

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Helena Maria Pimentel de Figueiredo Fonseca Lopes Dias
Licenciada em Engenharia do Ambiente (FCT/UNL)

RELATÓRIO DE ESTÁGIO (PRODEP)

Setembro de 1997

628(047.3)
LEGA 1996/DIAh



A evolução da consciência ecológica da Sociedade traduz-se em alguns efeitos muito visíveis. Por um lado, ao nível dos órgãos decisores comunitários e nacionais, aumentam os padrões de qualidade no que diz respeito ao tratamento

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

perante a situação actual, torna cada vez mais consciencia de que é imperioso viabilizar os projectos em fase de implementação, zelando o seu esforço à redução na produção de resíduos e à preservação de recursos naturais.

Helena Maria Pimentel de Figueiredo Fonseca Lopes Dias

Licenciada em Engenharia do Ambiente
pela Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

A via térmica para a eliminação dos RSU é a mais adoptada em diversos países de todos os continentes, sendo muitas vezes solução prioritária ou quase exclusiva. No geral, é uma via que visa a valorização dos RSU dado que produz calor que pode ser utilizado para aquecimento ou utilização no aquecimento.

Relatório de Estágio (PRODEP)

A incineração garante também uma redução de cerca de 80% do volume dos resíduos, apresentando assim uma solução alternativa ao Aterro Sanitário na gestão dos RSU.

**Estágio realizado sob a supervisão
de Professor Doutor Manuel Fonseca de Almeida**

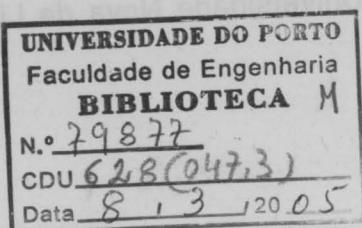
Professor Associado do Departamento de Metalurgia
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
em acordo com a LIPOR – Serviço Intermunicipalizado
de Tratamento de Lixos da Região do Porto

Assim, inscrevem-se essencialmente a deposição de RSU em lixões e em alguns aterros sanitários.

Porto, Setembro de 1997

FACULDADE DE ENGENHARIA
DA UNIVERSIDADE DO PORTO

ESCOLAIS DA INGENIERIA
DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS
ALTERNATIVAS DE GESTAO



1. INTRODUÇÃO

A evolução da consciência ecológica da Sociedade traduz-se em alguns efeitos muito visíveis. Por um lado, ao nível dos órgãos decisores comunitários e nacionais, aumentam os padrões de qualidade no que diz respeito ao tratamento e destino final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), tendo por consequência a implementação de sistemas de reutilização, valorização e reciclagem. Por outro lado, a população, em geral, tem uma noção cada vez mais perfeita de que sendo consumidora primária se constitui como a principal actriz da cadeia de produção/tratamento/destino final dos RSU. Assim, perante a situação actual, toma cada vez mais consciência de que é imperioso viabilizar os projectos em fase de implementação, dando o seu esforço à redução na produção de resíduos e à preservação de recursos naturais.

Um sistema de gestão de RSU é geralmente complexo e engloba diversas componentes: operações de recolha, transporte, triagem, preparação para a valorização e confinamento; e, processos de compostagem, incineração com recuperação de energia e reciclagem de materiais.

A via térmica para a eliminação dos RSU tem sido adoptada em diversos países de todos os continentes, em alguns deles como solução prioritária ou quase exclusiva. No geral, a incineração é uma via de valorização dos RSU dado que produz energia eléctrica a partir do calor da combustão ou utiliza este no aquecimento.

A incineração garante também uma redução de cerca de 80% do volume dos resíduos, apresentando-se, pois, como uma boa alternativa ao Aterro Sanitário na perspectiva de economia de espaço. Porém, como sub-produtos dessa operação resultam escórias, cinzas volantes, gases e efluentes líquidos, que carecem de tratamento e/ou destino final adequados.

Em Portugal, os sistemas actuais de tratamento e eliminação de RSU circunscrevem-se essencialmente à deposição de RSU em lixeiras e em alguns aterros sanitários, pontualmente podendo também registar-se alguns pólos

de compostagem. A incineração está prevista a breve prazo em duas Centrais de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (CIRSU), respectivamente nas Áreas Metropolitanas de Lisboa e Porto, as quais terão de resolver a contento todos os problemas relacionados com os sub-produtos obtidos.

O presente trabalho aborda diversas alternativas de gestão das escórias produzidas nas centrais de incineração de resíduos sólidos urbanos (EIRSU), sublinhando a possibilidade da sua valorização. Com base neste objectivo é possível reduzir a quantidade de resíduos sujeita a deposição final, consequentemente a necessidade de grandes volumes de aterro, mas, também, reduzir a quantidade de matérias-primas naturais usadas no fabrico de produtos para a construção civil, substituindo-as, pelo menos parcialmente, por escórias.

A abordagem efectuada pretendeu ser pragmática e actual, enquadrando o problema da gestão dos RSU ao nível comunitário e nacional, bem como realizando a pesquisa bibliográfica sobre as diversas formas de valorização já praticadas. Com este propósito foi também realizado um estágio no CREED - Centre de Recherches et d'Essais pour l'Environnement et les Déchets, ligado ao grupo francês GÉNÉRALE DES EAUX, que também se dedica a estudos de valorização das EIRSU, particularmente como inerte na construção rodoviária.

Além disso, realizou-se a caracterização fisico-química de uma amostra de EIRSU, incluindo testes de lixiviação, efectuaram-se ensaios de solidificação usando a fracção <0.5 mm das EIRSU em misturas com outros componentes e produziu-se uma amostra de agregados leves. A utilização destes materiais na construção civil, nomeadamente as EIRSU brutas, parece desenhar-se como uma hipótese muito plausível, atendendo aos resultados obtidos com a sua inclusão como inerte artificial em cubos de betão.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	2
2. ABORDAGEM EXPERIMENTAL	15
2.1 Introdução	16
2.2 Caracterização morfológica e amostragem das EIRSU	16
2.3 Caracterização física	18
2.3.1 Densidade e humidade	19
2.3.2 Distribuição granulométrica	19
2.3.3 Análise de componentes	22
2.4 Caracterização química das EIRSU	24
2.4.1 Microscopia eletrônica com microanálise	24
2.4.2 Análise por fluorescência de raios X	28
2.4.3 Análise termogravimétrica	29
2.4.4 Solução de lavagem das EIRSU	30
2.4.5 Ensaios de fixação	30
2.5 Caracterização dos componentes utilizados nas misturas	32
2.5.1 Distribuição granulométrica	33
2.5.2 Densidade	34
2.6 Obtenção de concentrados das EIRSU	35
2.6.1 Separação magnética	35
2.6.2 Jigagem	36
2.6.3 Separação em meios densos	38
2.7 Aplicações da fração grossa das EIRSU	38
2.7.1 Ensaio de fixação	39
2.7.2 Resistência ao esmagamento	41

1. INTRODUÇÃO	2
2. ABORDAGEM EXPERIMENTAL	15
2.1 Introdução	16
2.2 Caracterização morfológica e amostragem das EIRSU.....	18
2.3 Caracterização física	19
2.3.1 Densidade e humidade	19
2.3.2 Distribuição granulométrica	19
2.3.3 Análise de componentes	22
2.4 Caracterização química das EIRSU	24
2.4.1 Microscopia electrónica com microanálise	24
2.4.2 Análise por fluorescência de raios X	28
2.4.3 Análise termogravimétrica	29
2.4.4 Solução de lavagem das EIRSU	30
2.4.5 Ensaios de lixiviação	30
2.5 Caracterização dos componentes utilizados nas misturas	32
2.5.1 Distribuição granulométrica	33
2.5.2 Densidade	34
2.6 Obtenção de concentrados das EIRSU	35
2.6.1 Separação magnética	35
2.6.2 Jigagem	36
2.6.3 Separação em meios densos	38
2.7 Aplicações da fracção grosseira das EIRSU	38
2.7.1 Ensaio de lixiviação	39
2.7.2 Resistência ao esmagamento	41

2.7.3 Resistência à compressão	41
2.7.4 Ensaios de capilaridade	42
2.8 Aplicações da fracção fina das EIRSU	43
2.8.1 Metodologia da investigação	44
2.8.2 Componentes e respectivas proporções nas misturas	46
2.8.2.1 Influência do meio de cura	47
2.8.2.2 Efeitos em misturas de areia, argila, cinzas de carvão e cimento	48
2.8.2.3 Efeitos em misturas de argila, areia e cinzas de carvão	50
2.8.3 Influência da granulometria das EIRSU na resistência à compressão	54
2.8.4 Incorporação de CIRSU nas misturas.....	57
2.8.5 Conclusões	59
2.8.6 Fabrico de agregados artificiais	60
2.8.7 Deposição controlada	63
2.8.8 Aplicação das EIRSU como inerte e aglomerante.....	65
2.8.9 Volume de vazios das misturas ensaiadas	66
2.9 Optimização do empilhamento	69
2.9.1 Resolução do problema de optimização	74
3. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	82
REFERÊNCIAS	89
BIBLIOGRAFIA	94

ANEXO A	100
ANEXO B	119
ANEXO C	133

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 2

Quadro 2.1 - Distribuição granulométrica das EIRSU	20
Quadro 2.2 - Granulometria da fração < 0,5 mm das EIRSU, determinada por difusão de ágatas	21
Quadro 2.3 - Constituição da amostra e procedimento para a amostra de EIRSU	22
Quadro 2.4 - Análise dos elementos vestigiais na amostra montada em pastilhas	23
Quadro 2.5 - Análise dos elementos leves na amostra fundida	28
Quadro 2.6 - Composição das águas de levagem das EIRSU	30
Quadro 2.7 - Teste de lixiviação NFX 31-210 Fracção grosseira	31
Quadro 2.8 - Teste de lixiviação NFX 31-210 - Fracção-fina	32
Quadro 2.9 - Distribuição granulométrica dos componentes utilizados nas misturas	33
Quadro 2.10 - Densidade dos componentes utilizados nas misturas ..	34
Quadro 2.11 - Separação magnética	35
Quadro 2.12 - Concentração por digagem	36
Quadro 2.13 - Separação em líquidos densos	38
Quadro 2.14 - Resultados de lixiviação da fração grosseira das EIRSU e valores limites da norma NF X 31 - 210	40

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 2	41
Quadro 2.1 - Distribuição granulométrica das EIRSU	20
Quadro 2.2 - Granulometria da fracção < 0,5 mm das EIRSU, determinada por difracção de raios laser	21
Quadro 2.3 - Constituição das fracções granulométricas da amostra de EIRSU.....	22
Quadro 2.4 - Análise dos elementos vestigiais na amostra montada em pastilhada	28
Quadro 2.5 - Análise dos elementos leves na amostra fundida.....	28
Quadro 2.6 - Composição das águas de lavagem das EIRSU	30
Quadro 2.7 - Teste de lixiviação NFX 31-210 Fracção grosseira	31
Quadro 2.8 - Teste de lixiviação NFX 31-210 Fracção fina	32
Quadro 2.9 - Distribuição granulométrica dos componentes utilizados nas misturas.....	33
Quadro 2.10 - Densidade dos componentes utilizados nas misturas ...	34
Quadro 2.11 - Separação magnética.....	35
Quadro 2.12 - Concentração por Jigagem.....	36
Quadro 2.13 - Separação em líquidos densos	38
Quadro 2.14 - Resultados de lixiviação da fracção grosseira das EIRSU e valores limites da norma NF X 31 - 210.....	40

Quadro 2.15 - Dosagem utilizada para fabrico do betão a ensaiar	41
Quadro 2.16 - Resistência à compressão em betão endurecido	42
Quadro 2.17 - Ensaios de resistência: 1º plano experimental	
— amostras curadas em ambiente saturado e em	
condições normais de temperatura e ar ambiente.....	47
Quadro 2.18 - Ensaios de resistência: 1º plano experimental	48
Quadro 2.19 - Efeitos e respectiva significância:	
1º plano experimental	49
Quadro 2.20 - Ensaios de resistência: 2º plano experimental	51
Quadro 2.21 - Ensaios de resistência: 3º plano experimental	51
Quadro 2.22 - Efeitos e respectiva significância:	
2º plano experimental	52
Quadro 2.23 - Efeitos principais: 3º plano experimental	53
Quadro 2.24 - Ensaios de resistência: 4º plano experimental.....	54
Quadro 2.25 - Efeitos principais: matriz A do 4º plano experimental ...	55
Quadro 2.26 - Efeitos principais: matriz B do 4º plano experimental ...	55
Quadro 2.27 - Ensaios de resistência: 5º plano experimental.....	58
Quadro 2.28 - Matriz de efeitos: 5º plano experimental.....	59
Quadro 2.29 - Características de granulados	
produzidos com base na mistura 4.A2 e 4.B1	61
Quadro 2.30 - Teste de lixiviação NF X 31 - 210	62

Quadro 2.31 - Resistência à compressão de misturas ricas em EIRSU.....	64
Quadro 2.32 - Economia do volume ocupado	64
Quadro 2.33 - Resistência à compressão na razão cimento:inertes=1:3	65
Quadro 2.34 - Resistência à compressão na razão cimento:inertes=1:5	65
Quadro 2.35 - Volume de vazios das misturas ensaiadas	67
Quadro 2.36 - “Curvas óptimas” para $d_{\max}=125\text{mm}$ e q variável	71
Quadro 2.37 - “Curvas óptimas” para $d_{\max}=500\text{mm}$ e q variável	72
Quadro 2.38 - Composição das “misturas óptimas” encontradas, para $d_{\max} = 125$	77
Quadro 2.39 - Composição das “misturas óptimas” encontradas, para $d_{\max} = 500$	77
Quadro 2.40 - Distribuição granulométrica das misturas Mópt1 e Mópt2, para $d_{\max}=125$ e $d_{\max}=500$, $q=0,5$	74
Quadro 2.41 - Resistência à compressão: misturas óptimas	80
Quadro 2.42 - Volumes de vazios nas misturas óptimas	80

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Curva granulométrica cumulativa das EIRSU 20

Figura 2.2 - Curva granulométrica da fração < 2,5 mm das EIRSU 22

Figura 2.3 - Consistência 23

Figura 2.4 - Micrografia de uma amostra da fração correspondente ao intervalo de 2-3,62 mm das EIRSU 25

Figura 2.5 - Micrografia óptica na microanálise da amostra da fração correspondente ao intervalo de 2-3,62 mm das EIRSU 25

Figura 2.6 - Composição obtida na microanálise de um fragmento de vidro, encontrado na amostra da fração correspondente ao intervalo de 2-3,62 mm das EIRSU 26

Figura 2.7 - Aspecto de uma amostra da fração correspondente à fração granulométrica entre 4,699 mm e 6,680 mm das EIRSU 27

Figura 2.8 - Composição obtida na microanálise da amostra da fração correspondente à fração granulométrica entre 4,699 mm e 6,680 mm das EIRSU 27

Figura 2.9 - Gráfico Tensiogramétrico de uma amostra da fração fina das EIRSU (< 0,5 mm) 27

Figura 2.10 - Curvas granulométricas das componentes utilizadas nas misturas 28

Figura 2.11 - Elasão das fadomas em argamassa no 3º planejamento 29

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Curva granulométrica cumulativa das EIRSU	20
Figura 2.2 - Curva granulométrica da fracção < 0,5 mm das EIRSU ...	22
Figura 2.3 - Constituição das EIRSU, por granulometria	23
Figura 2.4 - Aspecto de uma amostra da fracção correspondente ao infracrivo de 2.362 mm das EIRSU.....	25
Figura 2.5 - Composição obtida na microanálise da amostra da fracção correspondente ao infracrivo de 2.362 mm das EIRSU	25
Figura 2.6 - Composição obtida na microanálise da um fragmento de vidro, encontrado na amostra da fracção correspondente ao infracrivo de 2.362 mm das EIRSU ..	26
Figura 2.7 - Aspecto de uma amostra da fracção correspondente à fracção granulométrica entre 4.699 mm e 6.680 mm das EIRSU	27
Figura 2.8 - Composição obtida na microanálise da amostra da fracção correspondente à fracção granulométrica entre 4.699 mm e 6.680 mm das EIRSU	27
Figura 2.9 - Gráfico Termogravimétrico do uma amostra da fracção fina de EIRSU (< 0,5 mm)	27
Figura 2.10 - Curvas granulométricas dos componentes utilizados nas misturas	34
Figura 2.11 - Efeitos dos factores em análise, no 3º plano experimental	53

Figura 2.12 - Efeitos principais: matriz A do 4º plano experimental	56
Figura 2.13 - Efeitos principais: matriz B do 4º plano experimental.....	56
Figura 2.14 - Efeitos dos factores em análise, no 5º plano experimental	59
Figura 2.15 - Frequência de ocorrência das misturas vs volume de vazios	68
Figura 2.16 - Curvas granulométricas do 4º plano experimental	69
Figura 2.17 - Curvas granulométricas das misturas para deposição	69
Figura 2.18 - Curva granulométrica das “curvas óptimas” para $d_{\max} = 125$ e q variável	73
Figura 2.19 - Curva granulométrica das “curvas óptimas” para $d_{\max} = 500$ e q variável	73
Figura 2.20 - Curvas granulométricas das misturas Mópt1 e Mópt2, $d_{\max} = 125$	79
Figura 2.21 - Curvas granulométricas das misturas Mópt1 e Mópt2, $d_{\max} = 500$	79

ESCOLHAS DA INGENIERIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

**JOSE MIGUEL VIEIRA
MÁRCIA MARQUES**

RESUMO

O presente trabalho é o resultado da experiência acumulada permitindo contextualizar as alternativas de gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) que já são utilizadas em Portugal. Foi exemplificado através da identificação de diferentes vias de reciclagem e tratamento deste material.

2.

ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Este trabalho visa contribuir para a implementação de sistemas de gestão integrados de resíduos sólidos urbanos, nomeadamente no que diz respeito ao seu tratamento e recuperação, sendo que a sua aplicação é feita através da identificação das alternativas existentes.

As alternativas de recuperação de componentes de RSU, que se tornaram cada vez mais numerosas, são de nível industrial, com um elevado nível de polimento tecnológico, ainda de largos custos, que é muitas vezes suportado por algumas dificuldades, nomeadamente a natureza das matérias primas (alta taxa de soproção), e quando impossível os concentrados sofrem uma forte concorrência ao nível das matérias primas originais.

As alternativas de recuperação seletiva de rações mistas dos ERSU, muitas vezes na forma de agregados para a construção civil, encontram-se mais económicas, sobretudo, ou, quando muito, o objectivo de produção é de menor escala.

Na perspectiva de aumentar a velocização das ERSU para a recuperação convém sempre considerar qualquer tipo de gestão que não seja dependente de uma separação prévia de factores, um dos quais é a natureza e sua composição. A recuperação é realizada por cada dos respectivos factores, portanto com os seus respectivos custos. Isto é, é importante ter em conta, ao fazer a sua estratégia, a ponderação das

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.1 Introdução

A bibliografia consultada e a experiência acumulada permitiram constatar que as escórias resultantes da incineração de RSU são já usualmente utilizadas em construção rodoviária, facto exemplificado através da laboração de unidades industriais francesas de pré-preparação deste material.

Nestas unidades as operações realizadas consistem essencialmente no seguinte: (i) triagem da fracção ferrosa e com maior potencial para a reciclagem, através de crivagens e separações magnéticas sucessivas; e, (ii) maturação das escórias até que atinjam os padrões ambientais admissíveis nas aplicações permitidas. Ainda em vias de desenvolvimento está a perspectiva de implementação de sistemas de separação de metais não-ferrosos.

A produção de concentrados de componentes da EIRSU afigura-se uma via de desenvolvimento tecnológico ainda de largos horizontes, embora claramente limitada por algumas dificuldades, nomeadamente a eficácia das metodologias de separação, a qualidade imposta aos concentrados obtidos pelos seus potenciais utilizadores e a competição das matérias-primas originais.

A utilização selectiva de fracções mais finas das EIRSU, nomeadamente na produção de agregados para a construção civil, encontra-se ainda em fase laboratorial, ou, quando muito, é objecto de projectos à escala piloto.

Outras perspectivas de tratamento e/ou valorização das EIRSU se podem colocar. Contudo, convém ter presente que qualquer solução de gestão deste resíduo depende de uma grande diversidade de factores, um dos quais é certamente a sua composição, estreitamente relacionada com a dos respectivos RSU, portanto com os esforços de reciclagem realizados a montante. Por outro lado, as razões de mercado não podem deixar de ponderar-se,

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

dado que não tem qualquer cabimento obter produtos sem aceitação ou fazê-lo a custos superiores a outras alternativas de gestão. Ou seja, qualquer alternativa considerada depende da política ambiental em vigor, do mercado, das tecnologias disponíveis e da normal evolução destes factores, isto é, tem dependência temporal.

No presente trabalho teve de definir-se uma estratégia experimental balizada pelas constatações anteriores, pela disponibilidade de meios para a concretizar, mas também limitada pela reduzida quantidade de amostra disponível (74 kg).

Sendo certo que as condições de utilização das EIRSU em pavimentação rodoviária parecem encontrar-se já suficientemente definidas, a diversificação e melhoria de utilização deste produto poderá ser alcançada através de: (i) utilizações selectivas de componentes das EIRSU ou de suas fracções granulométricas; e, (ii) aplicações em actividades diferentes da pavimentação. Esta poderá mesmo melhorar se se criarem alternativas de utilização selectiva, por exemplo das fracções mais finas das escórias.

Assim, o trabalho experimental realizado considerou os seguintes objectivos específicos:

- análise da resposta da amostra disponível a alguns métodos de separação física, no sentido de produzir concentrados de maior valor acrescentado;
- estudo da aplicação selectiva da fracção fina como: (a) inerte e aglomerante em argamassas (como substituto do cimento se se comportar como ligante hidráulico); (b) no fabrico de agregados artificiais por aglomeração em prato rotativo para utilização na construção civil; (c) considerando também a sua deposição controlada;

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

- análise da viabilidade de utilização da fração grosseira das escórias como substituto, pelo menos parcial, de inertes naturais em betões de construção civil.

Na base do trabalho esteve a caracterização físico-química da amostra obtida e a preocupação de satisfazer os critérios de mobilização de poluentes geralmente admitidos, bem como os requisitos de qualidade dos materiais produzidos, por exemplo a resistência à compressão uniaxial não-confinada. Os boletins de análise à caracterização física e química das escórias são apresentados no Anexo C.

2.2. Caracterização morfológica das EIRSU e amostragem

A amostra de 74 kg de escórias proveio de uma instalação francesa, em Toulon, de incineração em massa com uma capacidade de tratamento anual de 300000 ton de RSU, e tem um aspecto granular, heterogéneo, de cor acinzentada, com pequenos pedaços de metais, vidro e inqueimados perfeitamente visíveis.

De modo a obter parcelas representativas deste material para a execução de todos os ensaios e análises subsequentes, procedeu-se à sua amostragem do modo descrito a seguir:

- as escórias foram espalhadas numa área destinada à preparação das amostras;
- procedeu-se à sua homogeneização efectuando vários revolvimentos da massa com auxílio de uma pá, por fim formando-se um disco com cerca de 5 a 10 cm de espessura;

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

- este disco foi dividido em quatro partes sensivelmente iguais (primeiro duas metades e depois cada uma delas também em metades) das quais se seleccionaram quartos opostos;
- este processo de formação de um disco, divisão em quartos e rejeição dos 2 quartos opostos foi repetido até se obter a dimensão da amostra desejada.

2. 3 Caracterização física das EIRSU

2.3.1 Densidade e humidade

Os valores determinados para a densidade a granel e a humidade das escórias brutas são respectivamente $1,254 \text{ g/cm}^3$ e 19,7%. A densidade da fracção fina $< 0,5\text{mm}$, determinada por picnometria, é de $1,470 \text{ g/cm}^3$.

Determinaram-se também, no âmbito da preparação de amostras para ensaios posteriores, as seguintes propriedades:

- ♦ Massa volémica das EIRSU
 - do material impermeável = $2\ 530 \text{ kg/m}^3$
 - das partículas saturadas = $2\ 380 \text{ kg/m}^3$
 - das partículas secas = $2\ 280 \text{ kg/m}^3$
- ♦ Absorção de água pelas EIRSU = 4,30%

2.3.2 Distribuição granulométrica

A determinação desta característica realizou-se crivando as escórias, por via húmida, dado que se constatava facilmente haver aderência de partículas de menor calibre às mais grosseiras.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

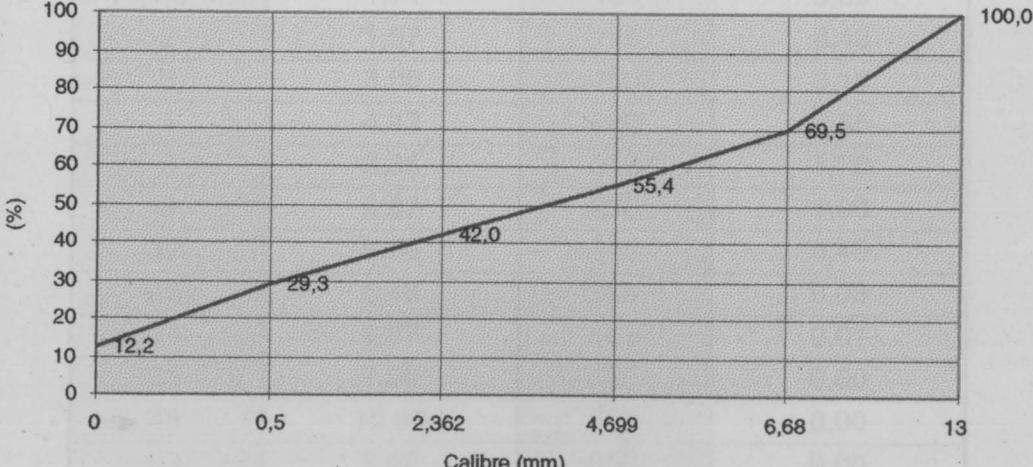
O processo conduziu aos resultados apresentados no Quadro 2.1 e à Figura 2.1 que os sumariza.

Da crivagem em circuito fechado resultou uma solução líquida de 64 litros, na qual se determinaram por evaporação os sólidos dissolvidos. O valor obtido foi de 0,45% da massa inicial da solução.

Quadro 2.1 - Distribuição granulométrica das EIRSU

Calibre	(kg)	(%)
($x > 13$ mm)	18,7	30,5
(6,680mm < $x < 13$ mm)	8,7	14,2
(4,699 mm < $x <$ 6,680 mm)	8,2	13,3
(2,362 mm < $x <$ 4,699 mm)	7,8	12,7
(0,5 mm < $x <$ 2,362 mm)	10,5	17,1
($x < 0,5$ mm)	7,5	12,2
TOTAL	61,4	100

Figura 2.1 - Curva granulométrica cumulativa das EIRSU



ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

As fracções de calibre superior a 2,362 mm foram sujeitas a algumas operações de separação manual e mecânica para determinar a sua constituição, isto é, quais os tipos e quantidades de materiais presentes nas amostras com potencial de reciclagem.

Estas fracções foram também as usadas ulteriormente nos ensaios em argamassas para produção de betão.

A fracção de calibre inferior a 2,362 mm serviu para a análise da possibilidade da produção de agregados por mistura com outros materiais.

A fracção correspondente ao infracrivo de 0,5 mm foi sujeita a análise granulométrica por difracção de raios laser, e o resultado encontra-se no Quadro 2.2. A respectiva curva granulométrica está representada na Figura 2.2.

**Quadro 2.2 - Granulometria da fracção < 0,5 mm das EIRSU,
determinada por difracção de raios laser**

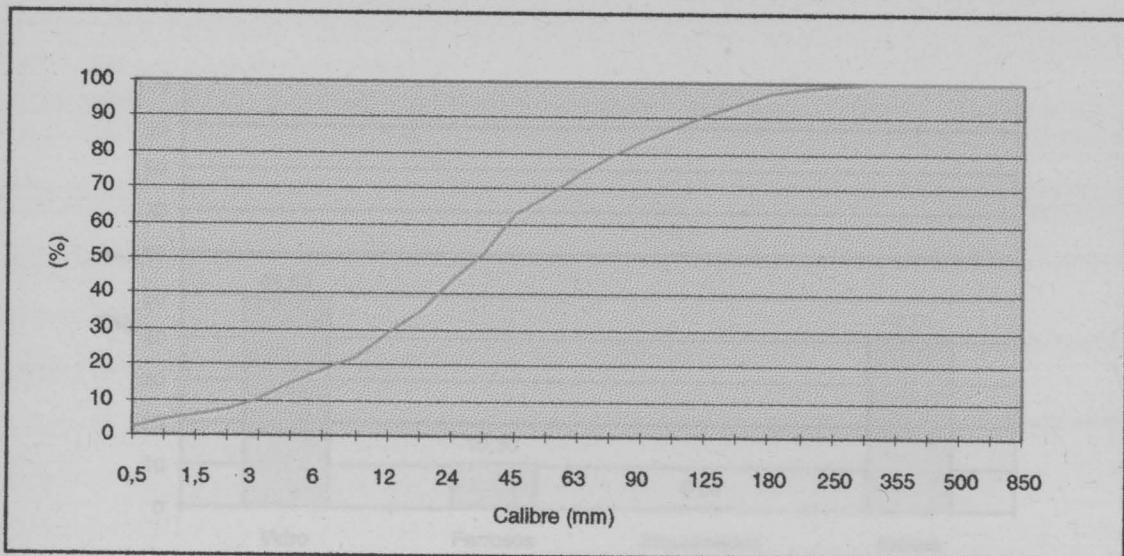
CALIBRE (mm)	EIRSU (<0,5mm) (%)	CALIBRE (mm)	EIRSU (<0,5mm) (%)
0,5	2,27	75	5,19
1	2,11	90	4,87
1,5	1,71	106	3,89
2	1,57	125	3,43
3	3,00	150	3,18
4	4,43	180	2,55
6	3,36	212	1,70
8	4,07	250	1,00
12	6,76	300	0,45
16	5,48	355	0,08
24	9,07	425	0,01
32	7,96	500	0,00
45	10,89	600	0,00
53	5,42	850	0,00
63	5,55		

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Figura 2.2 - Curva granulométrica da fracção < 0,5 mm das EIRSU



Face a estes resultados pode concluir-se que

2.3.3 Análise de componentes

A separação manual dos diversos componentes presentes em cada fracção granulométrica das escórias serviu de base à construção do Quadro 2.3 e da Figura 2.3.

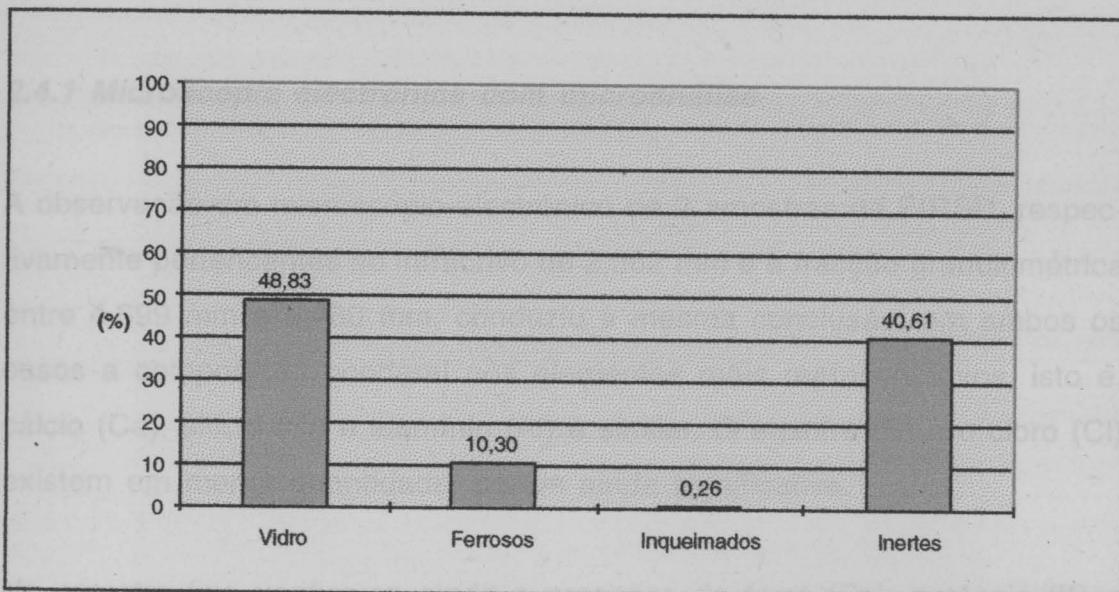
Quadro 2.3 - Constituição das fracções granulométricas da amostra de EIRSU

Calibre (mm)	Vidro (%)	Ferroso (%)	Inqueimados (%)	Inertes (%)
x > 13	48,1	11,1	0,4	40,4
(6,680 < x < 13)	53,6	9,4	0,2	36,8
(4,699 < x < 6,680)	42	10	~ 0	48
(2,362 < x < 4,699)	22	12	~ 0	66

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Figura 2.3 - Constituição das EIRSU, por granulometria



Face a estes resultados pode concluir-se que:

- (i) o vidro é o componente presente em maior percentagem na amostra de escórias em estudo (48,63 %), logo seguido pelos inertes (40,61 %), os dois representando cerca de 90 % da massa; a parte restante é constituída quase exclusivamente por materiais ferrosos uma vez que os inqueimados não têm praticamente expressão (~ 0,261 %).
- (ii) as três fracções de maior calibre, isto é, $>13\text{ mm}$, $6,680\text{ mm} < x < 13\text{ mm}$ e $2,362\text{ mm} < x < 4,699\text{ mm}$ contêm mais vidro, contrariamente à fracção menos grosseira de $2,362\text{ mm} < x < 4,699\text{ mm}$ na qual o conteúdo é mais baixo;
- (iii) os inertes seguem uma evolução inversa da do vidro aumentando nas fracções mais finas;
- (iv) os cerca de 10,3 % de materiais ferrosos presentes nas escórias distribuem-se de modo aproximadamente uniforme por todas as fracções granulométricas;
- (v) a parcela de inqueimados é globalmente insignificante, particularmente nas duas fracções de menor granulometria, respectivamente $2,362\text{ mm} < x < 4,699\text{ mm}$ e $4,699\text{ mm} < x < 6,680\text{ mm}$.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.4. Caracterização química das EIRSU

2.4.1 Microscopia electrónica com microanálise

A observação em microscópio electrónico de 2 amostras de EIRSU, respetivamente pertencentes ao infracrivo de 2,362 mm e à fracção granulométrica entre 4,699 mm e 6,680 mm, conduziu à mesma conclusão: em ambos os casos a composição ponderal nos elementos mais representativos, isto é, cálcio (Ca), silício (Si) e alumínio (Al) é similar. O enxofre (S) e o cloro (Cl) existem em menor quantidade, porém ainda significativa.

Na amostra fina verifica-se ainda a presença de ferro (Fe), potássio (K) e titânio (Ti), que ocorrem em menor quantidade na amostra da fracção mais grosseira.

As fotografias e espectros seguintes ilustram o comentário anterior.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Figura 2.4 - Aspecto de uma amostra da fracção correspondente ao infracriado de 2.362 mm das EIRSU

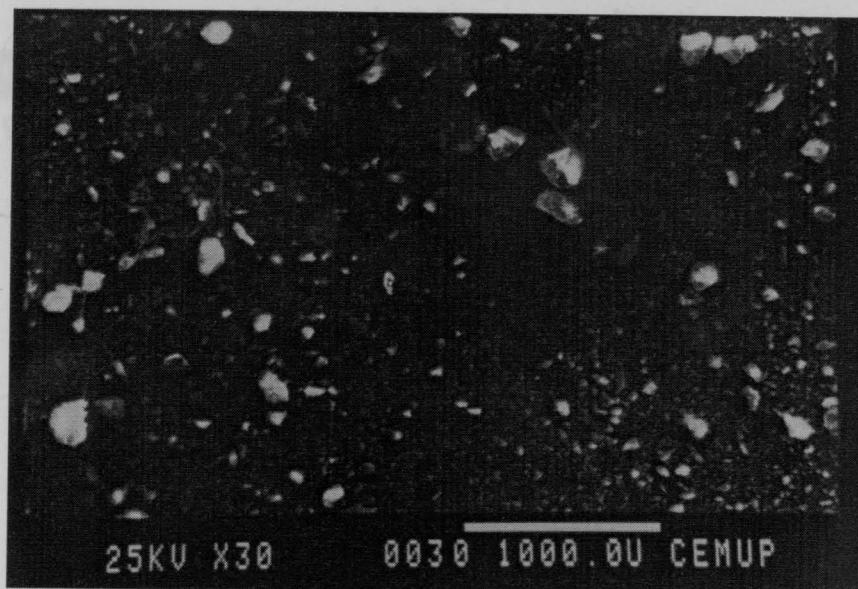
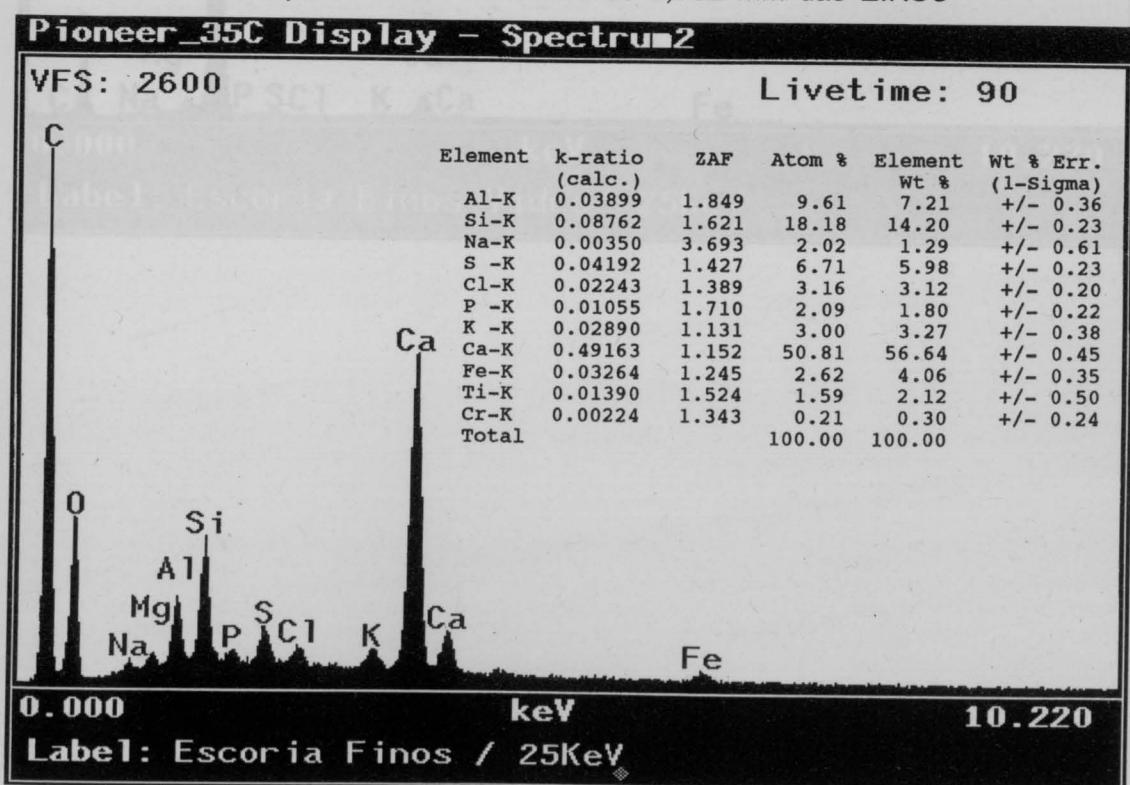


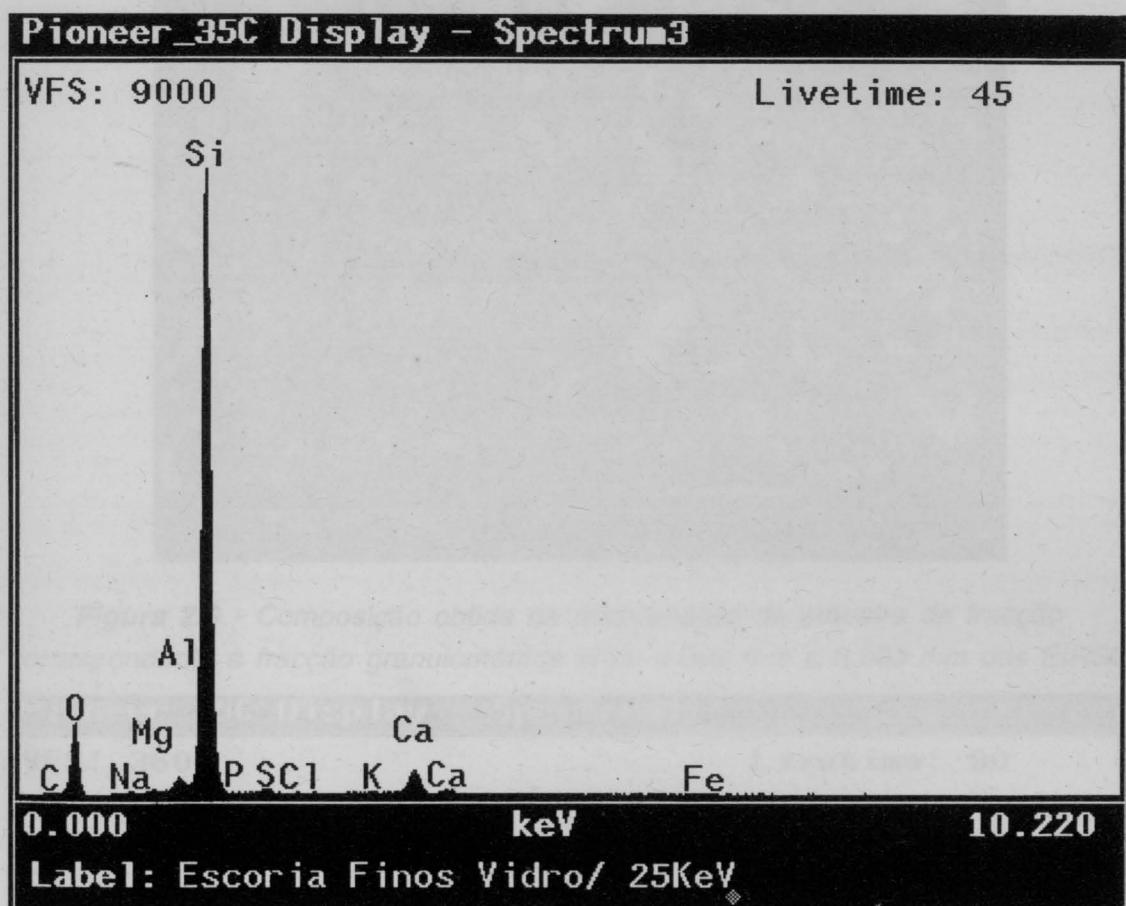
Figura 2.5 - Composição obtida na microanálise da amostra da fração correspondente ao infracrivo de 2.362 mm das EIRSU



ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Figura 2.6 - Composição obtida na microanálise de um fragmento de vidro, encontrado na amostra da fração correspondente ao infracriado de 2,362 mm das EIRSU



ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Figura 2.7 - Aspecto de uma amostra da fracção correspondente à fracção granulométrica entre 4,699 mm e 6,680 mm das EIRSU EIRSU

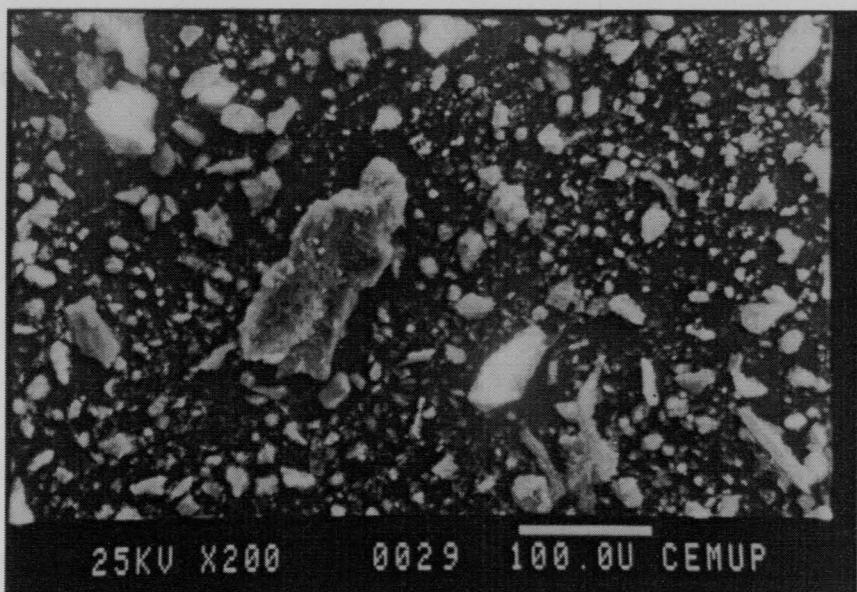
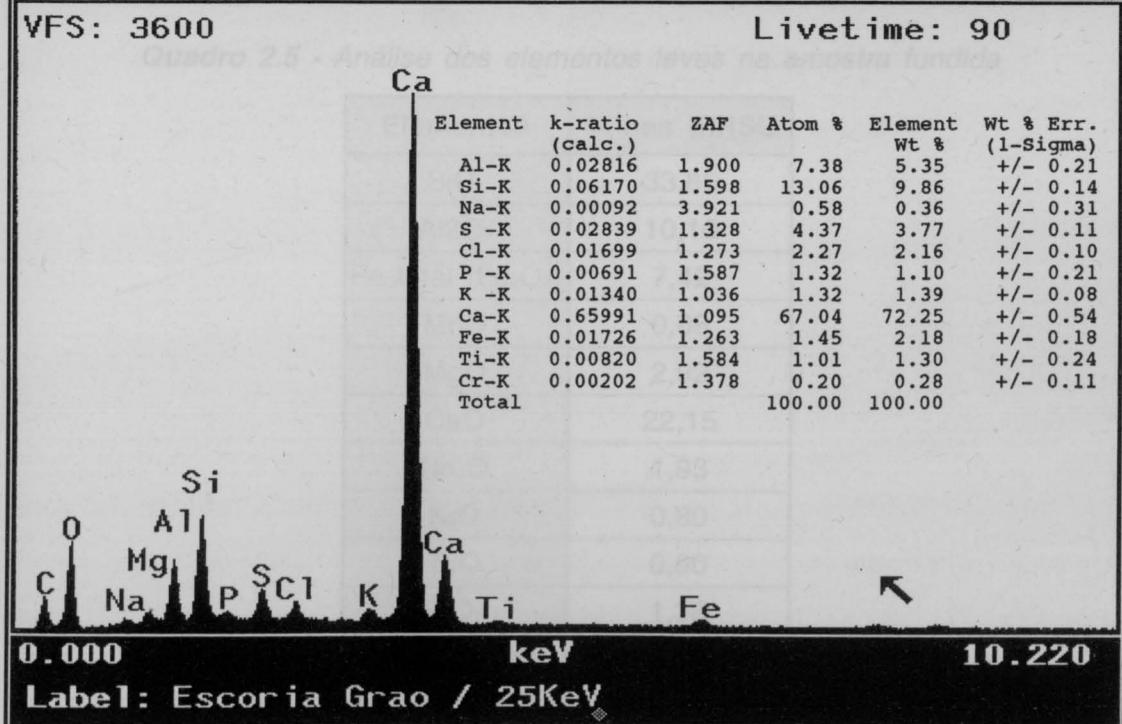


Figura 2.8 - Composição obtida na microanálise da amostra da fracção correspondente à fracção granulométrica entre 4,699 mm e 6,680 mm das EIRSU

Pioneer_35C Display – Spectrum



ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.4.2 Análise por fluorescência de raios X

A análise por fluorescência de raios X foi somente realizada numa amostra da fracção de granulometria inferior a 2,362 mm.

Quadro 2.4 - Análise dos elementos vestigiais na amostra montata em pastilha

Elementos	Dosagem nas EIRSU (ppm)
Rb	33
Sr	326
Zr	91
Ba	1198

Os resultados demonstram que os constituintes predominantes nas escórias são os óxidos de silício (SiO_2), cálcio (CaO) e alumínio (AlO_2), e que o ferro (expresso como Fe_2O_3) e o óxido de magnésio (MgO) ocorrem também em quantidades significativas.

Quadro 2.5 - Análise dos elementos leves na amostra fundida

Elementos	% nas EIRSU
SiO_2	33,80
Al_2O_3	10,10
Fe total (Fe_2O_3)	7,42
MnO	0,09
MgO	2,92
CaO	22,15
Na_2O	1,93
K_2O	0,80
Ti_2O	0,90
P_2O_5	1,36
Perda Rubro (960°C)	16,36

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

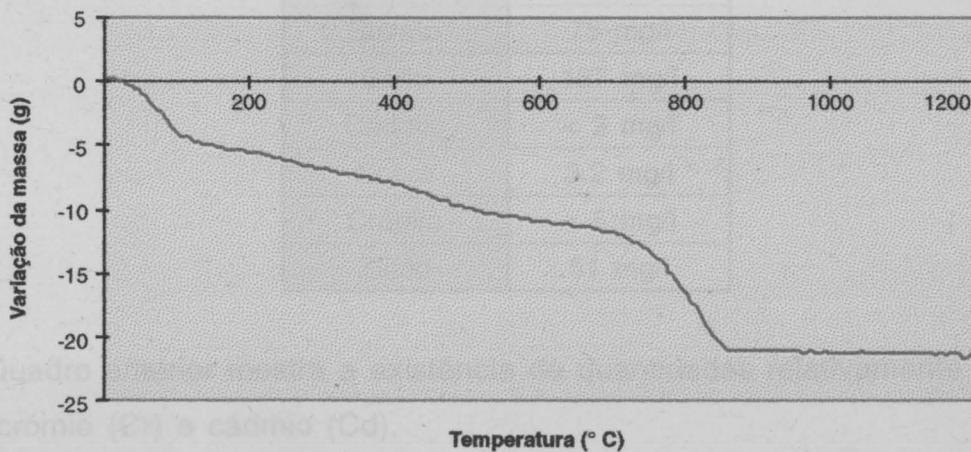
De entre os elementos menos abundantes analisados, isto é, bário (Ba), estrôncio (Sr), zircónio (Zr) e rubídio (Rb), os dois primeiros ocorrem em maior quantidade, respectivamente de 1198 e 326 ppm.

Em nenhum dos espectros se identificou a presença de mercúrio como se esperava.

2.4.3 Análise termogravimétrica

Este ensaio efectuou-se com uma amostra do infracrivo de 0,5 mm de ERSU, secas à temperatura ambiente, e conduziu à Figura 2.9.

Figura 2.9 - Termogravimetria duma amostra da fracção fina de ERSU (< 0,5 mm)



Esta acusa uma acentuada perda de massa na porção inicial do aquecimento até cerca de 100 °C devida à presença de água de absorção. A seguir regista-se perda de massa mais progressiva até cerca de 600 °C, a qual se poderá atribuir à presença de hidróxido de cálcio e sulfatos e sulfitos de cálcio hidratados.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Sensivelmente entre 650 e 800 °C regista-se nova perda de massa, desta vez abrupta, devida à presença de carbonato de cálcio na amostra, verificando-se de seguida a estabilização da variação de massa até ao final do ensaio (cerca dos 1100 °C).

2.4.4 Solução de lavagem das EIRSU

O estudo realizado à solução de lavagem das escórias frescas, sujeitas posteriormente a filtração por gravidade, para despistagem de metais pesados presentes na amostra, conduziu aos resultados do Quadro 2.6.

Quadro 2.6 - Composição das águas de lavagem das EIRSU

Parâmetro	EIRSU
Cloreto	840 mg/l
Sulfato	75 mg/l
Bário	187 mg/l
Cádmio	< 2 mg/l
Cobre	3.2 mg/l
Crómio	< 5 mg/l
Zinco	51 mg/l

O Quadro anterior mostra a existência de quantidades relativamente baixas de crómio (Cr) e cádmio (Cd).

2.4.5 Ensaios de lixiviação

Os ensaios de lixiviação permitem avaliar a disponibilidade de elementos presentes no material a ensaiar, e que podem, em condições específicas,

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

dissolver-se dentro de um espaço de tempo prolongado (e.g. 1000-10 000 anos).

Os resultados expressam a concentração máxima dos elementos no lixiviado e exprimem-se por exemplo em massa lixiviada/massa inicial do material ensaiado (e.g. mg Pb/kg EIRSU), mas não indicam o espaço de tempo durante o qual a libertação pode ocorrer.

Os ensaios de lixiviação realizados em amostras de escórias, nas suas fracções grosseira ($\geq 0,5$ mm) e fina ($< 0,5$ mm), seguiram a norma NFX 31-210. Os resultados obtidos encontram-se nos Quadros 2.7 e 2.8, respectivamente.

Quadro 2.7 - Teste de lixiviação NFX 31-210
Fracção grosseira

Elemento	1 ^a extracção (mg/kg MS)	2 ^a extracção (mg/kg MS)	3 ^a extracção (mg/kg MS)	TOTAL (mg/kg MS)
As*	8,4	13,2	5,2	26,8
Hg*	50	90	200	340
Cu	7,0	1,2	0,2	8,4
Ni	0	0	0	0
Zn	0	0	0	0
Mg	3,8	2,0	2,6	8,4
Ag	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0
Pb	7,8	6,6	4,7	19,1
Cd	0	0	0	0
Al	307,7	245,3	303,8	856,8
Fe	1,0	0	0	1,0
Cl	1107	284	56	1448
Sulfatos	3690	0	0	3690

* em mg/ton

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.5.1 Distribuição de partículas
Quadro 2.8 - Teste de lixiviação NFX 31-210
Fracção fina

Elemento	1 ^a extracção (mg/kg MS)	2 ^a extracção (mg/kg MS)	3 ^a extracção (mg/kg MS)	TOTAL (mg/kg MS)
As*	4,8	0	11,3	16,2
Hg*	20	10	10	40
Cu	26,2	9,5	4,5	40,2
Ni	0	0	0	0
Zn	0	0	0	0
Mg	1,2	1,8	1,3	4,3
Ag	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0
Pb	10,9	8,0	6,6	25,5
Cd*	20	0	0	20
Al	5,4	3,6	7,3	16,3
Ba	48,0	30,1	0	78,1
Fe	1,0	0	0	1,0
Cl	3 535	369	170	4 075
Sulfatos	7 380	1 845	0	9 225

* em mg/ton.

Comparando os resultados obtidos para cada uma das fracções, verifica-se que para os principais metais pesados, à excepção do mercúrio, a fracção fina (< 0,5 mm) apresenta maiores concentração nas soluções lixiviadas. A perda por calcinação a 550° C, durante 30 minutos, foi determinada para as fracções fina e grosseira, e são respectivamente de 98 000 mg/kg MS e 14 000 mg/kg MS.

2.5 Caracterização dos componentes utilizados nas misturas

Para o estudo das várias alternativas de utilização das escórias, e nos processos de estabilização/solidificação, foram utilizados componentes como areia, argila, cinzas de carvão e cimento, que se caracterizam seguidamente quanto à granulometria e densidade.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.5.1 Distribuição granulométrica

As distribuições granulométricas do cimento e da argila foram determinadas por difracção de raios laser, e a da areia por crivagem, e encontram-se resumidas no Quadro 2.9. As respectivas curvas granulométricas apresentam-se na Figura 2.10.

Quadro 2.9 - Distribuição granulométrica dos componentes utilizados nas misturas

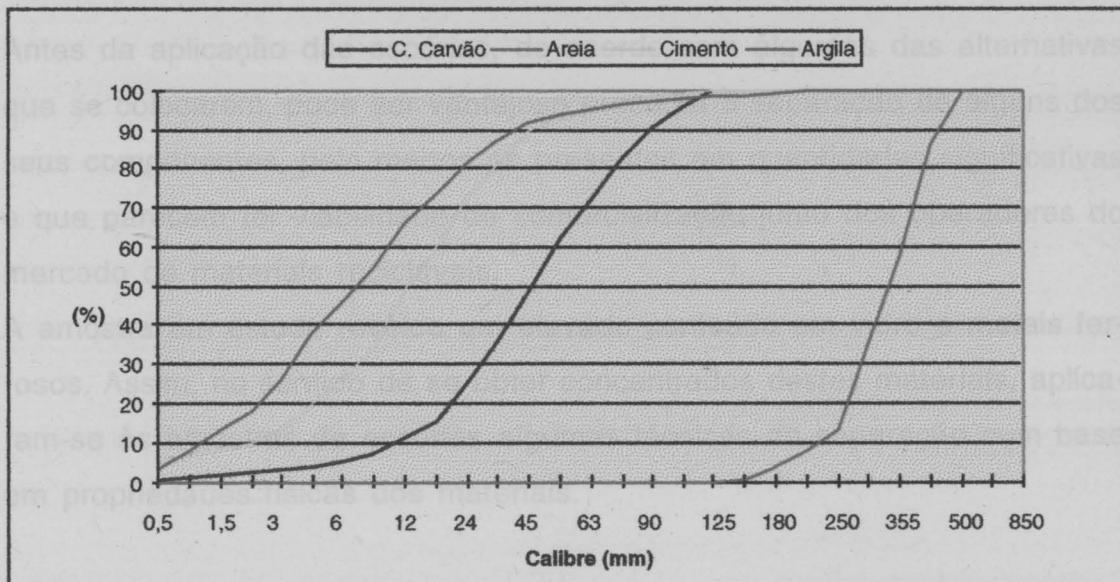
CALIBRE (mm)	C. CARVÃO (%)	AREIA (%)	CIMENTO (%)	ARGILA (%)
0,5	0,57	0	4,77	3,42
1	0,57	0	2,50	4,84
1,5	0,36	0	1,19	4,87
2	0,93	0	1,16	4,63
3	0,66	0	3,24	8,63
4	0,74	0	6,81	11,55
6	1,49	0	6,39	7,87
8	1,92	0	8,54	8,68
12	3,77	0	14,72	11,64
16	4,43	0	10,54	7,07
24	10,01	0	12,47	8,33
32	10,21	0	8,23	5,28
45	13,03	0	8,77	4,96
53	13,11	0	3,27	1,87
63	10,40	0	2,64	1,58
75	10,85	0	1,87	1,21
90	7,39	0	1,26	0,92
106	5,65	0	0,67	0,62
125	3,91	0	0,35	0,48
150	0	0,34	0,17	0,42
180	0	3,75	0,10	0,36
212	0	4,00	0,07	0,27
250	0	4,75	0,05	0,18
300	0	22,05	0,04	0,13
355	0	22,65	0,05	0,08
425	0	28,83	0,06	0,07
500	0	13,64	0,05	0,04
600	0	0	0	0
850	0	0	0	0

* Fonte: Relatório do Projecto RECBUILD, 1994, M. F. Almeida

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Figura 2.10 - Curvas granulométricas dos componentes utilizados nas misturas



2.6.1 Separação magnética

2.5.2 Densidade

A determinação da densidade dos componentes por picnometria foi realizada conforme o procedimento normalizado, obtendo-se os valores do Quadro 2.13. Colheram-se os resultados do Quadro 2.11.

Quadro 2.10 - Densidade dos componentes utilizados nas misturas

Densidade (g/cm ³)	Cimento	Areia	Argila	CIRSU	C. Carvão*
a granel	1.13	1.63	0.65	0.46	0.97
picnómetro	2,54	2,44	4,31	1,87	1,96

* Fonte: Relatório do Projecto RECBUID, 1994, M. F. Almeida

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.6 Obtenção de concentrados das EIRSU

Antes da aplicação das escórias, de acordo com algumas das alternativas que se colocarem, pode ser vantajoso proceder à separação de alguns dos seus componentes, pelo menos os presentes em quantidades significativas e que parecem ter viabilidade de comercialização junto dos operadores do mercado de materiais recicláveis.

A amostra em estudo revelou um elevado conteúdo em vidro e metais ferrosos. Assim, no sentido de se obter concentrados destes materiais, aplicaram-se às amostras de escórias algumas técnicas de separação com base em propriedades físicas dos materiais.

2.6.1 Separação magnética

Três amostras, correspondendo aos infracrivos de 13 mm e 6,680 mm e à fracção granulométrica entre 2,362 mm e 4,4699 mm, foram sujeitas a uma separação magnética, recorrendo a duas passagens do material, a 1^a sob magnetização correspondente à frequência de 42 Hz e a 2^a a 50 Hz. Deste ensaio colheram-se os resultados do Quadro 2.11.

Quadro 2.11 - Separação magnética

Calibre (mm)	Magnéticos (%)	Não Magnéticos (%)
(6,680<x<13)	16,0	84,0
(4,699<x<6,680)	36,8	63,2
(2,362<x<4,699)	50,9	49,1

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Em todas as granulometrias ensaiadas existe ainda uma quantidade significativa de materiais magnéticos, mesmo de baixa permeabilidade magnética, atingindo valores de 16,0 a 50,9 %; esta quantidade de partículas magnéticas vai aumentando à medida que a granulometria vai diminuindo, o que nos poderá levar a considerar a possibilidade de reduzir o calibre das partículas maiores no sentido de libertar os materiais magnéticos.

2.6.2 Jigagem

A jigagem permite uma separação densitária de misturas de partículas com densidades e calibres diferentes e de diversos calibres, segundo os princípios que conduzem à separação de densidades, por estratificação em leitos pulsáteis.

Uma vez que a caracterização do Quadro 2.2 revelou a presença de uma elevada percentagem de vidro nas escórias, tentou-se, através da jigagem, obter um concentrado de vidro com potencial para ser reciclado.

Esta metodologia aplicada a 3 amostras correspondentes respectivamente aos infracrivos de 13 mm e 6,680 mm e à fracção granulométrica entre 2,362 mm e 4,4699 mm, levou aos resultados no Quadro 2.12.

Quadro 2.12 - Concentração por Jigagem

Calibre (mm)	Pesados (%)	Leves (%)
(4,699 < x < 6,680)	9,4	90,6
(2,362 < x < 4,699)	32,8	67,2

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Para as granulometrias mais baixas, correspondentes às fracções granulométricas de $4,699 < x < 6,680$ e $2,362 < x < 4,699$ os pesados constituem respectivamente 9,4% e 32,8%.

Quanto à amostra correspondente à granulometria de $6,680 < x < 13$, o ensaio não conduziu a quaisquer resultados significativos, devido à elevada dimensão das partículas que não reagiram à metodologia da jigagem.

Nas amostras dos concentrados pesados, verificou-se manualmente, através do uso de um pequeno íman, que as partículas pesadas correspondem aos materiais magnéticos, estando por isso associada a sua densidade ao teor em componentes ferrosos.

Os leves são constituídos essencialmente por vidro e inertes, que devido à pequena diferença de densidades foram igualmente arrastados pelo leito, e por algumas partículas metálicas laminares, que devido à sua forma são facilmente arrastadas pelo leito aquoso.

Assim, a separação das escórias por jigagem leva à obtenção de um concentrado de partículas magnéticas que constitui a parcela dos pesados, não se conseguindo obter na restante parcela que corresponde aos leves, um concentrado com elevado teor em vidro que viabilize a sua reciclagem.

Para se proceder à separação de materiais magnéticos, torna-se mais simples e efectiva a utilização de um tambor magnético, como se pode concluir da comparação dos Quadros 6.11 e 6.12 em que é visível a maior percentagem de magnéticos separada via separador magnético relativamente à jigagem.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.6.3 Separação em meios densos constitui parte significativa do total em peso das EIRSU. Note-se que no caso da amostra em estudo esta fracção

A separação em meios densos tem aplicabilidade apenas em partículas de calibres muito pequenos, tendo-se por isso sujeitado a este ensaio apenas uma amostra correspondente à fracção granulométrida entre 2,362 mm e 4,699 mm. Na separação foi utilizado o bromofórmio e os resultados obtidos encontram-se no Quadro 2.13.

Quadro 2.13 - Separação em líquidos densos

Calibre (mm)	Pesados (%)	Leves (%)
(2,362 < x < 4,699)	11,1	88,9

Também aqui se verificou, manualmente através de um íman, que os pesados correspondem às partículas magnéticas presentes na amostra.

2.7 Aplicações da fracção grosseira das EIRSU

Do conjunto de resultados anteriores pode concluir-se, relativamente à obtenção de concentrados de componentes das EIRSU, que das técnicas de separação aplicadas a separação magnética é a mais efectiva para a triagem dos metais ferrosos, e que nenhuma das técnicas aplicadas se mostrou eficaz na obtenção de um concentrado de vidro.

2.7 Aplicações da fracção grosseira das EIRSU

A aplicação da fracção grosseira das EIRSU, uma vez suprimida a fracção fina (< 0,5 mm), como substituto de inertes naturais em betões de construção civil torna-se altamente vantajosa, nomeadamente em termos da redução do

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

material a depositar em aterro, já que constitui parte significativa do total em peso das EIRSU. Note-se que no caso da amostra em estudo esta fracção atinge os 88 %.

O facto de no nosso País não estar prevista a utilização de inertes artificiais em betões estruturais, faz com que os ensaios de verificação da conformidade de inertes naturais segundo a normalização portuguesa não devam ser aplicados às EIRSU.

Por isso o estudo teve como critérios de análise desta possibilidade de utilização, a mobilização de poluentes das escórias e o comportamento do betão obtido perante ensaios mecânicos, nomeadamente de resistência à compressão.

Outros critérios já tidos em conta noutros países foram também considerados na análise das alternativas de aplicação da fracção grosseira das EIRSU.

acima dos limites definidos na legislação em referência
categoria IV (isto é, escórias imediatamente valorizáveis (0,2 mg/kg MS para

2.7.1 Ensaio de lixiviação

As características do lixiviado resultante da aplicação da norma NF X 301-210 à fracção grosseira das EIRSU, e a sua comparação com os limites estabelecidos (Quadro 2.14) mostra que esta fracção pode classificar-se na categoria "M", ou seja na classe das escórias maturáveis.

A caracterização realizada que mostra que as EIRSU ensaiadas contêm cerca de 50% em peso de vidro e 10% de ferrugens, poderia por isso justificar a concentração mais elevada em chumbo no lixiviado.

O mercúrio encontrado no lixiviado tem a provável a presença de pilhas e metais de lampadas fluorescentes nos RSU incinerados.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Quadro 2.14 - Resultados de lixiviação da fracção grosseira das EIRSU e valores limite da norma NF X 31 - 210

Elemento	Amostra de EIRSU (mg/kg MS)	NF X 31 - 210 (mg/kg MS)
Taxa de inqueimados (%)	0,3	< 5
Fracção solúvel (%)	0,1	< 10
As	0,03	< 4
Cd	0	< 2
Cr 3+	0	< 3
Hg	0,3	< 0,4
Pb	19,1	< 50
SO ₄ ²⁻	3690	< 15 000

O mercúrio e o chumbo, com concentrações nos lixiviados de 0,34 e 19,06 mg/kg MS, respectivamente, são os elementos cujos valores se encontram acima dos limites definidos na legislação em referência para escórias da categoria "V", isto é, escórias imediatamente valorizáveis (0,2 mg/kg MS para o mercúrio e 10 mg/kg MS para o chumbo).

A bibliografia consultada [22], refere que RSU com grandes quantidades de vidro e metais ferrosos podem originar teores elevados em chumbo nas EIRSU; o elevado teor em mercúrio pode ser atribuído à presença de pilhas usadas nos RSU.

A caracterização realizada que mostra que as EIRSU ensaiadas contêm cerca de 50% em peso de vidro e 10% de ferrosos, poderá por isso justificar a concentração mais elevada em chumbo no lixiviado.

O mercúrio encontrado no lixiviado torna provável a presença de pilhas e metais de lâmpadas fluorescentes nos RSU incinerados.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.7.2 Resistência das EIRSU ao esmagamento

Realizou-se um ensaio de resistência ao esmagamento, segundo a norma CEN/TC 154/SC5 DOC.N277, de Setembro de 1996, e obteve-se para a amostra ensaiada um valor de 0,6 MPa.

De acordo com a norma UNI 7548 a fração grosseira das EIRSU testada pode ser aplicada como inerte artificial em betão não estrutural, de resistência à compressão < 15 MPa Tipo Lc1.

2.7.3 Resistência à compressão

Foram produzidos 7 provetes de betão (15 x 15 x 15 cm) utilizando uma argamassa doseada de acordo com a norma UNI 7 549, Parte 12^a (Agregado leve - validação das propriedade mediante prova em betão convencional), substituindo o inerte por escórias [28].

A dosagem dos cerca de 35 litros de argamassa para a formulação do betão a testar foi a seguinte:

Quadro 2.15 - Dosagem utilizada para fabrico do betão a ensaiar

MATERIAL	MASSA (g)	VOLUME (cm ³)
Cimento Tipo II*	12 250	3 952
Areia **	17 500	6 554
Ar ***	-	875
Água (0.5 Cim)	6 125	
Água absorvida	500	
Água total	6 625	6 340
EIRSU	19 988	17 500
TOTAL	56 362	35 021

* densidade = 3,10 ** densidade = 2,67 *** conteúdo de ar no betão 2,5%

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Para a argamassa preparada, a trabalhabilidade obtida (“slump test”), determinada conforme a NP 87 é de 6 cm.

Uma perspectiva de gestão da EIRSU a indagar, a qual se pode revelar mais Os provetes, fabricados e curados conforme a ISO 2736, destinaram-se à realização de ensaios de resistência à compressão uniaxial aos 7, 14 e 28 dias, e também de capilaridade. Os resultados apresentam-se em seguida.

Quadro 2.16 - Resistência à compressão em betão endurecido

Cura (dias)	7			14			28		
	1	2	média	3	4	média	5	6	média
Peso (kg)	7,36	7,44	7,4	7,4	7,66	7,53	7,42	7,4	7,41
Resistência (MPa)	18,7	18,7	18,7	20,9	22,2	21,55	25,3	23,5	24,4

De acordo com as classes de resistência do betão estabelecidas na NP ENV 206 os provetes ensaiados evidenciam características de um betão de classe C16/20 [29].

Contudo, aos 7 e 14 dias os valores são já da classe C16/20 e o valor médio obtido aos 28 dias (24,4 MPa) está muito próximo da classe C20/25, o que pode indicar uma forte tendência para o comportamento do betão ensaiado como um betão de classe C20/25.

Para resultados com maior confiança, seria necessário produzir um novo conjunto de provetes em condições semelhantes, mas em maior número.

2.7.4 Ensaios de capilaridade

Num dos provetes cúbicos de betão foram realizados ensaios de capilaridade por imersão e por absorção, e os valores determinados são respectivamente 5% e 11 cm.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.8 Aplicações alternativas da fracção fina das EIRSU

Uma perspectiva de gestão de EIRSU a indagar, a qual se pode revelar mais vantajosa do que outras, implica estabelecer utilizações diferenciadas:

- usar a fracção mais grosseira como inerte graúdo na confecção de betões, ou sub-camadas de pavimentação; e,
- dar à fracção mais fina outro destino mais conveniente.

Embora da caracterização efectuada e apresentada em 2.3, se conclua que a fracção fina ($< 0,5$ mm) constitui somente cerca de 12% do total da massa da amostra de EIRSU em estudo, a separação deste material dos 88% restantes pode apresentar vantagens como as seguintes:

- Se a fracção fina não satisfizer os critérios de lixiviação, a supressão duma parcela que pela sua maior superfície específica é, em geral, mais reactiva, e, portanto, mais capaz de mobilizar poluentes, poderá ser decisiva na classificação e subsiguiente utilização da fracção grosseira remanescente. Por outro lado, circunscrevendo o tratamento à fracção mais fina reduzir-se-á substancialmente o custo da gestão global da EIRSU;
- No caso da fracção fina apresentar propriedades compatíveis com a utilização em argamassas, como inerte fino ou aglomerante cimentício;
- Numa condição de mercado em que só haja oportunidade de aplicar graúdos.

A procura duma solução de estabilização/solidificação para a parcela mais fina enquadra-se na 1^a hipótese, a qual pode obrigar à sua completa deposição controlada.

Outras vias de solução do problema destes finos são a sua incorporação nas matérias primas para fabrico de cimento, ou o fabrico de aglomerados que

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

depois provem satisfazer os critérios de inocuidade que lhes é exigida para serem aplicados. Este último caso, enquadra-se na última das 3 hipóteses afloradas, pois aumenta o calibre dos finos tornando-os, por isso, apetecíveis no mercado.

Se a fracção fina não tiver perigosidade pode substituir a areia fina em argamassas, ou, se detiver propriedades pozolânicas, o que ainda será melhor, pode mesmo dispensar algum cimento.

A investigação de qualquer uma destas alternativas de aplicação da fracção fina das EIRSU, pressupõe o estudo do comportamento de misturas dos finos (< 0.5 mm) de EIRSU com outros componentes, por exemplo, areia, argila, cinzas de carvão e cimento. Em cada caso pretender-se-á obter o máximo de qualidades físicas da mistura ao mais baixo custo e garantir produtos com baixa solubilidade de alguns dos seus constituintes potencialmente perigosos.

2.8.1 Metodologia da investigação

Nos casos anteriormente citados de aplicação dos finos de EIRSU, isto é, deposição após E/S, incorporação em argamassas e produção de aglomerados, não será provável haver uma só solução de mistura que melhor satisfaça todas as opções. O mais provável será mesmo que varie a percentagem máxima de incorporação de finos de EIRSU em cada uma destas alternativas. Contudo, em qualquer uma destas, a mistura dos componentes deverá deter requisitos de consistência suficiente, embora diferente em cada uma, e satisfazer critérios ambientais que assegurem não haver contaminações devidas a qualquer um dos componentes, nomeadamente os das EIRSU. Por exemplo, uma solução de E/S deve ter pelo menos a consistência dum solo normal, isto é, a respectiva mistura de componentes deve ter resistência

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

mecânica à compressão não confinada de 0,35 MPa [30]. Por sua vez, um agregado artificial no qual os finos de EIRSU sejam incorporados deve cumprir um critério de resistência ao esmagamento a granel de pelo menos 1,5 MPa [31]. Também a inclusão dum inerte numa argamassa obedece a requisitos de resistência do conjunto cuja verificação se encontra normalizada [29]. Ou seja, para a procura da melhor solução em cada um destes casos importa conhecer o comportamento das misturas e o efeito de cada um dos factores influentes, particularmente os respectivos componentes, nos critérios que se devem satisfazer, desde logo na resistência do conjunto.

A metodologia de investigação adoptada teve de ser parcimoniosa, atendendo à quantidade de amostra e tempo disponível, e assentou por isso no seguinte:

- Decisão sobre os componentes e respectivas proporções na mistura;
- Obtenção de pequenas amostras cilíndricas de 2,5 cm de diâmetro e o dobro de altura, segundo procedimentos de enformação uniformes, isto é, praticamente sem qualquer compactação;
- Teste de compressão uniaxial não-confinada de pelo menos 4 amostras cilíndricas uma vez decorridos períodos de tempo pré-definidos;
- Análise dos resultados com vista a definir os factores influentes na compressão;
- Reinício do ciclo, realizando novas misturas e amostras, de acordo com as conclusões obtidas; ou,
- seu encerramento, se a solução obtida for satisfatória. Neste último caso pode verificar-se o critério ambiental e dar-se por obtido um bom resultado se ele for satisfeito. Em caso contrário há que procurar nova solução que satisfaça ambos os critérios.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

No trabalho usou-se sempre que possível:

- planeamento experimental de matrizes ortogonais robustas (ou completas) ou de Taguchi [32,33];
- realizaram-se testes de compressão uniaxial não confinada nas amostras ao fim de 7 dias de ganho de presa;
- efectuou-se o tratamento estatístico dos resultados obtidos, por forma a concluir sobre a influência dos factores (componentes) em estudo na resistência à compressão uniaxial;

2.8.2 Componentes e respectivas proporções nas misturas

No sentido de obter uma primeira aproximação relativamente às proporções e influência dos diversos componentes, obtiveram-se várias amostras usando escórias correspondentes à fracção de granulometria inferior a 2,362 mm. Os planos experimentais foram realizados de acordo com o que se apresenta no Anexo D.

Dado que o grau de humidade necessária a cada mistura é função dos respectivos componentes, entendeu-se que nesta fase não se deveria considerar a água como mais um factor a investigar. Assim, em vez de se considerarem 2 ou mais níveis de humidade, adicionou-se água em quantidade suficiente para se obterem sempre misturas de aspecto homogéneo, húmidas, mas não em excesso, com plasticidade e conduzindo a amostras de consistência suficiente para o seu manuseamento

As amostras produzidas com o diâmetro de 2,5 cm e 5 cm de altura rondavam 45 g cada.

Os resultados relativos aos ensaios de resistência de todas as amostras produzidas encontram-se no Anexo C.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.8.2.1 - Influência do meio de cura

No sentido de decidir acerca do ambiente no qual as amostras deviam permanecer a ganhar presa realizou-se o seguinte ensaio comparativo com amostras correspondentes às 7 primeiras misturas do 1º plano experimental:

Os resultados correspondentes ao plano experimental completo apresentam-

- para cada uma obtiveram-se 8 amostras cilíndricas: 4 foram colocadas numa caixa hermética, contendo uma vasilha com água, de modo a produzir um ambiente húmido saturado, e as outras 4 expuseram-se às condições normais de temperatura e ar ambiente;
- todas as amostras foram testadas à compressão uniaxial não confinada ao fim de 7 dias.

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 2.17 e indicam não haver qualquer vantagem num ambiente húmido saturado.

Quadro 2.17 - Ensaios de resistência:

1º plano experimental - amostras curadas em ambiente saturado
e em condições normais de temperatura e ar ambiente

Ensaio	Resistência (MPa)	
	Amb. saturado	Cond. Normais
1.1	0,45	1,13
1.2	0,50	1,18
1.3	0,40	1,05
1.4	0,50	1,09
1.5	1,50	1,63
1.6	1,40	1,56
1.7	1,30	1,68

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.8.2.2 - Efeitos em misturas de areia, argila, cinzas de carvão e cimento

Por isso, para as restantes misturas a partir da 8^a, já só se produziram 4 amostras cilíndricas, as quais se deixaram a ganhar presa nas condições de temperatura e ar ambientes.

Os resultados correspondentes ao plano experimental completo apresentam-se no Quadro 2.18. Note-se que cada valor de resistência à compressão não-confinada é a média dos valores de 4 amostras cilíndricas após 7 dias de ganho de presa em atmosfera normal.

Quadro 2.18 - Ensaios de resistência: 1º plano experimental

Ensaio	COMPONENTES (%)					Resistência (MPa)
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila	ERSU	
1.1	10	20	5	5	60	1,1
1.2	20	20	5	5	50	1,2
1.3	10	30	5	5	50	1,1
1.4	20	30	5	5	40	1,1
1.5	10	20	15	5	50	1,6
1.6	20	20	15	5	40	1,6
1.7	10	30	15	5	40	1,7
1.8	20	30	15	5	30	2,2
1.9	10	20	5	10	55	1,4
1.10	20	20	5	10	45	1,3
1.11	10	30	5	10	45	1,0
1.12	20	30	5	10	35	1,0
1.13	10	20	15	10	45	1,7
1.14	20	20	15	10	35	2,1
1.15	10	30	15	10	35	1,8
1.16	20	30	15	10	25	1,9

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

As conclusões são as seguintes:

- a mistura de resistência à compressão mais elevada, cerca de 2,2 MPa, corresponde à combinação dos componentes no nível 2, à excepção da argila (as EIRSU contribuem apenas com 30% do peso para o total);
- todas as misturas apresentam resistência à compressão superior à de um solo normal.

A análise de variância destes resultados (ANOVA) na procura de efeitos principais e interacções significativas entre os factores em causa, isto é, cinzas de carvão, areia, argila e cimento, origina a matriz de efeitos e respectiva significância apresentada no Quadro 2.19.

Quadro 2.19 - Efeitos e respectiva significância: 1º plano experimental

Factor	Efeito esperado	p
1: C. carvão	57,65	0,186444
2: Areia	- 22,95	0,568953
3: Cimento	330,78	0,000318
4: Argila	40,35	0,333025
1 2	17,93	0,654223
1 3	62,00	0,160680
2 3	85,70	0,071968
1 4	- 2,03	0,959208
2 4	- 81,43	0,083007
3 4	14,85	0,709653
1 2 3	2,43	
1 2 4	- 47,30	
1 3 4	23,63	
2 3 4	- 12,58	
1 2 3 4	- 64,30	

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Face a estes resultados pode afirmar-se o seguinte:

- o cimento tem um significativo efeito na resistência à compressão (grau de confiança >95%), que incrementa de 330 N quando nas misturas aumenta de 5 para 15%;
- os restantes factores não demonstram efeitos principais significativos na resistência (<95% de confiança) nesta região experimental;
- as interacções cimento-areia e areia-argila revelam um significado não muito distante do nível dos 95%, embora de efeitos contrários, pelo que se poderão justificar novos ensaios no sentido de validar ou não estas influências na resistência.

Note-se que as interacções do cimento com a areia e com as cinzas de carvão são ambas positivas, respectivamente de 85,7 N e 62,0 N, o que, conjuntamente com o efeito principal, leva a concluir que o cimento se apresenta como o factor determinante na resistência à compressão nesta região experimental.

2.8.2.3 - Efeitos em misturas de argila, areia e cinzas de carvão

Nestas condições, isto é, com adições de cimento nestes níveis, é menos fácil pôr a claro os efeitos de ligação dos outros componentes. Contudo, no caso de existirem, é importante aproveitá-los para reduzir ao mínimo a incorporação de cimento nas misturas.

Assim, nos 2 planos experimentais seguintes entendeu-se suprimir a adição de cimento.

O 2º plano experimental manteve as EIRSU como complemento dos restantes factores. O 3º plano experimental, pelo contrário, considerou as EIRSU

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

como factor com 2 níveis, e a areia assumiu o papel de complemento nas respectivas misturas.

Em ambos os casos os 3 factores variaram em 2 níveis. Porém, o 2º plano experimental foi ainda completo, de 8 ensaios, ao passo que o 3º é reduzido, de acordo com uma matriz de Taguchi, do tipo L4, havendo lugar a apenas 4 ensaios.

Os respectivos resultados apresentam-se nos Quadros 2.20 e 2.21, respetivamente.

A análise da variação da matriz completa do Quadro 2.20 conduziu aos resultados:

Quadro 2.20 - Ensaios de resistência: 2º plano experimental

Ensaio	COMPONENTES (%)				Resistência (MPa)
	C. carvão	Areia	Argila	EIRSU	
2.1	10	20	5	65	0,87
2.2	20	20	5	55	0,73
2.3	10	30	5	55	0,61
2.4	10	20	5	45	0,49
2.5	20	20	10	60	0,79
2.6	10	30	10	50	0,71
2.7	20	30	10	50	0,64
2.8	10	20	10	40	0,61

Quadro 2.21 - Ensaios de resistência: 3º plano experimental.

Ensaio	COMPONENTES (%)				Resistência (MPa)
	C. carvão	Argila	EIRSU	Areia	
3.1	15	5	25	55	0,53
3.2	15	10	50	25	0,36
3.3	25	5	50	20	0,97
3.4	25	10	25	40	0,66

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Os resultados indicam o seguinte:

- diminuição de resistência à compressão face aos anteriores, devido à supressão do cimento;
- a obtenção de consistências de solos normais.

Por outro lado, não há diferenças enormes entre os níveis dos resultados obtidos nos 2 planos experimentais.

A análise de variância da matriz completa do Quadro 2.20 conduziu aos resultados do Quadro 2.22 seguinte.

Quadro 2.22 - Efeitos e respectiva significância: 2º plano experimental

Factor	Efeito esperado	p
1: C. carvão	45,625	0,060860
2: Areia	- 91,875	0,030292
3: Argila	5,625	0,420833
1 2	9,375	0,277965
1 3	16,875	0,161494
2 3	30,625	0,090334
1 2 3	4,373	

A ANOVA assinala o seguinte:

- o efeito negativo na resistência que resulta da adição de areia às misturas ensaiadas (grau de confiança >95%);
- o efeito positivo das cinzas de carvão, embora com grau de confiança de apenas 94%.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

A análise dos resultados da matriz de Taguchi do 3º plano experimental, usando o critério “quanto mais, melhor”, origina o Quadro 2.23 e a Figura 2.11 seguintes.

Note-se que devido à parcimónia desta metodologia não é possível obter graus de significância dos efeitos principais.

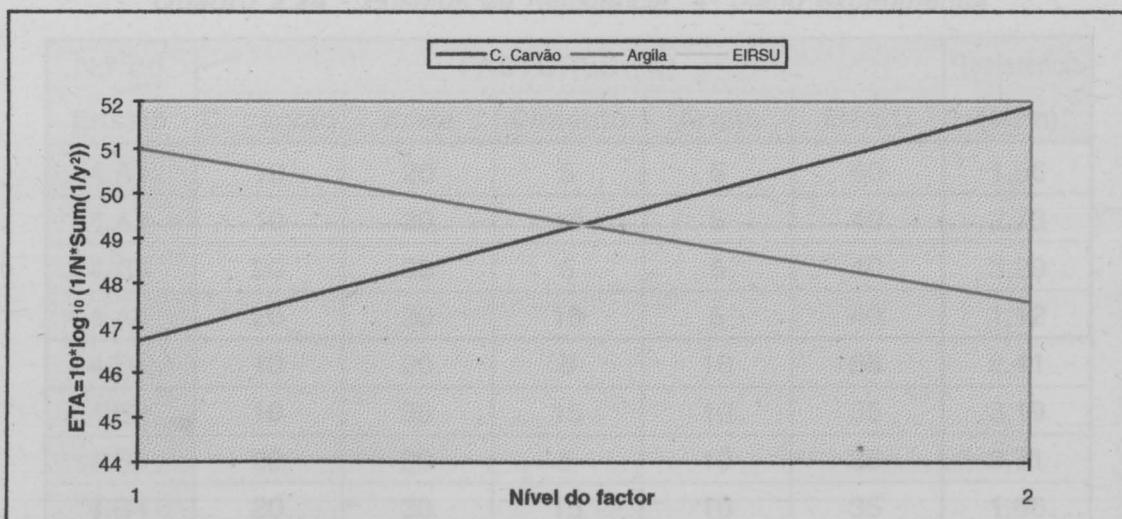
Quadro 2.23 - Efeitos principais: 3º plano experimental

Factor	Nível	Efeito esperado
1: C. carvão	2	2,59127
2: Argila	1	1,69881
3: EIRSU	2	0,00345

Contudo, nesta região experimental parece verificar-se o seguinte:

as EIRSU praticamente não influenciam a resistência das amostras; o carvão e a argila têm efeitos contrários quando aumenta a sua incorporação nas misturas: o primeiro aumenta a resistência e a segunda diminui-a.

Figura 2.11 - Efeitos dos factores em análise, no 3º plano experimental



ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.8.3 Influência da granulometria das EIRSU na resistência à compressão

Os efeitos principais dos teóres na resistência à compressão assinalam-se. A influência da granulometria das EIRSU nestes resultados foi estudada através de uma nova série de ensaios, nos quais a fracção de EIRSU < 2,362 mm foi substituída pela fracção < 0,5 mm.

Esta opção é também objectiva, uma vez que se reconheceu ser esta a fracção mais problemática sob o ponto de vista de aplicação, isto é, ser possível encaminhar conjuntamente com a fracção mais grosseira também a de calibre situado entre 0,5 e 2,362 mm.

O plano experimental pretendeu ser parcimonioso, e, por isso, incluiu 2 matrizes de Taguchi do tipo L_4 , (3 factores a variar em 2 níveis), havendo lugar a 8 ensaios Contudo, de modo a obter resultados comparativos com os do 1º plano experimental, conservaram-se os mesmos níveis de factores, pelo que em cada matriz L_4 se conserva o 4º factor num nível previamente definido.

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 2.24 e parecem mostrar um aumento generalizado dos valores de resistência obtidos.

Quadro 2.24 - Ensaios de resistência: 4º plano experimental

N.º do Ensaio	FACTORES (%)					Resistência (MPa)
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila	EIRSU	
4.A1	10	20	5	5	60	1,56
4.A2	10	30	15	5	40	2,73
4.A3	20	20	5	5	40	3,29
4.A4	20	30	15	5	40	1,12
4.B1	10	20	5	10	55	2,41
4.B2	10	30	15	10	35	3,19
4.B3	20	20	5	10	35	3,71
4.B4	20	30	15	10	35	1,66

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Estes resultados foram tratados estatisticamente de várias maneiras.

Os efeitos principais dos factores na resistência à compressão assinalam-se nos Quadros 2.25 e 2.26 que resultam da análise das 2 matrizes L_4 em separado segundo o critério de “quanto mais resistência, melhor”.

Quadro 2.25 - Efeitos principais: matriz A do 4º plano experimental

Factor	Nível	Efeito esperado
1: C. carvão	1	0,48390
2: Areia	1	1,13254
3: Cimento	2	2,35660

Quadro 2.26 - Efeitos principais: matriz B do 4º plano experimental

Factor	Nível	Efeito esperado
1: C. carvão	1	0,31824
2: Areia	1	1,12892
3: Cimento	2	3,54918

Estes efeitos traduzem-se graficamente nas Figuras 2.12 e 2.13 e as conclusões são as seguintes:

- o cimento é o factor que nitidamente mais contribui para o aumento da resistência à compressão das amostras;
- as cinzas de carvão e a areia parecem exercer uma influência negativa na resistência.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Figura 2.12 - Efeitos principais: matriz A do 4º plano experimental

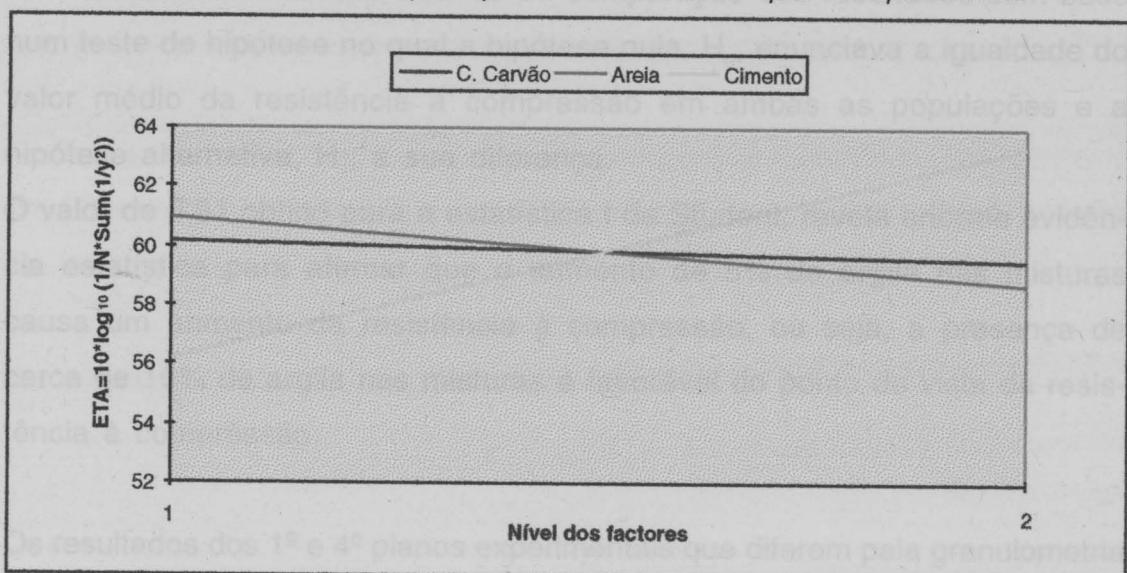
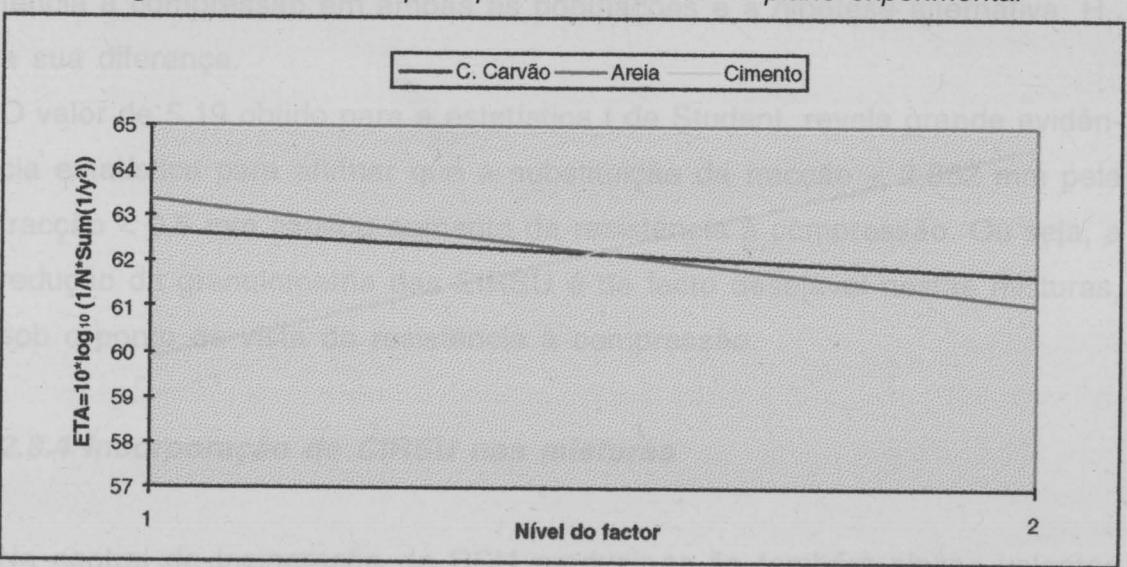


Figura 2.13 - Efeitos principais: matriz B do 4º plano experimental



- A argila, cujo valor se incrementa de 5% nas misturas da matriz B relativamente às da matriz A, provoca um visível aumento de resistência à compressão uniaxial não-confinada.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Este efeito foi confirmado através da comparação dos resultados com base num teste de hipótese no qual a hipótese nula, H_0 , enunciava a igualdade do valor médio da resistência à compressão em ambas as populações e a hipótese alternativa, H_1 , a sua diferença.

O valor de 6,81 obtido para a estatística t de Student, revela enorme evidência estatística para afirmar que o aumento de 5% de argila nas misturas causa um aumento da resistência à compressão, ou seja, a presença de cerca de 10% de argila nas misturas é favorável do ponto de vista da resistência à compressão.

Os resultados dos 1º e 4º planos experimentais que diferem pela granulometria das EIRSU foram igualmente comparados com base num teste de hipótese no qual a hipótese nula, H_0 , enunciava a igualdade do valor médio da resistência à compressão em ambas as populações e a hipótese alternativa, H_1 , a sua diferença.

O valor de 5,19 obtido para a estatística t de Student, revela grande evidência estatística para afirmar que a substituição da fracção < 2,362 mm pela fracção < 0,5 mm causou aumento da resistência à compressão. Ou seja, a redução da granulometria das EIRSU é de facto desejável nestas misturas, sob o ponto de vista da resistência à compressão.

2.8.4 Incorporação de CIRSU nas misturas

Na central de incineração de RSU produzir-se-ão também cinzas volantes (CIRSU), um produto de muito baixa granulometria, cujo gestão se deve realizar de forma adequada.

Uma das perspectivas que se colocam relativamente a este resíduo é a de suprimir a enorme fracção de solúveis que contém (>50%), baixando drasticamente a sua perigosidade e reduzindo o volume a gerir. O resíduo resul-

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

tante da lavagem conserva, porém, muito fina granulometria, e pode desempenhar um papel importante numa solução conjunta com a parcela mais fina das EIRSU.

A perspectiva de incorporar esse produto nas misturas testadas foi, por isso, aflorada através de 5º plano experimental. Este baseou-se na matriz do 3º plano experimental, tendo-se substituído as cinzas de carvão por CIRSU e utilizado a fracção < 0,5 mm das EIRSU.

Os resultados relativos aos ensaios de compressão das amostras deste plano experimental originaram o Quadro 2.27.

Quadro 2.27 - Ensaios de resistência: 5º plano experimental

Ensaio	COMPONENTES (%)				Resistência (MPa)
	CIRSU	Argila	EIRSU	Areia	
1	15	5	25	55	0,57
2	15	10	50	25	0,74
3	25	5	25	20	0,88
4	25	10	50	40	0,80

A média destes resultados de resistência à compressão é superior à do 3º plano experimental, respectivamente 0,75 e 0,63. Claro que para esta diferença contribuíram os efeitos das CIRSU e a menor granulometria das EIRSU.

Porém, o valor da estatística t de student para o teste de hipótese da média das diferenças (1,37) , não é significativo ao nível de 95%.

A análise estatística da matriz de Taguchi ilustrada no Quadro 2.28 e na Figura 2.14. atribui às CIRSU o efeito positivo mais elevado.

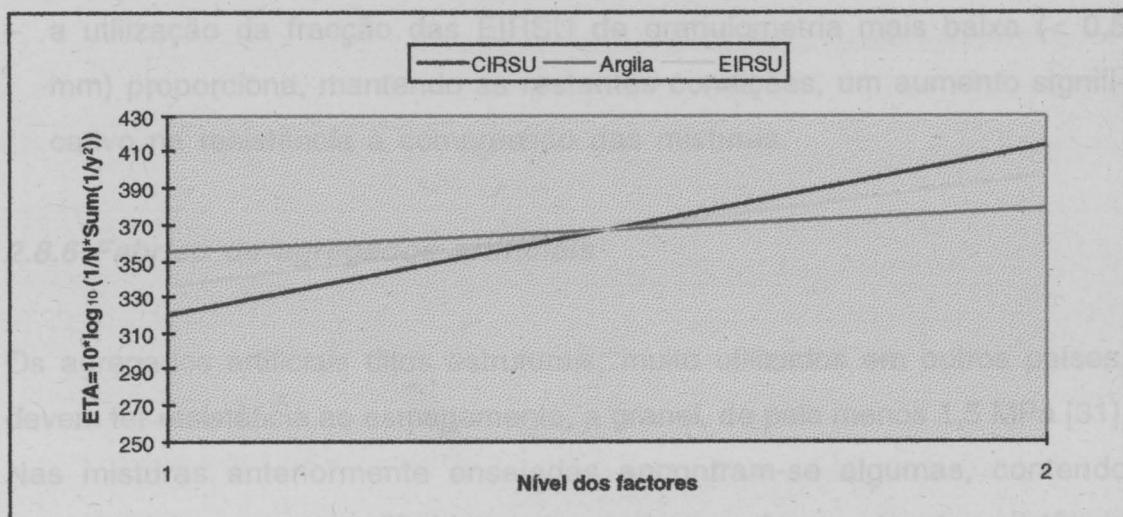
ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Quadro 2.28 - Matriz de efeitos: 5º plano experimental

Factor	Nível	Efeito esperado
1: CIRSU	2	46,6188
2: Argila	2	11,3562
3: EIRSU	2	30,2188

Figura 2.14 - Efeitos principais dos factores em análise, no 5º plano experimental



De qualquer modo, com base nos valores da resistência à compressão obtidos, conclui-se que é possível uma solução de deposição conjunta de CIRSU lavadas e fração fina de EIRSU.

2.8.5 Conclusões

O conjunto dos resultados de resistência à compressão uniaxial não confinada anteriormente apresentados permitem inferir o seguinte:

- quando presente nas misturas, o cimento é o componente que mais aumenta a resistência à compressão uniaxial não-confinada;

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

- na sua ausência os valores da resistência à compressão diminuem nitidamente devido à falta de ligantes tão relevantes entre os componentes seleccionados;
- em tais circunstâncias, as cinzas de carvão assumem o efeito principal positivo mais significativo de entre os componentes em análise;
- porém, a substituição das cinzas de carvão por CIRSU implica uma alteração ainda significativa dos valores de resistência à compressão, e, no caso destas misturas, as CIRSU têm o efeito principal mais elevado;
- a utilização da fracção das EIRSU de granulometria mais baixa (< 0,5 mm) proporciona, mantendo as restantes condições, um aumento significativo na resistência à compressão das misturas.

2.8.6 Fabrico de agregados artificiais

Os agregados artificiais ditos estruturais, muito utilizados em outros países, devem ter resistência ao esmagamento, a granel, de pelo menos 1,5 MPa [31]. Nas misturas anteriormente ensaiadas encontram-se algumas, contendo cimento, cujas amostras cilíndricas apresentaram pelo menos esta resistência à compressão unaxial não-confinada.

Assim, desejando-se testar este tipo de alternativa de solução e alguns dos aspectos operatórios inerentes, nomeadamente a aptidão à obtenção de grânulos por rolamento, seleccionaram-se duas misturas com grande parcela de EIRSU, uma delas com maior quantidade de cimento do que a outra. As suas composições correspondem às misturas 4. A2 e 4. B1, do 4º plano experimental, isto é, 10% de cinzas de carvão, 30% de areia, 15% de cimento, 5% de argila e 40% de EIRSU, por um lado, e 10% de cinzas de carvão, 20% de areia, 5% de cimento, 10% de argila e 55% de EIRSU, por outro lado. A resistência não-confinada que corresponde às amostras destas composições é de, respectivamente, 2,73 e 2,41 MPa.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Os grânulos produzidos por rolamento em prato rotativo demonstraram as propriedades assinaladas no Quadro 2.29.

No fabrico dos agregados verdes usaram-se 2 tipos de pratos de granulação. O de maior diâmetro, maior velocidade de rotação, regulável, foi usado para a mistura 4. B1, tendo-lhe correspondido maior velocidade de rolamento e maior altura de queda, isto é, melhor compactação.

Quadro 2.29 - Características de granulados produzidos com base nas misturas 4. A2 e 4.B1

	Porosidade* (%)	Densidade (g/cm ³)	Resistência ao esmagamento (MPa)
Agregado verde (4. A2)			0,6
Agregado verde (4. B1)	16,89	1,31	1,3
Agregado cozido (4. B1)	22,14	1,18	-

* Determinada após 2 horas de emersão em água

No Quadro 2.29 também se assinalam as características relativas a uma parcela do material cozido a temperatura superior a 1000 °C. Porém, para este efeito esta comprovou não ser a mistura mais conveniente.

Os resultados do teste de lixiviação do agregado verde (4.B1), que se encontram no Quadro 2.30, mostram valores inferiores aos limites estabelecidos na norma utilizada.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Quadro 2.30 - Teste de lixiviação NF X 31 - 210

Elemento	Peletes (mg/kg MS)	NF X 31-210 (mg/kg MS)
As	7×10^{-3}	2
Hg	vestígios	< 0,4
Cu	5,9	
Ni	0	
Zn	0	
Mg	7,9	
Ag	0	
Cr	0	1
Pb	2,6	15
Cd	0	1
Al	5,4	
Fe	vestígios	
Cl	1491	
Sulfato	6458	7 000

Os resultados anteriores parecem indicar que:

- apesar de conter maior parcela de cimento o agregado produzido com a mistura 4. A2 não ganhou coesão significativa, tendo como consequência baixo valor de resistência ao esmagamento. Pelo contrário, o agregado produzido com a mistura 4. B1, que tem menor percentagem de cimento, apresenta resistência ao esmagamento bem superior. Ou seja, a forma de realização desta etapa de granulação é muito incidente na resistência obtida, sendo preferíveis as condições que beneficiem a compactação dos grânulos;
- o agregado resultante da mistura 4. B1 não cumpre, porém, os requisitos de um agregado estrutural, no que diz respeito à resistência ao esmagamento;

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

- contudo, dado que não há mobilização de contaminantes nos níveis definidos pela norma NFX 31 - 210, o agregado assim obtido ser aplicado em utilizações que sob o ponto de vista mecânico sejam menos exigentes.

2.8.7 Deposição controlada

A necessidade de deposição controlada da fracção fina das EIRSU após tratamento de estabilização/solidificação (E/S) aconselha a utilizar misturas baratas, que não contenham cimento, mas que garantam o critério mínimo de resistência à compressão ($> 0,35$ MPa) e a imobilização de poluentes. De entre as misturas ensaiadas em que não se incluiu cimento, várias houve que cumpriram os requisitos de resistência, podendo ser, por isso, assinaladas como potenciais soluções de E/S. Contudo, de entre elas, numa perspectiva de melhor utilização do espaço disponível para deposição, dever-se-ão escolher as que incorporam maior quantidade de EIRSU.

A mistura (2.1, 2º plano experimental) constituída por 10% de cinzas de carvão, 20% de areia, 5% de argila e 65% de EIRSU, no caso ensaiado a fracção $< 2,362$ mm, é, por isso, uma das candidatas.

Como os resultados disponíveis se referem à fracção $< 2,362$ mm das EIRSU e não à fracção $< 0,5$ mm, entendeu-se, por isso, reverificá-los neste calibre.

Nessa mesma perspectiva de deposição controlada, mas de modo a utilizar melhor o volume disponível, foram ainda ensaiadas mais 2 misturas com base na anterior: uma utilizando 80% de EIRSU, 15% de cinzas de carvão e 5% de areia; e, outra, com 100% de EIRSU.

Como se vê excluiu-se a argila em ambas.

Os resultados de resistência à compressão ao fim de 7 dias são os indicados no Quadro 2.31.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Quadro 2.31 - Resistência à compressão de misturas ricas em EIRSU

Ensaio	COMPONENTES (%)				Resistência (MPa)
	C. Carvão	Areia	Argila	EIRSU	
M1	10	20	5	65	1,16
M2	15	5	0	80	0,87
M3	0	0	0	100	0,86

Ao substituir os 65% da fracção mais fina das EIRSU pela de calibre inferior a 0,5 mm ganhou-se um acréscimo de resistência de cerca de 0,30 MPa, o que está de acordo com a tendência demonstrada anteriormente.

Contudo, os resultados mostram que é perfeitamente possível obter as características de resistência à compressão dos produtos solidificados usando só as EIRSU, sem qualquer aditivo.

No que concerne à ocupação de volume por estas misturas solidificadas, os exemplos apresentados do Quadro 2.32 são elucidativos.

Quadro 2.32 - Economia de volume ocupado

Nº do ensaio	COMPONENTES (%)						Volume (cm³)		
	C Carvão	CIRSU	Areia	EIRSU	Cimento	Argila	a granel	molde	Economia
M2	6,96	0	1,38	53,73	0	0	62,07	24,50	37,57
5.3	0	24,46	5,52	33,58	0	3,46	67,022	24,50	42,52

Na verdade, no ponto de vista duma solução de deposição controlada, a economia de espaço relativamente ao volume ocupado pelos diferentes componentes a granel é geralmente elevada. Esta solução, aliás, poderá convir ao explorador do local de deposição controlada, desde que lhe seja pago a respectiva taxa de deposição do(s) outro(s) resíduos.

Do ponto de vista do produtor de EIRSU, também se verifica que este alcança melhoria da optimização do volume pelo simples empacotamento com os outros resíduos e comparativamente ao volume ocupado pelas EIRSU a granel.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.8.8 Aplicação das EIRSU como inerte e aglomerante

A possibilidade de utilizar os finos de EIRSU como inertes e/ou aglomerantes em argamassas foi analisada por comparação com 2 misturas-padrão, uma com relação cimento:areia de 1:3 e outra de 1:5.

Em qualquer dos casos a areia foi sendo substituída pela fração fina das EIRSU, em percentagens de 25, 50, 75 e 100 %.

Os resultados obtidos nos testes de resistência à compressão das amostras cilíndricas ao fim de 7 dias de presa ao ar encontram-se respectivamente nos Quadros 2.33 e 2.34.

Quadro 2.33 - Resistência à compressão na razão cimento:inertes = 1:3

Ensaio	Componentes (%)			Resistência MPa
	Areia	Cimento	EIRSU	
P _(1:3)	75	25	0	4,77
M1 _(1:3)	75	25	25	6,44
M2 _(1:3)	50	25	50	4,96
M3 _(1:3)	25	25	75	4,66
M4 _(1:3)	0	25	100	3,69

* As percentagens de areia e EIRSU são referidas ao total de inertes, no padrão só areia

Quadro 2.34 - Resistência à compressão na razão cimento:inertes = 1:5

Ensaio	Componentes (%)			Resistência MPa
	Areia	Cimento	EIRSU	
P _(1:5)	83,3	16,7	0	5,61
M1 _(1:5)	75	16,7	25	3,74
M2 _(1:5)	50	16,7	50	4,14
M3 _(1:5)	25	16,7	75	3,20
M4 _(1:5)	0	16,7	100	3,51

* As percentagens de areia e EIRSU são referidas ao total de inertes, no padrão só areia

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Os resultados demostram o seguinte:

- em geral a resistência melhora nas misturas mais ricas em cimento relativamente às de relação cimento:inertes = 1:5 (estranhamente, quando os inertes são só areia a mistura com menos cimento tem maior resistência);
- apenas no caso da razão cimento:inertes de 1:3 aumenta a resistência substituindo até 50% da areia por EIRSU;
- nos outros casos há sensível redução da resistência, principalmente para as misturas mais pobres em cimento.

A menos outros efeitos que também precisam de ser indagados, nomeadamente os teores em sulfatos, cloretos, cal livre e mobilização de metais pesados, parece viável usar a fracção fina das EIRSU no fabrico de argamassas, embora só com substituição parcial da areia fina.

2.8.9 Volume de vazios das misturas ensaiadas

As densidades dos componentes obtidas por picnometria e a composição e peso das amostras das misturas realizadas permitem calcular o volume realmente ocupado por todos os componentes de cada amostra ensaiada e compará-lo com o volume cilíndrico das amostras obtidas.

A diferença entre o 2º e o 1º valores, traduz o volume de vazios e é uma medida da eficiência do empacotamento das partículas dos diversos componentes. Se o empilhamento for bom é provável que a mistura minimize a ocupação de terreno, no caso de ser empregue para a deposição controlada, e aumente a resistência do agregado que com ela se obtém, em razão da menor distância média entre todas as partículas.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Às amostras cilíndricas produzidas corresponde o volume de cerca de 24,5 cm³.

O Quadro 2.35 apresenta as estimativas do volume de vazios em diversas amostras.

Quadro 2.35 - Volume de vazios das misturas ensaiadas, cm³

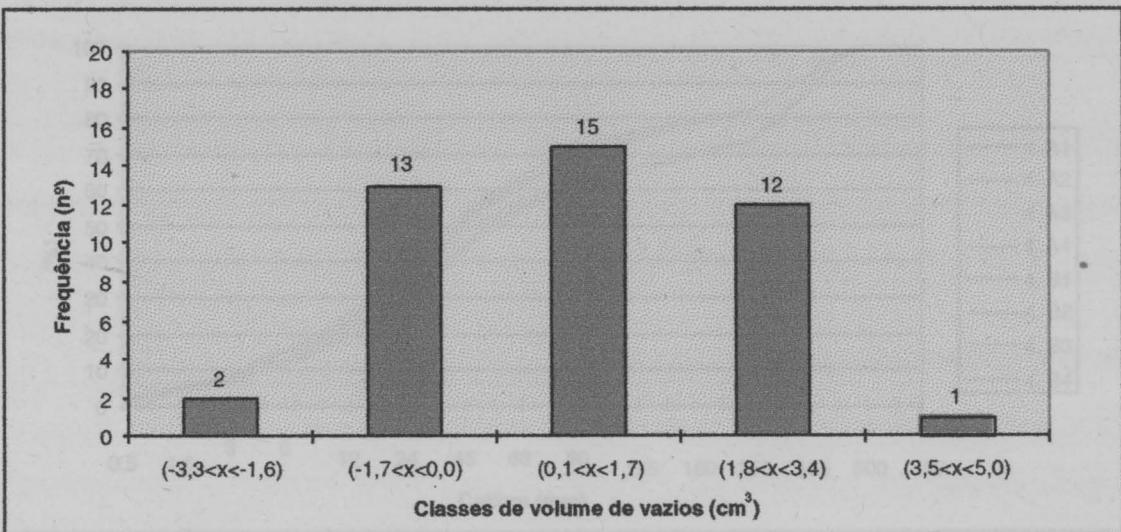
Na Figura 2.15 representa-se a distribuição de frequências do volume estimado de vazios divididos em diversas classes.

Contrariamente ao que seria de esperar há diversos valores negativos, o que só se justifica devido à enorme aleatoriedade dos resultados, nomeadamente no que se refere às densidades dos componentes efectivamente empregues nas misturas, mas também devido às condições de enformação das amostras cilíndricas.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Figura 2.15 - Distribuição de frequências do volume estimado de vazios



Contudo, os resultados apresentam a média positiva de $0,8 \text{ cm}^3$ e a Figura 2.15 aponta para uma distribuição de frequência de tendência normal. Atendendo ao reduzido número de amostras não é possível estabelecer uma relação entre vazios e componentes utilizados. Porém, verifica-se haver maior probabilidade de os volumes de vazios se situarem na classe $1,8 < X < 3,4 \text{ cm}^3$.

Os valores de volumes de vazios anteriormente indicados foram obtidos com misturas cujas granulometrias são apresentadas no Anexo C e reproduzidas nas Figuras 2.16 e 2.17 seguintes.

2.9 Optimização do empilhamento

A maximização da utilização de volume de deposição dum aterro, bem como da resistência à compressão dumha mistura sugere o máximo empacotamento dos diversos componentes, conduzindo à minimização do volume de vazios e à grande densidade do empilhamento das partículas.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Nesta secção são apresentadas as curvas granulométricas obtidas para os diferentes planos experimentais.

Figura 2.16 - Curvas granulométricas do 4º plano experimental

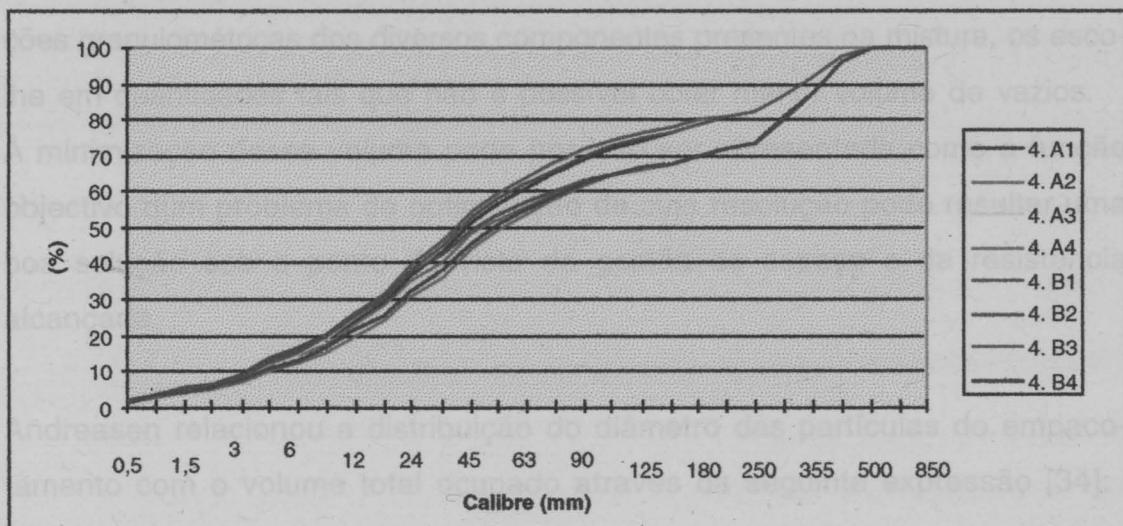
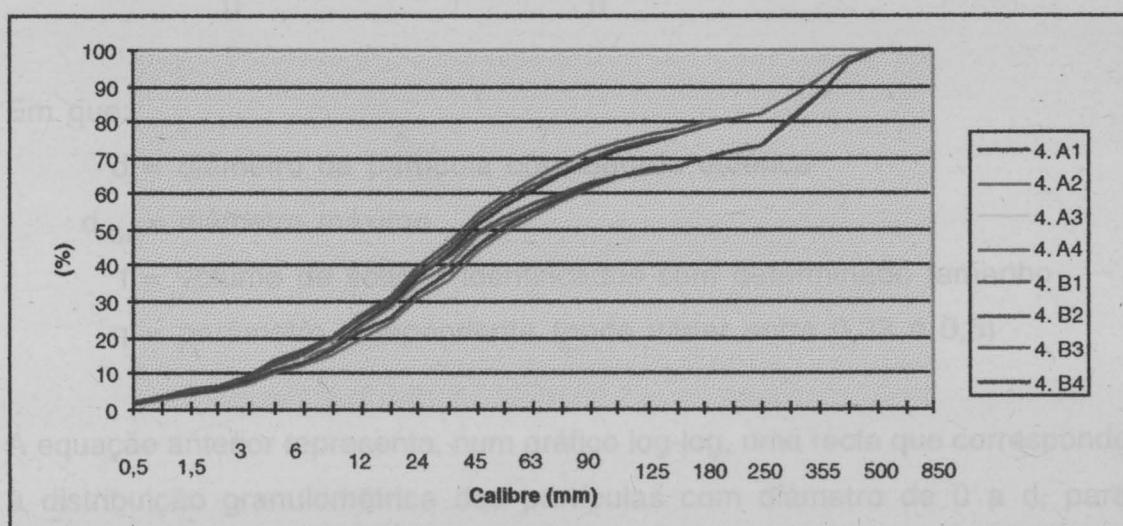


Figura 2.17 - Curvas granulométricas das misturas para deposição



2.9 Optimização do empilhamento

A maximização da utilização de volume de deposição dum aterro, bem como da resistência à compressão duma mistura sugere o máximo empacotamento dos diversos componentes, conduzindo à minimização do volume de vazios e a grande densidade do empilhamento das partículas.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Neste conceito, a “mistura óptima”, é aquela que, condicionada pelas distribuições granulométricas dos diversos componentes presentes na mistura, os escorre em quantidades tais que não é possível obter menor volume de vazios. A minimização desse volume pode por isso ser apresentada como a função objectivo dum problema de optimização de cuja resolução pode resultar uma boa solução sob o ponto de vista da gestão de espaço e da resistência alcançada.

Andreasen relacionou a distribuição do diâmetro das partículas do empacotamento com o volume total ocupado através da seguinte expressão [34]:

$$\sum_0^d f(d) = \left(\frac{d}{d_{\max}}\right)^q \text{ ou } \log \sum_0^d f(d) = q \log \left(\frac{d}{d_{\max}}\right)$$

Em que:

d = diâmetro da partícula considerada esférica

d_{\max} = diâmetro máximo

f = volume de sólidos identificados com determinado tamanho

q = parâmetro independente (pode variar entre 0,33 e 0,5)

A equação anterior representa, num gráfico log-log, uma recta que corresponde à distribuição granulométrica das partículas com diâmetro de 0 a d , para dado d_{\max} e q , que tem a maior densidade de empacotamento.

Para aproximar a composição de uma dada mistura dos componentes utilizados (cinzas de carvão, cimento, areia, argila e EIRSU), a uma mistura com uma “composição óptima”, recorreu-se ao método dos mínimos quadrados, tendo como objectivo minimizar a distância entre a recta dada pela equação de Andreasen e uma recta obtida através da mistura dos componentes considerados.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Assim, para determinar a “curva óptima”, utilizou-se na equação $d_{\text{máx}}$ como o maior diâmetro presente nas distribuições granulométricas dos componentes utilizados e d variou ao longo dos diversos intervalos granulométricos encontrados; por fim o valor de q variou entre 0,33 e 0,5, constante proposta por Andreasen.

As distribuições óptimas obtidas para dois conjuntos de calibres considerados ($d_{\text{máx}}=125$ e $d_{\text{máx}}=500$), encontram-se nos Quadros 2.36 e 2.37 e as respectivas curvas estão representadas nas Figuras 2.18 e 2.19.

Quadro 2.36 - “Curvas óptimas” para $d_{\text{máx}}=125\text{mm}$ e q variável

Diâmetro (μm)	$Y_{\text{ópt}}(0,33)$ (%)	$Y_{\text{ópt}}(0,387)$ (%)	$Y_{\text{ópt}}(0,443)$ (%)	$Y_{\text{ópt}}(0,5)$ (%)
0,5	1616,89	1180,31	866,39	632,46
1	415,56	363,15	311,40	261,97
1,5	290,98	262,23	231,75	201,02
2	231,38	212,65	191,59	169,47
3	365,77	342,91	315,04	284,28
4	290,85	278,08	260,45	239,66
6	459,78	448,41	428,28	402,04
8	365,61	363,63	354,06	338,93
12	577,94	586,37	582,21	568,56
16	459,57	475,51	481,32	479,32
24	726,48	766,79	791,48	804,07
32	577,69	621,82	654,31	677,86
45	759,54	832,39	891,50	940,36
53	396,03	440,24	478,13	511,53
63	442,22	496,32	544,14	587,77
75	472,39	535,45	592,78	646,67
90	523,93	599,94	670,84	739,31
106	497,82	575,68	649,98	723,41
125	529,55	618,13	704,36	791,31

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Quadro 2.37 - "Curvas óptimas" para $d_{máx}=500mm$ e q variável

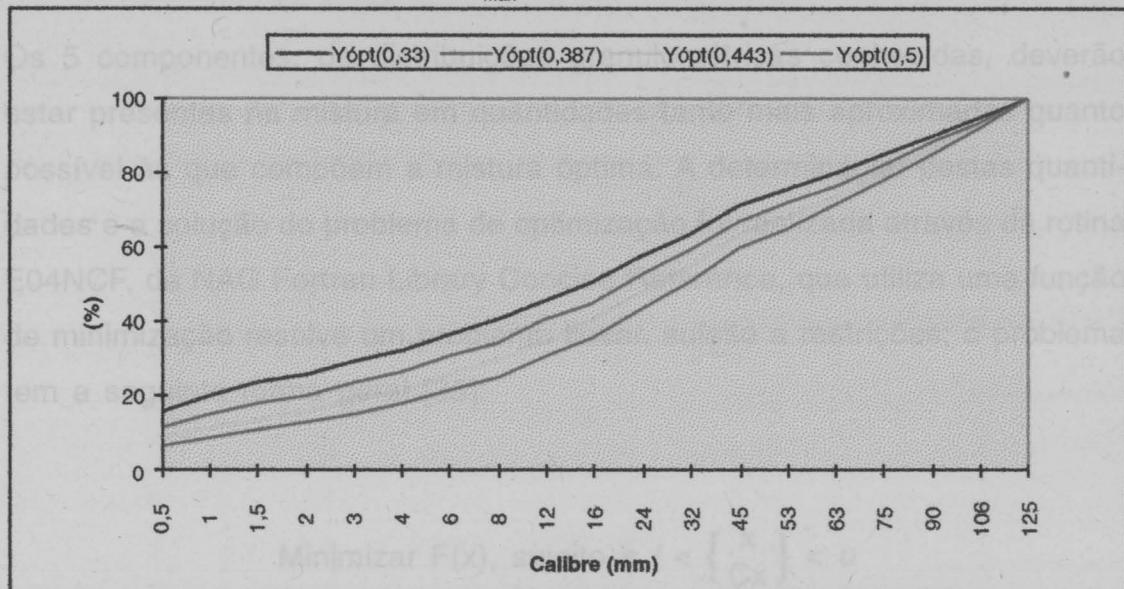
Diâmetro (μm)	$Y_{ópt}(0,33)$ (%)	$Y_{ópt}(0,387)$ (%)	$Y_{ópt}(0,443)$ (%)	$Y_{ópt}(0,5)$ (%)
0,5	1258,93	690,24	468,81	316,23
1	290,99	212,37	168,50	130,99
1,5	200,48	153,35	125,40	100,51
2	157,78	124,36	103,67	84,73
3	246,82	200,53	170,47	142,14
4	194,25	162,62	140,93	119,83
6	303,87	262,23	231,75	201,02
8	239,15	212,65	191,59	169,47
12	374,10	342,91	315,04	284,28
16	294,42	278,08	260,45	239,66
24	460,58	448,41	428,28	402,04
32	362,48	363,63	354,06	338,93
45	472,10	486,78	482,40	470,18
53	244,32	257,45	258,72	255,76
63	271,44	290,24	294,44	293,88
75	288,45	313,13	320,76	323,34
90	318,21	350,84	363,00	369,66
106	300,79	336,66	351,71	361,71
125	318,39	361,48	381,14	395,65
355	2426,01	2910,71	3181,14	3426,15
425	500,59	631,78	713,09	793,39
500	475,86	609,58	694,65	780,46

Calibro (mm)

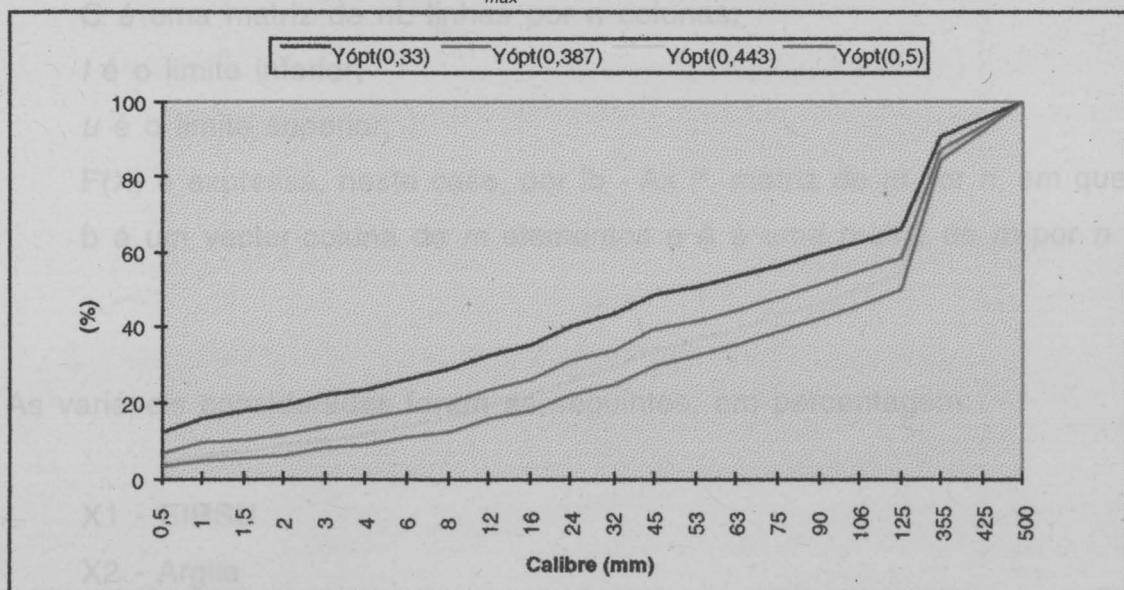
ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.2.1 Res...
Figura 2.18 - Curva granulométrica das “curvas óptimas” para para $d_{máx}=125\text{mm}$ e q variável



onde
Figura 2.19 - Curva granulométrica das “curvas óptimas” para para $d_{máx}=500\text{mm}$ e q variável



ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

2.9.1 Resolução do problema de optimização

Os 5 componentes, de distribuições granulométricas conhecidas, deverão estar presentes na mistura em quantidades tanto mais aproximadas quanto possível às que compõem a mistura óptima. A determinação destas quantidades e a solução do problema de optimização foi realizada através da rotina E04NCF, da NAG Fortran Library Concise Reference, que utiliza uma função de minimização resolve um problema linear, sujeito a restrições; o problema tem a seguinte forma geral [35]:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } F(x), \text{ sujeito a } l < \left\{ \begin{array}{l} x \\ Cx \end{array} \right\} < u \\ &x \in R^+ \end{aligned}$$

onde

C é uma matriz de nL linhas por n colunas;

l é o limite inferior;

u é o limite superior;

F(X) é expressa, neste caso, por $\|b - Ax\|^2$, matriz de m por n, em que b é um vector-coluna de m elementos e A é uma matriz de m por n

As variáveis consideradas foram as seguintes, em percentagem:

X1 - EIRSU

X2 - Argila

X3 - Cimento

X4 - Cinzas de carvão

X5 - Areia

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

As restrições impostas são:

$$X_1, X_2, X_3, X_4 \text{ e } X_5 > 0$$

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 = 100\%$$

Matriz A

	1	2	3	4	5
1	2,27	3,42	4,77	0,57	0
2	2,11	4,84	2,50	0,57	0
3	1,71	4,87	1,19	0,36	0
4	1,57	4,63	1,16	0,93	0
5	3,00	8,63	3,24	0,66	0
6	4,43	11,55	6,81	0,74	0
7	3,36	7,87	6,39	1,49	0
8	4,07	8,68	8,54	1,92	0
9	6,76	11,64	14,72	3,77	0
10	5,48	7,07	10,54	4,43	0
11	9,07	8,33	12,47	10,01	0
12	7,96	5,28	8,23	10,21	0
13	10,89	4,96	8,77	13,03	0
14	5,42	1,87	3,27	13,11	0
15	5,55	1,58	2,64	10,40	0
16	5,19	1,21	1,87	10,85	0
17	4,87	0,92	1,26	7,39	0
18	3,89	0,62	0,67	5,65	0
19	3,43	0,48	0,35	3,91	0
20	3,18	0,42	0,17	0	0,34
21	2,55	0,36	0,10	0	3,75
22	1,70	0,27	0,07	0	4,00
23	1,00	0,18	0,05	0	4,75
24	0,45	0,13	0,04	0	22,05
25	0,08	0,08	0,05	0	22,65
26	0,01	0,07	0,06	0	28,83
27	0	0,04	0,05	0	13,64

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Matriz C

	1	2	3	4	5	
1	1	0	0	0	0	
2	0	1	0	0	0	
3	0	0	1	0	0	
4	0	0	0	1	0	
5	0	0	0	0	1	
6	1	1	1	1	1	

O vector b assumiu os valores correspondentes a $Y_{\text{ópt}}(0,33)$ até $Y_{\text{ópt}}(0,5)$, para $d_{\text{máx}}=125 \text{ mm}$ e $d_{\text{máx}}=500 \text{ mm}$.

Simularam-se ainda “misturas óptimas”, impondo a presença de alguns dos componentes, nos seguintes moldes:

Caso de $d_{\text{máx}}=125 \text{ mm}$

cimento = 5%

cimento = 5% e areia = 10%

cimento = 5% e areia = 20%

Caso de $d_{\text{máx}}=500 \text{ mm}$

Considerando-se os casos de $d_{\text{máx}}=125 \text{ mm}$ e de $d_{\text{máx}}=500 \text{ mm}$, verifica-se que a cimento = 5% minimiza o valor da função objetivo aumenta, ou seja, o desvio cimento = 5% e cinzas de carvão = 10% é relativamente à mistura cimento = 5% e cinzas de carvão = 20% apenas as misturas obtidas para $d_{\text{máx}}=125 \text{ mm}$ acham-se às misturas óptimas.

A composição das misturas obtidas encontram-se nos Quadros 2.38 e 2.39.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Quadro 2.38 - Composição das "misturas óptimas" encontradas,
para $d_{\max} = 125$

COMPONENTES	$q = 0,5$			$q = 0,443$			$q = 0,387$			$q = 0,33$		
	Mópt1 (%)	Mópt2 (%)	Mópt3 (%)									
EIRSU	58,8	52,1	44,6	56,8	50,2	43,4	55,9	49,	42,9	56,0	50,3	43,5
Argila	3,9	1,7	~ 0	10,5	8,4	6,3	16,7	14,1	12,6	23,2	21,4	19,2
Cimento	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
C. carvão	32,3	31,2	30,4	27,5	26,4	25,3	21,7	20,6	19,5	14,3	13,4	12,2
Areia	~ 0	10	20	0,11	10	20	0,7	10	20	1,5	10	20
Função												
Objectivo	398825	510657	832742	476898	579820	892972	695496	757891	1085971	1194848	1270529	1557039

Quadro 2.39 - Composição das "misturas óptimas" encontradas,
para $d_{\max} = 500$

COMPONENTES	$q = 0,5$			$q = 0,443$			$q = 0,387$			$q = 0,33$		
	Mópt1 (%)	Mópt2 (%)	Mópt3 (%)									
EIRSU	55,1	45,1	35,0	59,1	49,1	38,9	61,8	50,7	36,3	59,4	44,9	30,6
Argila	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	1,1	5,5	7,8	12,3	16,7
Cimento	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
C. carvão	~ 0	10	20	~ 0	10	20	~ 0	10	20	~ 0	10	20
Areia	39,9	39,9	39,9	35,9	35,9	36,0	33,2	33,2	33,2	27,8	27,8	27,7
Função												
Objectivo	380873	398151	429693	419837	438815	471993	413152	443209	483022	835122	866814	906493

Considerando ambos os casos de $d_{\max} = 125$ mm e de $d_{\max} = 500$ mm, verifica-se que à medida que q diminui o valor da função objectivo aumenta, ou seja, o desvio da distribuição granulométrica da mistura obtida relativamente à mistura óptima é cada vez maior. Por isso, ensaiaram-se apenas as misturas obtidas para $q=0,5$. Destas excluíram-se as misturas Mópt3, cujos afastamentos da distribuição óptima são exagerados.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

As distribuições granulométricas das misturas ensaiadas encontram-se no Quadro 2.40 e as curvas granulométricas correspondentes nas Figuras 2.20 e 2.21.

**Quadro 2.40 - Distribuição granulométrica das misturas
Mópt1 e Mópt2, para dmáx=125 e dmáx=500, q=0,5**

CALIBRE (mm)	dmáx=125		dmáx=500	
	Mópt1(q=0,5) (%)	Mópt2(q=0,5) (%)	Mópt1(q=0,5) (%)	Mópt2(q=0,5) (%)
0,5	1,89	1,66	1,49	1,32
1	3,62	3,14	2,77	2,45
1,5	4,99	4,29	3,78	3,32
2	6,46	5,54	4,70	4,18
3	8,93	7,62	6,52	5,76
4	12,56	10,70	9,30	8,17
6	15,64	13,37	11,47	10,15
8	19,42	16,66	14,15	12,60
12	25,80	22,30	18,61	16,76
16	31,26	27,18	22,16	20,20
24	40,77	35,80	27,78	25,92
32	49,37	43,63	32,58	30,94
45	60,62	53,89	39,03	37,59
53	68,28	61,00	42,18	41,51
63	75,10	67,29	45,37	45,18
75	81,80	73,49	48,33	48,70
90	87,15	78,41	51,08	51,70
106	91,32	82,24	53,25	54,05
125	94,64	85,27	55,16	56,00
150	96,53	86,98	57,06	57,58
180	98,05	88,70	59,97	60,23
212	99,07	89,99	62,51	62,60
250	99,66	90,99	64,95	64,95
300	99,93	93,43	73,99	73,96
355	99,99	95,74	83,06	83,04
425	100	98,63	94,56	94,55
500	100	100	100	100
600	100	100	100	100
850	100	100	100	100

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Figura 2.20 - Curvas granulométricas das misturas

Mópt1 e Mópt2, $d_{máx}=125$

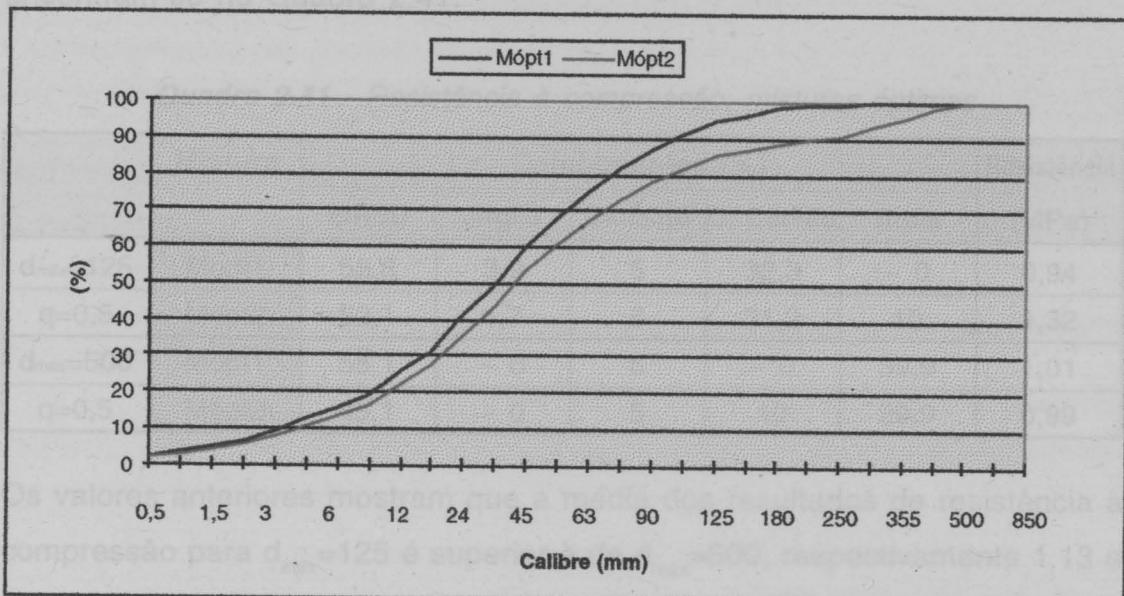
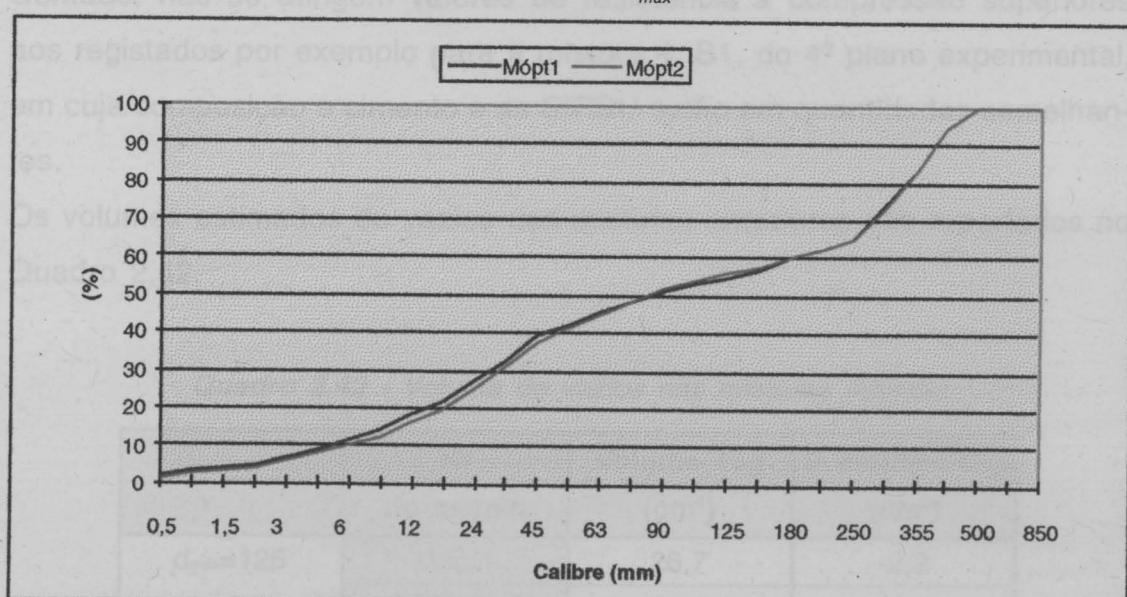


Figura 2.21 - Curvas granulométricas das misturas

Mópt1 e Mópt2, $d_{máx}= 500$



ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão com estas misturas, encontram-se no Quadro 2.41.

Quadro 2.41 - Resistência à compressão: misturas óptimas

	Mistura	Componentes (%)					Resistência (MPa)
		EIRSU	Argila	Cimento	C. Carvão	Areia	
$d_{\max}=125$	Mópt1	58,8	3,9	5	32,3	~ 0	0,94
$q=0,5$	Mópt2	52,1	1,7	5	31,2	10	1,32
$d_{\max}=500$	Mópt1	55,1	~ 0	5	~ 0	39,9	1,01
$q=0,5$	Mópt2	45,1	~ 0	5	10	39,9	0,99

Os valores anteriores mostram que a média dos resultados de resistência à compressão para $d_{\max}=125$ é superior à de $d_{\max}=500$, respectivamente 1,13 e 1, e que o valor mais elevado ocorre para $d_{\max}=125$, quando a areia atinge os 10% do peso da mistura.

Contudo, não se atingem valores de resistência à compressão superiores aos registados por exemplo para a mistura 4. B1, do 4º plano experimental, em cuja composição o cimento e as EIRSU estão em quantidades semelhantes.

Os volumes estimados de vazios das misturas anteriores são reportados no Quadro 2.42.

Quadro 2.42 - Volume de vazios nas misturas óptimas

	Nº do ensaio	Volume 45g (cm³)	V molde-V45g (cm³)
$d_{\max}=125$	Mópt1	26,7	-2,2
	Mópt2	26,0	-1,5
$d_{\max}=500$	Mópt1	24,5	0,0
	Mópt2	23,8	0,8

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

2 - Abordagem experimental

Destes resultados pode inferir-se o seguinte:

- As misturas com componentes de granulometria superior ($d_{\text{máx}}=500$) têm maior índice de vazios;
- Apesar destas misturas óptimas originarem menor volume de vazios, isso não se reflecte no aumento esperado de resistência à compressão uniaxial não-confinada.

Assim, o modelo de Andreasen parece não se adequar muito bem aos objectivos pretendidos. Na verdade, alguns dos seus pressupostos são difíceis de satisfazer, nomeadamente a regularidade das partículas. Por outro lado, o efeito da adição de água que actua como lubrificante, impede a segregação das partículas, mas ocupa volume, também não é tido em consideração pelo modelo.

Além disso, a variabilidade da distribuição granulométrica dos componentes é concerteza um aspecto a não negligenciar nesta interpretação.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

A gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos passa pela implementação de sistemas integrados que permitem uma articulação eficaz entre as várias alternativas de tratamento dos resíduos, salvaguardando os aspectos ambientais e da saúde pública e viabilizando a reciclagem de alguns materiais.

Da experiência conhecida em países de todos os continentes, resultam opções de tratamento do RSU mais utilizados são essencialmente deposição controlada em aterros e a incineração.

Esta última tem vindo a ganhar expressão no mundo todo. No clima de discussão das RSU, escórias e cinzas volantes como resíduos perigosos ou não, tem surgido alguma controvérsia.

Uma vez que estes resíduos são produzidos em quantidades significativas, têm sido realizados numerosos trabalhos no sentido de melhor os caracterizar e viabilizar a sua valorização à escala industrial, em alternativa à sua deposição em aterro. Alternativas como a utilização das escórias em construção rodoviária e no fabrico de betão estão já bem implementadas, havendo exemplos, por exemplo, em França, de aplicação em aterros e sub-camadas de estradas de tráfego pesado intenso.

A separação e gestão da fração fina das escórias, que contém a maior parte dos elementos com potencial de mobilização, permite porém haver uma fração grossa e livre de toxinas, que pela sua maior superfície específica é à partida mais reactiva, e por outro, caso deixa não satisfez os critérios da lixiviação, limita o tratamento à uma parcela de escória mais reduzida.

Quando os critérios de lixiviação não são cumpridos, alternativas de valorização da fração fina das escórias, nomeadamente a incorporação em matrizes

3. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

83

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

3 - Conclusões e sugestões

A gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos passa pela implementação de sistemas integrados que permitam uma articulação eficaz entre as várias alternativas de tratamento dos resíduos, salvaguardando os aspectos ambientais e da saúde pública e viabilizando a reciclagem de alguns materiais.

Da experiência conhecida em países de todos os continentes, resulta que as opções de tratamento de RSU mais utilizadas são essencialmente duas: a deposição controlada em aterros e a incineração com produção de energia. Esta última tem vindo a ganhar expressão ao longo das últimas décadas, e a preocupação sobre a gestão adequada dos resíduos produzidos pela combustão dos RSU, escórias e cinzas volantes, e desde logo a sua classificação como resíduos perigosos ou não, tem gerado alguma controvérsia. Uma vez que estes resíduos são produzidos em quantidades significativas, têm sido realizados numerosos trabalhos no sentido de melhor os caracterizar e viabilizar a sua valorização à escala industrial, em alternativa à sua deposição em aterro. Alternativas como a utilização das escórias em construção rodoviária e no fabrico de betão estão já bem implementadas, havendo exemplos, nomeadamente em França, de aplicações em aterros e sub-camadas de estradas de tráfego pouco intenso.

A separação e gestão da fracção fina das escórias, que contém a maior parte dos elementos com potencial de mobilização, permite por um lado obter uma fracção grosseira livre de uma parcela que pela sua maior superfície específica é à partida mais reactiva, e por outro, caso esta não satisfaça os critérios de lixiviação, limita o tratamento a uma parcela de resíduo mais reduzida.

Quando os critérios de lixiviação são cumpridos, alternativas de valorização da fracção fina das escórias, nomeadamente a incorporação em matrizes

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

3 - Conclusões e sugestões

cimentícias e betuminosas têm sido investigadas, produzindo-se betões pré-fabricados utilizados em blocos para construção civil e agregados leves utilizados essencialmente em diques e recifes artificiais.

Em Portugal, a tendência manifestada é de acompanhar as experiências de outros países, já com resultados positivos, e as orientações nesta área definidas no Plano Estratégico de Resíduos Sólidos (PERSU) consagra, entre outras, a valorização energética como uma via do tratamento dos RSU. Como consequência, as escórias e cinzas produzidas nas Centrais de Incineração em construção terão que ser devidamente geridas.

A abordagem experimental levada a cabo no presente trabalho, limitada por uma reduzida quantidade de amostra, orientou-se no sentido de aflorar várias alternativas para a gestão das EIRSU e não de tratar exaustivamente qualquer uma delas. Mesmo assim permitiu estabelecer as seguintes ilações:

- A amostra de EIRSU obtida, evidenciou uma quantidade anormal de vidro na sua composição, o que denota que as medidas para a sua redução, essencialmente a implementação de sistemas de recolha selectiva a montante, que melhoram a qualidade das escórias produzidas, e permitem melhorar a combustão nas centrais de incineração de RSU, não terão sido suficientemente adoptadas;
- Dos materiais presentes nas EIRSU em quantidade significativa e com potencial para serem reciclados, apenas os metais ferrosos reagiram de modo positivo às técnicas de separação aplicadas. A separação magnética mostrou-se a metodologia mais efectiva na obtenção de um concentrado de metais ferrosos;

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

3 - Conclusões e sugestões

- Os testes de lixiviação das fracções fina e grosseira das EIRSU, evidenciam concentrações elevadas de chumbo, mas que se encontram abaixo do limite superior estabelecido na norma NFX 31 - 210;
- À luz da classificação estabelecida na legislação francesa, e no que diz respeito à mobilização de poluentes, a fracção grosseira das EIRSU pode ser classificada como uma escória do tipo "M", carecendo de uma maturação prévia à sua utilização em construção rodoviária;
- A fracção grosseira das EIRSU tem uma resistência ao esmagamento que permite a sua utilização como inerte em betão não estrutural, segundo a normalização italiana UNI. Porém, utilizada como inerte graúdo na confecção de betão, originou resistência à compressão equivalente a um betão de classe C16/20, pelo que esse uso não deve ser posto fora de causa;
- A metodologia utilizada na investigação de alternativas de aplicação para a fracção fina das EIRSU permitiu aferir a composição de algumas misturas com outros componentes, nomeadamente cinzas de carvão, areia, cimento e argila. Estas podem vir a ser empregues em processos de E/S, e com o objectivo de posterior utilização no fabrico de cimento ou na produção de agregados leves, caso sejam cumpridos outros dos critérios exigidos, nomeadamente os de inocuidade;
- Todas as misturas realizadas e ensaiadas apresentam os requisitos mínimos de resistência à compressão uniaxial não-confinada para deposição controlada;
- Na região experimental em que se trabalhou, o cimento tem influência decisiva na resistência à compressão das misturas ensaiadas. Na sua

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

3 - Conclusões e sugestões

ausência as cinzas de carvão assumem este efeito, mas a sua substituição por CIRSU altera significativamente os valores de resistência à compressão;

- A resistência à compressão das misturas aumenta significativamente com a utilização da fracção granulométrica < 0,5 mm das EIRSU em substituição de outra de maior calibre;
- O granulado produzido com os finos < 0,5 mm das EIRSU apresenta resistência ao esmagamento inferior à exigida para agregados estruturais, podendo, no entanto, ser utilizado em aplicações menos nobres, pois não revela potencial poluidor apreciável;
- Algumas das misturas ensaiadas podem constituir-se como soluções do ponto de vista de deposição controlada e a economia de espaço relativamente ao volume ocupado pelos diferentes componentes a granel é geralmente elevada. Contudo, pode obter-se ainda maior redução de volume ocupado através da aplicação de pressão de compactação ao material;
- A utilização da fracção fina das EIRSU no fabrico de argamassas, parece ser viável, embora só com substituição parcial da areia fina. No entanto, há ainda outros efeitos que precisam de ser indagados, nomeadamente os relativos aos teores de sulfatos, cloretos, cal livre e a mobilização de metais pesados;
- A tentativa de optimização do empilhamento das partículas não produziu o aumento esperado da resistência à compressão das amostras, pelo que o modelo de Andreasen, nas condições em que foi aplicado, não parece adequado à resolução do problema.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

3 - Conclusões e sugestões

A abordagem experimental realizada demonstra que os sistemas tradicionais de separação magnética são efectivos na recuperação dos metais ferrosos existentes nas escórias, pelo que parece ser aconselhável implementar um sistema de triagem deste tipo à saída do tanque de arrefecimento das unidades de incineração.

A utilização da fracção grosseira das EIRSU como substituto de um inerte natural na produção de betão parece possível do ponto de vista da resistência à compressão. Esta possibilidade carece, no entanto, de verificação através da realização de todos os ensaios requeridos por este tipo de aplicação:

- por exemplo, ensaiando as EIRSU segundo todos os protocolos indicados pela normalização UNI, para verificação da conformidade com as características que se exigem a um inerte para aplicação em betão;
- produzindo várias amostras de betão com diversos graus de substituição de inerte natural por EIRSU, seguidos dos testes adequados a esta aplicação;
- realizando os testes de lixiviação que são necessários para verificar a inocuidade das misturas a utilizar.

A gestão da fracção fina tem algumas alternativas de entre as analisadas:

- a substituição de parte da areia fina nas argamassas, embora haja ainda que verificar os seus reflexos, isto é, a mobilização de metais pesados, os teores de sulfatos e cloretos, a cal livre;
- A produção de um agregado que, evitando a deposição da fracção fina pode servir a aplicações de enchimento cumprindo funções onde não se exige grande resistência. A obtenção de agregados leves mediante cozedura é ainda uma perspectiva em aberto na gestão dos finos das EIRSU, porém carecendo de investigação;

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

3 - Conclusões e sugestões

- a deposição controlada, se se tiver de realizar, pode ser concertada com a de outros resíduos que também careçam de ser depositados, numa perspectiva da minimização de volume e custo da deposição. Em particular, merece ser melhor analisada a deposição conjunta de finos de EIRSU e cinzas de incineração previamente lavadas.

O desenvolvimento de um algoritmo que permita estabelecer as proporções a usar na mistura, de modo a melhorar o empacotamento, reduzir o volume e obter melhor resistência à compressão é uma tarefa de grande utilidade na gestão deste e de outros resíduos.

Tudo isto, porém, exige muito maior volume de ensaios do que os realizados: o alargamento do universo experimental permitirá maior confiança nos resultados, bem como a possibilidade de abranger outros aspectos agora não abordados.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

[1] - Ministério do Ambiente — Grupo de Tarefa para Coordenação do Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos; "Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos", Lisboa, Julho de 1997.

[2] - Direcção Geral do Ambiente — Síntese de Indicadores disponíveis nos Resíduos Sólidos Urbanos; "Memorando", Lisboa, 1996.

REFERÊNCIAS

- [3] - Plano Nacional da Política de Ambiente (PNPA), Lisboa 1994
- [4] - HIDROPROJECTO; "Caracterização dos resíduos sólidos urbanos produzidos pelos municípios da LIPOR - Relatório final", Lisboa, Dezembro de 1996.
- [5] - IDAD; PROTERMIA; "Estudo de Impacto Ambiental da Central de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos LIPOR IF", Dezembro de 1995.
- [6] - "Solução Global Integrada para disposição final dos resíduos sólidos dos municípios de Amadora, Lisboa, Loures e Vila Franca de Xira" Relatório elaborado na sequência do Decreto do Ministro do Ambiente e Recursos Naturais de 17 de Novembro de 1996.
- [7] - G. TCHOBANOGLOSS, M. TRESEV & A. VIGE; "Integrated Solid Waste Management", 1993.
- [8] - M. PINHEIRO, R. OLIVEIRA; "Tratamento de resíduos sólidos", Universidade do Minho, 1996.
- [9] - S. CORTEZ; "Avaliação da Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente - Depósito de Resíduos Sólidos e Recuperação Paisagística", Porto 1994/95.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Referências

- [1] - Ministério do Ambiente — Grupo de Tarefa para Coordenação do Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos; “Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos”, Lisboa, Julho de 1997
- [2] - Direcção Geral do Ambiente — Síntese de Indicadores disponíveis nos Resíduos Sólidos Urbanos; “Memorando nº 41, SRR. 106 95.06.06”, Lisboa, 1996
- [3] - Plano Nacional da Política de Ambiente (PNPA), Lisboa 1994
- [4] - HIDROPROJECTO; “Caracterização dos resíduos sólidos urbanos produzidos pelos municípios da LIPOR - Relatório Final”, Lisboa, Dezembro de 1996
- [5] - IDAD; PROTERMIA; “Estudo de Impacte Ambiental da Central de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos LIPOR II”, Dezembro de 1995
- [6] - “Solução Global Integrada para disposição final dos resíduos sólidos dos municípios de Amadora, Lisboa, Loures e Vila Franca de Xira”; Relatório elaborado na sequência do Despacho da Ministra do Ambiente e Recursos Naturais de 17 de Novembro de 1993
- [7] - G. TCHOBANOGLOUS; H. THEISEN; S. A. VIGIL; “Integrated Solid Waste Management”, 1993
- [8] - M. PINHEIRO; R. OLIVEIRA; “Tratamento de resíduos sólidos”, Universidade do Minho, 1993/94
- [9] - S. CORTÊZ; “Apontamentos da cadeira de Mestrado em Engenharia do Ambiente - Deposição de Resíduos e Recuperação Paisagística”, Porto 1994/95

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Referências

- [10] - P. PINHO; Estudo elaborado para o consórcio Relitrate/Rolls Royce Power Systems/Kvarner Ventures — “Estudo Preliminar de Impacte Ambiental da Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos (LIPOR II)”, Fevereiro de 1993
- [11] - JUNIPER; “The Market for Pyrolysis & Gaseification of Waste in Europe — a Technology & Business Review”, Agosto de 1997
- [12] - C. C. WILES; “Municipal solid waste combustion ash: State-of-the-knowledge” Journal of Hazardous Materials nº 47 p 325 - 344, 1996
- [13] - C. MOALIGOU; “Les Mâchefers d’Incineration”; Espaces pour demain — Groupe de Travail Déchets, Fevereiro de 1993
- [14] - L. COUTAZ; “Valorisation des Mâchefers d’Usines d’Incinération d’Ordues Ménagères”; These présentée devant l’institut national des sciences appliquées de Lyon pour obtenir le grade de docteur specialité: conception en bâtiment et techniques urbaines, Janeiro de 1996
- [15] - B. JOHNKE; “Waste Incineration — an important element of the integrated waste management system in germany”; Waste Management & Research nº 10 p 303 - 315, Outubro de 1991
- [16] - N. E. KINNER; W. B. LYONS; P. H. RICE; D. B. DURLING; D. L. GRESS; “Geochemistry and Metals Concentrations in Marine Sediments Exposed to Solidified/Stabilized Municipal Solid Waste Incinerator Ash”; Waste Management nº 5 p 221 - 232, 1995
- [17] - M. T. ALI; W. F. CHANG; “Strength Properties of Cement-Stabilized Municipal Solid Waste Incinerator Ash Masonry Bricks”; ACI Materials Journal V. 91 nº 3 Maio/Junho de 1993

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Referências

- [18] - H. BELEVI; D. M. STAMPFLI; P. BACCINI; "Chemical Behaviour of Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash in Monofills; Waste Management & Reserch nº 10 p 153 - 167, Agosto de 1991
- [27] - NORMAIS DA INDUSTRIA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - Junho de 1992
- [19] - A.N.R.E.D.; Mâchefers, des Usines d'Incineration d'Ordures Ménagères: Caracteristiques et Utilizations.- Outubro de 1986
- [28] - NORMAIS DA INDUSTRIA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - Junho de 1976
- [20] - J. HADJINICOLAU; R. N. YONG; "Characterization and Management of Municipal Incinerato's Bottom Ash"; 1991
- [21] - CREED; "Les mâchefers des UIOM: prodution et valorisation"; Junho de 1995
- [31] - NORMAIS DA INDUSTRIA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - Junho de 1991
- [22] - C. COUDRAY; I. PARIS; F. WISSOCQ; "Étude sur la composition des Mâchefers d'Incineration d'Ordures Ménagères et l'origine des polluants qu'ils contiennent"; Polutec 94 — Symposium International sur les Traitements des Déchets, Lyon, 1994
- [34] - NORMAIS DA INDUSTRIA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - Junho de 1992
- [23] - M. THIJS; "Alternative Materials in Road Construction - Synthesesis of the State of Art Reviews by Member Countries on Fly Ash and Municipal Incinerator Residues"; Second Sprint Workshop, Exhibition and Demonstrations Technology and Innovation in Road Construction, Junho de 1992
- [35] - NORMAIS DA INDUSTRIA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - Junho de 1990
- [24] - V. T. BRESLING; F.J. ROETHEL; V.P. SCHAEPERKOEITEL; "Phisical and Chemical Interactions of Stabilized Inceneration Residue with the Marine Environment; Marin Polution Bulletin, V 19 nº 11B p 628-632, 1988
- [25] - F. J. ROETHEL; V. T. BRESLIN; "Unique Method of Ash Disposal can benefit Marine Life"; Solid Waste & Power, Outubro de 1988

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Referências

- [26] - L. FERRANDI; Le Revalorization des Mâchefers en Travaux Publiques — Etude Bibliographique”; Fevereiro de 1993
- [27] - NORMALIZAÇÃO FRANCESA; “X 31 - 210”, Dezembro de 1992
- [28] - NORMALIZAÇÃO ITALIANA; “UNI 7 549 Parte 12^a”, Junho de 1976
- [29] - NORMALIZAÇÃO PORTUGUESA; “ENV 206”, Outubro de 1993
- [30] - ASTM 2166 - 85; Executado conforme recomendação da USEPA
- [31] - NORMALIZAÇÃO ITALIANA; “UNI 7548 Parte 3^a”, 1991
- [32] - M. A. FIGUEIREDO; M. A. FERNANDES; “O Método de Taguchi no planeamento e análise de operações de soldadura”; Engenium pg 97 — 85, Agosto/Setembro de 1996
- [33] - STATISTICA; “Statistic Graphic System”; Statistic Corporation, 1994
- [34] - C. C. STEPHEN; L. B. GORDON; “Handbook of Industrial Refractories Technology – Principles, Types, Properties and Applications”, 1992
- [35] - NAG Fortran Library Concise Reference, 1990

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

- AGHTM, "Les Résidus Urbains. 2ème édition - Technique et Documentation", Lavoisier, 1985.

- A. PERRIER-ROSSET, "Les résidus de l'incinération des ordures ménagères", T.S.M. l'eau, Mars 1990.

BIBLIOGRAFIA

- BRGM, "Etude des caractéristiques des matériaux en cours de valorisation en technique routière - sites de Wasquehal, Halluin, Sezquedin", Janvier, 1994.
- C. C. WILES, "Utilization of municipal waste combustion residues in other countries", Proceedings of the 7th International conference on municipal solid waste combustor ash utilization, Arlington, Virginia, Novembre 1994.
- C. C. WILES, "U. S. EPA on the benefits and issues of utilization", Proceedings of the 5th International conference on municipal solid waste combustor ash utilization, Arlington, Virginia, Novembre 1992.
- C. PREVOST, R. SINQUIN, J. PARIS, "Plan de assurance qualité pour la production de mécheterre valorisables", TSM n° 2, Février 1995.
- CREED, "Caractérisation des mécheterre stockés sur le site de Montchau", Limay, 1993.
- CREED, "Problème de redécharge mécheterre: les principaux résultats", Juillet 1993.
- CYLERGIE, "Etude de l'évolution des propriétés physico-chimiques et mécaniques d'un stock de mécheterre", Mai, 1994.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Bibliografia

- AGHTM; "Les Residus Urbains. 2éme edition - Technique et Documentation Lavoisier", 1985
- A. PERIER-ROSSET; "Les résidus de l'incinération des ordures ménagères", T.S.M.-l'eau, Mars 1989
- BRGM; "Étude des caractéristiques des mâchefers en vue de leur valorisation en technique routière - sites de Wasquehal, Halluin, Sequedin", Janvier, 1994
- C. C. WILES; "Utilization of municipal waste combustion residues in other countries"; Proceedings of the 7th international conference on municipal solid waste combustor ash utilization, Arlington, Virginia, Novembro 1994
- C. C. WILES; "U. S. EPA on mwc residues and issues of utilization"; Proceedings of the 5th international conference on municipal solid waste combustor ash utilization, Arlington, Virginia, Novembro 1992
- C. PREVOST; R. SINQUIN; I. PARIS; "Plan de assurance qualité pour la production de mâchefers valorisables", TSM n° 2, Fevereiro 1995
- CREED; "Caractérisation des mâchefers stockés sur le site de Montchain", Limay, 1993
- CREED; "Programme de recherche mâchefers: les principaux résultats", Avril 1996
- CYLERGIE; "Étude de l'évolution des propriétés physico - chimiques et mécaniques d'un stock de mâchefer", Maio, 1994

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Bibliografia

- C. ZEVENBERGEN; R. N. J. COMANS; "Geochemical factores controlling the mobilization of major elements during weathering of MSW bottom ash"; Environmental Aspects of Construction with Waste Materials, 1994
- ENVIRONMENTAL PROTECTION SERIES; "The national incinerator testing and evaluation program (NITEP): summary of the characterization and treatment studies on residues from municipal solid waste incineration"; REPORT EPS 3/UP/8, Canada, Outubro 1993
- F. J. ROETHEL; "Analytical concerns associated with the toxicity characteristics leaching procedure"; Proceedings of the 7th international conference on municipal solid waste combustor ash utilization, Arlington, Virginia, Novembro 1994
- G. BERTOLINI; "Alternative Material in Road Construction: Social, economical and environmental aspects of the use of domestic waste and by-products"; Second Sprint Workshop, exhibition and demonstration on technology transfer and innovation in road construction, Rotterdam, Junho 1992
- G. BERTOLINI; "Alternative Material in Road Construction: Fly Ash and Municipal Incinerator Residues"; Second Sprint Workshop, exhibition and demonstration on technology transfer and innovation in road construction; Rotterdam, Junho 2-4 1992.
- H. A. VAN DER SLOOT et al; "Leaching characteristics of incinerator residues and potencial for modification of leaching" Netherlands 1989
- H. K. ROFFMAN; "Chemical Characteristics of municipal wasre combustion (MWC) ash laboratory extracts compared to field monofill leachtes";

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Bibliografia

Proceedings of the 7th international conference on municipal solid waste combustor ash utilization, Arlington, Virginia, Novembro 1994

- I. PARIS; G. VALENTIS; K. WICKER; "Valorization des mâchefers d'UIOM"; 11éme Congrès JIE, Setembro, 1994
- I. PARIS; G. VALENTIS; L. FERRANDI; K. WICKER; "Protocole d'enchantillonage sur flux de mâchefers d'incenaration d'ordures ménagères", CREED
- I. A. PARIS; CREED - "Programe de recherche mâchefers: compte rendu d'avancement n° 3", Fevereiro 1993
- I. A. PARIS; CREED - "Catacterisation des mâchefers d'UIOM: Compte rendu d'avancement n°2", Novembro 1992
- J. C. SCHMITT; "Incinerator ash: New York's perspective"; Proceedings of the 7th international conference on municipal solid waste combustor ash utilization, Arlington, Virginia, Novembro 1994
- J. G. P. BORN; "Useful aplications of bottom ashes"; Text oral presentation Spint-Workshop, Waste Processing Assotiation, Junno, 2-4 1992.
- J. HADJINICOLAU; R. N. YONG; "Characterization and management of municipal incinerato's bottom ash", Canadá 1989
- J. HARTLEN; "Incenerator ash utilization in some countries in Europe" Sweden 1990
- J. VERON; "Les Machefers - Exposé d'ensemble: origine - composition

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Bibliografia

des mâchefers"; Coloque « Les déchets de la dépollution - vers une stratégie de traitement global », INSA Maio 1987

- J. VERON et al; "Les mâchefers d'incéneration d'ordures ménagères. I. Principales propriétés", Março 1989
- LE CONSEIL FÉDÉRAL SUISSE; "Ordonnance sur le Traitement des Déchets (OTD)", Dezembro 1990
- L. Y. MAYSTRE; F. VIRET; "A goal oriented characterization of urban waste", 1990
- POLDEN; "Étude du comportement à la lixiviation de cinq mâchefers d'incéneration d'ordures ménagères"; Étude effectuée à la demande du Ministère de l'Environnement - Raport final, Novembro 1992
- POLDEN; "Étude de deux échantillons de mâchefers de l'usine d'incéneration de Thonon-Les-Bains"; Étude effectuée à la demande du Ministère de l'Environnement. Analyses sur brut, tests de lixiviation X31-210, analyse de lixiviats, Dezembro 1992
- R. HIRT; "Mâchefers - incineration refuse. Raport Genegeral", Suisse, 1989
- R. SINQUIN; G. VALENTIS; I. PARIS; "Testing and use of bottom ash in France"; Conférence ASH7, Washington USA, Novembro 1994
- S. J. NAGOURNEY; "The TCLP Test - Methods and limitations"; Proceedings of the 7th international conference on municipal solid waste combustor ash utilization, Arlington, Virginia, Novembro 1994

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Bibliografia

- TIRU; "Étude de la lixiviation du mâchefers d'incéneration par l'eau de pluie", Abril 1987
- V. HUSCHER; "Valorisation des mâchefers - Journee ALORCE"; Lyon, 11 Janeiro 1995

ANEXO A

LEMC-LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Rua dos Bragas, Faculdade de Engenharia - 4099 Porto Codex

A preencher pela Entidade Requerente (letras maiúsculas):

REQUERENTE: S.A. Eng. Itália Lopes OBRA:

MORADA:

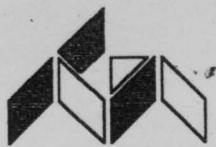
TELEFONE: FAX: N° CONTRIBUINTE:

QUANTIDADE DE PROVETES: ENSAIO: Compressão simples

Nº Boletim	Referências dos cubos	Nº do cubo	Data de fabrico	Peso do cubo (kg)	Carga de rotura (ton)	Tensão de rotura (MPa)
	30-7-97	-	30-7-97	7.360	43	18.7
		-		7.440	43	18.7
	30-7-97	-	30-7-97	7.400	48	20.9
		-		7.660	51	22.2
	30-7-97	-		7.420	58	25.3
		-		7.400	54	23.5
			11			
	<i>Por meio da filial de</i>					
	<i>Peso seco → 6,796 Kg</i>					
	<i>Peso Humido → 7.135 Kg</i>					
	<i>Subida de água → máxima → 17.5 cm</i>					
	<i>mínima → 10.5 cm</i>					
	<i>Média → 14.0 cm</i>					

Data de Ensaio: 6-8-97

Recebido em
Por



RELATÓRIO DE ANÁLISE

Relatório nº 12 / FRX / 96
Página nº 1 de 6
Nº Ordem Lab 552 / 96

Amostras

1 amostra de Escórias de Incineração de Resíduos Urbanos, para Mestrado em Engenharia do Ambiente, sob orientação dos Prof. Manuel Fonseca Almeida e Prof António Fiúza (FEUP) - Projecto 0.2.0

Requerente

Engª D. Helena Maria Pimentel de Figueiredo Fonseca Lopes Dias

Carta Req. de
16.10.96

Estudo Solicitado

Método Instrumental

Fluorescência de Raios-X

Metodologia

Método Interno - PA 001/FRX Qualitativa e PA 004/FRX Semi Quantitativa

Secção: Fluorescência de Raios X

Registo: 705 FRX

Am. chegadas à Secção em 15.11.96

Data de Início da Análise: 21.11.96

Data de Conclusão da Análise: 02.12.96

- Análise Qualitativa e Quantitativa, por Fluorescência de Raios-X, das Escórias de Incineração de Resíduos Urbanos (Fracção Fina, Resultante de uma Crivagem Via Húmida)

Sobre a amostra prensada foi efectuada uma análise qualitativa, que permitiu identificar os seguintes elementos:

Si	P	Ba
Ca	K	Sr
Al	Ti	Sn
Fe	Mn	Cr
Mg	Pb	Ni
S	As	Cd
Cl	Zn	Rb
Na	Cu	

Sobre a amostra pastilhada, efectuou-se a dosagem dos Elementos Traço, possíveis de quantificar:

(Resultados dados em ppm)

Rb	Sr	Zr	Ba
33	326	91	1198

Este Boletim não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção do Laboratório. Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e ensaiadas. Qualquer extrapolação é da exclusiva responsabilidade do requerente.



Relatório nº
Página nº
Nº Ordem Lab

12 / FRX / 96
2 de 6
552 / 96

A dosagem dos Elementos Leves, efectuada sobre amostra fundida, mostra-nos os seguintes resultados:

(Resultados dados em %)

Elementos	Escórias
SiO_2	33.80
Al_2O_3	10.10
Fe Total (Fe_2O_3)	7.42
MnO	0.09
MgO	2.92
CaO	22.15
Na_2O	1.93
K_2O	0.80
Ti_2O	0.90
P_2O_5	1.36
Perda Rubro (960°C)	16.36

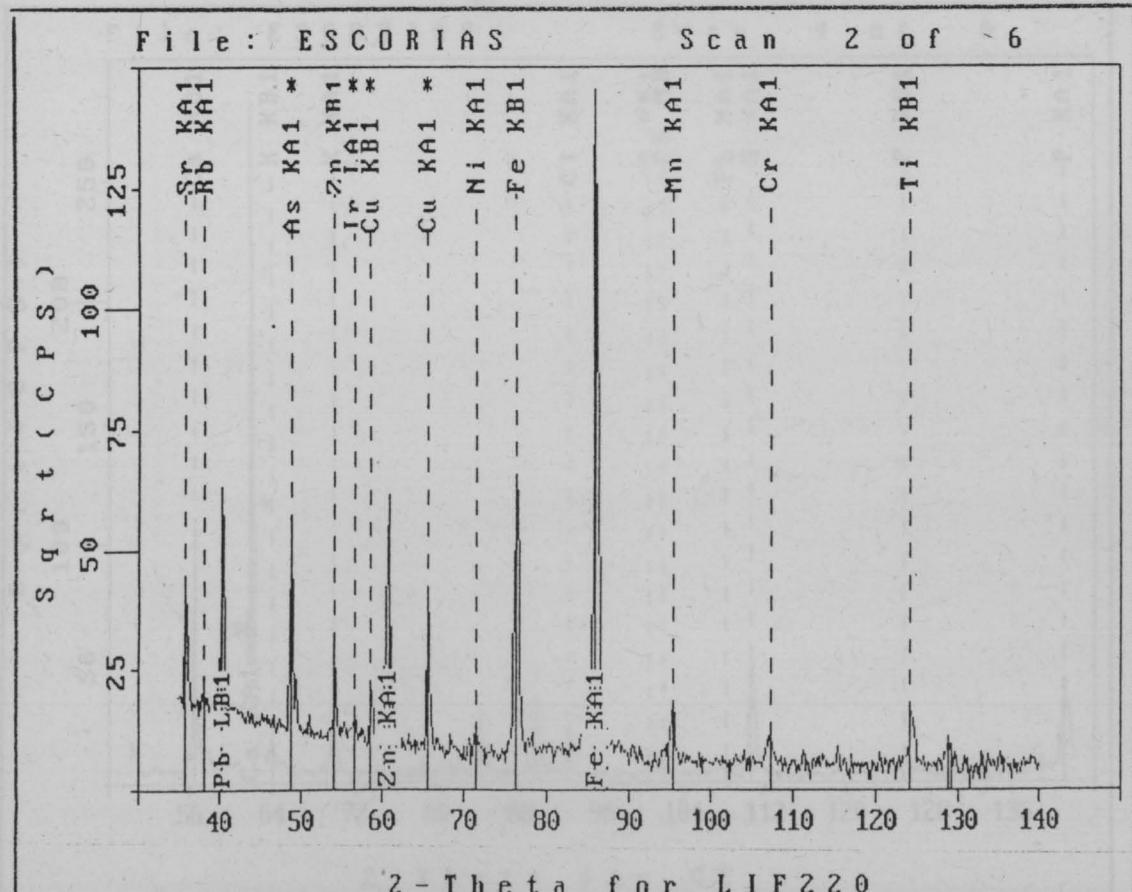
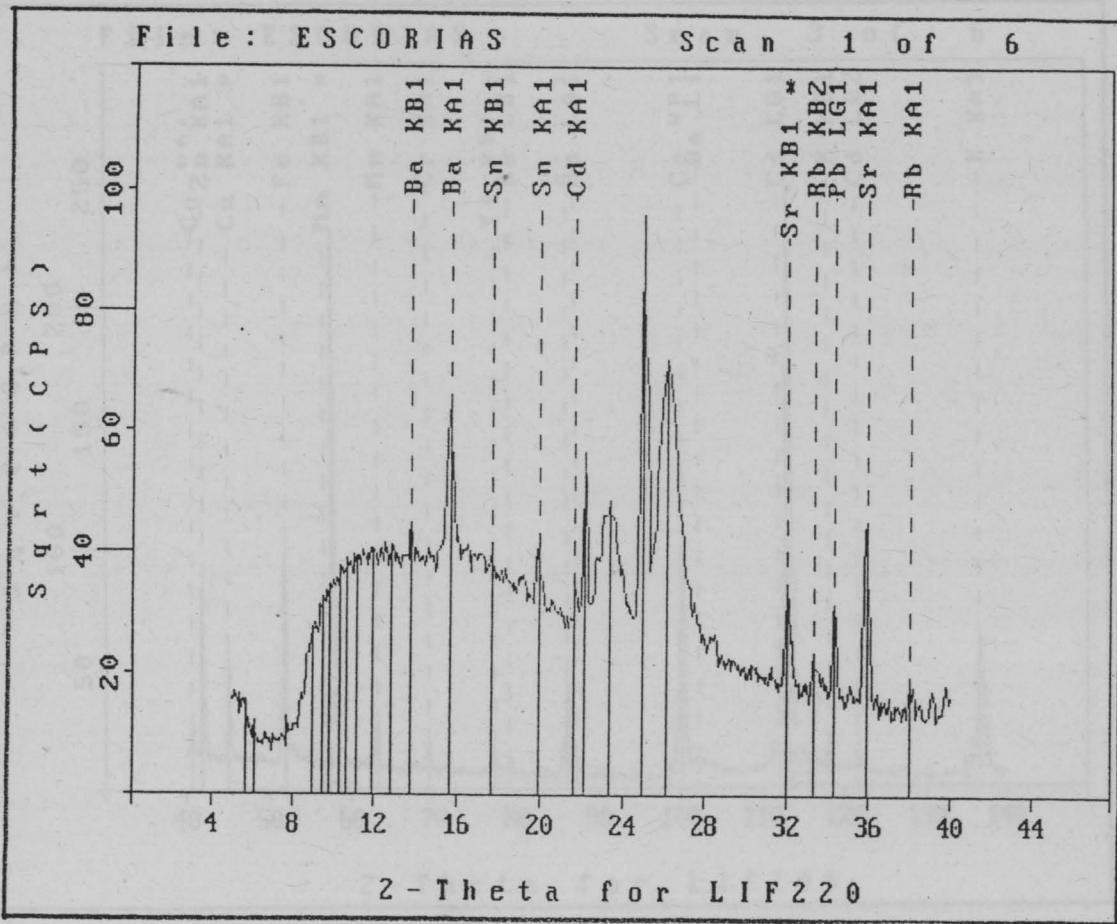
Os valores apresentados, devem ser considerados como semi-quantitativos, dada a natureza da amostra, tão diferente das amostras que constituem as rectas de calibração dos programas utilizados.

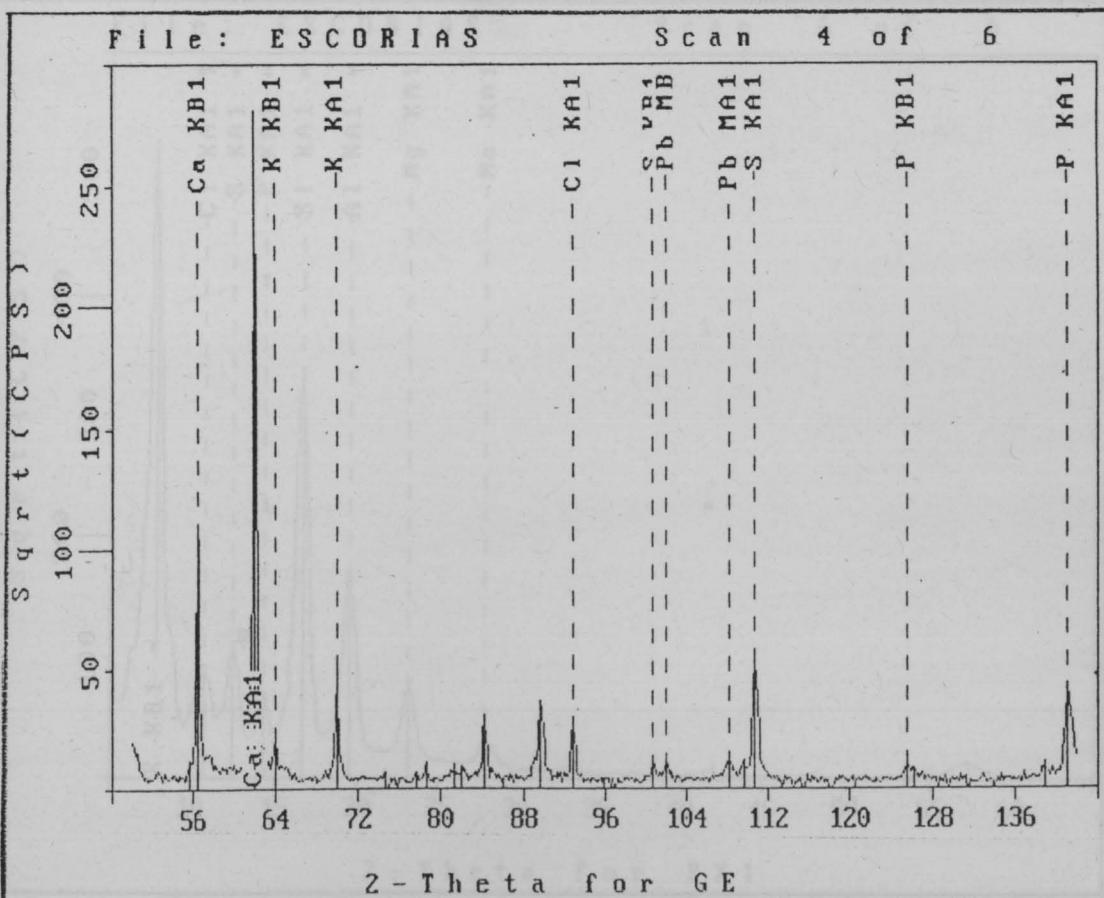
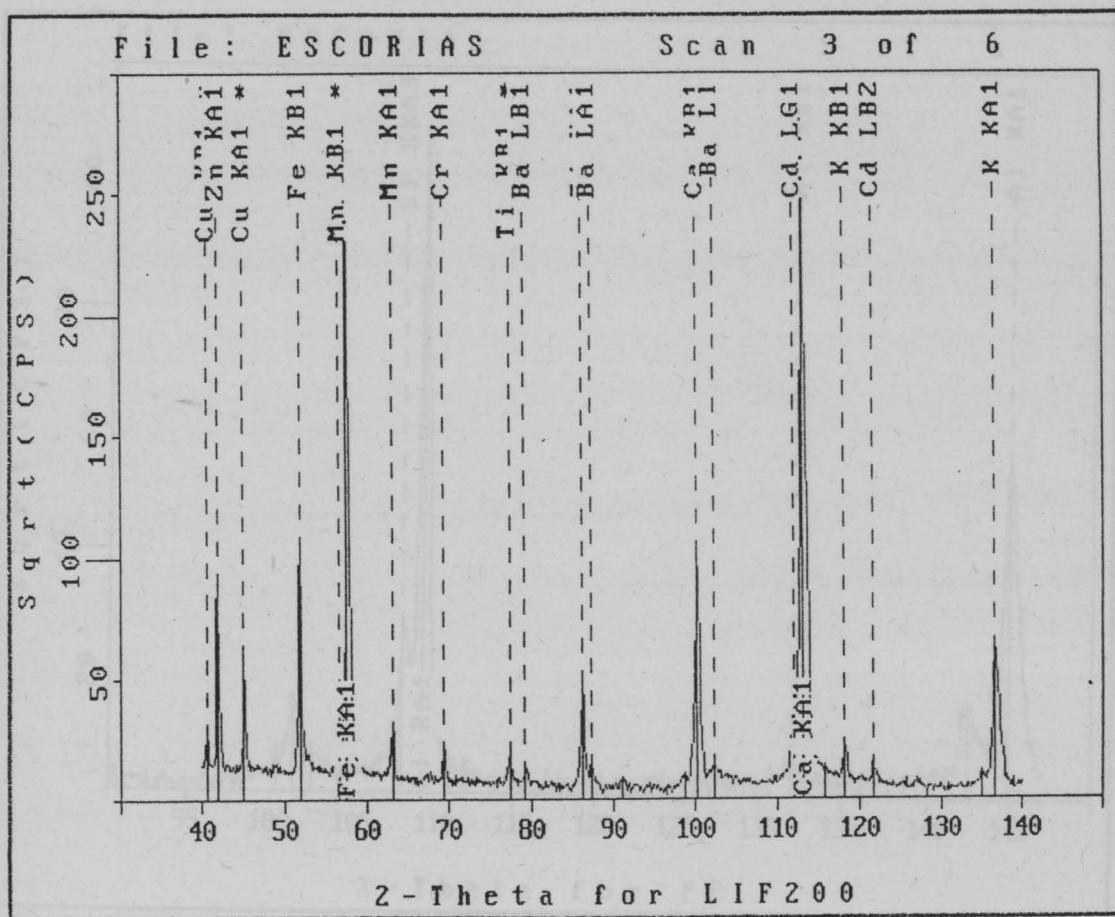
Laboratório, 3 de Dezembro de 1996

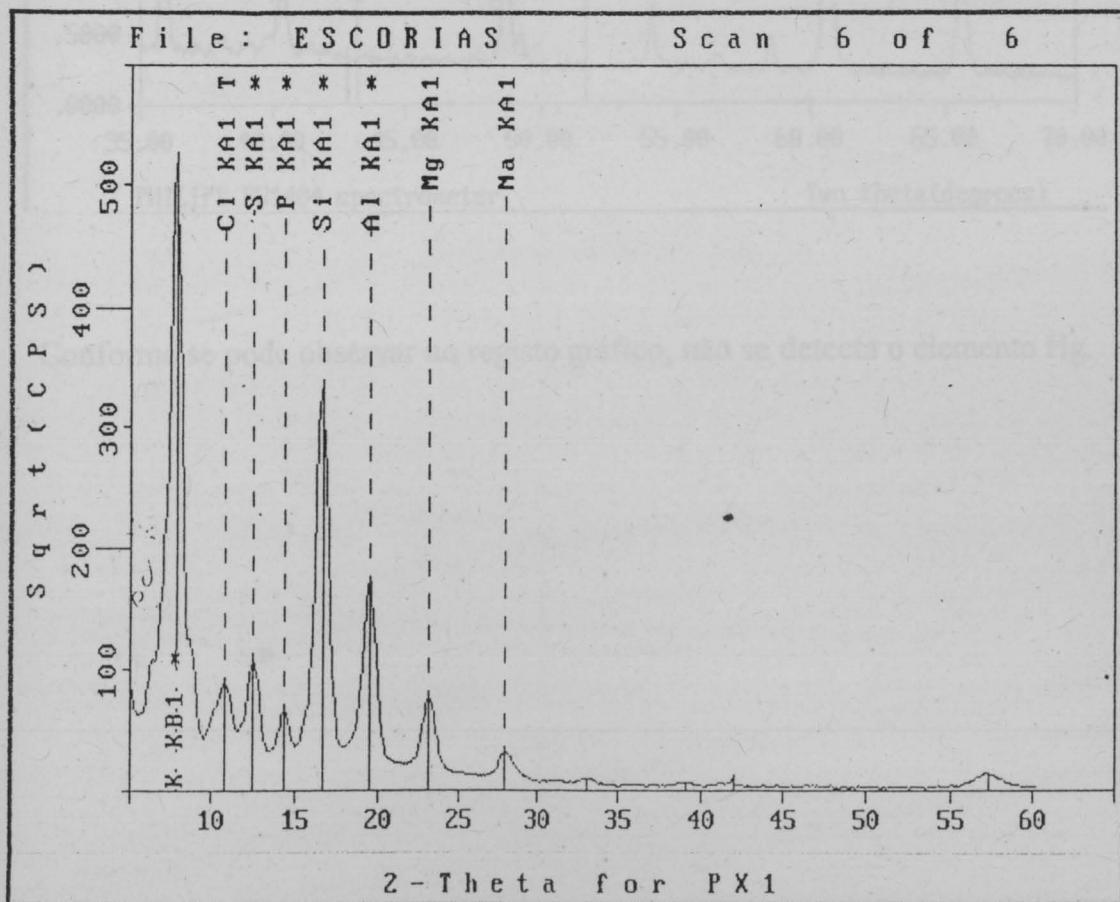
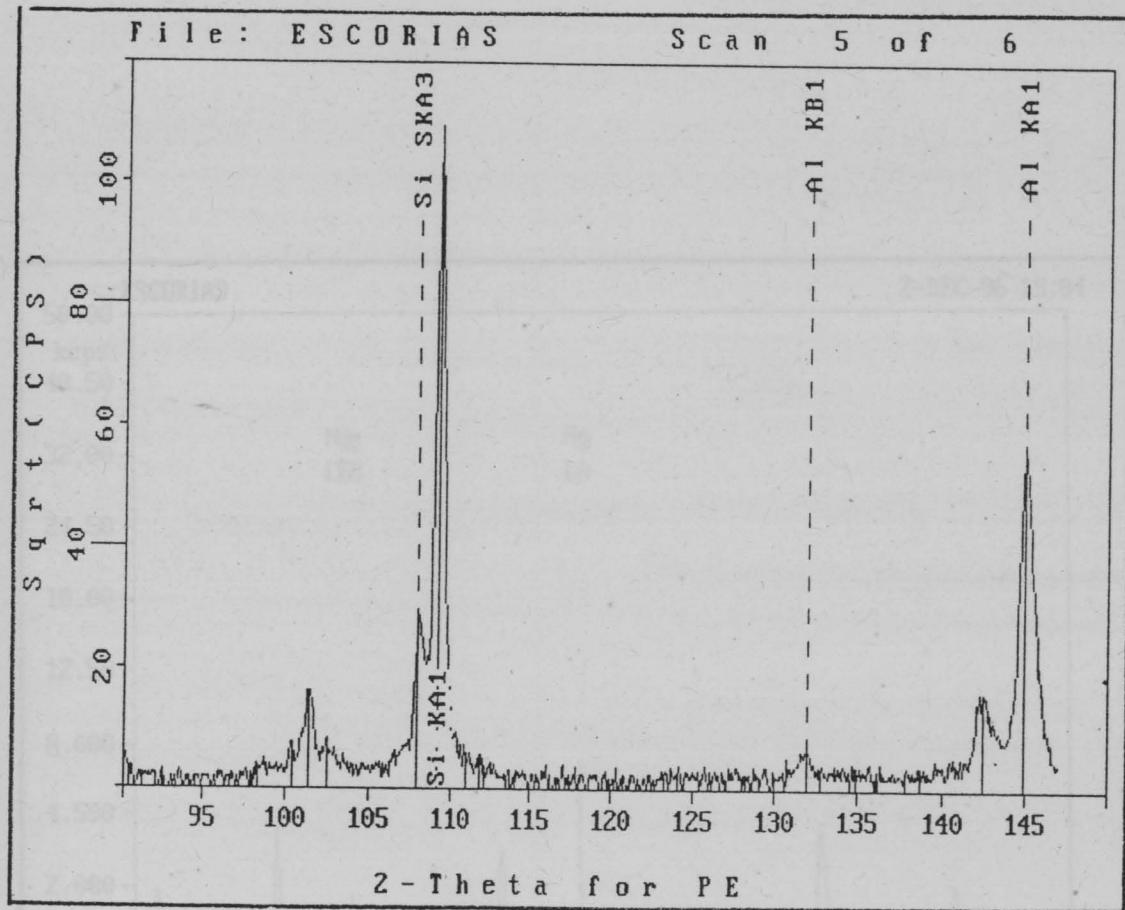
O Responsável pela Secção,

Maria Eugénia Moreira
(Técnico Especialista Principal)

Este Boletim não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção do Laboratório.
Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e ensaiadas. Qualquer extrapolação é da exclusiva responsabilidade do requerente.



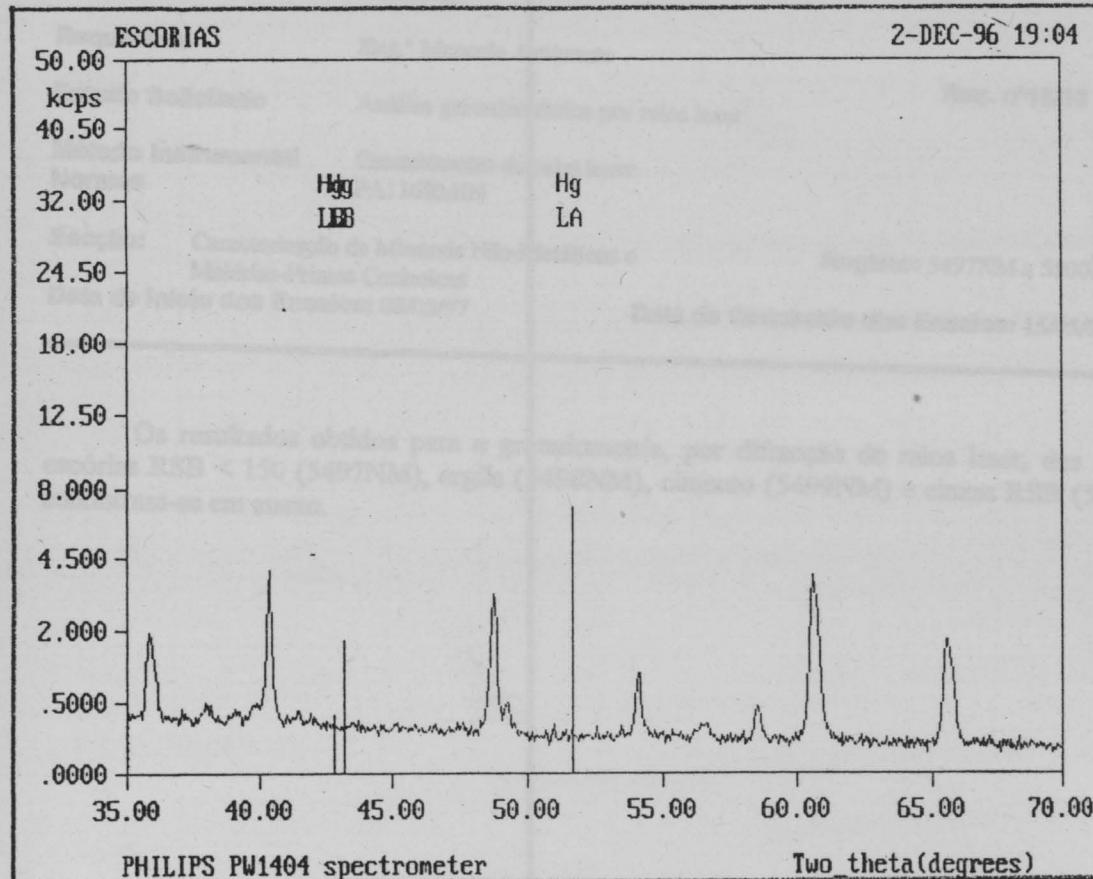






Instituto Geológico e Mineiro
MINISTÉRIO DA ECONOMIA

Relatório nº 12 / FRX / 96
Página nº 6 de 6
Nº Ordem Lab. 552 / 96



Conforme se pode observar no registo gráfico, não se detecta o elemento Hg.



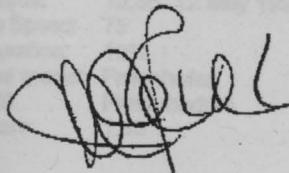
Instituto Geológico e Mineralógico
MINISTÉRIO DA ECONOMIA

Eng.º Mamede de Infesta

Tel.: 21 9996 330

LABORATÓRIO

BOLETIM DE ENSAIOS


Amostras

4 amostras

Boletim nº 51 / RMIN / 97
Página nº 1 de 9
Nº Ordem Lab 285 / 97

Requerente

Eng.º Mamede Amarante

Estudo Solicitado

Análise granulométrica por raios laser

Req. nº 18/13

Método Instrumental

Granulómetro de raios laser

Normas

PAI16RMIN

Secção: Caracterização de Minerais Não-Metálicos e
Materias-Primas Cerâmicas

Registo: 5497NM a 5500NM

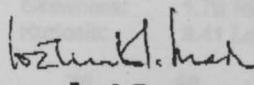
Data de Início dos Ensaios: 08/05/97

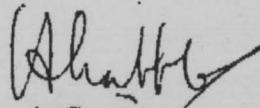
Data de Conclusão dos Ensaios: 15/05/97

Os resultados obtidos para a granulometria, por difração de raios laser, das amostras escórias RSB < 150 (5497NM), argila (5498NM), cimento (5499NM) e cinzas RSB (5500NM) encontram-se em anexo.

S. Mamede de Infesta, 16/05/97

Os Geólogos,


José Grade


A. Casal Moura

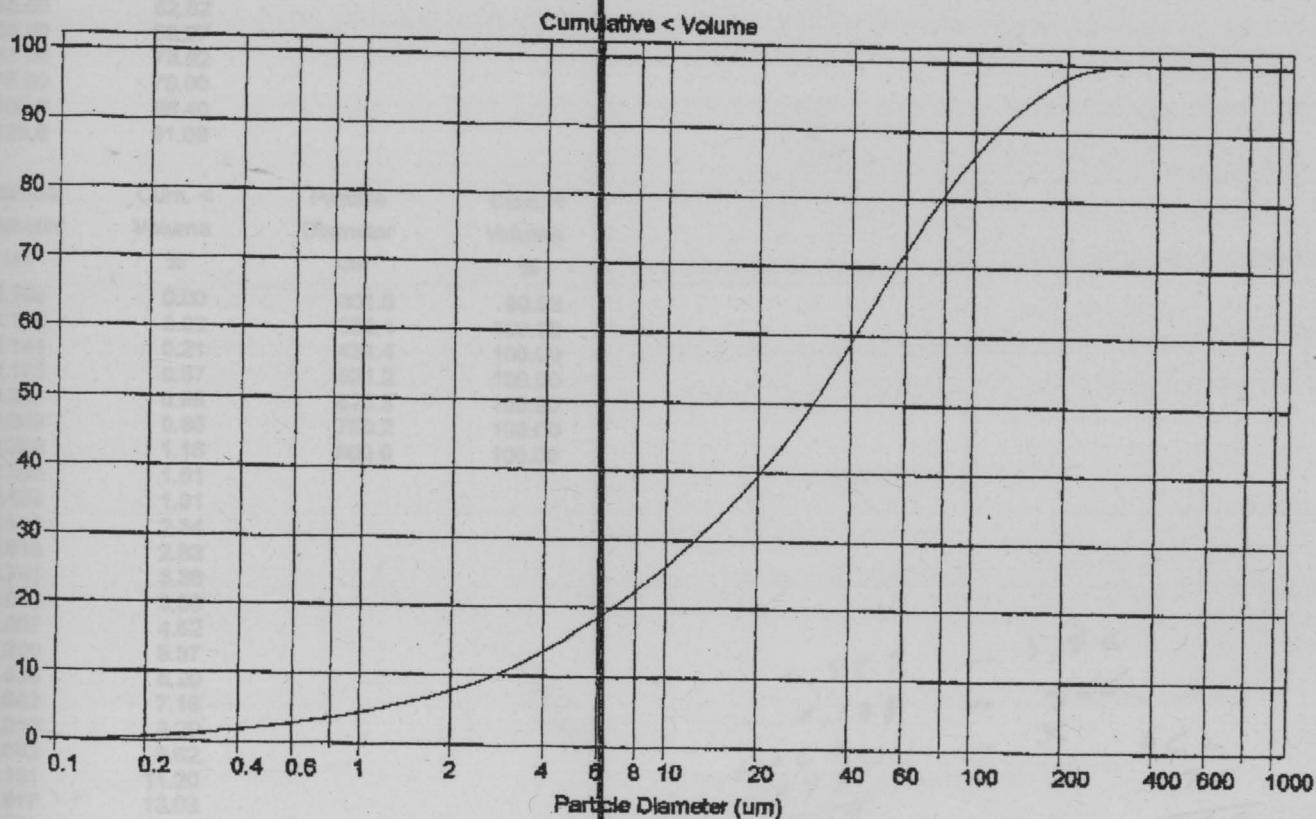
Este Boletim não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direção do Laboratório.
Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e ensaiadas. Qualquer interpolação é da exclusiva responsabilidade
do requerente.

COULTER^R LS Particle Size Analysis

15:38 12 May 1997

labigm.\$28

File name: LABIGM.\$28
Sample ID: 5497NM
Operator: Selores
Comments:
Start time: 15:36 12 May 1997
Pump Speed: 75
Obscuration: 10%
Optical model: Fraunhofer
LS 130 Fluid module
Software: 1.53
Group ID: LAB.GM
Run number: 1
Run length: 60 Seconds
Firmware: 1.3 18



Volume Statistics (Arithmetic)

labigm.\$28

Calculations from 0.100 μm to 900.0 μm

Volume	100.0%		
Mean:	48.97 μm	95% Conf. Limits:	0-147 μm
Median:	30.09 μm	S.D.:	51.1 μm
Mean/Median Ratio:	1.661	Variance:	2610 μm^2
Mode:	46.68 μm	C.V.:	109%
		Skewness:	1.76 Right skewed
		Kurtosis:	3.41 Leptokurtic

% <	10	25	50	75	90
Size μm	2.777	9.355	30.09	85.50	118.3

COULTER[®] LS Particle Size Analysis

Labigm. \$26

15:39 12 May 1997

Particle Diameter um	Volume % <
2.000	7.65
4.000	13.55
8.000	22.53
10.00	26.13
16.00	34.79
20.00	39.50
25.00	44.90
32.00	51.86
45.00	62.82
53.00	58.27
63.00	73.82
75.00	79.00
100.0	86.40
125.0	91.09

Particle Diameter um	Cum. %	Particle Diameter um	Cum. %
Diameter um	Volume	Diameter um	Volume
0.100	0.00	301.8	99.93
0.120	0.09	362.1	100.00
0.144	0.21	434.4	100.00
0.173	0.37	521.2	100.00
0.207	0.58	625.3	100.00
0.249	0.85	750.2	100.00
0.298	1.16	900.0	100.00
0.358	1.51		
0.429	1.91		
0.515	2.34		
0.618	2.83		
0.741	3.36		
0.889	3.96		
1.067	4.62		
1.280	5.37		
1.536	6.20		
1.842	7.18		
2.210	8.29		
2.652	9.62		
3.181	11.20		
3.817	13.03		
4.578	15.09		
5.494	17.34		
6.591	19.74		
7.907	22.35		
9.487	25.24		
11.38	28.37		
13.65	31.71		
16.38	35.25		
19.65	39.10		
23.58	43.40		
28.29	48.24		
33.94	53.65		
40.72	59.49		
48.85	65.56		
58.61	71.55		
70.32	77.16		
84.36	82.22		
101.2	86.68		
121.4	90.55		
145.7	93.82		
174.8	96.48		
209.7	98.41		
251.6	99.51		

$$\begin{aligned}
 & 0,889 - 3,96 \\
 & 0,178 - 0,66 \\
 & 1,067 - X \quad 4,62 \\
 & 0,889 - 3,76 \\
 & \overline{0,178} \quad \overline{0,66} \\
 & \overline{0,178} = \frac{0,111 + 0,66}{0,178} = 4,62
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 0,111 \\
 & \overline{0,178} = 3,96 + X
 \end{aligned}$$

1,000

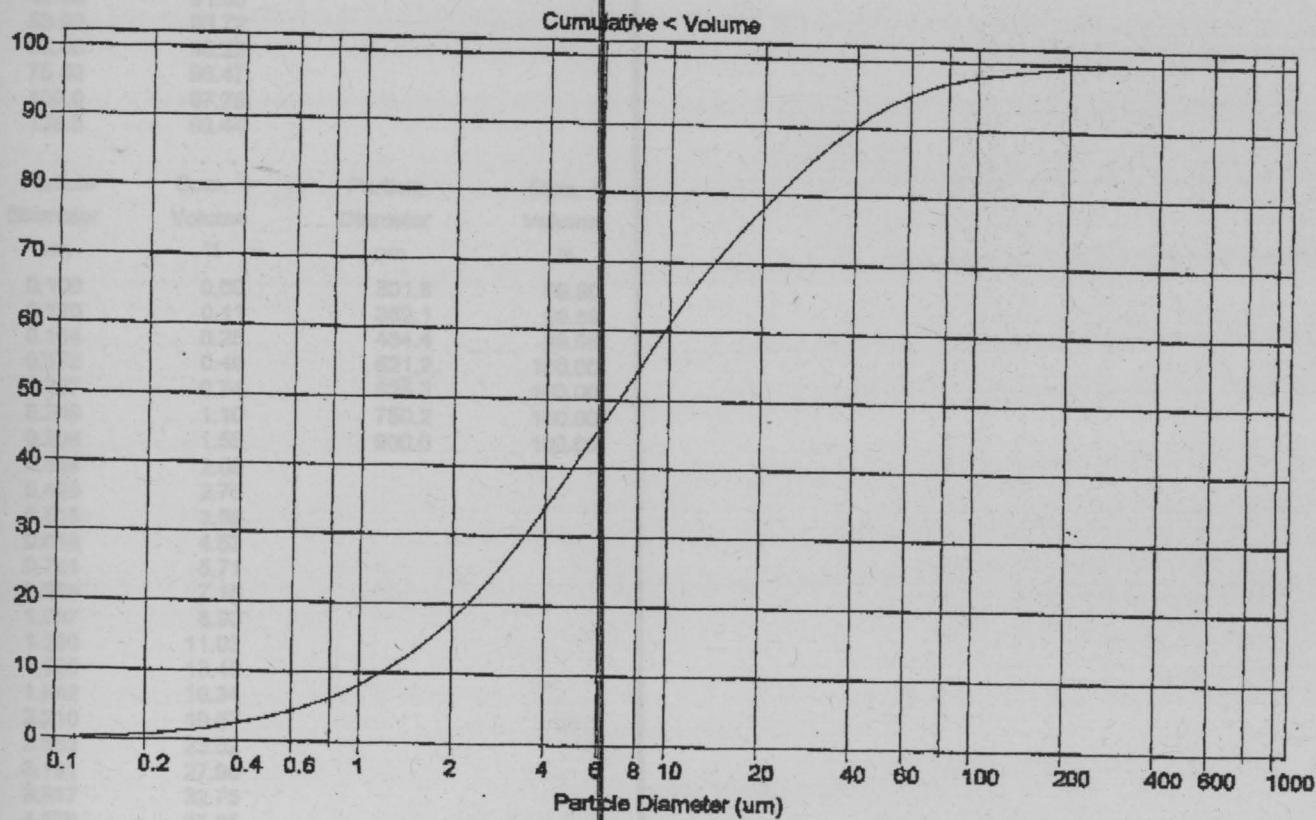
COULTER^R LS Particle Size Analysis

16:04 12 May 1997

labigm.\$29

File name: LABIGM.\$29
Sample ID: 5498NM
Operator: Selores
Comments:
Start time: 16:02 12 May 1997
Pump Speed: 75
Obscuration: 11%
Optical model: Fraunhofer
LS 130 Fluid module
Software: 1.53

Group ID: LAB.GM
Run number: 2
Run length: 60 Seconds
Firmware: 1.3 1.8



Volume Statistics (Arithmetic)

labigm.\$29

Calculations from 0.100 μm to 900.0 μm

Volume	100.0%
Mean:	16.67 μm
Median:	6.888 μm
Mean/Median Ratio:	2.421
Mode:	8.276 μm
	95% Conf. Limits: 0-78.7 μm
	S.D.: 31.8 μm
	Variance: 1000 μm^2
	C.V.: 190%
	Skewness: 6.02 Right skewed
	Kurtosis: 53.6 Leptokurtic

% <	10	25	50	75	90
Size μm	1.175	2.827	6.888	17.36	39.22

COULTER^R LS Particle Size Analysis

LabID: M.29

16:05 12 May 1997

Particle Diameter um	Volume % <
2.000	17.79
4.000	34.07
8.000	54.51
10.00	61.15
18.00	73.25
20.00	77.94
25.00	82.32
32.00	88.82
46.00	91.86
53.00	93.72
63.00	95.28
75.00	96.47
100.0	97.78
125.0	98.44

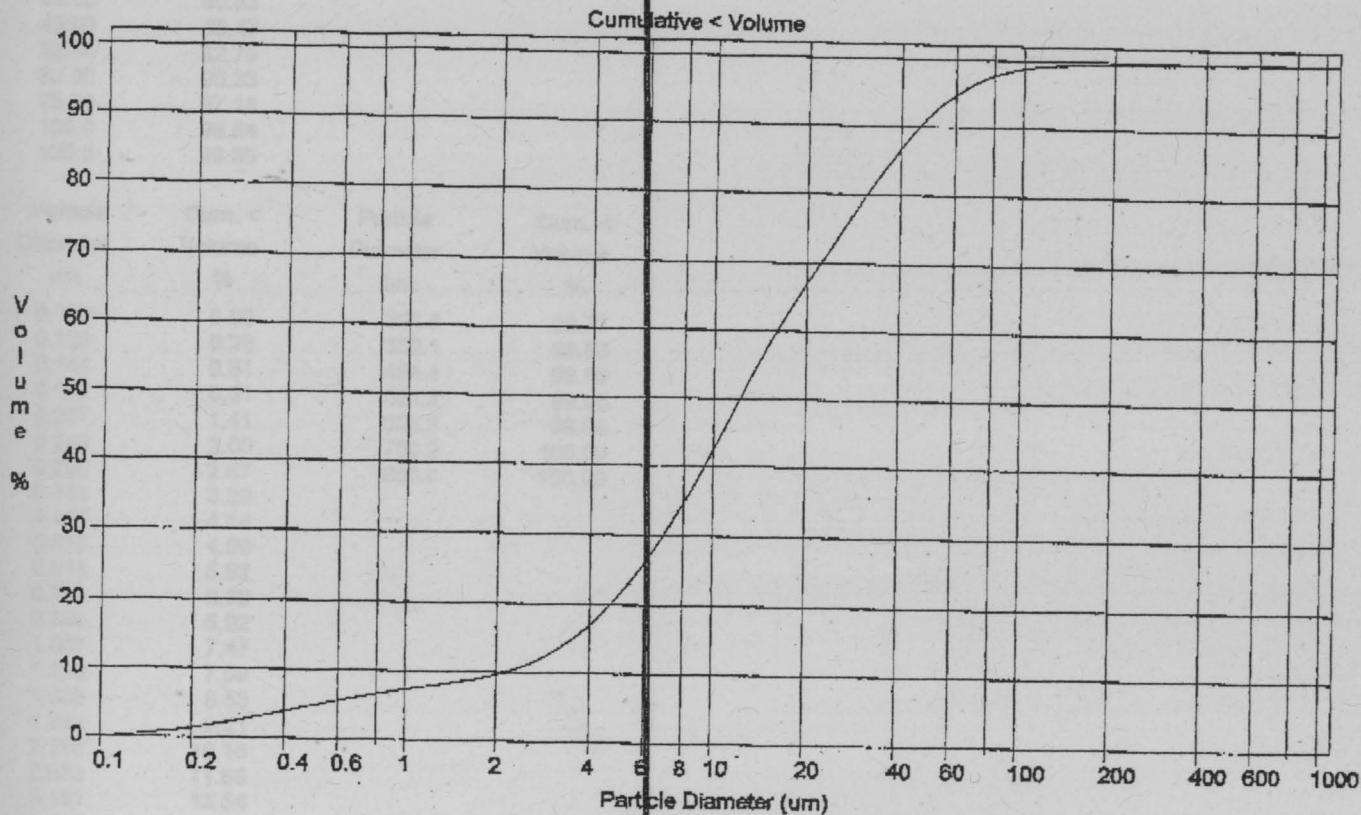
Particle Diameter um	Cum. % Volume	Particle Diameter um	Cum. % Volume
0.100	0.00	301.8	99.80
0.120	0.11	382.1	99.89
0.144	0.25	434.4	99.96
0.173	0.45	521.2	100.00
0.207	0.74	625.3	100.00
0.249	1.10	750.2	100.00
0.298	1.55	900.0	100.00
0.358	2.09		
0.429	2.76		
0.515	3.56		
0.618	4.53		
0.741	5.71		
0.889	7.18		
1.067	8.93		
1.260	11.03		
1.536	13.48		
1.842	16.34		
2.210	19.67		
2.652	23.52		
3.181	27.90		
3.817	32.75		
4.579	37.95		
5.494	43.32		
6.591	48.73		
7.907	54.17		
9.487	59.61		
11.38	64.83		
13.65	69.57		
16.38	73.78		
19.65	77.59		
23.58	81.20		
28.29	84.85		
33.94	87.82		
40.72	90.56		
48.85	92.84		
58.61	94.69		
70.32	96.08		
84.38	97.09		
101.2	97.82		
121.4	98.37		
145.7	98.80		
174.8	99.17		
209.7	99.47		
251.6	99.67		

COULTER^R LS Particle Size Analysis

16:19 12 May 1997

labigm.\$30

File name: LABIGM.\$30 Group ID: LAB.GM
Sample ID: 5499NM
Operator: Selores
Comments:
Start time: 16:17 12 May 1997
Pump Speed: 75
Obscuration: 11%
Optical model: Fraunhofer
LS 130 Fluid module
Software: 1.53 Firmware: 1.3 1.8



Volume Statistics (Arithmetic)

labigm.\$30

Calculations from 0.100 μm to 900.0 μm

Volume	100.0%	95% Conf. Limits:	0-79.5 μm
Mean:	20.45 μm	S.D.:	30.1 μm
Median:	12.19 μm	Variance:	907 μm^2
Mean/Median Ratio:	1.677	C.V.:	147%
Mode:	11.91 μm	Skewness:	8.34 Right skewed
		Kurtosis:	117 Leptokurtic

% <	10	25	50	75	90
Size μm	2.150	5.758	12.19	26.34	46.18

COULTER^R LS Particle Size Analysis

16:19 12 May 1997

Lablgm.\$30

Particle Diameter um	Volume % <
2.000	9.60
4.000	17.07
8.000	34.60
10.00	42.52
16.00	59.90
20.00	67.00
25.00	73.51
32.00	80.63
45.00	89.47
53.00	92.73
63.00	95.33
75.00	97.15
100.0	98.84
125.0	99.35

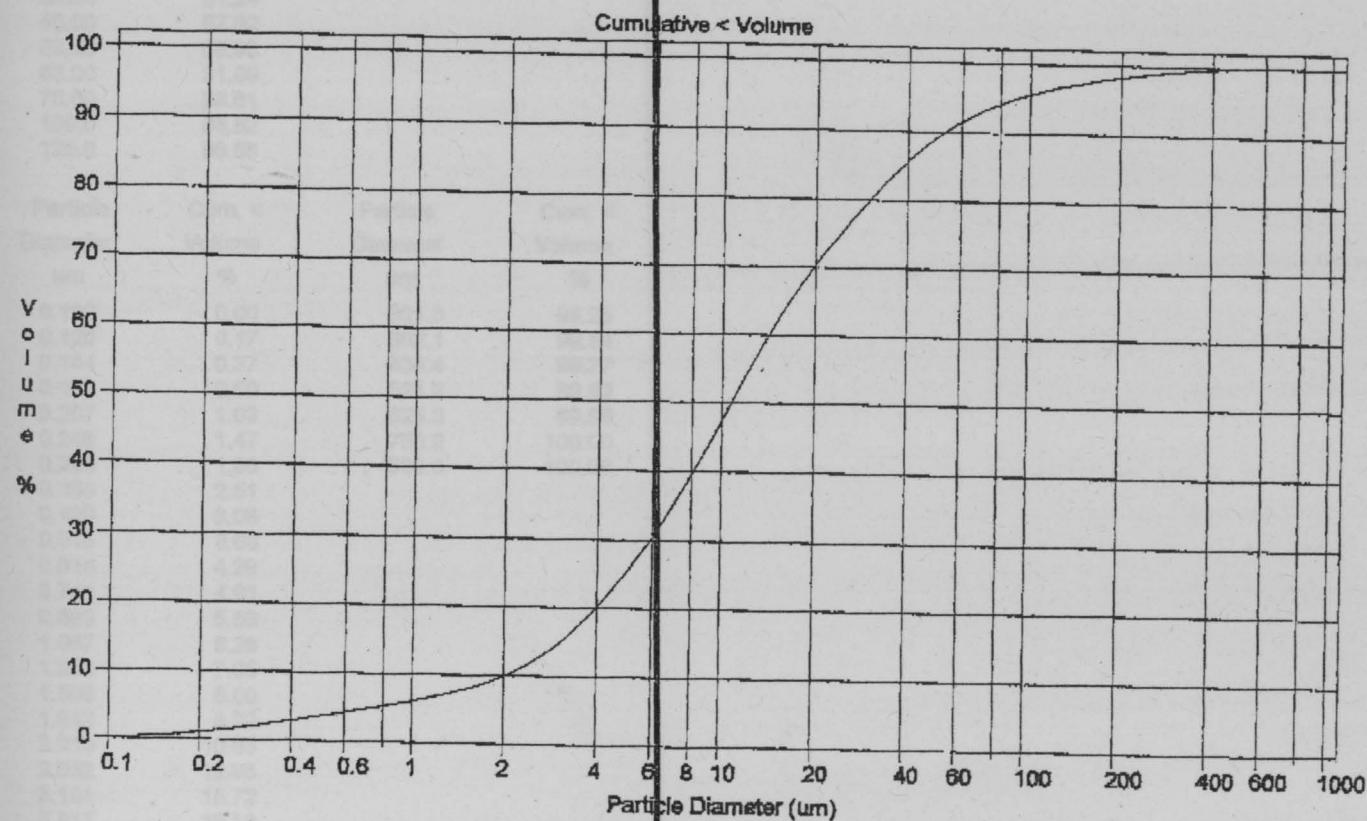
Particle Diameter um	Cum. < Volume %	Particle Diameter um	Cum. < Volume %
0.100	0.00	301.8	99.77
0.120	0.23	362.1	99.83
0.144	0.51	434.4	99.89
0.173	0.91	521.2	99.95
0.207	1.41	625.3	99.98
0.249	2.00	750.2	100.00
0.298	2.67	900.0	100.00
0.358	3.39		
0.429	4.14		
0.515	4.90		
0.618	5.62		
0.741	6.30		
0.889	6.92		
1.067	7.47		
1.260	7.99		
1.536	8.53		
1.842	9.21		
2.210	10.16		
2.652	11.55		
3.181	13.54		
3.817	16.23		
4.579	19.67		
5.494	23.83		
6.591	28.65		
7.907	34.21		
9.487	40.55		
11.38	47.41		
13.65	54.30		
16.38	60.72		
19.65	66.48		
23.58	71.82		
28.29	77.08		
33.94	82.30		
40.72	87.13		
48.85	91.21		
58.61	94.36		
70.32	96.58		
84.36	98.03		
101.2	98.89		
121.4	99.31		
145.7	99.49		
174.8	99.59		
209.7	99.67		
251.6	99.73		

COULTER^R LS Particle Size Analysis

16:34 12 May 1997

labigm.\$31

File name: LABIGM.\$31
 Sample ID: 5500NM
 Operator: Selores
 Comments:
 Start time: 16:32 12 May 1997
 Pump Speed: 75
 Obscuration: 10%
 Optical model: Fraunhofer
 LS 130 Fluid module
 Software: 1.53
 Group ID: LAB.GM
 Run number: 4
 Run length: 60 Seconds
 Firmware: 1.3 1.B



Volume Statistics (Arithmetic)

labigm.\$31

Calculations from 0.100 μm to 900.0 μm

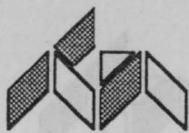
Volume	100.0%	
Mean:	24.91 μm	95% Conf. Limits: 0-120 μm
Median:	10.74 μm	S.D.: 48.5 μm
Mean/Median Ratio:	2.319	Variance: 2350 μm ²
Mode:	10.88 μm	C.V.: 195%
		Skewness: 5.53 Right skewed
		Kurtosis: 40.4 Leptokurtic

% <	10	25	50	75	90
Size μm	2.026	4.902	10.74	24.22	53.11

LabID: \$31

Particle Diameter	Volume % <
um	
2.000	9.89
4.000	20.20
8.000	39.45
10.00	47.40
16.00	64.00
20.00	70.34
25.00	75.76
32.00	81.24
45.00	87.62
53.00	89.98
63.00	91.99
75.00	93.61
100.0	95.62
125.0	96.69

Particle Diameter	Cum. < Volume	Particle Diameter	Cum. < Volume
um	%	um	%
0.100	0.00	301.8	99.25
0.120	0.17	362.1	99.54
0.144	0.37	434.4	99.77
0.173	0.66	521.2	99.92
0.207	1.03	625.3	99.99
0.249	1.47	750.2	100.00
0.298	1.96	900.0	100.00
0.358	2.51		
0.429	3.08		
0.515	3.68		
0.618	4.29		
0.741	4.91		
0.889	5.56		
1.067	6.28		
1.260	7.05		
1.536	8.00		
1.842	8.22		
2.210	10.83		
2.652	12.88		
3.191	15.72		
3.817	19.18		
4.579	23.30		
5.494	28.02		
6.591	33.26		
7.907	39.05		
9.487	45.46		
11.38	52.20		
13.65	58.78		
16.38	64.75		
19.65	69.89		
23.58	74.40		
28.29	78.57		
33.84	82.47		
40.72	85.95		
48.85	88.87		
58.81	91.21		
70.32	93.06		
84.38	94.53		
101.2	95.69		
121.4	96.58		
145.7	97.27		
174.8	97.87		
208.7	98.42		
251.6	98.88		



Exmo(s) Senhor(es)
Engª Helena Fonseca Lopes Dias
Câmara Municipal da Maia
Praça do Município
4470 MAIA

Anostras

Respeitante

Estudo Solicitado

S / referência

Método Instrumental

S / comunicação

N / referência

1211 /DIR/130

Data

1996 DEZ 06

ASSUNTO: Prestação de Apoio Analítico

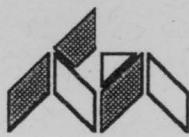
Na sequência do pedido formulado na carta de V. Ex^a. de 96.10.16, junto envio o Boletim nº 683/H/96 e o Relatório 12/FRX/96.

Com os melhores cumprimentos

O Director do Laboratório

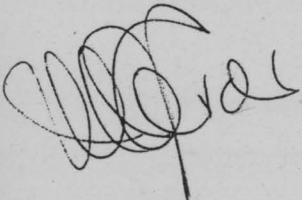
(M.R. Machado Leite, Engº)

Este documento não pode ser reproduzido sem autorização prévia da Direção do Instituto.



BOLETIM DE ANÁLISE

Boletim nº 683 / H / 96
Página nº 1 de 1
Nº Ordem Lab 552 / 96



Amostras

Solução de lixiviação de escórias - Colheita de s/ data
Amostra enviada pelo requerente

Requerente ENGª HELENA FONSECA LOPES DIAS

Req. nº ---

Estudo Solicitado Doseamento de cloreto, sulfato e alguns metais pesados

Método Instrumental ---

Metodologia Procedimento Composto

Secção: Hidroquímica

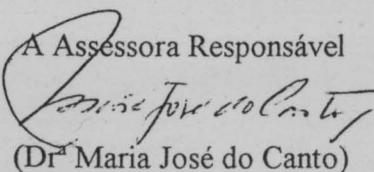
Registo: 703/96

Data de Início da Análise: 18-11-1996

Data de Conclusão da Análise: 26-11-1996

Parâmetro	Método utilizado	Resultado
Cloreto	VOL - PA011H	840 mg/L
Sulfato	GRAV - PA012H	75 mg/L
Bário	ICP - método interno	187 µg/L
Cádmio	ICP - método interno	<2 µg/L
Cobre	ICP - método interno	3.2 mg/L
Crómio	ICP - método interno	<5 µg/L
Zinco	ICP - método interno	51 µg/L

S. Mamede de Infesta, 5 de Dezembro de 1996

A Assessora Responsável

(Drª Maria José do Canto)

Este Boletim não pode ser parcialmente reproduzido sem autorização por escrito dada pela Direcção do Laboratório.
Os resultados referem-se exclusivamente às amostras recebidas e ensaiadas. Qualquer extrapolação é da exclusiva responsabilidade do requerente.

ESCORIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

1. PLANOS DE ENSAIO

O método dos planos experimentais completos define as experiências a realizar com base em todas as combinações possíveis dos vários factores nos respetivos níveis. Numa matriz completa todos os resultados das experiências são recolhidos e, posteriormente, calculadas as respectivas médias e interacções dos factores considerados.

ANEXO B

O efeito principal de um determinado fator significa que, passando do nível 1 para o nível 2 proporciona um aumento (ou diminuição se o efeito for negativo) na resposta média global. Dados respeitantes ao efeito de segundo nível informam:

- quaisquer efeitos de segundo nível que sejam significativos globais;
- estatística da variação entre os efeitos de segundo nível.

Considera-se, para efeitos de análise, que existem factores que correspondem ao mesmo nome, mas que têm efeitos diferentes entre si, entre dois níveis, como é o caso da temperatura.

	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
10%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
20%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
30%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%
40%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%
50%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%
60%	60%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%
70%	70%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%
80%	80%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	160%
90%	90%	100%	110%	120%	130%	140%	150%	160%	170%

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

1. PLANOS DE ENSAIO

O método dos planos experimentais completos define as experiências a realizar com base em todas as combinações possíveis dos vários factores nos respectivos níveis. Numa matriz completa, após a realização dos ensaios e recolhidos os resultados, é possível calcular os efeitos principais e as interacções dos factores considerados.

O efeito principal de um determinado factor significa que, passar do nível 1 para o nível 2 proporciona um aumento (ou diminuição se o efeito for negativo) na resposta média global. Destes resultados podem tirar-se as seguintes informações:

- qual/quais o(s) factor(es) que tem maior efeito na resposta média global;
- existência de interacções entre factores que influenciam a resposta.

Considere-se, para definir o **1º plano experimental**, quatro factores que correspondem aos componentes a misturar, com uma variação entre dois níveis, como está ilustrado no Quadro B.1.

*Quadro B.1 - Factores e níveis da matriz factorial
do 1.º plano experimental*

FACTOR	NÍVEL 1	NÍVEL 2
(A) Cinzas de carvão	10%	20%
(B) Areia	20%	30%
(C) Cimento	5%	15%
(D) Argila	5%	10%

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

O número de combinações (ensaios) é $2^4 = 16$, e o 1º plano experimental, ilustrado pela Quadro B.2, pode ser construído recorrendo ao seguinte algoritmo:

- 1º factor: alternar o algarismo 1 com o algarismo 2 até ao ensaio nº 16;
- 2º factor: alternar dois algarismos 1 com dois algarismos 2, até ao ensaio nº 16;
- 3º factor: alternar quatro algarismos 1 com quatro algarismos 2, até ao ensaio nº 16;
- 4º factor: alternar oito algarismos 1 com oito algarismos 2, até ao ensaio nº 16.

*Quadro B.2 - 1º plano de experiências
(factorial de quatro factores a dois níveis)*

Nº do ensaio	FACTORES			
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila
1	1	1	1	1
2	2	1	1	1
3	1	2	1	1
4	2	2	1	1
5	1	1	2	1
6	2	1	2	1
7	1	2	2	1
8	2	2	2	1
9	1	1	1	2
10	2	1	1	2
11	1	2	1	2
12	2	2	1	2
13	1	1	2	2
14	2	1	2	2
15	1	2	2	2
16	2	2	2	2

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

Substituindo na tabela anterior as notações 1 e 2 pelos valores dos respetivos níveis para cada factor, e completando com escórias os 100% correspondentes à massa total das misturas, obtém-se a composição das misturas a realizar, com a indicação percentual de cada componente presente nas mesmas, como mostra a Quadro B.3. O Quadro B.4 contém a quantidade de cada componente a utilizar nas misturas.

Quadro B.3 - Composição das misturas do 1º plano experimental (%)

Nº do ensaio	FACTORES (%)				EIRSU
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila	
1	10	20	5	5	60
2	20	20	5	5	50
3	10	30	5	5	50
4	20	30	5	5	40
5	10	20	15	5	50
6	20	20	15	5	40
7	10	30	15	5	40
8	20	30	15	5	30
9	10	20	5	10	55
10	20	20	5	10	45
11	10	30	5	10	45
12	20	30	5	10	35
13	10	20	15	10	45
14	20	20	15	10	35
15	10	30	15	10	35
16	20	30	15	10	25

2º Plano Experimental

Tipo de matriz: completa

Nº de fatores: 3

Nº de níveis: 2

Nº de ensaios: 16

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

Quadro B.4 - Composição das misturas do 1º plano experimental (g)

Nº do ensaio	FACTORES (g)				EIRSU (g)	Total (g)
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila		
1.1	75	150	37,5	37,5	450	750
1.2	80	80	20	20	200	400
1.3	40	120	20	20	200	400
1.4	80	120	20	20	160	400
1.5	40	80	60	20	200	400
1.6	80	80	60	20	160	400
1.7	40	120	60	20	160	400
1.8	60	90	45	15	90	300
1.9	30	60	15	30	165	300
1.10	60	60	15	30	135	300
1.11	30	90	15	30	135	300
1.12	60	90	15	30	105	300
1.13	30	60	45	30	135	300
1.14	60	60	45	30	105	300
1.15	30	90	45	30	105	300
1.16	60	90	45	30	75	300

De um modo semelhante ao descrito anteriormente, definiram-se os restantes planos de ensaios, em que se utilizaram matrizes ortogonais.

Nos casos em que se utilizaram matrizes de Taguchi [33], recorreu-se à tipologia de matrizes já definidas na bibliografia e ao respectivo preenchimento com os factores e níveis em análise.

A composição das misturas a realizar nos planos experimentais definidos encontram-se nos Quadros seguintes.

2º Plano Experimental

Tipo de matriz: completa

Nº de factores: 3

Nº de níveis: 2

Nº de ensaios: $2^3 = 8$

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

Factores: Cinzas de carvão

Areia

Argila

Complemento: Escórias da Incineração de RSU (EIRSU)

Níveis:

FACTOR	NÍVEL 1	NÍVEL 2
Cinzas de carvão	10%	20%
Areia	20%	30%
Argila	5%	10%

2º plano experimental

Nº do ensaio	FACTORES		
	C. carvão	Areia	Argila
2.1	1	1	1
2.2	2	1	1
2.3	1	2	1
2.4	2	2	1
2.5	1	1	2
2.6	2	1	2
2.7	1	2	2
2.8	2	2	2

Composição das misturas do 2º plano experimental (%)

Nº do ensaio	FACTORES (%)			EIRSU (%)
	C. carvão	Areia	Argila	
2.1	10	20	5	65
2.2	20	20	5	55
2.3	10	30	5	55
2.4	20	30	5	45
2.5	10	20	10	60
2.6	20	20	10	50
2.7	10	30	10	50
2.8	20	30	10	40

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

Composição das misturas 2º plano experimental (g)

Nº do ensaio	FACTORES (g)			EIRSU (g)	Total (g)
	C. carvão	Areia	Argila		
2.1	25	50	12,5	162,5	250
2.2	50	50	12,5	137,5	250
2.3	25	75	12,5	137,5	250
2.4	50	75	12,5	112,5	250
2.5	25	50	25	150	250
2.6	50	50	25	125	250
2.7	25	75	25	125	250
2.8	50	75	25	100	250

3º Plano Experimental

Tipo de matriz: ortogonal L4

Nº de factores: 3

Nº de níveis: 2

Nº de ensaios: 4

Factores: Cinzas de carvão

Argila

EIRSU

Complemento: Areia

Níveis:

FACTOR	NÍVEL 1	NÍVEL 2
Cinzas de carvão	15%	25%
Argila	5%	10%
EIRSU	25%	50%

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

3º plano experimental

Nº do ensaio	FACTORES		
	C. carvão	Argila	EIRSU
3.1	1	1	1
3.2	1	2	2
3.3	2	1	2
3.4	2	2	1

Composição das misturas do 3º plano experimental (%)

Nº do ensaio	FACTORES (%)			Areia (%)
	C. carvão	Argila	EIRSU	
3.1	15	5	25	55
3.2	15	10	50	25
3.3	25	5	50	20
3.4	25	10	25	40

Composição das misturas do 3º plano experimental (g)

Nº do ensaio	FACTORES (g)			Areia (g)	Total (g)
	C. carvão	Argila	EIRSU		
1	37,5	12,5	65,5	137,5	250
2	30	20	100	50	200
3	50	10	100	40	200
4	50	20	50	80	200

4º Plano Experimental

Tipo de matriz: 2 matrizes ortogonais L_4

Nº de factores: 4

Nº de níveis: 2

Nº de ensaios: 4 + 4

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

Factores: Cinzas de carvão

Areia

Cimento

Argila

Complemento: EIRSU

Níveis:

FACTOR	NÍVEL 1	NÍVEL 2
Cinzas de carvão	10%	20%
Areia	20%	30%
Cimento	5%	15%
Argila	5%	10%

4º plano experimental

Matriz A

Nº do ensaio	FACTORES			
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila
4.A1	1	1	1	1
4.A2	1	2	2	1
4.A3	2	1	2	1
4.A4	2	2	1	1

Matriz B

Nº do ensaio	FACTORES			
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila
4.B1	1	1	1	2
4.B2	1	2	2	2
4.B3	2	1	2	2
4.B4	2	2	1	2

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

Composição das misturas do 4º plano experimental (%)

Matriz A

Nº do ensaio	FACTORES (%)				EIRSU (%)
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila	
4.A1	10	20	5	5	60
4.A2	10	30	15	5	40
4.A3	20	20	15	5	40
4.A4	20	30	5	5	40

Matriz B

Nº do ensaio	FACTORES (%)				EIRSU (%)
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila	
4.B1	10	20	5	10	55
4.B2	10	30	15	10	35
4.B3	20	20	15	10	35
4.B4	20	30	5	10	35

Composição das misturas do 4º plano experimental (g)

Matriz A

Nº do ensaio	FACTORES (g)				EIRSU (g)	Total (g)
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila		
4.A1	20	40	10	10	120	200
4.A2	20	60	30	10	80	200
4.A3	40	40	30	10	80	200
4.A4	40	60	10	10	80	200

Matriz B

Nº do ensaio	FACTORES (g)				EIRSU (g)	Total (g)
	C. carvão	Areia	Cimento	Argila		
4.B1	20	40	10	20	110	200
4.B2	20	60	30	20	70	200
4.B3	40	40	30	20	70	200
4.B4	40	60	10	20	70	200

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

5º Plano Experimental

Tipo de matriz: ortogonal L4

Nº de factores: 3

Nº de níveis: 2

Nº de ensaios: 4

Factores: CIRSU

Argila

EIRSU

Complemento: Areia

Níveis:

FACTOR	NÍVEL 1	NÍVEL 2
CIRSU	15%	25%
Argila	5%	10%
EIRSU	25%	50%

Com as misturas realizadas, produziram-se cilindros com 2,5 cm de diâmetro e 3 cm de altura para se proceder à sua resistência à compressão uniaxial, aos 7 dias.

5º plano experimental

Nº do ensaio	FACTORES		
	CIRSU	Argila	EIRSU
5.1	1	1	1
5.2	1	2	2
5.3	2	1	2
5.4	2	2	1

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

Composição das misturas do 5º plano experimental (%)

Nº do ensaio	FACTORES (%)			Areia (%)
	CIRSU	Argila	EIRSU	
5.1	15	5	25	55
5.2	15	10	50	25
5.3	25	5	50	20
5.4	25	10	25	40

Para a realização das amostras, foram utilizados os resultados obtidos com o conteúdo das misturas, e a sua realização foi favorável, tendo-se a seguinte composição:

Composição das misturas do 5º plano experimental (g)

Nº do ensaio	FACTORES (g)			Areia (g)	Total (g)
	CIRSU	Argila	EIRSU		
5.1	37,5	12,5	62,5	137,5	250
5.2	30	20	100	50	200
5.3	50	10	100	40	200
5.4	50	20	50	80	200

Determinou-se a altura da amostra e a sua densidade.

2. PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Com as misturas realizadas, produziram-se amostras cilíndricas, com 2,5 cm de diâmetro e 5 cm de altura para posteriores ensaios de resistência à compressão uniaxial, aos 7 dias.

A compressão a exercida no enchimento do molde foi a mínima possível, garantindo a sua coesão das partículas constituintes das misturas mas sem as deformar; de outro modo o enchimento do molde com compressão iria interferir na resistência das amostras, que passaria a depender também da pressão aplicada na execução das amostras e não somente das proporções dos diferentes materiais utilizados nas misturas.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

Para a determinação do nº de amostras a efectuar para cada uma das misturas, foi realizada uma análise da variância amostral sobre resultados obtidos com uma das misturas (a mistura que provavelmente apresente maior conteúdo em graúdos). Assumiu-se que a variância é idêntica em todas as misturas, e ao determinar-se o grau de confiança para a mistura mais desfavorável ter-se-á o intervalo de confiança a utilizar para todas as amostras. Para a realização das misturas foi necessário preparar os materiais, recorrendo-se a:

- crivagem das cinzas de carvão, a uma malha inferior a 125 mm
- secagem de todos os componentes a utilizar nas misturas

Determinação da quantidade de mistura necessária para 10 amostras

Como a peça a utilizar para modelar as amostras é um cilindro com o diâmetro de $\varnothing = 2.5$ cm, e considerando que a altura do cilindro deverá ser o dobro do seu diâmetro ou seja $h = 5$ cm, o respectivo volume será

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \times h = 24.5 \text{ cm}^3$$

Considerando uma densidade de 3 g/cm^3 correspondente a uma material silicatado, o peso para cada amostra será

$$P = 24.5 \text{ cm}^3 \times 3 \text{ g/cm}^3 = 73.6 \text{ g}$$

Para 10 amostras deverão ser necessárias cerca de 750 g de mistura.

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo B

A mistura efectuada é a correspondente ao ensaio nº 1 do 1º plano experimental, por ser a que tem maior percentagem de ERSU que é o material mais grosso, sendo a proporção de cada um dos materiais que compõem a mistura a seguinte:

Cinzas de Carvão = 75 g

Areia = 150 g

Cimento = 37.5 g

Argila = 37.5 g

ERSU = 450 g

Total = 750 g

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL NÃO CONFIRMADA

1.1 Componentes e determinação das propriedades físicas dos resíduos luminosos

ANEXO C

1º plano experimental

as amostras curadas em ambiente seco.

Espeleto	1	2	3	4	5	6
1.1 set	187,7	185,9	223,7	287,8	221,4	0,45
1.2 set	243,3	249,1	261,3	294,5	242,5	0,50
1.3 set	211,2	2213,7	213	260,0	209,5	0,40
1.4 set	265,4	250,8	254,2	297,2	299,4	0,50
1.5 set	705,8	585,5	508,3	801,4	725,5	1,50
1.6 set	698,6	746,8	675,3	810,8	684,1	1,40
1.7 set	830,3	740,6	512,6	593,4	645,7	1,50

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo C

1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL NÃO CONFINADA

1.1 Componentes e determinação das respectivas proporções nas misturas

1º plano experimental

☒ amostras curadas em ambiente saturado

Ensaio	Resistência (N)					Resistência (MPa)
	1	2	3	4	Média	
1.1 sat	187,7	185,9	223,7	287,0	221,1	0,45
1.2 sat	243,3	249,1	241,3	264,1	249,5	0,50
1.3 sat	211,2	213,7	213	200,0	209,5	0,40
1.4 sat	265,4	250,6	254,5	267,2	259,4	0,50
1.5 sat	705,8	585,5	808,3	801,4	725,3	1,50
1.6 sat	696,6	745,6	675,3	619,8	684,3	1,40
1.7 sat	830,3	740,6	512,6	503,4	646,7	1,30

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo C

mo amostras curadas em condições de umidade e temperatura ambiente

Ensaio	Resistência (N)					Resistência (MPa)
	1	2	3	4	Média	
1.1	500,9	546,6	577,3	597,2	555,5	1,13
1.2	446,1	481,6	677,3	708	578,3	1,18
1.3	395,4	404,4	647,7	621,3	517,2	1,05
1.4	461,3	453,2	631,5	602	537,0	1,09
1.5	635,4	686,6	960	924	801,5	1,63
1.6	525,6	516,3	1039	989,3	767,6	1,56
1.7	601,1	631,8	998,8	1073,3	826,3	1,68
1.8	1103,8	961,3	1106,4	1053,7	1056,3	2,15
1.9	760	590	700	720	692,5	1,41
1.10	580	640	630	670	630,0	1,28
1.11	540	480	460	450	482,5	0,98
1.12	440	460	530	510	485,0	0,99
1.13	920	860	920	570	817,5	1,67
1.14	1000	1020	1130	1050	1050,0	2,14
1.15	820	890	800	1000	877,5	1,79
1.16	770	920	880	1140	927,5	1,89

2º plano experimental

Ensaio	Resistência (N)					Resistência (MPa)
	1	2	3	4	Média	
2.1	360	460	400	490	427,5	0,87
2.2	400	370	330	340	360,0	0,73
2.3	290	310	330	270	300,0	0,61
2.4	260	220	260	230	242,5	0,49
2.5	420	380	390	370	390,0	0,79
2.6	380	350	340	320	347,5	0,71
2.7	300	310	330	320	315,0	0,64
2.8	320	270	320	290	300,0	0,61

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo C

3º plano experimental

Ensaio	Resistência (N)					Resistência (MPa)
	1	2	3	4	Média	
3.1	260	250	260	280	263	0,53
3.2	170	190	170	180	178	0,36
3.3	500	500	450	460	478	0,97
3.4	330	320	320	320	323	0,66

1.2 Influência da granulometria das EIRSU na resistência à compressão

4º plano experimental

☞ MATRIZ A

Ensaio	Resistência (N)					Resistência (MPa)
	1	2	3	4	Média	
4. A1	770	690	810	800	768	1,56
4. A2	1360	1260	1450	1290	1340	2,73
4. A3	1510	1650	1710	1590	1615	3,29
4. A4	510	540	570	580	550	1,12

☞ MATRIZ B

Ensaio	Resistência (N)					Resistência (MPa)
	1	2	3	4	Média	
1 (45g)	1020	1250	1240	1220	1183	2,41
2 (45g)	1450	1730	1570	1520	1568	3,19
3 (45g)	1930	1770	1740	1840	1820	3,71
4 (45g)	800	770	820	870	815	1,66

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo C

1.3 Incorporação de CIRSU nas misturas

5º plano experimental

Ensaio	Resistência (N)					Resistência (MPa)
	1	2	3	4	Média	
5.1	329,2	238,2	285,1	259,3	278	0,57
5.2	371,8	357,1	353,3	362,2	361	0,74
5.3	387,4	481,1	454,6	403,4	432	0,88
5.4	409,7	394,1	366,5	405,3	394	0,80

1.4 Deposição controlada

Ensaio	Resistência (N)					Resistência (MPa)
	1	2	3	4	5	
M1	530	570	530	540	680	570,00
M2	340	470	420	460	450,0	428,00
M3	420	390	390	360	550,0	422,00

1.5 Aplicação das EIRSU como inerte e aglomerante

☞ Razão cimento:areia = 1:3

Ensaio	Resistência (N)					Resistência (MPa)
	1	2	3	4	Média	
Padrão	2,82	3,46	3,08	0,00	2340,00	4,77
M1	3,17	3,35	2,58	3,54	3160,00	6,44
M2	2,19	2,65	2,37	2,54	2437,50	4,96
M3	2,43	2,23	2,26	2,23	2287,50	4,66
M4	1,49	1,87	2,18	1,70	1810,00	3,69

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo C

Razão cimento:areia = 1:5

Ensaio	Resistência (N)					Resistência (MPa)
	1	2	3	4	Média	
Padrão	2,68	2,87	2,67	2,79	2753	5,61
M1	1,30	1,66	2,40	1,98	1835	3,74
M2	1,99	2,18	1,90	2,06	2033	4,14
M3	1,66	1,48	1,55	1,59	1570	3,20
M4	1,56	1,89	1,64	1,79	1720	3,51

1.6 Misturas óptimas

$d_{máx} = 125$

Ensaio	Resistência (N)					Média	Resistência (MPa)
	1	2	3	4	5		
Mópt1	540	400	440,0	490	430	460,0	0,94
Mópt2	640	660	580	650,0	720,0	650,0	1,32

$d_{máx} = 500$

Ensaio	Resistência (N)					Média	Resistência (MPa)
	1	2	3	4	5		
Mópt1	400	620	490,0	500	480	498,0	1,01
Mópt2	570	500	440	460,0	470,0	488,0	0,99

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo C

2. CÁLCULO DO VOLUME DE VAZIOS

☞ 1º plano experimental

Nº do ensaio	Volume 45g (cm ³)	V Molde-V45g (cm ³)
1.1	25,7	-1,2
1.2	25,0	-0,5
1.3	24,5	0,0
1.4	23,8	0,8
1.5	24,5	0,1
1.6	23,7	0,8
1.7	23,2	1,3
1.8	22,5	2,1
1.9	24,7	-0,2
1.10	24,0	0,6
1.11	23,5	1,0
1.12	22,8	1,8
1.13	23,5	1,1
1.14	22,7	1,8
1.15	22,2	2,3
1.16	21,5	3,1

☞ 2º plano experimental

Nº do ensaio	Volume 45g (cm ³)	V Molde-V45g (cm ³)
2.1	26,4	-1,9
2.2	25,6	-1,1
2.3	25,2	-0,6
2.4	24,4	0,1
2.5	25,4	-0,9
2.6	24,6	-0,1
2.7	24,2	0,4
2.8	23,4	1,1

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo C

» 3º plano experimental

Nº do ensaio	Volume 45g (cm ³)	V Molde-V45g (cm ³)
3.1	21,7	2,8
3.2	24,4	0,1
3.3	25,2	-0,7
3.4	21,8	2,7

» 5º plano experimental (ensaios para deposição)

» 4º plano experimental

MATRIZ A

Nº do ensaio	Volume 45g (cm ³)	V Molde-V45g (cm ³)
4. A1	25,7	-1,2
4. A2	23,2	1,3
4. A3	23,7	0,8
4. A4	23,8	0,8

MATRIZ B

Nº do ensaio	Volume 45g (cm ³)	V Molde-V45g (cm ³)
4. B1	24,7	-0,2
4. B2	22,2	2,3
4. B3	22,7	1,8
4. B4	22,8	1,8

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo C

» 5º plano experimental

Nº do ensaio	Volume 45g (cm ³)	V Molde-V45g (cm ³)
5.1	21,9	2,6
5.2	24,6	0,0
5.3	25,5	-1,0
5.4	22,1	2,4

» 6º plano experimental (ensaios para deposição)

Nº do ensaio	Volume 45g (cm ³)	V Molde-V45g (cm ³)
M1	22,9	1,6
M2	27,8	-3,3
M3	19,5	5,0

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo C

3. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS ENSAIADAS, EM QUE SE UTILIZOU A FRACÇÃO DE EIRSU < 0,5 mm

Distribuição granulométrica das misturas do 4º plano experimental

CALIBRE (mm)	MISTURAS							
	4. A1 (%)	4. A2 (%)	4. A3 (%)	4. A4 (%)	4. B1 (%)	4. B2 (%)	4. B3 (%)	4. B4 (%)
0,5	1,83	1,85	1,91	1,43	1,88	1,91	1,96	1,49
1	3,51	3,37	3,48	2,75	3,71	3,56	3,68	2,95
1,5	4,88	4,51	4,66	3,81	5,23	4,86	5,01	4,17
2	6,21	5,64	5,88	4,92	6,71	6,14	6,39	5,42
3	8,67	7,82	8,13	6,84	9,46	8,61	8,92	7,63
4	12,32	11,27	11,65	9,68	13,46	12,41	12,79	10,83
6	15,19	14,11	14,64	12,04	16,56	15,48	16,01	13,41
8	18,69	17,65	18,37	14,91	20,29	19,25	19,97	16,51
12	24,44	23,52	24,62	19,69	26,28	25,36	26,46	21,53
16	29,05	28,09	29,63	23,64	30,97	30,01	31,55	25,57
24	36,54	35,00	37,55	30,32	38,42	36,89	39,44	32,20
32	43,01	40,71	44,27	36,22	44,76	42,46	46,02	37,97
45	51,54	47,93	52,80	43,87	52,99	49,39	54,25	45,32
53	56,36	52,00	58,18	48,92	57,63	53,27	59,45	50,19
63	60,94	55,73	62,95	53,42	62,01	56,81	64,03	54,50
75	65,29	59,23	67,54	57,83	66,17	60,11	68,42	58,70
90	69,06	62,15	71,20	61,36	69,74	62,83	71,88	62,04
106	72,02	64,40	74,01	64,11	72,54	64,92	74,53	64,63
125	74,51	66,25	76,25	66,31	74,88	66,62	76,62	66,68
150	76,52	67,67	77,63	67,71	76,75	67,90	77,86	67,94
180	78,82	69,84	79,44	69,88	78,95	69,97	79,56	70,00
212	80,66	71,75	80,94	71,78	80,71	71,80	80,99	71,83
250	82,22	73,59	82,31	73,61	82,23	73,60	82,32	73,62
300	86,91	80,40	86,91	80,41	86,90	80,39	86,90	80,41
355	91,49	87,23	91,48	87,25	91,49	87,23	91,48	87,24
425	97,27	95,90	97,26	95,90	97,27	95,90	97,26	95,90
500	100	100	100	100	100	100	100	100
600	100	100	100	100	100	100	100	100
850	100	100	100	100	100	100	100	100

ESCÓRIAS DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ALTERNATIVAS DE GESTÃO

Anexo C

Distribuição granulométrica das misturas realizadas “para deposição”

CALIBRE (mm)	MISTURAS		
	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)
0,5	1,70	1,90	2,27
1	3,37	3,67	4,37
1,5	4,76	5,09	6,08
2	6,11	6,49	7,66
3	8,56	8,99	10,66
4	12,09	12,65	15,09
6	14,81	15,56	18,45
8	18,09	19,10	22,52
12	23,44	25,08	29,28
16	27,80	30,12	34,76
24	35,11	38,88	43,83
32	41,57	46,78	51,79
45	50,20	57,45	62,69
53	55,13	63,76	68,11
63	59,86	69,75	73,65
75	64,38	75,53	78,85
90	68,33	80,54	83,71
106	71,45	84,49	87,60
125	74,09	87,83	91,03
150	76,25	90,39	94,21
180	78,68	92,62	96,77
212	80,60	94,18	98,47
250	82,21	95,22	99,47
300	86,91	96,68	99,91
355	91,50	97,87	99,99
425	97,27	99,32	100
500	100	100	100
600	100	100	100
850	100	100	100





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO DEPGEF

prodep

PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO EDUCATIVO PARA PORTUGAL



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu

Nome: Helena Maria Pimentel de Figueiredo
Fonseca Lopes Dias
Curso: Eng^a do Ambiente
Datas: 02/01/97 a 30/06/97
Tema: Escórias da incineração de resíduos sólidos urbanos alternativas de gestão
Empresa: LIPOR
Concurso: 3/96 – PRODEP II – Medida 5/Ação 5.2 - Estágio