Nuno Lapa[1]
Universidade Nova de Lisboa (UNL), Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT),
Unidade de Biotecnologia Ambiental (UBiA);
Campus da Caparica, Ed. Departamental, 3º piso, gab. 377, 2829-516 Caparica, Portugal;
Email: ncsn@fct.unl.pt

Incorporação de Cinzas de Fundo em Novos Materiais para a Construção Civil

Resumo

No presente trabalho apresentam-se algumas das principais propriedades das cinzas de fundo (escórias), produzidas nas centrais de incineração de RSU, que podem condicionar a sua valorização na área da construção civil. São também referidas as principais aplicações através das quais estes materiais são habitualmente valorizados e discutem-se algumas utilizações potenciais alternativas à clássica valorização na construção rodoviária. São discutidas, em especial, as possibilidades de valorização na produção de betão, com resistência mecânica média (20-25 MPa), para a aplicação em construções de paredes-diafragma, no sub-solo, assim como na produção de materiais com reduzida resistência mecânica (<20 MPa), destinados ao enchimento de antigas minas e pedreiras.

Tendo em conta o potencial ecotóxico destes materiais, apresentam-se, de uma forma resumida, as normas legislativas e os regulamentos ambientais, mundialmente mais avançados, que regulamentam a utilização de resíduos na construção civil. Em particular, são apresentados os enquadramentos legislativos da França, da Alemanha e da Holanda. É ainda discutida a situação legislativa da UE, quer em matéria de classificação das escórias, quer da sua valorização na construção civil.

Por fim, efectua-se uma breve descrição do projecto europeu VALOMAT, em que a UBiA-FCT-UNL participou, e enunciam-se os seus principais resultados.

Palavras-chave: Incineração de RSU; Cinzas de fundo (escórias); valorização em materiais para a construção civil; ecocompatibilidade

Abstract

This paper shows some of the main properties of the bottom ashes produced in municipal solid waste incineration plants, which may restrict their use in the civil engineering activities. It is also referred the main applications through which these waste materials are usually re-used and it is discussed some potential uses that can be promising alternatives to the classical use in road construction. The applications in the production of concrete with medium mechanical strength (20-25 MPa) for the construction of underground diaphragm-walls and in the production of mortars with low mechanical strength (<20 MPa) for mine and quarry backfilling are

1 - Professor Auxiliar da UNL na área da Engenharia do Ambiente.

discussed.

Taking into account the ecotoxic potential of the bottom ashes, it is shown the most developed environmental legislation in the world that regulates the use of these residue materials in the civil engineering works. The legislative frameworks of France, Germany and Netherlands are shown. It is also discussed the present situation in the European Union about the classification of the bottom ashes and their re-use in the civil engineering activities.

Finally, a short description of the VALOMAT European project, in which UBiA-FCT-UNL has participated, is shown and a brief description on its results is done.

Keywords: Municipal solid waste incineration; Bottom ashes; Re-use in civil engineering materials; Eco-compatibility assessment

1. Algumas Propriedades Físicas e Químicas das Cinzas de Fundo (escórias) Resultantes da Incineração em Massa de RSU

A valorização das escórias das centrais de incineração em massa de RSU, na produção de materiais para a construção civil, depende, significativamente, da composição desses materiais e das suas propriedades físicas e químicas. Uma vez que as escórias são utilizadas, em larga medida, como substitutos dos agregados clássicos, habitualmente empregues nos materiais de construção civil, a viabilidade técnica da sua utilização neste sector encontra-se fortemente condicionado pelo grau de similitude entre as propriedades físicas e químicas destes materiais e as dos agregados clássicos.

Como refere Bruder-Hubscher (1998), as escórias das unidades de incineração em massa de RSU têm um aspecto semelhante a uma areia grosseira, de cor acinzentada, com composição significativamente heterogénea. Nelas podem ser encontrados materiais metálicos, vidro e cerâmica.

O aspecto visual e a composição das escórias são afectados pelos processos de tratamento a que estas são submetidas, antes da sua valorização. Estes processos variam de unidade de incineração para unidade de incineração, podendo envolver diferentes tecnologias de arrefecimento, de separação de materiais por dimensão das partículas e/ou por características magnéticas, bem como de maturação e armazenamento na unidade de incineração. Apresentam-se, seguidamente, algumas das principais características dessas escórias, que mais directamente podem afectar, positiva ou negativamente, o nível e o tipo de valorização destes materiais.

1.1. Fracção de materiais rejeitados (não submetidos a valorização)

O tratamento das escórias origina a produção de uma fracção inicial, designada por materiais rejeitados, que não é submetida a valorização. A proporção dos materiais rejeitados depende da composição dos RSU em materiais metálicos e inertes, bem como dos tipos e da eficiência dos processos de separação utilizados.

Relativamente aos materiais inertes presentes nos RSU, estima-se que 90 a 95% da massa inicial destes materiais sejam transferidos para as escórias (Bruder-Hubscher, 1998). No que respeita aos processos de separação utilizados, a fracção de partículas, inicialmente eliminada, é separada da restante massa das escórias pela dimensão das suas partículas. Na Europa, a fracção dos materiais rejeitados é frequentemente obtida pela crivagem das escórias por crivos com malhas de dimensão igual a 40 mm.

Nos EUA, esta fracção pode corresponder a dimensões superiores a 19 mm ou a 50 mm, dependendo do tipo de valorização previsto para as escórias (Chandler *et al.*, 1997).

Os trabalhos de Lundvigsen e Hjelmar (1992), realizados em centrais de incineração na Dinamarca, indicaram que a fracção dos materiais rejeitados pode variar entre 1,3 e 22,7% da massa húmida das escórias produzidas. Os trabalhos de Chesner *et al.* (1988) e de Eighmy *et al.* (1992), realizados em unidades de incineração de RSU, nos EUA, apontaram para percentagens de materiais rejeitados variando entre 2,4 e 66,0%.

1.2. Fracção das escórias obtidas após a remoção dos materiais rejeitados

A fracção dos materiais que atravessam os crivos de classificação é constituída, fundamentalmente, por materiais metálicos, cuja percentagem, em matéria seca, pode variar entre 3,0 e 46,9%, e por materiais vitrificados indiferenciados, cuja percentagem, em matéria seca, pode variar entre 27,0 e 61,8%. Estes dois tipos de materiais, quando somados, correspondem, em média, a cerca de 50,0% das escórias que atravessam os crivos de classificação. No Quadro1 apresentam-se alguns valores médios da composição da fracção de escórias que não é retida nos crivos de classificação.

O vidro pode ser encontrado em percentagens que variam entre 10,8 e 44,9% e, de um modo geral, este material corresponde à maior fracção de todos os materiais presentes. Os materiais cerâmicos, os orgânicos e as pedras representam, em geral, uma fracção reduzida na massa das escórias resultantes do processo de classificação das escórias por dimensão das partículas.

1.3. Teor de água

O teor de água nas escórias é muito variável entre diferentes centrais de incineração e pode apresentar também uma acentuada variabilidade sazonal, para a mesma central de incineração.

Quadro 1 - Composição média, estabelecida por classificação visual, das escórias que não são retidas nos crivos de classificação, em centrais de incineração de RSU

País	Unidade de incineração	Composição (% ms[7])						Ref. bibliog.
		Metais	Materiais vitrificados	Pedras	Vidro	Cerâmica	Orgânicos	
Holanda	"Amsterdam"[1]	3	27	34	27	5	4	Stoelhorst (1991)
	"Dordrecht"[1]	5	29	26	27	7	6	
	"Den Haag"[1]	7	38	21	21	9	4	
	"Rotterdam"[1]	6	32	30	20	5	7	
Suécia	"Malmöe"[2]	n.d.[6]	45,0	8,7	44,9	1,3	0,1	Hartlén e Lundgren (1991)
	"Malmöe"[3]	n.d.	55,6	2,0	40,0	2,4	n.d.	
	"Malmöe"[4]	n.d.	50,6	10,1	35,9	3,4	n.d.	
EUA	"Babylon, NY"[5]	24,2	61,7	n.d.	10,8	3,3	0,0	LIRPB (1992)

[1] fracção de dimensão <50 mm; [2] fracção de dimensão entre 5,6 e 8,0 mm; [3] fracção de dimensão entre 8,0 e 11,2 mm; [4] fracção de dimensão entre 11,2 e 50,0 mm; [5] fracção de dimensão entre 6,4 e 50,8 mm; [6] n.d.: não determinado; [7] ms: matéria seca

Quadro 2 - Teores de humidade determinados em diferentes amostras de escórias de centrais de incineração de RSU

País	Unidade de incineração	Teor de humidade (% mh[7])				Ref. bibliog.
		min	Máx	Média	n	
Suécia	"Malmöe"	n.d.[5]	n.d.	16,4	13	Hartlén e Rogbeck (1989)
	"Malmöe"	n.d.	n.d.	22,9	5	
França	Amostra fornecida pela YPREMA[1]	n.r.[6]	n.r.	22,1	n.r.	Quenee *et al.* (2000)
	Amostra fornecida pela YPREMA[2]	n.r.	n.r.	11,5	n.r.	
EUA	"Brooklyn, NY"[3]	11,3	72,5	27,9	62	Chesner *et al.* (1988)
	"Concord, NH"[4]	23,6	65,2	37,8	65	Eighmy *et al.* (1992)

[1] fracção de dimensão entre 0 e 5 mm; [2] fracção de dimensão entre 5 e 20 mm; [3] fracção de dimensão <50,8 mm; [4] fracção de dimensão <19,0 mm; [5] n.d.: não determinado; [6] n.r.: não referido; [7] mh: matéria húmida

A variabilidade deste parâmetro relaciona-se, fundamentalmente, com o tipo de sistema de arrefecimento das escórias. Os sistemas constituídos por tanques de água, nos quais as escórias são mergulhadas, produzem um material com maior teor de humidade do que os sistemas de arrefecimento constituídos por aspersores, através dos quais a água é distribuída sobre a massa de escórias a elevada temperatura.

1.4. Conteúdo em materiais ferrosos

Apesar de um número importante de centrais de incineração de RSU dispor de sistemas de recuperação de metais, em particular ferrosos, as escórias resultantes dos processos separativos apresentam, de uma forma geral, teores destes materiais que podem variar entre 0,4 e 43,5%, em massa seca.

Tal como se indica no Quadro 3, os valores médios dos materiais ferrosos, determinados em amostras colhidas em unidades de incineração da Holanda e dos EUA, variaram entre 1,3 e 25,8%, em função da massa seca.

A variabilidade associada a este parâmetro é devida, sobretudo, aos seguintes factores:

a) Existência de sistemas de recolha selectiva de metais, nos sistemas de recolha dos RSU;

b) Eficiência dos sistemas de recolha selectiva de metais;

c) Diferentes metodologias laboratoriais utilizadas na quantificação da fracção relativa aos metais ferrosos.

Quadro 3 - Teores de metais ferrosos em escórias de centrais de incineração de RSU

País	Unidade de incineração	Teor de materiais ferrosos (% ms)				Ref. bibliog.
		min	Máx	Média	n	
Holanda	AVI 1[1,2]	0,4	4,4	1,3	29	TAUW (1988)
	AVI 2	0,6	8,7	3,2	26	
	AVI 3	0,9	3,6	2,3	26	
	AVI 4	0,6	3,3	1,6	20	
EUA	Concord, NH[2,3]	13,4	43,5	25,8	72	Eighmy *et al.* (1992)

[1] Fracção inferior a 45 mm; [2] Método de separação magnética; [3] Fracção inferior 19mm

1.5. Conteúdo em partículas finas e grosseiras

A concentração de partículas finas, nas escórias das centrais de incineração de RSU, é um parâmetro importante para a valorização destes

materiais na construção civil. A presença de teores elevados destas partículas gera, habitualmente, problemas relacionados com a durabilidade dos materiais de construção civil obtidos a partir delas.

A fracção das partículas finas, entendida, na Europa, como o conjunto de partículas com dimensão <63 µm e, nos EUA, com dimensão <75 µm, apresenta, geralmente, uma elevada capacidade de absorção de água. Sob condições de temperaturas ambientais reduzidas que podem conduzir à congelação da água, os materiais de construção, constituídos por estas partículas, podem apresentar uma acentuada degradação da sua estrutura, com a consequente redução da sua durabilidade. Este processo é devido, essencialmente, à formação dos cristais de gelo que, ao expandirem, geram tensões na estrutura interna dos materiais, podendo conduzir à sua desagregação.

Com base nos trabalhos de Chesner *et al.* (1988), TAUW (1988), Vehlow (1992) e Eighmy *et al.* (1992), é possível concluir que a fracção das partículas finas apresenta uma massa com valores médios entre 1,9 e 7,4% da massa seca de escórias, podendo encontrar-se valores mínimos na ordem de 1,0% e máximos na ordem de 10,1%.

Relativamente às fracções das partículas com dimensões superiores às anteriormente referidas, estas são mais representativas e, em geral, apresentam uma distribuição equitativa das suas massas secas pelas fracções com diferentes dimensões. Esta característica física é ilustrada na Fig. 1, onde se pode observar uma distribuição equilibrada da massa seca pelas fracções com diferentes dimensões.

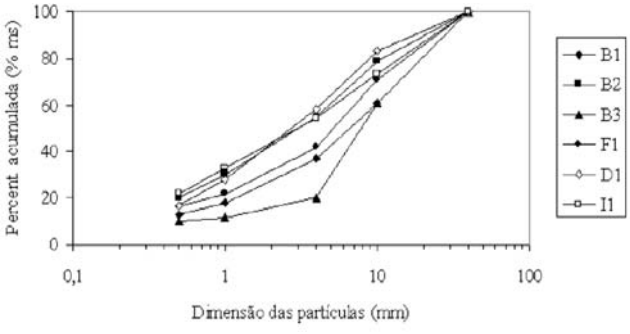
Esta distribuição equilibrada da massa das partículas, pelas diversas fracções de diferentes dimensões, contribui para a compactabilidade destes materiais, o que favorece a sua valorização como agregados substitutos dos agregados naturais, nos materiais de construção civil.

.1.6. Composição mineralógica geral

As escórias das centrais de incineração de RSU são constituídas, sob o ponto de vista mineralógico, por uma mistura de óxidos silico-aluminados de cálcio e de sódio, nos quais se encontram também óxidos de ferro, chumbo, zinco, manganésio e cobre.

A composição elementar destas escórias é próxima da composição de algumas rochas eruptivas, como, por exemplo, os granitos e os basaltos (Belevi e Baccini, 1989). A utilização da tecnologia de difracção de raios-X (XRD), habitualmente aplicada em estudo geo-mineralógicos, permitiu identificar, em diversos estudos, um conjunto muito diverso de óxidos, hidróxidos e outros sais, os mais importantes dos quais se apresentam no Quadro 4.

Figura 1 Distribuição acumulada, por diferentes classes granulométricas, das partículas existentes em seis escórias diferentes, recolhidas em diferentes centrais europeias de incineração em massa de RSU



Quadro 4. Principais fases minerais presentes nas escórias das centrais de incineração de RSU

Fases Minerais	Ref. bibliog.	Fases Minerais	Ref. bibliog.	Fases Minerais	Ref. bibliog.
SiO_2 $CaCO_3$ Fe_3O_4 Fe_2O_3 Fe FeO $Ca_2Al(OH)_7.6,5H_2O$ $Na_2Si_2O_5$ $CaSO_4$ $(Ca,Na)(Al,Si)_2O_8$ $NaAlSi_3O_8$	Stämpfli *et al.* (1992)[1]	Fe_3O_4 SiO_2 $(Ca,Na)_2(Al,Mg)(Al,Si)_2O_7$ $CaCO_3$ $KAlSi_3O_8$ $NaAlSi_3O_8$ $CaAl_2Si_2O_8$ $FeCr_2O_4$ $Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$ Fe_2SiO_4 Cr_2O_3 Fe_2O_3 $CaMgSiO_4$ Al_2O_3 $Ca(OH)_2$ $CaSO_4$	Vehlow *et al.* (1992)[2]	$Ca_2Al_2SiO_7$ $MgCa_2Si_2O_7$ Fe_3O_4 $FeAl_2O_4$ SiO_2 $Ca_3(PO_4)_2$ Fe_2O_3 $CaSO_4$ CaO $Al(OH)_3$ NaCl $ZnCl_2$ $NaAlSi_3O_8$ Al_2SiO_5 TiO_2	Eighmy *et al.* (1994)[3]

[1] Técnicas XRD; [2] Técnicas XRD e petrografia; [3] Técnicas XRD, petrografia e microscopia de varrimento

As proporções das fases minerais podem variar entre centrais de incineração e, para a mesma central, pode observar-se alguma variabilidade ao longo do tempo, devido, sobretudo, à variabilidade da composição dos RSU.

1.7. Alcalinidade das escórias

As escórias das centrais de incineração de RSU apresentam um valor de pH, em água, que pode variar entre 10,5 e 13. Estes valores extremos são devidos, pelo menos em parte, à hidratação dos óxidos, nomeadamente do óxido de cálcio (CaO), que originam a formação de hidróxidos de cálcio e magnésio.

Para além do elevado valor do pH, estas escórias apresentam, também, um poder tampão relativamente elevado, o que condiciona, necessariamente, a lixiviação de elementos químicos, como, por exemplo, os metais pesados que estão presentes na sua composição.

O poder tampão das escórias é determinado pela capacidade de neutralização por ácido nítrico (teste ANC). Este parâmetro mede o número de miliequivalentes de ácido que é necessário para reduzir o valor inicial do pH, de um grama de escórias, até um valor final de 4,3. Segundo os trabalhos de Sawell e Constable (1988), Sawell *et al.* (1989) e Eighmy *et al.* (1992), são necessários entre 1,2 e 4,1 meq de HNO_3, por grama de escórias secas, para reduzir o pH do lixiviado para um valor situado entre 7,0 e 4,3. Estes resultados indicam que o poder tampão das escórias é relativamente elevado, o que significa que estes materiais apresentam uma resistência elevada às alterações do pH do meio em que se encontram.

1.8. Composição química elementar das escórias

A composição química elementar das escórias, provenientes da incineração dos RSU, é variável e depende de quatro factores principais:

a) Composição química dos RSU submetidos a incineração;

b) Volatilidade dos elementos químicos;

c) Tipos de forno e de grelhas utilizados no sistema de combustão;

d) Operação do sistema de combustão.

De acordo com os dados de Chandler *et al.* (1997), podem ser encontrados cerca de 50 elementos químicos nas escórias das unidades de incineração de RSU. Todavia, a concentração desses elementos químicos é muito variável, podendo distinguir-se os constituintes principais, ou "constituintes maiores", com concentrações superiores a 10 $g.kg^{-1}$, os constituintes de menor concentração, ou "constituintes menores", com concentrações entre 1 e 10 $g.kg^{-1}$, e

os elementos vestigiais, ou “elementos traço”, com concentrações inferiores a 1 $g.kg^{-1}$.

No Quadro 5 apresentam-se as composições médias elementares, indicadas por diversos autores, das escórias de unidades de incineração de RSU. Neste quadro são ainda apresentados os valores médios da composição elementar da litosfera e as gamas de variação da composição elementar de diferentes solos.

A comparação dos dados obtidos na caracterização elementar das escórias, com os valores médios da composição da litosfera e com as gamas de variação da composição dos solos, indicadas por Lindsay (1979), permite concluir que aquele tipo de material se encontra mais enriquecido em constituintes menores e vestigiais do que a litosfera terrestre e os solos provenientes de diversos continentes.

Esta conclusão é particularmente evidente para alguns metais, como, por exemplo, o Cu, o Cr, o Pb, o Zn, o Ni e o Cd. Ela conduz, necessariamente, à necessidade de se averiguar qual o risco da contaminação ambiental que está associado à utilização, na construção civil, de materiais contendo este tipo de escórias. Em termos práticos, a questão que poderá ser

Quadro 5. Composição elementar das escórias de centrais de incineração de RSU, da litosfera e de solos

Tipo de elementos	Elementos químicos	Concentração nas Escórias ($g.kg^{-1}$ ms)						Litosfera ($g.kg^{-1}$ ms)	Solos ($g.kg^{-1}$ ms)
		Belevi *et al.* (1992)	Wiles (1994)	Le Goux e Le Douce (1995)	Hjelmar (1996)	Chandler *et al.* (1997)	Alba *et al.* (1997)	Lindsay (1979)	
Constituintes principais	Al	50-65	22-73	58-143	47-72	21,9-72,8	90	81	10-300
	C	n. r.	n. r.	n. r.	n. r.	10,0-60,0	n. r.	0,95	n. r.
	Ca	100-110	37-120	70-110	65-97	0,37-123	105	36	7-500
	Fe	55-110	4-150	14-70	27-150	4,10-150	73	51	7-550
	K	13-15	0,8-15	8-32	9,2-22	0,75-16,0	13	26	0,4-30
	Na	23-42	3-42	15-30	22-41	2,87-42,0	26	28	0,75-7,5
	O	n. r.	n. r.	n. r.	n. r.	400-500	n. r.	465	n. r.
	S	2-5	n. r.	n. r.	1,3-8	1,0-5,0	n. r.	0,6	0,03-10
	Si	220-260	91-310	120-230	210-290	91-308	183	276	230-350
Constituintes menores	Cl^-	1-4	n. r.	n. r.	1,2-3,2	0,8-4,2	n. r.	0,5	0,02-0,9
	Cr	n. r.	n. r.	n. r.	0,23-0,60	0,023-3,17	n. r.	0,2	0,001-1,0
	Cu	1-3	n. r.	n. r.	0,9-4,8	0,19-8,24	n. r.	0,07	0,002-0,1
	Mg	14-16	0,4-26	12-30	7,7-19	0,4-26,0	11	21	0,6-6,0
	Mn	n. r.	0,07-2	n. r.	<0,7-1,7	0,083-2,4	0,6	0,9	0,02-3,0
	P	5-6	1-6	4-26	2,9-13	1,4-6,4	9	1,2	0,2-5,0
	Pb	0,9-14	n. r.	n. r.	1,3-5,4	0,098-13,7	n. r.	0,016	0,002-0,2
	Ti	4-6	2-9	3-12	3,2-7,2	2,6-9,5	5	6,0	1-10
	Zn	1-4	n. r.	n. r.	1,8-6,2	0,613-7,7	n. r.	0,08	0,01-0,3
Constituintes vestigiais	As	n. r.	n. r.	n. r.	0,019-0,080	0,00012-0,189	n. r.	0,005	0,001-0,05
	Cd	0,004-0,014	n. r.	n. r.	0,0014-0,040	0,0003-0,0705	n. r.	0,0002	0,00001-0,0007
	F	n. r.	n. r.	n. r.	n. r.	0,2-1,1	n. r.	0,63	0,01-4,0
	Hg	0,0001-0,0003	n. r.	n. r.	<0,00001-0,003	0,00002-0,0078	n. r.	0,0001	0,00001-0,0003
	Ni	n. r.	n. r.	n. r.	0,060-0,19	0,007-4,3	n. r.	0,1	0,005-0,5

ms: matéria seca; n. r.: não referido

colocada é a de se saber, perante a evidência de um enriquecimento químico das escórias em alguns elementos tóxicos, relativamente, por exemplo, aos agregados naturais, se a sua aplicação em materiais de construção civil poderá, ou não, traduzir-se num aumento da contaminação ambiental?

A resposta a esta questão não é simples, uma vez que envolve um conjunto de factores muito diversificados. Em primeiro lugar, é importante referir que a composição elementar das escórias, assim como de qualquer outro material, não traduz a disponibilidade dos elementos químicos que se encontram na sua composição.

Com efeito, a estrutura química em que se encontram integrados pode condicionar a sua libertação para o ambiente em que os materiais de construção serão utilizados.

Para além disso, a utilização das escórias em materiais de construção civil pode envolver um conjunto de pré-tratamentos que contribuem para a redução do seu nível de contaminação e para o aumento do nível de estabilização química. Em muitos casos, a utilização das escórias em materiais de construção civil envolve a sua incorporação em matrizes de cimento, as quais contribuem para a redução da emissão dos elementos químicos poluentes. Esta redução resulta de dois processos essenciais: retenção química, por incorporação dos elementos na matriz de cimento através de reacções químicas, e retenção física, por encapsulação.

As condições ambientais, a que os materiais de construção estarão submetidos, poderão também ser determinantes nos processos de emissão de poluentes. Neste âmbito, as condições de pH e temperatura do meio, as razões líquido / /sólido (L/S) a que os materiais são submetidos, as condições de oxidação-redução do meio, a duração e a extensão dos ciclos de congelação/descongelação e humidificação/secagem, a actividade biológica e os teores de carbono e salinidade no meio envolvente, são alguns dos inúmeros factores que podem condicionar a emissão de poluentes a partir dos materiais (Gobbey e Perrodin, 1999; Imyim *et al.*, 2000; Quenee, *et al.*, 2000; Perrodin *et al.*, 2000; Barna *et al.*, 2000; Lapa *et al.*, 2001).

2. Usos Potenciais das Escórias das Centrais de Incineração de RSU na Construção Civil

2.1. Principais usos das escórias na construção civil e principais factores que condicionam a sua valorização

A utilização das escórias das centrais de incineração de RSU, em materiais para a construção civil, tem-se centrado sobretudo na construção de estradas ou de infra-estruturas relacionadas com os transportes rodoviários. Na Europa, a utilização das escórias, nesta área da construção civil, tem abrangido um conjunto relativamente vasto de aplicações, das quais se destacam as seguintes:

a) Aplicação como agregados reciclados na construção de estradas;

b) Aplicação como materiais granulares, utilizados como sub-base dos pavimentos de locais de parqueamento;

c) Aplicação na construção de ciclovias;

d) Aplicação em estradas não asfaltadas.

Pode considerar-se, actualmente, que o conhecimento adquirido nesta área de aplicação é já suficientemente vasto para permitir suportar actividades de reciclagem e de construção de

estradas à escala industrial. Aliás, estas actividades são já uma realidade, não apenas na Europa, mas também nos EUA. Este conhecimento pode ser considerado como comum e baseia-se em inúmeros trabalhos de investigação e desenvolvimento tecnológico que têm sido desenvolvidos nos últimos anos. De entre eles, referem-se os trabalhos de Correia e Nunes (1990), Gress *et al.* (1991), Goacolou, *et al.* (1995), Bruder-Hubscher (1998), Nicolau, *et al.* (1999), Ecke *et al.* (2001) e Pagotto *et al.* (2003).

O principal desafio que se coloca, desde cerca do início da década de 1990 até à actualidade, reside em se avaliar a possibilidade da valorização destas escórias noutros tipos de aplicações para a construção civil, como, por exemplo, na produção de betão para a construção de edifícios, de túneis subterrâneos rodoviários ou ferroviários, de paredes de reforço de taludes, ou, até mesmo, na produção de materiais que possam ser utilizados no enchimento de minas e pedreiras em fim-de-vida ou abandonadas.

Estas aplicações potenciais, que se baseiam na produção de betões estruturais, com tensões de rotura à compressão médias a altas, e de materiais com características semelhantes a betões com tensões de rotura à compressão médias a baixas, envolvem a avaliação de seis factores essenciais, necessários à tomada de decisão sobre a adequabilidade da utilização deste tipo de escórias na produção desses materiais. Esses factores são os seguintes:

a) Características mecânicas dos materiais – Tendo em conta as reduzidas resistências mecânicas das escórias, comparativamente aos agregados naturais, a sua utilização como material de substituição daqueles agregados poderá afectar as propriedades mecânicas do betão e, consequentemente, as suas aplicações potenciais.

Os trabalhos desenvolvidos pelas empresas Soletanche-Bachy e Inertec, em colaboração com a ADEME, na área da recuperação de minas abandonadas, localizadas na cidade de Caen (França) (Soletanche-Bachy *et al.*, 1998; Bouchelaghem *et al.*, 1999), demonstraram que a utilização intensiva de escórias é possível, nomeadamente, em argamassas com reduzida resistência mecânica aos ensaios de compressão simples (tensão de rotura <20 MPa) e em betões com resistência mecânica moderada (tensão de rotura entre 20 e 25 MPa). Nestes casos, podem atingir-se percentagens de substituição dos agregados naturais até cerca de 50%. A utilização de escórias em betões de elevada qualidade (tensão de rotura >25 MPa) é actualmente excluída, uma vez que as percentagens de substituição dos agregados seriam de tal modo baixas que tornariam o processo de pré-tratamento das escórias economicamente inviável;

b) Estabilidade mecânica dos materiais, a longo termo – Esta estabilidade encontra-se directamente dependente do conteúdo em sais, em particular, cloretos e sulfatos. A presença de teores elevados de cloretos provoca, geralmente, a corrosão das estruturas de reforço do betão. Os teores elevados de sulfatos poderão conduzir à formação de etringite secundária, a qual poderá dar origem ao empolamento do betão e à sua consequente degradação física, a médio e longo prazos.

O teor em materiais de pequena dimensão (finos) é também um factor determinante para a estabilidade mecânica dos betões e argamassas. Em geral, teores elevados de finos tendem a aumentar a microporosidade e o teor de água no interior destes materiais. Por um lado, o aumento da microporosidade diminui a sua resistência mecânica a tensões exteriores, e, por outro, elevados

teores de água diminuem a resistência aos ciclos de congelação / descongelação, o que diminui a sua durabilidade, a longo prazo.

Uma vez que as escórias das centrais de incineração de RSU se caracterizam pela presença de elevados teores de cloretos, de sulfatos e de materiais finos, a sua utilização, como materiais de substituição dos agregados naturais, deverá envolver um pré-tratamento que permita reduzir as fracções de menor dimensão e aquelas em que predominam os cloretos e sulfatos. O recurso a processos de lavagem, da fracção que será submetida a valorização, é muitas vezes considerado como um passo essencial para que esta atinja os requisitos mínimos para a sua incorporação em betões e argamassas (Soletanche-Bachy *et al.*, 1998). No entanto, este procedimento tende a aumentar os custos do betão, dada a necessidade de tratamento dos efluentes de lavagem das escórias;

c) Estabilidade química dos materiais, a longo termo – A estabilidade química, a longo termo, dos materiais contendo escórias é fundamental para se garantir um impacte ambiental reduzido, resultante da emissão de elementos químicos, nomeadamente elementos alcalinos, alcalino-terrosos e metais. A estabilidade química depende do nível de pré-tratamento efectuado às escórias, do nível de estabilização química induzido na fase de pré-tratamento e da incorporação no cimento, assim como da estabilidade dos materiais face às alterações químicas e biológicas do meio em que serão utilizados.

Do nível de estabilidade química dos materiais dependerão as taxas de emissão de poluentes e, consequentemente, os níveis de toxicidade e ecotoxicidade induzidos nos compartimentos ambientais localizados na sua envolvente (Magalhães *et al.*, 1999; Lapa *et al.*, 2003);

d) Produção mínima de escórias valorizáveis – A produção de argamassas e betões, através da valorização das escórias de centrais de incineração de RSU, requer a existência de dois passos fundamentais, um localizado a montante do pré-tratamento e o outro a jusante. O primeiro refere-se à determinação de algumas propriedades químicas das escórias que chegam à unidade de pré-tratamento para serem submetidas a valorização. Esta caracterização química deverá permitir avaliar a possibilidade efectiva das escórias serem valorizadas. O segundo encontra-se associado à avaliação da qualidade do material produzido pelo pré-tratamento e da sua adequabilidade para o processo de valorização que irá ser aplicado.

Estes passos do processo de valorização das escórias deverão ser executados numa unidade especialmente dimensionada para o efeito, onde se incluam medidas de protecção ambiental e de controlo da qualidade dos materiais produzidos. A construção desta unidade, embora seja efectuada junto à unidade de produção de argamassas e betões, requer, obrigatoriamente, um investimento inicial de construção e implementação que se estima ser elevado. Este custo de investimento terá que ser recuperado sobre um volume relativamente elevado de betões e argamassas, o qual deverá atingir um quantitativo crítico de 10.000 $m^3.ano^{-1}$ (Soletanche-Bachy *et al.*, 1998). Este quantitativo de materiais para a construção civil requer a disponibilidade de quantitativos elevados de escórias, em pelo menos uma central de incineração localizada na vizinhança da central de pré-tratamento e

valorização. Para além disso, as escórias produzidas deverão ter qualidade aceitável para poderem ser submetidas a este tipo de valorização;

e) Custos de transporte das escórias para a unidade de pré-tratamento e valorização – Relativamente ao aspecto económico associado ao transporte das escórias, é actualmente aceite que a unidade de pré-tratamento e valorização se deverá situar junto ao local de utilização dos materiais produzidos. Assim, as escórias deverão ser transportadas desde a central de incineração até esta unidade.

Os custos de recolha, acondicionamento e transporte das escórias assumirão, portanto, um peso significativo no custo final de produção dos materiais valorizados. Por isso, a distância da central de incineração à unidade de pré-tratamento e valorização terá um valor máximo, acima do qual aqueles custos originarão materiais com um custo final superior aos dos materiais clássicos produzidos com agregados naturais. Esta distância máxima corresponderá à distância crítica de localização da unidade de pré-tratamento e valorização, relativamente à central de incineração. Esta distância poderá ser variável de país para país, dependendo das condições económicas locais. Nas actuais condições económicas dos países europeus mais desenvolvidos, a distância crítica é de ceca de 50 km;

f) Aspectos psico-sociais e de saúde humana – A utilização de materiais para construção civil, contendo escórias, em edifícios destinados a actividades humanas com permanência prolongada, como, por exemplo, habitações, escolas, hospitais, edifícios destinados a actividades profissionais, entre outros, poderá condicionar uma reacção social adversa, motivada pela presença de resíduos nos materiais utilizados para a construção desses edifícios.

Seria assim necessário avaliar-se o risco de contaminação dos utilizadores desses edifícios, em estudos anteriores à sua utilização efectiva, por forma a garantir-se que destas aplicações não resultariam riscos significativos para a saúde humana. Todavia, foi convicção das equipas envolvidas no projecto europeu VALOMAT que, mesmo que fosse demonstrada a não perigosidade destes materiais contendo escórias, seria provável uma reacção social contrária a estes tipos de aplicação destes materiais. Considerando este aspecto, as equipas envolvidas no projecto VALOMAT decidiram que estes tipos de aplicação dos novos materiais não constituiria objecto de estudo no âmbito desse projecto. Tal decisão pode ser considerada como configurando uma aplicação directa do Princípio da Precaução.

2.2. Uso potencial das escórias em betões destinados a construções no sub-solo

As estimativas anuais do consumo de betão, na Europa, para estruturas destinadas a construções no sub-solo, atingiu, no ano de 1998, o valor de 17 Mm^3. Este valor incluía pilares para fundações, paredes de betão reforçado com aço para construções no sub-solo profundo (designadas, na terminologia portuguesa, por paredes diafragma e, na terminologia inglesa, por “Diaphragm walls” ou, apenas, “D-walls”), túneis subterrâneos e outros usos diversos.

No Quadro 6 apresentam-se as estimativas do consumo do betão para estes tipos de estruturas, no que se refere à situação europeia, em geral, e à situação francesa, em particular. Esta última é apresentada pelo facto de, neste país,

Quadro 6. Estimativa anual, efectuada em 1998, do consumo de betão na Europa e em França, para estrutu-ras destinadas a construções no sub-solo (Soletanche-Bachy *et al.*, 1998)

Tipo de estruturas	Tipo de betão	Consumo em França ($10^3 m^3.ano^{-1}$)	Consumo na Europa ($10^3 m^3.ano^{-1}$)	Taxa Típica de Utilização Min. ($10^3 m^3.local^{-1}$)	Taxa Típica de Utilização Máx. ($10^3 m^3.local^{-1}$)	Tensão de rotura (1) (Mpa)
Pilares para fundações						
Pré - fabricados	BR (2) ou BPR (3)	50	3000	10	100	>25
Fabricados no local	BR	60	6000	0,5	5	>20
Paredes diafragma						
Em betão reforçado	BR	600	2000	2	20	>20
Pré - fabricadas	BR	80	200	1	10	>25
Para confinação	BnR(4)	175	800	2	50	n.s.(6)
Túneis						
Segmentos Pré - fabricados	BR	175	1400	20	100	>25
Recuperação de minas e pedreiras						
Pedreiras em fosso	MnR (5)	100 a 1000	desconhecido	1	100	n.s.
Pedreiras em flanco	MnR	desconhecido	desconhecido	desconhecido	desconhecido	n.s.
Galerias de minas	MnR	0,1 a 1	desconhecido	0,1	1,0	n.s.

(1) Relativa a ensaios de compressão simples; (2) Betão reforçado; (3) Betão reforçado e pré-esforçado; (4) Betão não reforçado; (5) Material não reforçado; (6) Não significativo

ser também relevante, sob o ponto de vista de consumo de betão, uma outra aplicação com forte componente ambiental: a recuperação de minas e pedreiras em fim-de-vida e abandonadas.

Relativamente às aplicações nas quais a resistência mecânica dos materiais é um factor determinante para a sua utilização, a aplicação de escórias tem sido cuidadosamente avaliada, por forma a determinarem-se os efeitos da percentagem da substituição dos agregados naturais, na resistência mecânica dos materiais finais e na sua durabilidade. Os trabalhos desenvolvidos pelas empresas Inertec e Soletanche-Bachy (Bouchelaghem *et al.*, 1999) permitem concluir que a utilização de escórias na produção de betões, com elevada resistência mecânica, é difícil.

Para que os materiais atinjam uma resistência à compressão superior a 25 MPa, a percentagem de substituição dos agregados naturais deve ser inferior a 50%. Este facto dificulta o retorno económico do investimento de construção da unidade de pré-tratamento das escórias, uma vez que torna o betão substituído mais caro do que o betão produzido com agregados clássicos.

Conclui-se, assim, que as construções no sub-solo, que necessitam de betão com um valor de resistência à compressão superior a 25 MPa, não constituem, de acordo com os dados técnicos mais recentes, um mercado potencial de valorização de escórias.

No que se refere às construções, no sub-solo, que requerem betão com uma resistência

mecânica à compressão média (entre 20 e 25 MPa), a substituição dos agregados pode atingir uma percentagem de 50% em massa. Nesse caso, deverá ser realizado um pré-tratamento de redução do teor em metais e sais, assim como de fixação química de alguns poluentes, nomeadamente, de metais pesados.

Uma das aplicações de betão, no sub-solo, que maior interesse pode suscitar para a valorização das escórias é a construção de paredes diafragma, com betão não reforçado, destinadas a desempenharem uma função física de confinação (barreiras de confinação). Estas barreiras são habitualmente construídas nas fronteiras de locais poluídos, submetidos ou não a processos de recuperação, com o objectivo principal de limitarem a dispersão dos poluentes para áreas vizinhas não contaminadas. Assim, a principal característica física destas barreiras deverá ser a sua reduzida permeabilidade a materiais líquidos ou semi-líquidos.

A resistência mecânica destas paredes assume um papel secundário, sendo muitas vezes utilizados betões com níveis de resistência à compressão de cerca de 1 a 3 MPa. Neste caso, a utilização das escórias, como materiais de substituição dos agregados naturais, pode ser encarada, sob o ponto de vista estritamente mecânico, como uma hipótese de valorização destes materiais residuais com forte probabilidade de sucesso. Todavia, torna-se necessário avaliar o comportamento de parâmetros físicos e mecânicos, a longo prazo, de uma parede deste tipo, por forma a determinar-se se eles não são afectados pela incorporação das escórias no betão e se, consequentemente, a parede apresenta o mesmo nível de durabilidade que uma outra construída com betão composto por agregados naturais.

A valorização das escórias, por incorporação em betão destinado à construção de paredes de confinação, poderá ter associado, todavia, um problema de rentabilidade económica que se relaciona com os casos efectivos em que tal medida é utilizada. Os dados actuais indicam que surgem, anualmente, na Europa, entre cinco a dez casos em que esta solução é considerada adequada. Esta situação deixa antever que o volume de betão necessário, para este tipo de aplicação, estará abaixo do limite crítico que permite produzir betão substituído com escórias a um custo inferior ao betão constituído por agregados naturais.

Do conjunto de aplicações indicadas no Quadro 6, as mais atraentes, sob os pontos de vista mecânico e económico, são, muito provavelmente, as relacionadas com a recuperação de pedreiras e minas em fim-de-vida ou abandonadas. Este interesse prende-se com a baixa resistência mecânica que estes materiais podem apresentar, comparativamente às aplicações que requerem betões de alta e média qualidade. Além disso, são habitualmente necessários volumes de materiais relativamente elevados para preencher os volumes vazios existentes nessas minas e pedreiras.

2.3. Usos das escórias em materiais destinados à recuperação de minas e pedreiras

2.3.1. Vantagens resultantes do uso de escórias na produção de materiais de enchimento de antigas pedreiras ou minas.

Muitas minas e pedreiras, de média e de grande dimensões, localizam-se em Áreas Metropolitanas (AM) densamente povoadas, nas quais uma parte importante do problema da gestão dos RSU foi solucionado pela instalação de centrais de incineração. Deste modo, a disponibilidade de um material (escórias) com características predominantemente minerais, num

local próximo dessas antigas pedreiras ou minas e em quantidades adequadas à implementação de uma unidade de pré-tratamento e valorização, facilita a solução do problema relativo à disponibilidade de materiais destinados ao seu enchimento.

Os custos de transporte serão reduzidos, relativamente ao custo total de aplicação da técnica de renivelamento ou enchimento, dada a proximidade dos locais de produção e de utilização das escórias. Os custos de implementação e exploração de uma unidade de pré-tratamento das escórias serão compensados pelos elevados volumes de escórias que serão submetidas ao processo de estabilização. Assim, os custos de produção dos materiais contendo escórias serão tendencialmente inferiores aos custos de produção de materiais similares constituídos por inertes naturais.

No caso das actividades humanas, previstas para os antigos locais de extracção mineral, envolverem cargas estáticas ou dinâmicas reduzidas, as técnicas de renivelamento ou enchimento, com materiais caracterizados por resistências mecânicas baixas, são passíveis de serem aplicadas. Nesta situação, os materiais de enchimento podem ser constituídos por agregados com resistências mecânicas médias. As escórias apresentam resistências mecânicas adequadas para este tipo de materiais. Para além disso, as escórias apresentam uma vantagem adicional que se relaciona com o menor custo de aquisição, comparativamente aos agregados naturais.

Importa ainda salientar uma vantagem ambiental importante associada ao uso das escórias em argamassas ou betões destinados, quer ao enchimento de minas ou pedreiras, quer à construção de paredes diafragma no sub-solo. A substituição dos agregados naturais por escórias permitirá reduzir o esforço de exploração destes recursos naturais não renováveis, através da valorização de materiais residuais. Poder-se-á contribuir, assim, para a redução do esforço actual de exploração de pedreiras e areeiros.

2.3.2. Possíveis limitações associadas à valorização das escórias nos materiais de enchimento de antigas minas e pedreiras

Uma das principais limitações, associadas à valorização de escórias em materiais de enchimento de pedreiras e minas, relaciona-se com o elevado conteúdo em sais, nomeadamente, cloretos e sulfatos, e com as concentrações significativas de alguns metais na matriz sólida das escórias. Comparativamente aos agregados naturais, as escórias apresentam concentrações mais elevadas destas substâncias químicas, o que coloca, como se referiu anteriormente, problemas relacionados com a durabilidade dos materiais de enchimento, bem como com o risco da eventual contaminação dos compartimentos ambientais.

Este problema pode ser ultrapassado, contudo, através da realização de um processo preliminar de tratamento das escórias. Este deverá incluir uma fase de eliminação da fracção das escórias com maior conteúdo em elementos alcalinos, alcalino-terrosos e metais, seguida de uma fase de estabilização química dos poluentes presentes na fracção valorizável das escórias. Esta fase de estabilização deverá ser constituída, entre outros processos, pela adição de reagentes químicos específicos, que reduzam a mobilidade desses poluentes, e pela incorporação da fracção valorizável das escórias numa matriz de cimento.

O desenvolvimento deste tipo de materiais exige, naturalmente, uma avaliação rigorosa do

seu comportamento mineralógico, mecânico, químico e ecotoxicológico, em duas fases distintas desta tecnologia de valorização das escórias:

a) Durante o período laboratorial de desenvolvimento das suas formulações;

b) Durante o período experimental do seu comportamento em condições reais de utilização.

É também desejável que a utilização desta tecnologia de valorização fosse acompanhada, durante a fase de aplicação industrial, por metodologias de avaliação do comportamento dos materiais e do seu efeito sobre os compartimentos ambientais, quando submetidos a condições ambientais de variação em larga escala.

2.3.3. Características gerais dos materiais de enchimento contendo escórias

Considerando que os materiais de enchimento serão colocados nas pedreiras e nas minas através de processos de bombagem, eles devem apresentar as seguintes características, antes da solidificação:

a) Granulometria adequada ao processo de bombagem;

b) Propriedades reológicas adequadas à colocação hidráulica dos materiais nos fossos ou galerias;

c) Estabilidade física adequada, por forma a evitar processos de segregação do material;

d) Tempo de solidificação adequado ao tempo de bombagem do material para o fosso.

Após o período de solidificação do material de enchimento, este deverá apresentar as características mecânicas e químicas consideradas como adequadas para cada aplicação. Procura-se, desta forma, manter, por um lado, a estabilidade física da pedreira ou da mina recuperada e, por outro, garantir a ocorrência de taxas de libertação de substâncias químicas que não coloquem em risco a qualidade dos sistemas envolventes. Estas características devem, além disso, manter-se estáveis ao longo de todo o período de utilização do material.

3. Actos Legislativos e Regulamentos Ambientais Europeus mais importantes, Relacionados com a valorização de Resíduos na Construção Civil

Um dos principais problemas relacionados com a valorização das escórias, das centrais de incineração de RSU, na produção de materiais para a construção civil, diz respeito ao potencial tóxico que estes resíduos apresentam, comparativamente aos agregados naturais (van der Sloot, 2001; Pagotto, *et al.*, 2003). Na verdade, a estabilidade química das escórias é muito inferior à dos agregados clássicos, os quais, devido ao facto das suas taxas de libertação de substâncias químicas serem reduzidas, podem ser classificados como materiais inertes, ou, se se preferir, como materiais quimicamente estáveis.

As escórias apresentam, relativamente a alguns elementos químicos, elevadas taxas de libertação, em especial, quando em contacto com um meio aquoso. Para além disso, a variação de alguns factores ambientais, como, por exemplo, o pH, o potencial redox ou o teor em carbono orgânico, podem também fazer

variar significativamente as taxas de emissão desses elementos químicos (van der Sloot *et al.*, 2001).

Deve ainda ser referido que alguns dos elementos químicos, libertados pelas escórias, apresentam níveis de toxicidade potencialmente elevados. De entre estes, destacam-se o chumbo, o crómio e o zinco, podendo também ser detectado arsénio e mercúrio.

É importante referir que o comportamento químico das escórias, quando utilizadas como agregados sintéticos de substituição dos agregados naturais, não é necessariamente idêntico ao seu comportamento químico enquanto resíduos brutos individualizados. Na verdade, ambos os comportamentos são diferentes, devido ao facto da valorização das escórias, como agregados sintéticos, implicar a introdução destes resíduos em matrizes solidificadas, que condicionam a emissão de poluentes.

Muitos países europeus desenvolveram inúmeros trabalhos que lhes permitiram garantir a possibilidade de uso de alguns resíduos, nomeadamente, das escórias das centrais de incineração de RSU, como agregados de substituição em materiais de construção civil, em particular, na construção de estradas. Esses trabalhos permitiram o desenvolvimento de uma indústria florescente de valorização de resíduos, associada à actividade de construção civil. Este facto permite que alguns países apresentem elevadas percentagens de valorização das escórias, neste sector de actividade.

De acordo com dados de 1997 e 1998, a valorização das escórias, em materiais de construção civil, atingia, na Holanda, uma percentagem muito próxima de 100%. Na França, essa percentagem era de 30%, em 1997, mas aproximava-se de 50% no ano seguinte. Na Alemanha, era de 50%, no início de 1998. Na Dinamarca, era de cerca de 70% também no ano de 1998. Na Bélgica e na Suécia, pelo con*-trário, não se registava praticamente qualquer tipo de valorização das escórias (Bruder-Hubscher, 1998).

Em Portugal, tanto quanto se sabe no momento da redacção deste trabalho, não existe uma valorização sistemática, em materiais para construção civil, das escórias resultantes dos processos de tratamento que são realizados nas duas unidades de incineração existentes no país. Todavia, são de destacar alguns trabalhos de investigação, com o objectivo de contribuírem para a valorização destes resíduos em materiais para a construção civil (Nicolau *et al.*, 1999, 2000, 2001, 2002; LNEC, 2001; FEUP e Lipor, 2002). Fora da Europa, a valorização destes materiais é uma actividade pouco significativa. Por exemplo, segundo os mesmos dados de 1997 e 1998, a percentagem de valorização, nos EUA, era inferior a 5%, sendo maioritariamente destinada à construção de estradas. No Japão, essa percentagem era inferior a 10% e, no Canadá, era praticamente nula.

O desenvolvimento de uma indústria crescente de valorização de resíduos, em materiais de construção civil, obrigou alguns países europeus a adoptarem regulamentos legislativos e normas de utilização, de modo a fazer face às necessidades de protecção, quer dos consumidores/utilizadores, quer da saúde pública e do ambiente. Relativamente ao países europeus, destacam-se os regulamentos legislativos dos países que apresentam as maiores produções e, simultaneamente, as mais elevadas taxas de valorização de escórias. É o caso da França, da Alemanha e da Holanda.

O Ministério francês do Ambiente, a ADEME e um vasto grupo de peritos, na área da valorização de resíduos, têm vindo a trabalhar no sentido de integrar, na legislação francesa, a noção do comportamento dos resíduos, a

longo-termo, em função do cenário de exposição. Esta noção resulta do desenvolvimento do conceito de ecocompatibilidade e da aplicação da norma europeia ENV 12920.

A legislação francesa dispõe já de um instrumento importante de regulamentação da valorização de escórias das centrais de incineração de RSU. Este instrumento foi concretizado na Circular Ministerial, de 9 de Maio de 1994, na qual são definidas três categorias de escórias:

a) Categoria V (escórias valorizáveis) – Nesta categoria incluem-se todas as escórias com características adequadas à valorização directa na construção de estradas, na construção de parques automóveis e noutras aplicações. Todavia, a Circular Ministerial limita a utilização das escórias a aplicações em que os materiais não estejam em contacto directo com águas pluviais, superficiais e subterrâneas. Não é, também, autorizada a sua utilização em locais inundáveis, em locais de captação de água potável e a menos de 30 metros de cursos de água superficiais;

b) Categoria M (escórias valorizáveis, após um período de maturação) – No caso das escórias que não apresentam características adequadas à valorização imediata, estas poderão ser submetidas e um processo de maturação, com uma duração mínima de 12 meses, de modo a reduzir o seu potencial poluente. Após a aplicação do processo de maturação, se as escórias apresentarem as características compatíveis com a categoria V poderão então ser submetidas a valorização, tal como se indica para a categoria anterior. Caso contrário, elas deverão ser classificadas como pertencentes à categoria S;

c) Categoria S (escórias não valorizáveis e destinados a deposição) – Nesta categoria enquadram-se todas as escórias que, mesmo após um período de maturação de 12 meses, não apresentam as características adequadas a valorização. Estas escórias destinam-se à deposição em aterro, podendo ser submetidas a um tratamento específico, em função do seu potencial poluente.

As características que deverão ser avaliadas nas escórias, em cada uma destas categorias, são de natureza física e química, englobando os

Quadro 7 - Limites das categorias de classificação das escórias, resultantes da incineração de RSU, segundo a Circular Ministerial francesa de 9 de Maio de 1994

Caracterização	Parâmetro	Categoria V	Categoria M	Categoria S
Física	Fracção solúvel (% massa)	<5	<10	>10
	Inqueimados (%massa)	<5	<5	>5
Química ou do Potencial Poluente	As ($mg.kg^{-1}ms$)	<2	<4	>4
	Cd ($mg.kg^{-1}ms$)	<1	<2	>2
	COT ($g.kg^{-1}ms$)	<1,5	<2,0	>2,0
	Cr (VI) ($mg.kg^{-1}ms$)	<1,5	<3	>3
	Hg ($mg.kg^{-1}ms$)	<0,2	<0,4	>0,4
	Pb ($mg.kg^{-1}ms$)	<10	<50	>50
	SO_4^{2-} ($g.kg^{-1}ms$)	<10	<15	>15

seguintes parâmetros: percentagem de inqueimados, fracção solúvel e parâmetros relativos ao potencial poluente (COT, sulfatos e metais). A fracção solúvel e o potencial poluente deverão ser analisados nos lixiviados das escórias, obtidos pela norma francesa AFNOR NF X31-210 (NF X31-210, 1992), que se destina a materiais granulares. Este ensaio de lixiviação é realizado em três ciclos sucessivos de extracção, em fluxo descontínuo, cada um com uma duração máxima de 16 horas. A razão líquido/sólido (L/S) é de 10 $L.kg^{-1}$, em cada ciclo de extracção.

Os limites definidos para cada parâmetro, relativamente a cada uma das categorias de escórias, são apresentados no Quadro 7.

No que à Alemanha diz respeito, a deposição de resíduos em aterros e a sua valorização em materiais de construção civil encontram-se globalmente enquadradas pelo regulamento designado por LAGA, ou, mais abreviadamente, Guia LAGA. Este guia técnico foi elaborado pela Comissão dos Estados e dos "Länder" germânicos, com o objectivo de harmonizar, entre as diferentes regiões da Alemanha, as técnicas de análise, de classificação e de avaliação das possibilidades de valorização de resíduos. O guia LAGA é consideravelmente abrangente, no que se refere aos resíduos que se enquadram nas suas especificações técnicas. Todavia, foram também incluídas, neste regulamento, normas técnicas específi-cas de valorização de grupos bem definidos de resíduos, nomeadamente, resíduos minerais resultantes de demolições (solos, resíduos de reparação de estradas e resíduos de reparação e demolição de edifícios), cinzas e escórias das centrais de incineração de RSU e resíduos de fundições. Os locais nos quais se regista uma situação de poluição acentuada não se encontram abrangidos por este guia técnico.

O princípio geral deste guia baseia-se no reco-nhecimento de que os sub-produtos minerais, resultantes das actividades industriais, poderão ser submetidos a valorização, desde que esse procedimento não conduza a efeitos adversos no ambiente. Deste modo, os possíveis cenários de valorização dos resíduos minerais devem incluir dois critérios importantes de avaliação:

a) A composição elementar dos resíduos, no que respeita à presença de substâncias poluentes, e o seu comportamento à lixiviação a partir de uma massa representativa desses materiais;

b) O estado dos compartimentos ambientais, nos quais esses materiais residuais irão ser utilizados, nomeadamente, a qualidade do solo ou de outros substratos envolventes.

Para cada tipo de resíduos, o guia LAGA apresenta exemplos de valorização que têm em consideração as condições hidrogeológicas dos locais de utilização, as condições específicas de utilização e o tipo de utilização previsto. Para um determinado resíduo mineral, que seja enquadrado no referido regulamento, é possível ao decisor definir os eventuais cenários de valorização desse resíduo, com base em três limites designados por Z0, Z1 e Z2.

Adicionalmente a estes três limites, podem ainda ser indicados os limites Z3, Z4 e Z5, os quais são utilizados para o caso dos resíduos que não apresentam características adequadas à valorização e que, consequentemente, deverão ser depositados em aterros.

No Quadro 8 sintetizam-se os tipos de valorização e de deposição dos resíduos enquadrados pelo guia germânico LAGA.

Quadro 8. Níveis de valorização e deposição de materiais residuais, em função dos limites máximos definidos no guia germânico LAGA

Limites	Tipo de Destino	Tipo de Valorização/Tipo de Deposição
Z0	Valorização	Valorização sem restrições específicas
Z1.1		Possível valorização em condições de utilização com pleno contacto com a envolvente ambiental, mesmo em situações geológicas desfavoráveis
Z1.2		A valorização em condições de utilização com pleno contacto com a envolvente ambiental só é possível numa situação hidrogeológica favorável
Z2		Valorização sujeita a medidas adicionais de protecção dos compartimentos ambientais, nomeadamente do solo
Z3	Deposição em aterro	Deposição num aterro de classe I
Z4		Deposição num aterro de classe II
Z5		Deposição num aterro para resíduos perigosos

O regulamento germânico específica os valores limite para o caso particular da valorização de escórias das centrais de incineração de RSU. Nos Quadros 9 e 10 são apresentados esses valores limite, com base na caracterização elementar das escórias e dos lixiviados produzidos a partir destes materiais, respectivamente.

Quadro 9. Valores limite de valorização de escórias de centrais de incineração de RSU, definidos no guia germânico LAGA, com base na caracterização visual e elementar

Parâmetro	Unidade	Valor limite
Resíduo seco	sem significado	registar
Aspecto físico	sem significado	registar
Cor	sem significado	registar
Odor	sem significado	registar
Inqueimados	sem significado	O menor possível
COT	% massa	<1[(1)]
EOX	$mg.kg^{-1}$	<3

[(1)] O limite é de 3% para as centrais de incineração mais antigas

O ensaio de lixiviação deverá ser realizado segundo as especificações técnicas da norma germânica DIN 38 414-S4 (DIN 38 414-S4, 1984). Este ensaio é realizado em fluxo descontínuo, com uma razão L/S de 10 $L.kg^{-1}$ e com um período máximo de extracção de 24 horas.

Atendendo ao que se sabe relativamente ao enquadramento legislativo da valorização de resíduos, em países europeus e noutros países industrializados do mundo, pode admitir-se que a Holanda é o país com o regulamento legislativo mais avançando, no que respeita à valorização de resíduos em materiais de construção civil. Este avanço deve-se a dois factores essenciais. Por um lado, foi necessário encontrar soluções técnicas adequadas para o incremento da produção de resíduos industriais, que se observou na Holanda, desde há 20 anos. Por outro lado, devido às características geográficas particulares deste país, a protecção dos recursos aquáticos e do solo tornou-se uma prioridade, em matéria de ambiente, para as autoridades holandesas (Eikelboom *et al.*, 2003).

Quadro 10. Valores limite de valorização, para a classe Z2, de escórias de centrais de incinera-ção de RSU, definidos no guia germânico LAGA, com base na caracterização da fracção solúvel

Parâmetro	Unidade	Valor limite para a classe Z2
Cor	sem significado	registar
Odor	sem significado	registar
Turvação	sem significado	registar
Cl^-	$mg.L^{-1}$	<250
CN^- totais	$mg.L^{-1}$	<0,02
COD	$mg.L^{-1}$	será futuramente definido
Condutividade	$mS.cm^{-1}$	<6
pH	Sorensen	7-13
SO_4^{2-}	$mg.L^{-1}$	<600
As	$\mu g.L^{-1}$	será futuramente definido
Cd	$\mu g.L^{-1}$	<5
Cr	$\mu g.L^{-1}$	<200
Cu	$\mu g.L^{-1}$	<300
Hg	$\mu g.L^{-1}$	<1
Ni	$\mu g.L^{-1}$	<40
Pb	$\mu g.L^{-1}$	<50
Zn	$\mu g.L^{-1}$	<300

Assim, à medida que os estudos e as tecnologias de valorização de resíduos, na produção de materiais para a construção civil, ganhavam uma dimensão significativa, um conjunto de regulamentos legislativos foi adoptado, de modo a garantir-se a protecção e a qualidade dos recursos hídricos e dos solos. Da conjugação da necessidade de protecção destes dois recursos, nasceu um princípio original na gestão dos resíduos: a gestão dos resíduos industriais deve ser suportada, fundamentalmente, pelas tecnologias de valorização, destinadas à produção de materiais para a construção civil, em detrimento das tecnologias de deposição, sem que, todavia, o uso desses materiais represente um risco para a qualidade dos recursos hídricos e para a qualidade do solo (Schreurs, 2003). Este princípio encontra-se tecnicamente fundamentado no Decreto sobre Materiais para Construção ("Building Materials Decree", BMD).

O BMD enquadra a utilização de todos os materiais minerais na construção civil, incluindo os materiais primários e os materiais residuais. A utilização de solos, contaminados ou não contaminados, é também incluída neste decreto. Neste caso, uma vez que estes solos são utilizados como matéria-prima para a construção civil, a sua designação altera-se para "terras" em vez de "solos", por forma a ser possível distinguir-se entre as matérias-primas e os solos dos locais onde os materiais de construção serão utilizados.

O BMD foi elaborado de modo a atingir dois objectivos fundamentais:

a) Promover o uso, na construção civil, de materiais residuais, nomeadamente materiais secundários, independentemente da sua origem, tendo por base um enquadramento legislativo com forte cariz ambiental;

b) Proteger os solos, as águas subterrâneas e as águas superficiais de contaminações provenientes desses materiais de construção.

A aplicação do decreto BMD realiza-se em dois passos principais. O primeiro passo consiste na avaliação do conteúdo dos materiais em compostos orgânicos. No Quadro 11 apresentam-se, de forma resumida, os limites máximos admissíveis para os grupos de compostos orgânicos que deverão ser determinados nos materiais para construção.

O segundo passo consiste na avaliação do potencial poluente dos materiais de construção, com base na realização de diferentes ensaios de lixiviação. No Quadro 12 são identificados os ensaios de lixiviação a que os diferentes tipos de materiais de construção deverão ser submetidos.

Quadro 11. Resumo dos limites máximos admissíveis para grupos de compostos orgânicos que deverão ser determinados nos materiais destinados à construção civil, de acordo com o BMD

Grupo de compostos orgânicos	Valor limite ($mg.kg^{-1}$ ms)
Compostos aromáticos (BTEX, Fenóis)	1,25
PAH (10 compostos) individualmente somatório	 5-50 75
Compostos orgânicos clorados PCB (7 compostos), somatório EOCI, somatório	 0,5 3
Pesticidas Clorados, somatório Não clorados, somatório	 0,5 0,5
Óleos minerais	500

Quadro 12. Ensaios de lixiviação a que os diferentes tipos de materiais de construção deverão ser submetidos, segundo o BMD (Schreurs, 2003)

Material de Construção	Teste de Lixiviação		
	Em coluna (NEN 7343)	De disponibilidade (NEN 7341)	De difusão (NEN 7345)
Terra não contaminada	não aplicável	não aplicável	não aplicável
Terra	aplicável	aplicável	não aplicável
Material granular	aplicável	aplicável	não aplicável
Material monolítico	não aplicável	aplicável	aplicável

No BMD, a protecção dos solos e dos recursos hídricos é conseguida através da definição das cargas poluentes máximas permitidas para os solos ($I_{máx}$), as quais funcionam como valores limite de protecção daqueles sistemas naturais. Estas cargas máximas permitidas, ou cargas marginais para o solo, são numericamente definidas como o desvio máximo de 1%, relativamente ao valor de referência, para uma camada de solo com 1 metro de profundidade e para um período de 100 anos. O BMD considera que estas cargas máximas permitem também atingir os objectivos de manutenção ou melhoria da qualidade das águas subterrâneas.

No Quadro 13 são apresentados alguns valores relativos aos objectivos de qualidade dos solos, bem como algumas cargas poluentes máximas ($I_{máx}$) admissíveis, para o mesmo compartimento ambiental, emitidas a partir dos materiais de construção, tal como se encontra definido no BMD.

O potencial poluente dos materiais de construção é avaliado através dos resultados obtidos nos ensaios de lixiviação. Para os materiais monolíticos, a emissão potencial de poluentes é determinada através da seguinte equação de fluxo difusional:

$$I_c = E_{64d} \cdot f_{temp} \cdot f_{ext} \cdot \sqrt{f_{bev} \cdot f_{iso}}$$

na qual:

- I_c representa a emissão potencial de poluentes a partir do material ($mg.m^{-2}$), num período de 100 anos;

- E_{64d}, a emissão acumulada de um dado poluente, determinada através do ensaio laboratorial de difusão ($mg.m^{-2}$);

- f_{temp}, o factor de correcção da diferença de temperaturas entre o ensaio laboratorial e as condições reais de uso (habitualmente igual a 0,7);

- f_{ext}, o factor de extrapolação da emissão relativa à variável tempo e que resulta da extrapolação dos dados laboratoriais, relativos a um ensaio que tem um tempo máximo de duração de 64 dias, para um cenário de utilização que se prevê que tenha uma duração máxima de 100 anos

(habitualmente de 2,4 para os sulfatos, cloretos e brometos, e de 15 para os outros poluentes);

- f_{bev}, o factor de correcção relativo ao período de humedecimento do material (0,1 para condições de humedecimento limitado e 1 para condições de humedecimento permanente);

- f_{iso}, o factor de correcção para uma aplicação com medidas adicionais de isolamento do material (0,1 para condições de isolamento e 1 para condições de ausência de isolamento).

Quadro 13. Resumo dos objectivos de qualidade para os solos holandeses e das cargas poluentes máximas admissíveis para o solo, libertadas a partir de materiais destinados à construção, de acordo com o BMD

Parâmetro	Objectivo de qualidade para os solos ($mg.kg^{-1}$)	$I_{máx}$ ($mg.m^{-2}$ para 100 anos)
As	29	435
Ba	200	3000
Cd	0,8	12
Co	20	300
Cr total	100	1500
Cu	36	540
Hg	0,3	4,5
Mo	10	150
Ni	35	525
Pb	85	1275
Sb	2,6	39
Se	1	15
Sn	20	300
V	68	1020
Zn	140	2100
Br^-	20	300 (água salobras ou marinhas)
Cl^-	100[(1)]	30000 $mg.m^{-2}.ano^{-1}$
CN^- combinados	5	75
CN^- livres	1	15
F^-	500	7500
SO_4^{2-}	n.d.	45000 $mg.m^{-2}.ano^{-1}$

[(1)] Objectivo definido para as águas subterrâneas (expresso em $mg.L^{-1}$); n.d.: não definido

Para os materiais granulares, o potencial de emissão de poluentes, I_c, expresso em $mg.m^{-2}$, para um período de 100 anos, pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$I_c = d_b.h.(E_{10} - E_g)\frac{1-e^{(-k.LS_{uso})}}{1-e^{(-k.LS_{exp})}}$$

na qual:

- d_b representa a densidade do material ($kg.m^{-3}$);

- h, a profundidade da construção em condições reais de utilização (m);

- E_{10}, a emissão acumulada de poluentes determinada através do ensaio de lixiviação em coluna para uma razão L/S de 10 ($mg.kg^{-1}$);

- E_g, o factor de correcção relativo à extrapolação dos dados laboratoriais para as condições reais de utilização (factor tabelado, em $mg.kg^{-1}$);

- k, a constante da velocidade de emissão de um determinado poluente (factor tabelado);

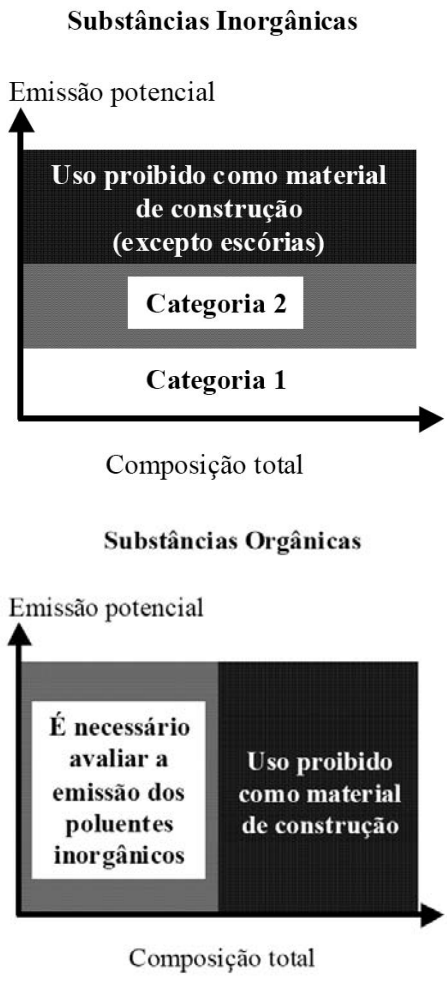
- LS_{uso}, a razão L/S estimada para as condições reais de utilização ($L.kg^{-1}$);

- LS_{exp}, a razão L/S utilizada nas condições experimentais do ensaio de lixiviação em coluna ($10\ L.kg^{-1}$).

A decisão quanto à adequabilidade de um determinado material para a construção civil baseia-se na comparação do resultado da composição orgânica do material, com os limites máximos admissíveis, bem como do potencial de emissão de poluentes, I_c, com a carga máxima admissível para os solos e para as águas subterrâneas e superficiais. Na Fig. 2 esquematizam-se as possíveis situações de resposta resultantes destas comparações, relativamente

à classe dos materiais de construção.

Fig. 2. Categorias de materiais de construção, de acordo com as caracterizações orgânica e inorgânica previstas no BMD (as escórias referidas no segundo diagrama referem-se às resultantes da incineração de RSU)



Os materiais que apresentem concentrações dos compostos orgânicos inferiores aos limites máximos, definidos no BMD, deverão ser avaliados quanto aos resultados obtidos na avaliação do potencial de emissão de poluentes inorgânicos. Todos os materiais que, cumprindo o critério anterior, apresentem cargas de emissão de poluentes inorgânicos, I_c, inferiores às cargas máximas admissíveis, $I_{máx}$, poderão ser utilizados como materiais de construção, sem nenhuma restrição particular (materiais da categoria 1).

Os materiais que, cumprindo o critério anterior, apresentem cargas de emissão de poluentes superiores às cargas máximas admissíveis para a categoria 1, mas que, sob medidas específicas de protecção, consigam cumprir estas cargas máximas, poderão ser utilizados na construção, desde que essas medidas sejam implementadas no local de utilização (materiais da categoria 2). Os materiais que, sendo submetidos a medidas específicas de protecção, não cumpram as cargas máximas de emissão da categoria 1, não poderão ser utilizados na construção.

A comparação dos regulamentos legislativos, anteriormente citados, demonstra, claramente, a maior evolução do regulamento holandês, face aos regulamentos francês e germânico. De facto, o BMD apresenta um enquadramento técnico bem desenvolvido, que se baseia em quatro linhas principais:

a) São tomados em conta, para avaliação, uma gama muito alargada de resíduos;

b) São abordados cenários de utilização muito abrangentes, face às inúmeras possibilidades de uso na construção civil;

c) É avaliado o comportamento químico dos materiais a longo prazo;

d) São estabelecidos critérios de classificação dos materiais, baseados em fundamentos científicos e legislativos de protecção da qualidade dos solos e dos recursos hídricos.

Ao nível da UE, não existem directivas ou decisões que harmonizem as acções de valorização

de materiais residuais na construção civil. É importante referir, contudo, que, no decurso do projecto VALOMAT, a Comissão Europeia iniciou a alteração, de um modo sensível, da classificação das escórias das centrais de incineração de RSU.

De acordo com a Decisão da Comissão nº 94/3/CE, de 20 de Dezembro de 1993, na qual a CE estabeleceu a primeira versão do Catálogo Europeu de Resíduos (CER), estas escórias encontravam-se registadas como resíduos minerais, resultantes do tratamento térmico de resíduos municipais. O texto da Directiva do Conselho nº 94/904/CE, aprovada em 22 de Dezembro de 1994, onde se apresentou a primeira versão do Cátalogo Europeu de Resíduos Perigosos (CERP), não incluía estas escórias como fazendo parte deste grupo de resíduos.

Após ter decorrido um período de quase seis anos sobre a aprovação da Directiva do Conselho nº 94/904/CE, a Comissão aprovou a Decisão nº 2000/532/CE, de 3 de Maio de 2000, na qual substituiu os textos legislativos daquela Directiva do Conselho e da Decisão da Comissão nº 94/3/CE. Relativamente às escórias resultantes da incineração de RSU, esta Decisão manteve, no essencial, a posição anterior, segundo a qual estes resíduos apresentam, de uma forma geral, características minerais não perigosas. Todavia, esta Decisão considera, simultaneamente, que alguns destes materiais residuais podem conter substâncias perigosas. Nesta situação, deverão ser os Estados-Membros a decidir sobre a classificação a atribuir a estes resíduos. No caso de se considerar como válida a presença de substâncias perigosas, as escórias deverão ser classificadas com o código 19-01-11, da lista de resíduos perigosos.

Ao atribuir a cada Estado-Membro, através desta posição, a decisão sobre a classificação deste tipo de materiais residuais, a Comissão Europeia atribui-lhes também, por implicação, a responsabilidade de decidirem sobre o nível de valorização destes resíduos, bem como sobre a definição dos critérios para a sua valorização. Torna-se, assim, possível a existência de critérios diversificados, como os que foram abordados anteriormente, ou, até mesmo, de situações em que o enquadramento legislativo sobre a valorização de resíduos, em materiais de construção civil, é totalmente inexistente, como é o caso, por exemplo, de Portugal.

É ainda de salientar que, ao nível da UE, a Directiva do Conselho nº 1999/31/CE, de 26 de Abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterros, nomeadamente o seu artigo 16º e o anexo II, conduziu à publicação da Decisão do Conselho nº 2003/33/CE, de 19 de Dezembro de 2002, que estabelece os critérios técnicos e os processos de admissão de diferentes tipos de resíduos em aterros. No Quadro 14 apresentam-se os valores limite de lixiviação para resíduos destinados à deposição em aterros para resíduos inertes.

Os valores limite, definidos para as razões L/S de 2 e 10, devem ser verificados em lixiviados dos materiais residuais, obtidos pela norma europeia 12457 (EN 12457, 2002), partes 1 e 2, respectivamente. Os valores limite definidos para C_0 deverão ser observados nos lixiviados dos materiais residuais, obtidos a partir da proposta de norma europeia prEN 14405. Esta proposta de norma define um ensaio de percolação, em fluxo ascendente, no qual se procura avaliar o comportamento químico de materiais granulares, em particular no que aos seus constituintes inorgânicos diz respeito.

4. O Projecto Europeu Valomat

Em 1998, a CE aprovou a proposta do projecto Europeu designado por VALOMAT ("New civil engineering materials based on bottom ash valorisation"), no âmbito do programa Brite-Euram III.

Quadro 14. Valores limite de lixiviação para resíduos destinados à deposição em aterros para resíduos inertes (Decisão do Conselho nº 2003/33/CE).

Parâmetro	Valores limite		
	L/S=2 ($mg.kg^{-1}$ ms)	L/S=10 ($mg.kg^{-1}$ ms)	Ensaio de percolação, C_0[1] ($mg.L^{-1}$)
As	0,1	0,5	0,06
Ba	7	20	4
Cd	0,03	0,04	0,02
Cr total	0,2	0,5	0,1
Cu	0,9	2	0,6
Hg	0,003	0,01	0,002
Mo	0,3	0,5	0,2
Ni	0,2	0,4	0,12
Pb	0,2	0,5	0,15
Sb	0,02	0,06	0,1
Se	0,06	0,1	0,04
Zn	2	4	1,2
Cl^-	550	800	460
F^-	4	10	2,5
SO_4^{2-}	560[4]	1000[4]	1500
Fenóis	0,5	1	0,3
COD[2]	240	500	160
SDT[3]	2500	4000	n.d.[5]

[1] O parâmetro C_0 refere-se às concentrações determinadas no primeiro lixiviado de um ensaio de percolação, obtido com uma razão L/S de 0,1; [2] Se os resíduos não satisfizerem estes valores limite relativamente ao COD, ao valor de pH originado pela amostra, estes poderão ser alternativamente verificados com L/S=10 e a um pH entre 7,5 e 8,0. Os resíduos podem ser considerados em conformidade com o critério de admissão para o COD, se o resultado desta determinação não exceder o valor de 500 $mg.kg^{-1}$ ms; [3] Os valores limite para os SDT podem ser utilizados em alternativa aos valores para os sulfatos e os cloretos; [4] Se os resíduos não satisfizerem os valores limite definidos para os sulfatos, poderão ser considerados em conformidade com o critério de admissão para este parâmetro, desde que a concentração não exceda os seguintes valores: 1500 $mg.L^{-1}$ para C_0, a L/S=0,1, e 6000 $mg.kg^{-1}$ ms, a L/S=10; [5] n.d.: não definido

Este projecto teve a duração de três anos e envolveu a participação de sete equipas de diferentes países da UE: as empresas Soletanche-Bachy (França), Inertec (França), Solvay (Bélgica) e Sobry-Shanks (Bélgica), o instituto de investigação Insavalor-Polden Division (França) e as Universidades de Aachen-RWTH (Alemanha) e Nova de Lisboa, esta última através da Unidade de Biotecnologia Ambiental (UBiA), da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT).

Os objectivos principais deste projecto eram os seguintes:

a) Desenvolver novas possibilidades de valorização das escórias das centrais de incineração de RSU para o sector da construção civil, de modo a contribuir-se para a redução das taxas anuais de extracção do volume de agregados naturais e da deposição das escórias em aterros;

b) Desenvolver formulações adequadas a aplicações específicas, baseadas na utilização de ligantes hidráulicos para a estabilização de uma gama alargada de escórias. O objectivo quantitativo centrava-se na produção de novos materiais, a um custo 20% inferior ao dos materiais clássicos utilizados nas mesmas aplicações. A qualidade dos novos materiais deveria ser idêntica à dos materiais clássicos, permitindo atingir os mesmos níveis de funcionalidade;

c) Avaliar o comportamento mecânico e químico, a longo termo, dos novos materiais e garantir a sua ecocompatibilidade. Os novos materiais deveriam apresentar estabilidades mecânica e química idênticas ou superiores às dos materiais clássicos. Deveriam respeitar os limites de protecção dos solos e dos sistemas hídricos subterrâneos e superficiais vigentes na UE. Dado o reduzido conjunto de dados disponíveis, a

nível europeu e mundial, sobre a avaliação do comportamento, a longo termo, dos materiais para construção civil contendo resíduos, foi ainda definido que os resultados obtidos nesta avaliação deveriam ser disponibilizados como contributo para a evolução dos regulamentos europeus nesta matéria.

A componente inovadora deste projecto compreendia dois factores principais. Por um lado, pretendia-se desenvolver novos materiais que pudessem ser utilizados em dois tipos de aplicações pouco estudadas: enchimento de antigas pedreiras ou minas, bem como a produção de betão, de média qualidade, que pudesse ser utilizado na construção de paredes diafragma no sub-solo (resistências mecânicas caracterizadas por tensões de rotura entre 20 e 25 MPa). Por outro lado, o projecto VALOMAT constituiu o primeiro projecto europeu de desenvolvimento de materiais, no qual se utilizou uma metodologia de avaliação dos seus comportamentos, a longo termo, baseada no conceito global da ecocompatibilidade. Deste modo, a inclusão de uma forte componente de avaliação ecotoxicológica dos novos materiais constituiu, seguramente, o passo inovador mais significativo deste projecto, não apenas ao nível europeu, mas também ao nível mundial.

O projecto VALOMAT conduziu ao desenvolvimento de diversas formulações de novos materiais, incorporando escórias, com características mecânicas, químicas e ecotoxicológicas idênticas ou, até mesmo, superiores às dos materiais clássicos utilizados na construção de paredes diafragma, com resistência mecânica média, e no enchimento de antigas minas e pedreiras. A empresa responsável pela coordenação do projecto (Soletanche-Bachy) prevê patentear as formulações destes novos materiais.

5. Referências Bibliográficas

Alba, N., Gassos, S., Lacorte, T. and Baldasano, J. M. (1997) Characterization of municipal solid waste incineration residues from facilities with different air pollution control systems. *J. of Air and Waste Management Association*, 47, pp. 1170-1179.

Barna, R., Rethy, Z., Imyim, A., Perrodin, Y., Moszkowicz, P. and Tiruta-Barna, L. (2000) Environmental behaviour of a construction made of a mixture of hydraulic binders and air pollution control residues from municipal solid waste incineration: Part 1 – Physico-chemical charcaterization and modeling of the source term. *Waste Management*, 20, pp. 741-750.

Belevi, H. and Baccini, P. (1989) Long-term assessment of bottom ash monofill leachates. *Proc. Int. Conf. Munic. Waste Combust.*, 1, pp. 5B/41- 5B/52.

Belevi, H., Stampfli, D. and Baccini, P. (1992) Chemical behaviour of municipal solid waste incinerator bottom ash in monofills. *Waste Management Research*, 10, pp. 153-167.

Bouchelaghem, A., Magnié, M. and Gobbey, A. (1999) Valorisation de mâchefers stabilisés pour le confortement de carrières souterraines: étude du comportement a long terme. *Stab&Env 99 Conference*, 13-16 Avril, Lyon, Villeurbanne, France, pp. 274-279.

Bruder-Hubscher, V. (1998) *Valorisation de machefers d'incineration d'ordures menageres: comparaison d'études d'impact sur le terrain et en laboratoire*. These pour l'obtention du diplome de doctorat, Universite Louis Pasteur de Strasbourg, 213 pp.

Chandler, A., Eighmy, T., Hartlén, J., Hjelmar, O., Kosson, D., Sawell, S., van der Sloot, H. and Vehlow, J. (1997) *Municipal solid waste incineration residues.* Studies in Environmental Science (eds.), vol. 67, Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, 974 pp.

Chesner, W., Collins, R. and Fung, T. (1988) *Assessment of the potential suitability of Southwest Brooklyn incinerator residue in asphaltic concrete mixes*. New York State Energy Research and Development Authority Report 90-15, Albany, NY, USA.

Correia, A. e Nunes, M. (1990) Comportamento mecânico de misturas de areia e detritos de britagem de calcário estabilizadas com cimento. *Seminário sobre a aplicação de cimento em pavimentos*, LNEC, 3 – 5 Dezembro, pp. 138-152.

DIN 38 414-S4 (1984) *German standard for the examination of water, wastewater and sludge - Sludge and Sediments (group S): determination of leachability by water (S4)*. Part 4, 6 pp.

Ecke, H, Kylefors, K., Maurice, C. and Lagerkvist, A. (2001) Bottom ash from municipal solid waste incineration (MSWI)

in road construction. *Beneficial use of recycled materials in transportation applications*, Eighmy, T. T. (editor), Air & Waste Management Association, November 13-15, Arlington, Virginia, pp. 783-789.

Eighmy, T, Euseden Jr, J., Marsella, K., Hogan, J., Domingo, D., Krzanowski, J. and Stämpfli, D. (1994) Particle petrogenisis and speciation of elements in MSW incineration bottom ashes. *Environmental Aspects of Construction with Waste Materials*, Goumons, J. J., van der Sloot, H. A. and Aalbers, T. G. (ed.), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, p. 111.

Eighmy, T., Gress, D., Zhang, X., Tarr, S. and Whitehead, I. (1992) *Bottom ash utilization evaluation for the Concord, New Hampshire waste-to-energy facility.* Environmental Research Group Interim Report, UNH, Durham, NH, USA.

Eikelboom, R, Ruwiel, E. and Goumans, J. (2003) The Building Materials Decree: an example of a Dutch regulation based on the potential impact of materials on the environment. *Wascon 2003 Conference – progress on the road to sustainability*, Workshop on Leaching for Engineers, San Sebastián, 4-6 June, Spain, 12 pp.

EN 12457 (2002) *Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges*. Parts 1 to 4, European Committee for Standardization (ed.), CEN, Brussels, Belgium.

FEUP e LIPOR (2002) *Valorização de escórias resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos*. FEUP e Lipor (ed.), Outubro, Projecto co-financiado pela União Europeia através do Fundo de Coesão, 63 pp.

Goacolou, H., Seigneurie, C., Joson, C., Pascual, C. and Troesch, O. (1995) Scorcim pour la valorisation des mâchefers en travaux routiers. *Revue générale des routes et aérodromes*, 729, Mai, 6 pp.

Gobbey, A. and Perrodin, A. (1999) Ecocompatibilité des déchets. *Stab&Env 99 Conference*, 13-16 Avril, Lyon, Villeurbanne, France, pp. 189-197.

Gress, D., Zhang, X., Tarr, S., Pazienza, I. and Eighmy, T. (1991) Municipal solid waste combustion ash as an aggregate substitute in asphaltic concrete. *Waste Materials in Construction Conference*, Studies in Environmental Science, 48, The Netherlands, 10-14 November, pp. 161-175.

Hartlén, J. and Lundgren, T. (1991) Utilization of incinerator bottom ash: legal, environmental and engineering aspects. *Waste Materials in Construction*, Goumons, J. J., van der Sloot, H. A. and Aalbers, T. G. (ed.), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, p. 207.

Hartlén, J. and Rogbeck, J. (1989) Sorted incinerator slag used as fill material. *Proceedings of the Int. Conf. on Municipal Waste Combustion*, Florida, 11-14 April, AWMA.

Hjelmar, O. (1996) Disposal strategies for municipal solid waste incineration residues. *J. of Hazardous Materials*, 47, pp. 345-368.

Imyim, A., Tiruta-Barna, L., Barna, R. and Méhu, J. (2000) Prediction of inorganic pollutant release from various cement based materials in disposal/utilisation scenario based on the application of a multi-parameter leaching tool box. *Waste Materials in Construction*, Wooley, G., Goumans, J. J., Wainwright, P. J. (ed.), Pergamon, Elsevier Science, The Netherlands, pp. 318-324.

Lapa, N., Barbosa, R., Mendes, B. and Santos Oliveira, J. (2001) An environmental risk assessment of concrete based on the reuse of ashes from MSWI incineration. *Beneficial use of recycled materials in transportation applications*, Eighmy, T. T. (editor), Air & Waste Management Association, November 13-15, Arlington, Virginia, Published in 2003, pp. 175-192.

Lapa, N., Barbosa, R., Mendes, B. and Santos Oliveira, J. (2003) New materials for quarry back-filling and underground constructions based on MSWI bottom ash reuse: ecotoxic risk assessment. *Wascon 2003 Conference – progress on the road to sustainability*, San Sebastián, 4-6 June, Spain, Urbina, G. and Goumans, H. (ed.), pp. 451-463.

Le Goux, J-Y et Le Douce, C. (1995) *L'incinération des déchets ménagers.* Economica (eds.), Paris, France, 226 pp.

Lindsay, W. (1979) *Chemical equilibria in soils*. J. Wiley & Sons (ed.), New York.

LIRPB, Long Island Regional Planning Board (1992) *The potential for beneficial use of waste-to-energy facility ash.* Draft engineering property data report, LIRPB, NYSERDA.

LNEC – Lab. Nac. de Engenharia Civil (2001) *Estudo de viabilidade da aplicação de escórias de incineração de resíduos sólidos urbanos na construção rodoviária*. LNEC, Departamento de Vias de Comunicação, Núcleo de Pavimentos Rodoviários, Proc. 92/1/14358, Estudo realizado para a Valorsul, Lisboa, 66 pp.

Ludvigsen, K. and Hjelmar, O. (1992) *Vurdering af slagge fra affaldsforbraendingsanlaeg.* Vandkvalitetsinstituttet Udkast, Horsholm, Denmark.

Magalhães, M., Monteiro, F., Fernando, A., Lapa, N., Pereira, J. and Santos Oliveira, J. (1999) Influence of inertization materials on the quality of fly ash leachates of a power plant. *Stab&Env 99 Conference*, posters' volume, 13-16 Avril, Lyon, Villeurbanne, France, pp. 118-120.

NF X31-211 (1994) *Déchet: essai de lessivage d'un déchet de solidification*. AFNOR, Paris, 13 pp.

Nicolau, L., Bastos, A. e Figueiras, J. (2000) Betões leves fabricados com escórias resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos. *Encontro Nacional de Betão Estrutural 2000*, 22-24 Novembro, Porto, pp. 115-124.

Nicolau, L., Bastos, A. e Figueiras, J. (2002) Upgrading of MSW incineration bottom ashes: the Portuguese case. *4th*

AECEF International Symposium on Environmental Aspects in Civil Engineering Education, Porto, 18-20 September.

Nicolau, L., Bastos, A., Lopes, M., Figueiras, J., Almeida, M. e Cardoso, A. (1999) Caracterização de escórias com vista à sua valorização na construção rodoviária. *Revista de Geotecnia*, 87, Novembro, pp. 63-71.

Nicolau, L., Lopes, M., Bastos, A., Figueiras, J. e Cardoso, A. (2001) Caracterização de escórias com vista à sua utilização em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários. *Revista de Geotecnia*, 91, Novembro, pp. 85-94.

Pagotto, C., Béchet, B., Lanini; S., Descat, M., Paris, B., Piantone, P. and Raimbault, G. (2003) Environmental impact assessment of the use of municipal solid waste incineration bottom ash in roadwork. *Wascon 2003 Conference – progress on the road to sustainability*, San Sebastián, 4-6 June, Spain, Urbina, G. and Goumans, H. (ed.), pp. 3-12.

Perrodin, Y., Grelier-Volatier, L., Barna, R. and Gobbey, A. (2000) Assessment of the ecocompatibility of waste disposal or waste use scenarios: towards the elaboration and implementation of a comprehensive methodology. *Waste Materials in Construction*, Wooley, G., Goumans, J. J., Wainwright, P. J. (ed.), Pergamon, Elsevier Science, The Netherlands, pp. 504-511.

Quenee, B., Li, G., Siwak, J. and Basuyau, V. (2000) The use of MSWI bottom ash as aggregates in hydraulic concrete. *Waste Materials in Construction*, Wooley, G., Goumans, J. J., Wainwright, P. J. (ed.), Pergamon, Elsevier Science, The Netherlands, pp. 422-437.

Sawell, S. E. and Constable, T. W. (1988) *NITEP Phase IIB: assessment of contaminant leachability from the residues of a mass burning incinerator.* Environment Canada, EPS Manuscript Series IP-82, vol. VI.

Sawell, S. E., Constable, T. W. and Klicius, R. K. (1989) *The National Incineration Testing and Evaluation Program: evaluation of contaminants leachability from residues collected at a refuse derived fuel waste combustion facility*. Environment Canada, Manuscript Series IP-96.

Schreurs, J. (2003) Leaching course for engineers. *Wascon 2003 Conference – progress on the road to sustainability*, Workshop on Leaching for Engineers, San Sebastián, 4-6 June, Spain, 47 pp.

Soletanche-Bachy, Inertec and Ibac (1998) *Market review of potential applications - Final report of task 1.2 of Valomat project*. Not published, 50 pp.

Stämpfli, D., Belevi, H., Fontanive, R. and Baccini, P. (1992) *Reactions of bottom ash from municipal solid waste incinerators and construction waste samples with water.* EAWAG/AWS, project 3335, Dubendorf, Switzerland.

Stoelhorst, D. (1991) The use of waste materials in civil engineering: AVI slag can replace gravel in concrete production. *Waste Materials in Construction*, Goumons, J. J., van der Sloot, H. A. and Aalbers, T. G. (ed.), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, p. 71.

TAUW (1988) *Veabrin kwaliteitskontrole van AVI-slakken 87-88.* RAP-305/JJS/avd, Deventer, The Netherlands.

van der Sloot, H. A. (2001) Characteristics, treatment and utilization of residues from municipal waste incineration. *Waste Management*, 21, pp. 753-765.

van der Sloot, H. A., Hoede, D., Cresswell, D. and Barton, J. (2001) Leaching behaviour of synthetic aggregates. *Waste Management*, 21, pp. 221-228.

Vehlow, J., Pfrang-Stotz, G. and Schneider, J. (1992) Restoffe-charakterisierung, behandlung, verwertug. *Symposium 25 Jahre lit 5 Jahre TAMARA, Forschung und Entwicklung in Kernforschungszentrum Karlsruhe zur Hausmüllverbrennung,* Karlsruhe, Germany.

Wiles, C. (1994) Municipal solid waste combustion ash: state of knowledge. *American Chemical Society*, 208, 266-ENVR.