram qualquer tipo de transformação, não havendo custos adicionais de transformação da matéria-prima.

Uma vez que os resultados obtidos para este tipo de aplicação em camadas betuminosas de baixa exigência foram satisfatórios, seria pertinente, em trabalhos futuros, avaliar o desempenho das escórias em camadas de maior exigência, tais como camadas de regularização.

De um modo geral conclui-se que as escórias possuem potencial para as aplicações que foram discutidas. Apesar de haver diferenças em relação aos agre-

gados utilizados, será pertinente estudar a aplicação das escórias em pequenas quantidades e, numa fase inicial, em obras pouco exigentes, como por exemplo como agregado em pavimentação de estradas sujeitas a tráfego reduzido. A utilização desta nova matéria-prima traz grandes vantagens, nomeadamente em relação ao seu baixo custo e a nível ambiental, na diminuição do volume depositado em aterro.

## 4.2. Reflexão final

Este estágio não teve apenas o objectivo de caracterizar as escórias resultantes da incineração de RSU, mas também o de compreender todo o processo gerador e todos os factores que influenciam as características das escórias. Serviu também para a integração numa realidade que, esperançosamente, passará a fazer parte do meu quotidiano.

Com esta iniciativa tive oportunidade de testar e adquirir novos conhecimentos e de me preparar para a realidade do mundo de trabalho.

O estágio veio preencher uma lacuna na formação académica, na medida em que consciencializa para a responsabilidade de um cargo numa empresa e para todo o trabalho a ele associado.



# Bibliografia







- [1] J. Q. Levy, A. J. Cabeças, "Resíduos Sólidos Urbanos – Princípios e Processos". AEPISA – Associação das empresas portuguesas para o sector do ambiente, 1ª Edição, 2006.
- [2] "Integrated Pollution Prevention and Control – Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration". European Commission, 2006. Acedido a 20 de Maio de 2010 em: <http://eippcb.jrc.es/reference/>
- [3] C. R. Cheeseman, *et al.*, "Ceramic processing of incinerator bottom ash", *Waste Management*, vol. 23, pp. 907-916, 2003.
- [4] R. C. C. Monteiro, *et al.*, "Characterization of MSWI bottom ashes towards utilization as glass raw material", *Waste Management*, vol. 28, pp. 1119-1125, 2008.
- [5] O. Gines, *et al.*, "Combined use of MSWI bottom ash and fly ash as aggregate in concrete formulation: Environmental and mechanical considerations", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 169, pp. 643-650, Set 2009.
- [6] J. M. Chimenos, *et al.*, "Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 64, pp. 211-222, Fev 1999.
- [7] Relatório de Sustentabilidade, *Valor Ambiente – Gestão e Administração de Resíduos da Madeira, S.A.*, 2007. Acedido a 25 de Novembro de 2009 em: <http://www.valorambiente.pt/>
- [8] Valor Ambiente – Gestão e Administração de Resíduos da Madeira, S.A., 2008. Acedido a 30 de Junho de 2010 em: <http://www.valorambiente.pt/>
- [9] Programas de Monitorização Ambiental da ETRS da Meia Serra, *Valor Ambiente – Gestão e Administração de Resíduos da Madeira, S.A.*, s.d.
- [10] Descrição técnica do processo - *Manual de operação pertencente aos arquivos técnicos da ETRS da Meia Serra*. Acedido a 20 de Abril de 2010.
- [11] J. S. Coutinho, "Agregados para Argamassas e Betões", *Materiais de Construção I*. 1999.
- [12] J. L. B. Aguiar, Apontamentos teóricos da unidade curricular Materiais de Construção II, *Universidade do Minho*, 2001.

[13] P. Pereira, L. P. Santos, Pavimentos Rodoviários, *Braga: Tipografia Barbosa & Xavier, Lda.*, 2002.

[14] NP EN 1097-2 de 2002 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação. *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.

[15] NP EN 13242 de 2005 – Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária. *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.

[16] NP EN 932-1 de 2002 – Ensaio das propriedades gerais dos agregados – Parte 1: Métodos de amostragem. *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.

[17] NP EN 933-1 de 2000 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração. *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.

[18] NP EN 933-3 de 2000 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 3: Determinação da forma das partículas – Índice de achatamento. *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.

[19] NP EN 933-9 de 2002 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 9: Determinação do teor de finos – Ensaio do azul de metileno. *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.

[20] NP EN 933-8 de 2002 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 8: Determinação do teor de finos – Ensaio do equivalente de areia. *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.

[21] NP EN 1097-1 de 2002 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval). *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.

[22] NP EN 1097-6 de 2003 – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.

- [23] EN 1744-1 de 1998 – Tests for chemical properties of aggregates – Part 1: Chemical analysis. *CEN – Comité Européen de Normalisation*, Bruxelas.
- [24] NP EN 196-1 de 2006 – Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.
- [25] NP EN 196-3 de 2006 – Métodos de ensaio de cimentos – Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade. *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.
- [26] prEN 1015-13 de 1995 – Methods of test for mortar for masonry – Part 13: Determination of dimensional stability of hardened mortars. *CEN – Comité Européen de Normalisation*, Bruxelas.
- [27] NP 142 de 1968 – Misturas Betuminosas: Ensaio de compressão Marshall. *IGPAI – Repartição de Normalização*.
- [28] E 267 de 1973 – Misturas Betuminosas: Determinação da Densidade Aparente. Especificação LNEC, *LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa.
- [29] Caderno de Encargos Tipo Obra, “14.03 – Pavimentação: Características dos materiais”, *Estradas de Portugal, S.A.*, Fevereiro de 2009. Acedido a 3 de Janeiro de 2010 em: <http://www.estradasdeportugal.pt/index.php/pt/empreendimentos>
- [30] A. S. Coutinho, “Fabrico e propriedades do betão”, Volume I – Propriedades das matérias-primas e Volume II – Fabrico, *LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa, 1988.
- [31] L. A. F. Bauer, “Materiais de Construção I”, *LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, S.A.*, 1994.
- [32] J. F. S. Oliveira, B. Mendes, N. Lapa, “Resíduos – Gestão, Tratamento e sua Problemática em Portugal”, *Lidel – Edições técnicas, lda*, 2009.



# A NEXOS





**ANEXO I – Preparação da solução floculante e da solução de lavagem para a determinação do teor equivalente de areia, segundo a norma NP EN 933-8 de 2002.**

**Solução flocculante concentrada**, preparada a partir de:

- cloreto de cálcio cristalino,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ou cloreto de cálcio anidro,  $\text{CaCl}_2$ ;
- glicerina, 99% glicerol, da qualidade de reagente para laboratório;
- solução de formaldeído, 40% em volume, da qualidade de reagente para laboratório;
- água destilada ou desmineralizada.

**Preparação:**

Dissolver  $219 \pm 2$  g do cloreto de cálcio cristalino em  $350 \pm 50$  mL de água destilada ou desmineralizada, arrefecer até temperatura ambiente e se necessário filtrar com papel de filtro médio ou grosso. Adicionar  $480 \pm 5$  g de glicerina e  $12,5 \pm 0,5$  g de solução de formaldeído e diluir com água destilada ou desmineralizada até se obter 1 L de solução misturando vigorosamente. A solução deverá ser armazenada num local protegido da luz.

**NOTA:** 219 g  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  é equivalente a 111 g de cloreto de cálcio anidro,  $\text{CaCl}_2$ .

**Solução de lavagem:**

**Preparação:**

Diluir  $125 \pm 1$  mL de solução flocculante concentrada em água destilada ou desmineralizada até se obter  $5,00 \pm 0,01$  L.

**NOTA:** Na preparação da solução de lavagem, convém que a solução concentrada seja primeiro agitada vigorosamente e subsequentemente o recipiente onde estava contida deve ser enxaguado várias vezes com água destilada ou desmineralizada, vertendo essa água num frasco de 5 L antes de se diluir a solução até se obter 5 L.

A solução de lavagem não deve ser utilizada após 28 dias da data da sua preparação ou se se apresentar turva, com precipitado ou bolor.



**ANEXO II – Determinação dos sulfatos solúveis em meio ácido, segundo a norma EN 1744-1 de 1998 – Secção 12.**

## **Sulfatos solúveis em meio ácido – EN 1744-1 de 1998 – Secção 12**

1. Amostragem e redução (**7 kg  $\approx$  12 conquilhas**);
2. Secar ( $110 \pm 5$ ) °C;
3. Esmagar e reduzir a uma massa de **20 g**;
4. Moer até passar num peneiro de **125  $\mu\text{m}$**  → Retirar **2 g**;
5. Pesar com uma casa decimal (**m<sub>6</sub>**);
6. Colocar a amostra num copo de 250 ml e adicionar **90 ml de água fria**;
7. Enquanto a mistura é misturada vigorosamente, adicionar **10 ml de ácido clorídrico concentrado**;
8. Aquecer a solução cuidadosamente e desfazer os sólidos com uma vareta de vidro;
9. Permitir a digestão da solução durante 15 minutos, abaixo da temperatura de ebulição;

Para evitar a oxidação de sulfitos, colocar os **90 ml de água** e os **10 ml de ácido clorídrico concentrado** no copo de 250 ml e aquecer até ao ponto de ebulição. Remover da fonte de calor e, agitando, polvilhar a amostra na solução ácida.

11. Filtrar o resíduo num filtro de papel médio para um copo de 400 ml. Lavar cuidadosamente com **água quente**;
12. Verificar se as lavagens estão livres de iões cloreto, pelo teste de nitrato de prata;

Teste do nitrato de prata: recolher a lavagem num tubo de ensaio, adicionar várias gotas de **ácido nítrico concentrado** e de **solução de nitrato de prata**. Verificar se a solução está turva ou se existe precipitado. Se existir, continuar as lavagens, fazendo este teste periodicamente. Se não existir, confirma-se que as lavagens estão livres de iões cloreto.

**Solução de nitrato de prata (0,1 mol/l):** Secar **20 g de nitrato de prata** a  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  durante **1 hora**. Arrefecer no excicador. Pesar **(16,987 $\pm$ 0,001) g**, dissolver e diluir em **1 litro de água** num frasco volumétrico. Armazenar numa garrafa cor âmbar, protegido da luz solar.

13. Ajustar o volume para **250 ml** e, se necessário, acidificar recorrendo a **ácido clorídrico (1+11)** até o indicador vermelho de metilo atingir coloração vermelha (**pH<5**);
14. Levar à ebulição e manter durante **5 minutos**. Verificar se a solução está clara. Se não estiver, recomeçar o teste usando uma amostra nova;
15. Enquanto a mistura é agitada vigorosamente, mantendo à temperatura de ebulição, adicionar gota a gota **10 ml de cloreto de bário**, pré-aquecido à temperatura abaixo do ponto de ebulição. Continuar a fervura durante **15 minutos**;

Dissolver **100 g de cloreto de bário (BaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O)** em **1 litro de água**. Filtrar em filtro de papel médio antes de usar.

16. Baixar ligeiramente a temperatura e manter durante **30 minutos**. Deixar num lugar morno durante a noite;
17. Transferir o precipitado para um filtro de papel fino. Lavar o precipitado várias vezes até que as lavagens estejam livres de iões cloreto (teste do nitrato de prata);
18. Colocar o papel filtro com o precipitado num cadinho previamente pesado;
19. Secar a  $110 ^\circ\text{C}$  durante **30 minutos** e aumentar gradualmente ( $10 ^\circ\text{C}/\text{minuto}$ ) até aos  $925 ^\circ\text{C}$ , permanecendo durante **1 hora**;
20. Arrefecer até à temperatura ambiente num excicador;
21. Pesar o cadinho com o precipitado e retirar a massa do cadinho (**m<sub>7</sub>**);

$$\text{Teor de Sulfatos} = \frac{m_7}{m_6} \times 34,30$$

$m_6$  – massa da amostra [g];  $m_7$  – massa do precipitado [g]; Teor de Sulfatos [%].

**ANEXO III – Determinação do enxofre total, segundo a norma EN  
1744-1 de 1998 – Secção 11.**

### Enxofre total – EN 1744-1 de 1998 – Secção 11

1. Amostragem e redução (**7 kg  $\approx$  12 conchas**);
2. Secar ( $110 \pm 5$ ) °C;
3. Esmagar e reduzir a uma massa de **20 g**;
4. Moer até passar num peneiro de **125  $\mu\text{m}$**  → Retirar **1 g**;
5. Pesar com uma casa decimal (**m<sub>4</sub>**);
6. Colocar num Erlenmeyer de 250 ml com funil – Colocar na hotte;
7. Adicionar **3 ml de água** e **1 ml de bromo**;
8. Agitar calmamente a mistura durante **1 minuto**;
9. Adicionar pelo funil **15 ml de ácido nítrico concentrado**, livre de enxofre [(1,40 - 1,42) g/cm<sup>3</sup>];
10. Colocar a mistura num banho vapor durante **1 hora**, quebrando o gel periodicamente;
11. Adicionar **30 ml de água** e levar à ebulição numa placa de aquecimento. Retirar quando o fumo castanho cessar;
12. Adicionar **5 ml de ácido clorídrico concentrado** [(1,18 – 1,19) g/cm<sup>3</sup>] e **10 ml de água**. Ferver até atingir um volume reduzido;
13. Repetir o passo anterior;
14. Transferir o conteúdo para um frasco de 250 ml, lavar o Erlenmeyer com água até o frasco conter **100 ml**;
15. Colocar polpa de filtro de papel, levar a mistura quase à ebulição;
16. Tornar a solução alcalina adicionando **amónia**, verificar através de medidor de pH (pH $\approx$ 8);
17. Ferver durante **30 segundos** → Filtrar com sucção ligeira (usar filtro de papel de porosidade média) e lavar com água destilada morna (pouca);

18. Transferir o filtro de papel para o copo e adicionar **70 ml de água quente e 5 ml de ácido clorídrico concentrado**;
19. Manter no ponto de ebulição durante **30 segundos** → Filtrar com sucção ligeira (usar filtro de papel de porosidade média) e lavar com água destilada morna (pouca), rejeitando o precipitado;
20. Acidificar o filtrado total com **1 ml de ácido clorídrico concentrado** (o conteúdo total do frasco deve ser **220 ml**);
21. Levar à fervura durante **5 minutos**;
22. Enquanto a mistura é agitada vigorosamente, mantendo à temperatura de ebulição, adicionar gota a gota **10 ml de cloreto de bário**, pré-aquecido à temperatura abaixo do ponto de ebulição. Continuar a fervura durante **15 minutos**;
23. Baixar ligeiramente a temperatura e manter durante **30 minutos**. Deixar num lugar morno durante a noite (50-60°C);
24. Transferir o precipitado para um filtro de papel fino. Lavar o precipitado várias vezes até que as lavagens estejam livres de iões cloreto (teste de nitrato de prata);
25. Colocar o papel filtro com o precipitado num cadinho previamente pesado;
26. Secar a 110 °C durante **30 minutos** e aumentar gradualmente (10 °C/minuto) até aos 925 °C, permanecendo durante **1 hora**;
27. Arrefecer até à temperatura ambiente num excicador;
28. Pesar o cadinho com o precipitado e retirar a massa do cadinho (**m<sub>5</sub>**);

$$\text{Enxofre total: } S = \frac{m_5}{m_4} \times 13,74$$

m<sub>4</sub> – massa da amostra [g]; m<sub>5</sub> – massa do precipitado [g]; S [%].

**ANEXO IV – Determinação dos cloretos, segundo a norma EN 1744-1  
de 1998 – Secção 7.**

## Cloretos – EN 1744-1 de 1998 – Secção 7

1. Amostragem e redução (**7 kg**  $\approx$  **12 conchas**);
2. Secar ( $110 \pm 5$ ) °C;
3. Peneirar num peneiro de **16 mm** e esmagar partículas com tamanho superior de modo a passar no peneiro;
4. Misturar cuidadosamente e retirar duas amostras de (**2  $\pm$  0,3**) kg;
5. Colocar cada uma das amostras em garrafas de **5 litros**, previamente pesadas, arredondado à grama. Registrar a massa das amostras;
6. Adicionar uma massa de água igual à massa de amostra;
7. Agitar a amostra durante **60 minutos**;
8. Filtrar extractos num filtro de papel médio até que pelo menos **100 ml de filtrados** sejam recolhidos (lípidos ou ligeiramente opalescentes);
9. Recolher **100 ml de extracto** com uma pipeta e colocar num copo de 250 ml;
10. Adicionar **5 ml de ácido nítrico**, seguido da **solução de nitrato de prata** (bureta de 50 ml) até que todos os cloretos sejam precipitados;

**Ácido nítrico:** Adicionar **100 ml de ácido nítrico** (1,40-1,42) g/cm<sup>3</sup> e **150 ml de água**. Numa hotte, ferver o ácido diluído até que fique incolor e deixar arrefecer até à temperatura ambiente.

**Solução de nitrato de prata (0,1 mol/l):** Secar **20 g de nitrato de prata** a ( $110 \pm 5$ ) °C durante **1 hora**. Arrefecer no excicador. Peser (**16,987  $\pm$  0,001**) g, dissolver e diluir em **1 litro de água** num frasco volumétrico. Armazenar numa garrafa cor âmbar, protegido da luz solar.

11. Se houver a presença de sulfitos, permitir a digestão durante **3 ou 5 minutos** a uma temperatura abaixo do ponto de ebulição. Pode-se formar um precipitado branco de enxofre que não necessita de filtração. Deixar arrefecer e então adicionar a **solução de nitrato de prata**;



12. Deve ser adicionado nitrato de prata suficiente para titular **3 ml de solução de tiocianato**;
13. Registrar o volume de nitrato de prata adicionado ( $V_5$ );
14. Adicionar **2 ml de 3,5,5-trimetilhexan-1-ol**, colocar uma rolha e agitar vigorosamente para coagular o precipitado;
15. Retirar a rolha e lavar, para evitar a perda de solução;
16. Adicionar **5 ml de solução de alumínio férrico** [ $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ], seguida da **solução padrão de tiocianato**, adicionada a partir de uma bureta, até que ocorra a primeira mudança de cor permanente (branco opalescente para castanho pálido);

**Solução de alumínio férrico [ $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ]: 60 g de água + 50 g de alumínio férrico.** Aquecer para dissolver, adicionando **10 ml de ácido nítrico** (preparação acima). Arrefecer até  $T_{\text{amb}}$  e armazenar numa garrafa de vidro.

**Solução padrão de tiocianato ( $\approx 0,1$  mol/litro):** Dissolver **9,7 g de tiocianato de potássio** em **água** e diluir para 1 litro num balão volumétrico. Pipetar **25 ml de solução de nitrato de prata** para um frasco de 100 ml, adicionar **5 ml de ácido nítrico** (preparação acima) e **1 ml de solução indicadora de alumínio férrico**. Adicionar a **solução de tiocianato** a partir de uma bureta, até que ocorra a primeira mudança de cor permanente (branco opalescente para castanho pálido). Registrar o volume de solução de tiocianato adicionado ( $V_1$  [ml]). Calcular a concentração da solução de tiocianato ( $c_T$

$$[\text{mol/litro}]). c_T = \frac{2,5}{V_1}$$

17. Registrar o volume de solução de tiocianato ( $V_6$ );
18. O resultado do teste é dado pela média das determinações dos dois extractos;

$$\text{Teor de Cloretos: } C = 0,003546 \times W[V_5 - (10 \times c_T \times V_6)]$$

$W$  – 1000 g/massa de agregado em gramas;  $V_5$  – volume da solução de nitrato de prata [ml];  $V_6$  – volume da solução de tiocianato padronizada [ml];  $c_T$  – concentração da solução de tiocianato padronizada [mol/litro];  $C$  [%].

**ANEXO V – Análise granulométrica de agregados utilizados em argamassa e em formulações betuminosas.**

**Tabela A.I – Análise granulométrica da areia utilizada na formulação da argamassa.**

Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Acumulada retida	% Acumulada passada
20	-	-	-	-
16	-	-	-	-
10	-	-	-	-
8	0	0	0	100
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2	1	0	0	100
1	6	1	1	99
0,5	135	15	16	84
0,25	579	66	82	18
0,125	150	17	99	1
0,063	8	1	99	1
0	5	1	100	0
Total	884	100	-	-

**Tabela A.II – Análise granulométrica dos agregados utilizados na formulação da mistura betuminosa.**

Abertura quadrada dos peneiros (mm)	% Acumulada de material que passa no peneiro			
	Agregados			
	Areia	Pó de pedra	Brita 1	Brita 2
22,4	100	100	100	100
16	100	100	99	88
11,2	100	100	90	20
8	100	100	48	5
5,6	100	100	5	4
4	100	96	2	4
2	100	74	1	4
1	88	54	1	4
0,5	60	40	1	4
0,25	25	29	1	4
0,125	10	21	1	4
0,063	2	15	1	2
Fundo	0	0	0	0

**ANEXO VI – Formulações betuminosas.**

**Tabela A.III – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de referência.**

Peneiros (mm)	Brita 2		Brita 1		Pó de pedra		Areia		Formulação	Fuso adoptado
	Gran.	28%	Gran.	31%	Gran.	18%	Gran.	23%		
<b>22,4</b>	100,0	28,0	100,0	31,0	100,0	18,0	100,0	23,0	100,0	100 - 100
<b>16</b>	88,0	24,6	99,0	30,7	100,0	18,0	100,0	23,0	96,3	90 - 100
<b>11,2</b>	20,0	5,6	90,0	27,9	100,0	18,0	100,0	23,0	74,5	68 - 93
<b>5,6</b>	4,0	1,1	5,0	1,6	100,0	18,0	100,0	23,0	43,7	40 - 60
<b>2</b>	4,0	1,1	1,0	0,3	74,0	13,3	100,0	23,0	37,8	26 - 41
<b>0,5</b>	4,0	1,1	1,0	0,3	40,0	7,2	60,0	13,8	22,4	12 - 26
<b>0,125</b>	4,0	1,1	1,0	0,3	21,0	3,8	10,0	2,3	7,5	4 - 14
<b>0,063</b>	2,0	0,6	1,0	0,3	15,0	2,7	2,0	0,5	4,0	2 - 7

**Tabela A.IV – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes com 10% de escórias.**

Peneiros (mm)	Brita 2		Brita 1		Pó de pedra		Areia		Escórias		Formulação	Fuso adoptado
	Gran.	24%	Gran.	31%	Gran.	14%	Gran.	21%	Gran.	10%		
<b>22,4</b>	100,0	24,0	100,0	31,0	100,0	14,0	100,0	21,0	100,0	10,0	100,0	100 - 100
<b>16</b>	88,0	21,1	99,0	30,7	100,0	14,0	100,0	21,0	96,2	9,6	96,4	90 - 100
<b>11,2</b>	20,0	4,8	90,0	27,9	100,0	14,0	100,0	21,0	91,8	9,2	76,9	68 - 93
<b>5,6</b>	4,0	1,0	5,0	1,6	100,0	14,0	100,0	21,0	68,0	6,8	44,3	40 - 60
<b>2</b>	4,0	1,0	1,0	0,3	74,0	10,4	100,0	21,0	36,8	3,7	36,3	26 - 41
<b>0,5</b>	4,0	1,0	1,0	0,3	40,0	5,6	60,0	12,6	17,2	1,7	21,2	12 - 26
<b>0,125</b>	4,0	1,0	1,0	0,3	21,0	2,9	10,0	2,1	8,2	0,8	7,1	4 - 14
<b>0,063</b>	2,0	0,5	1,0	0,3	15,0	2,1	2,0	0,4	6,5	0,7	4,0	2 - 7

**Tabela A.V – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes com 20% de escórias.**

Peneiros (mm)	Brita 2		Brita 1		Pó de pedra		Areia		Escórias		Formulação	Fuso adoptado
	Gran.	25%	Gran.	24%	Gran.	15%	Gran.	16%	Gran.	20%		
<b>22,4</b>	100,0	25,0	100,0	24,0	100,0	15,0	100,0	16,0	100,0	20,0	100,0	100 - 100
<b>16</b>	88,0	22,0	99,0	23,8	100,0	15,0	100,0	16,0	96,2	19,2	96,0	90 - 100
<b>11,2</b>	20,0	5,0	90,0	21,6	100,0	15,0	100,0	16,0	91,8	18,4	76,0	68 - 93
<b>5,6</b>	4,0	1,0	5,0	1,2	100,0	15,0	100,0	16,0	68,0	13,6	46,8	40 - 60
<b>2</b>	4,0	1,0	1,0	0,2	74,0	11,1	100,0	16,0	36,8	7,4	35,7	26 - 41
<b>0,5</b>	4,0	1,0	1,0	0,2	40,0	6,0	60,0	9,6	17,2	3,4	20,3	12 - 26
<b>0,125</b>	4,0	1,0	1,0	0,2	21,0	3,2	10,0	1,6	8,2	1,6	7,6	4 - 14
<b>0,063</b>	2,0	0,5	1,0	0,2	15,0	2,3	2,0	0,3	6,5	1,3	4,6	2 - 7

**ANEXO VII – Tabelas com limites gerais, tolerâncias e categorias para classificação dos agregados, segundo a norma NP EN 13242 de 2005.**

**Tabela A.VI – Limites gerais para a granulometria.**

Agregado	Dimensão (mm)	Porcentagem de passados, em massa					Categoria G
		2D	1,4D	D	d	d/2	
Grosso	$d \geq 1$	100	98 a 100	85 a 99	0 a 15	0 a 5	$G_c$ 85-15
	e $D > 2$	100	98 a 100	80 a 99	0 a 20	0 a 5	$G_c$ 80-20
Fino	$d = 0$	100	98 a 100	85 a 99	-	-	$G_F$ 85
	e $D \leq 6,3$	100	98 a 100	80 a 90	-	-	$G_F$ 80
Granulometria extensa	$d = 0$	-	100	85 a 99	-	-	$G_A$ 85
	e $D > 6,3$	100	98 a 100	80 a 99	-	-	$G_A$ 80
		100	-	75 a 99	-	-	$G_A$ 75

**Tabela A.VII – Tolerâncias da granulometria típica do agregado de granulometria extensa.**

Tolerâncias			Categoria
Porcentagem de passados, em massa			
Peneiro D	Peneiro D/2	Peneiro 0,063 mm	Agregado de granulometria extensa $GT_A$
±5	±10	±3	$GT_A10$
±5	±20	±4	$GT_A20$
±7,5	±25	±5	$GT_A25$
Não requerido			$GT_ANR$

**Tabela A.VIII – Categorias para os valores máximos do teor de finos.**

Agregado	Porcentagem de passados no peneiro de 0,063 mm	Categoria f
Granulometria extensa	≤ 3	$f_3$
	≤ 5	$f_5$
	≤ 7	$f_7$
	≤ 9	$f_9$
	≤ 12	$f_{12}$
	≤ 15	$f_{15}$
	> 15	$f_{Declarado}$
Não requerido		$f_{NR}$

**Tabela A.IX – Categorias para os valores máximos do índice de achatamento.**

Índice de achatamento	Categoria FI
≤ 20	$FI_{20}$
≤ 35	$FI_{35}$
≤ 50	$FI_{50}$
> 50	$FI_{Declarado}$
Não requerido	$FI_{NR}$

**Tabela A.X** – *Categorias para os valores máximos do coeficiente Los Angeles.*

Coeficiente Los Angeles	Categoria LA
≤ 20	LA <sub>20</sub>
≤ 25	LA <sub>25</sub>
≤ 30	LA <sub>30</sub>
≤ 35	LA <sub>35</sub>
≤ 40	LA <sub>40</sub>
≤ 50	LA <sub>50</sub>
≤ 60	LA <sub>60</sub>
> 60	LA Declarado
Não requerido	LA <sub>NR</sub>

**Tabela A.XI** – *Categorias para os valores máximos da resistência ao desgaste por atrito.*

Coeficiente micro-Deval	Categoria M <sub>DE</sub>
≤ 20	M <sub>DE</sub> 20
≤ 25	M <sub>DE</sub> 25
≤ 35	M <sub>DE</sub> 35
≤ 50	M <sub>DE</sub> 50
> 50	M <sub>DE</sub> Declarado
Não requerido	M <sub>DE</sub> NR

**Tabela A.XII** – *Categorias para o valor máximo do teor de sulfatos solúveis em ácido.*

Teor de sulfatos solúveis em ácido %	Categoria AS
≤ 0,2	AS <sub>0,2</sub>
≤ 0,8	AS <sub>0,8</sub>
> 0,8	AS Declarado
Não requerido	AS <sub>NR</sub>

**Tabela A.XIII** – *Categorias para os valores máximos do teor de enxofre total.*

Teor de enxofre total %	Categoria S
≤ 1	S <sub>1</sub>
> 1	S Declarado
Não requerido	S <sub>NR</sub>



**ANEXO VIII – Características dos agregados utilizados nas misturas betuminosas.**

**Reciclagem de escórias de incineração de RSU como agregados para a construção**

**Tabela A.XIV – Características dos agregados utilizados nas misturas betuminosas (Prebel).**

Características	Areia Fina		Pó de Pedra		Brita 1		Brita 2	
	Valor declarado	Categoria	Valor declarado	Categoria	Valor declarado	Categoria	Valor declarado	Categoria
Dimensão nominal (d/D)	0/2		0/4		4/11		11/22	
Granulometria		G <sub>F85</sub>		G <sub>F85</sub>		G <sub>85/20</sub>		G <sub>85/20</sub>
Teor de finos		f <sub>10</sub>		f <sub>16</sub>		f <sub>4</sub>		f <sub>4</sub>
Forma das partículas						F <sub>NR</sub>		F <sub>NR</sub>
Teor de Conchas						SC <sub>NR</sub>		SC <sub>NR</sub>
Qualidade dos finos			DND <sup>1</sup>		DND		DND	
Resistência à fragmentação						LA <sub>NR</sub>		LA <sub>NR</sub>
Resistência ao desgaste por atrito						M <sub>DeNR</sub>		M <sub>DeNR</sub>
Resistência ao polimento						PSV <sub>NR</sub>		PSV <sub>NR</sub>
Massa volúmica (picnómetro)								
- Material impermeável	3,04 Mg/m <sup>3</sup>		3,08±0,04 Mg/m <sup>3</sup>		3,04±0,04 Mg/m <sup>3</sup>		3,04±0,04 Mg/m <sup>3</sup>	
- Partículas secas em estufa	2,77 Mg/m <sup>3</sup>		2,93±0,04 Mg/m <sup>3</sup>		2,88±0,04 Mg/m <sup>3</sup>		2,88±0,04 Mg/m <sup>3</sup>	
- Partículas saturadas	2,86 Mg/m <sup>3</sup>		2,98±0,04 Mg/m <sup>3</sup>		2,93±0,04 Mg/m <sup>3</sup>		2,93±0,04 Mg/m <sup>3</sup>	
Absorção de água	3,2%		≤5,0%		≤5,0%		≤5,0%	
Retração por secagem	0,011%		0,044%		0,044%		0,044%	
Reacção alcalis-silica			DND		DND		DND	
Teor de cloretos	0,14-0,56		≤0,01%		≤0,01%		≤0,01%	
Teor de sulfatos solúveis em ácido		AS <sub>0,2</sub>		AS <sub>NR</sub>		AS <sub>NR</sub>		AS <sub>NR</sub>
Enxofre total	0,02		≤0,038%		≤0,034%		≤0,034%	
Teor de húmus	Mais claro que a solução padrão		Isento		Isento		Isento	

<sup>1</sup> DND – Desempenho não determinado.