

CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIAS COM VISTA À SUA VALORIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA

Characterisation of bottom ashes aiming its use in road construction

LUÍS VAZ NICOLAU*

ANA MARIA BASTOS**

M. LURDES LOPES**

JOAQUIM FIGUEIRAS***

M. FONSECA ALMEIDA****

ANTÓNIO CARDOSO*****

RESUMO - O estudo de soluções para a utilização de escórias resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos, RSU, reveste-se na actualidade da maior importância técnica, económica e social, devido, não somente ao custo do seu armazenamento, mas também aos problemas ambientais que daí decorrem.

Conscientes da importância e actualidade do problema, a LIPOR (Serviço Intermunicipalizado de Tratamento de Lixos da Região do Porto) e a FEUP, têm em desenvolvimento uma acção concertada que visa a avaliação da viabilidade de aplicação de escórias resultantes da incineração de RSU como materiais de construção civil e obras públicas.

O presente trabalho emana de uma primeira fase desse estudo, no qual se procuraram avaliar as potencialidades de aplicação de escórias de incineração de RSU na construção rodoviária. O estudo foi desenvolvido utilizando escórias com características que se prevê venham a ter as que serão produzidas pela central de incineração da LIPOR, tendo estes materiais sido caracterizados laboratorialmente do ponto de vista geotécnico e ambiental.

Os resultados que se apresentam e analisam neste trabalho permitem um posicionamento optimista no que se refere às potencialidades de utilização de escórias de incineração de RSU na construção rodoviária.

SYNOPSIS - Solutions concerning the upgrading of bottom ashes resulting from the combustion of municipal solid wastes are, at the moment, of the most technical, economical and social importance due, not only to the high cost of landfilling, but also to subsequent environmental problems.

Aware of the importance of the subject, LIPOR and FEUP are developing an experimental research program on the viability of reusing municipal incinerator bottom ash as civil construction and public works materials.

* Aluno de Doutoramento da FEUP.

** Professora Auxiliar da FEUP.

*** Professor Catedrático da FEUP.

**** Professor Associado da FEUP.

***** Professor Associado Agregado da FEUP.

The present paper corresponds to the first stage of this research, where the viability of reusing municipal solid waste bottom ash in road construction was studied with bottom ashes whose characteristics are expected similar to those produced by LIPOR incinerator in the near future.

The experimental geotechnical and environmental characterisation of the bottom ashes will be presented and the results will be analysed. Some conclusions will be put forward, concerning the viability of using municipal solid waste bottom ash in road construction.

1 - INTRODUÇÃO

A gestão de RSU constitui um dos problemas relevantes das sociedades actuais, não só pela escassez e custo de superfícies disponíveis para a deposição desses resíduos, mas também pelos problemas ambientais que daí decorrem (Nicolau *et al.*, 1999).

A incineração desses resíduos - combustão com oxidação química dos seus constituintes a elevada temperatura - reduz o volume em cerca 60-80%, o que facilita a sua gestão em termos quantitativos, embora se mantenha, em menor extensão, o problema das áreas para deposição.

Por estas razões, e também na perspectiva duma melhor gestão dos recursos naturais com a economia decorrente da substituição dos materiais tradicionais pelos resultantes da incineração dos RSU, nos últimos tempos a comunidade técnico-científica tem vindo a desenvolver esforços crescentes no sentido de estudar a viabilidade de aplicação de resíduos de incineração como materiais para a construção civil e obras públicas.

Ciente do interesse e actualidade desta problemática, a LIPOR (Serviço Intermunicipalizado de Tratamento de Lixos da Região do Porto), empresa que irá dispor num futuro próximo duma central de valorização energética, LIPOR II, na região do Porto, estabeleceu com a FEUP um protocolo de colaboração que visa o estudo da valorização de produtos resultantes da incineração dos RSU na construção civil e obras públicas em geral, e, na construção rodoviária, em particular.

O presente trabalho apresenta os resultados da primeira fase do estudo relativo à avaliação da viabilidade de utilização de escórias de incineração de RSU na construção rodoviária. Nesta fase do estudo utilizaram-se escórias provenientes de uma central de incineração na qual os resíduos urbanos e os processos de tratamento apresentam características semelhantes àqueles que se prevê venham a ser utilizados na LIPOR II. Por isso, espera-se grande semelhança de características das escórias estudadas e das que virão a resultar da actividade da LIPOR II.

O estudo experimental desenvolvido nos laboratórios da FEUP, versou a caracterização geotécnica e ambiental das referidas escórias, e os resultados obtidos permitem uma posição optimista face à possibilidade de aplicação destes materiais em substituição dos tradicionais, naturais, na construção rodoviária.

2 - CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE INCINERAÇÃO

A ausência de normalização portuguesa apropriada aos materiais em estudo levou a que se considerasse, para apoio ao desenvolvimento do presente trabalho, alguma da estrangeira disponível.

Segundo a regulamentação francesa, por exemplo, as escórias são materiais pertencentes à categoria dos *solos orgânicos e sub-produtos industriais*. A classificação destes materiais deve ser complementada com a identificação dos parâmetros utilizados na classificação dos solos ou das rochas, consoante as escórias sejam *frescas* ou não.

Assim, a caracterização das escórias foi efectuada do ponto de vista geotécnico e ambiental, pretendendo este último avaliar os riscos de danos ambientais resultantes da utilização das escórias.

Na caracterização do ponto de vista geotécnico avaliaram-se os seguintes parâmetros:

- de natureza;
- de comportamento mecânico;
- de estado.

Por sua vez, na caracterização do ponto de vista ambiental considerou-se essencialmente a percentagem de contaminantes lixiviados e a sua comparação com os valores admitidos.

2.1 - Caracterização geotécnica

Durante a incineração dos RSU a quase totalidade da matéria orgânica é queimada, fazendo com que os resíduos produzidos sejam constituídos essencialmente por matéria inorgânica. Na maioria dos casos estes resíduos constituem uma mistura heterogênea de metais ferrosos e não ferrosos, resíduos cerâmicos e vidro, podendo também conter uma certa percentagem de matéria orgânica resultante de combustão deficiente (Nicolau, 1999a; Nicolau *et al.*, 1999).

Pela simples observação das escórias *frescas* estudadas, achou-se conveniente proceder à remoção do material retido no peneiro 1" (25,4 mm), o qual é essencialmente constituído por sucata e plásticos: Com a sua remoção obtêm-se um novo material com muito baixo teor em ferro, (< 5% em peso), e com o aspecto de uma gravilha de dimensões 0/20 mm (ver Figura 1).

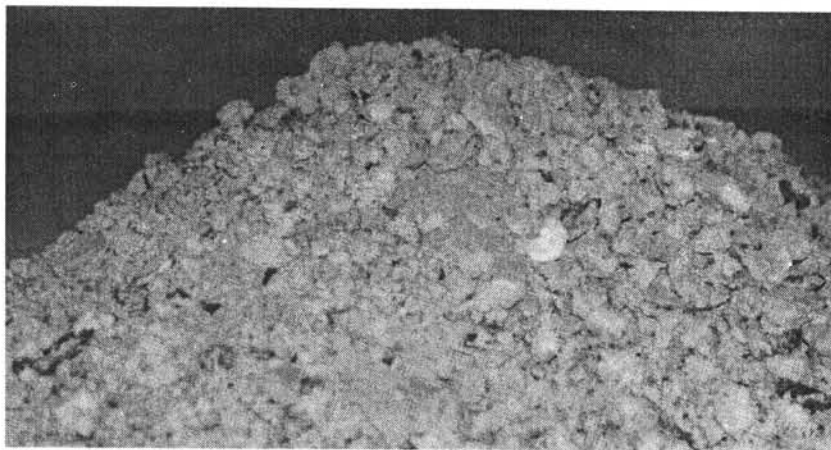


Figura 1 - Aspecto das escórias após remoção do material retido no peneiro de 1".

O Quadro I resume os resultados obtidos na caracterização experimental deste material, para o que foram realizadas seis séries de ensaios. Os resultados são expressos em termos de intervalo de variação e valor médio encontrado para cada propriedade nos seis ensaios realizados. Parte do material foi ensaiado na condição de *fresco* e parte deixou-se exposto à temperatura e humidade ambiente por um período de dez meses, o que originou um endurecimento significativo.

Os parâmetros de natureza, comportamento mecânico e de estado, foram definidos para as escórias ensaiadas *frescas* com o objectivo de avaliar a sua semelhança de comportamento com o dos solos. No que se refere às escórias expostas por dez meses procurou-se avaliar a sua semelhança de comportamento com o das rochas.

Quadro I – Resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica das escórias (Nicolau, 1999a)

Classificação	Parâmetros	Ensaios		Resultados	
				Intervalo de variação	Valor médio
Solos	Natureza	Granulometria	% material inferior 2 mm	31,0 - 43,5	35,2
			% material inferior 80µm	4,7 - 12,9	7,9
		Características Argilosas	Ip (%)		N. P.
			VBS (%)	0,02 - 0,03	0,03
			Equivalente de areia (%)	49 - 61	54
	Comportamento mecânico	Los Angeles (%)		45 - 60	49
		Friabilidade das areias (%)		8,4 - 11,7	10,1
	Estado	Proctor Normal	γ _d (kN/m ³)	14,7 - 15,0	14,9
			W _{OPN} (%)	21,0 - 22,0	21,5
		CBR (%)		40 – 49	43
		IPI (%)		59 – 74	65
Rochas		Fragmentabilidade (%)		2,0 - 2,1	2,1
		Degradação (%)		1,0 - 1,0	1,0

Com base nas análises granulométricas das escórias *frescas* verifica-se que apenas numa série de ensaios a percentagem de partículas com dimensões inferiores a 75 µm é superior a 12% e entre 31,0% e 43,5% a percentagem de partículas com dimensões inferiores a 2 mm.

A sensibilidade do material à água é baixa, tal como é evidenciado pelos resultados dos ensaios do equivalente de areia, variável entre 49 e 61%, e do azul de metileno, sempre inferior a 0,03%.

Por outro lado constata-se que estas escórias são relativamente permeáveis, já que o valor médio do coeficiente de permeabilidade obtido foi de 4x10⁻⁵ cm/s.

Com base nos resultados obtidos, e numa perspectiva de utilização destas escórias de incineração na construção rodoviária, o Guia Técnico do LCPC – SETRA *Réalisation des remblais et des couches de forme*, Fascicule I, II; 1992, classifica-as de um modo geral na categoria D₂, dos solos insensíveis à água. Porém, as escórias que revelaram 12,9% de partículas com dimensões inferiores a 75 µm não podem ser incluídas nesta categoria, sendo classificadas na categoria B₅ dos saibros e gravilhas com finos não argilosos¹.

Recorde-se que os limites máximos impostos pelo Anexo do Guia Técnico do LCPC – SETRA, Fascicule II, 1992, no que diz respeito à categoria D₂, são de 0,1% para o valor do

¹75 µm foi a dimensão do peneiro utilizado nos ensaios, inferior à sugerida na regulamentação francesa, de 80 µm. Como o infracrivo nesta dimensão de peneiro é ultrapassado em cerca de 0,9% do valor limite da classificação das escórias na categoria D₂, poder-se-á considerar o material ensaiado na série em causa como pertencente à categoria D₂.

Azul de Metileno (VBS), 12 e 70% para a quantidade de partículas com dimensões inferiores a 80 µm e 2 mm, respectivamente, e diâmetro máximo das partículas de 50 mm. Quanto à categoria B_s, o valor limite máximo do Azul de Metileno é de 1,5%, ao passo que a quantidade de partículas com dimensões inferiores a 80 µm tem de estar compreendida entre 12 e 35%.

O Guia Técnico referido descreve os materiais classificados na categoria D₂ como tendo comportamento semelhante ao dos solos permeáveis e sem coesão, que, quando bem graduados e devidamente compactados, evidenciam óptimas capacidades de resistência ao tráfego. O mesmo documento refere serem materiais com características excelentes para utilização na construção de aterros.

A utilização isolada, sem adição de qualquer tipo de ligante, destes materiais na execução de camadas de forma está dependente da sua resistência ao choque e ao desgaste determinada através de ensaios de Los Angeles e de Micro-Deval. Com efeito essa utilização só deverá ser permitida caso os coeficientes de Los Angeles e Micro-Deval sejam inferiores a 45%. Porém, no caso das escórias ensaiadas, verifica-se que o coeficiente de Los Angeles foi quase sempre ultrapassado, apresentando em termos médios o valor de 49%.

As escórias expostas por 10 meses à temperatura e humidade ambiente foram ensaiadas à fragmentabilidade e degradação, os resultados obtidos permitiram classificá-las, de acordo com o Guia Técnico do LCPC – SETRA, Fascicule II, 1992, como tendo comportamento semelhante ao das rochas da sub-classe R₄₂, correspondente às rochas siliciosas de dureza média, por apresentarem um valor de fragmentabilidade inferior a 7%, limite a partir do qual o material é considerado fragmentável.

Estes materiais podem ser empregues na execução de camadas de forma com ou sem ligantes hidráulicos, consoante as condições atmosféricas presentes no momento de aplicação em obra.

2.2 - Caracterização ambiental

Do ponto de vista ambiental a qualidade das escórias de incineração de RSU depende essencialmente da percentagem de inqueimados e da capacidade de resistir à mobilização de metais pesados.

Com o objectivo de definir a qualidade das escórias de incineração de RSU na vertente indicada tem-se vindo a desenvolver, em vários países, normalização específica. Uma referência particular poderá ser feita à Circular de Maio de 1994 do Ministério do Ambiente Francês relativa à metodologia de definição da capacidade poluente de escórias de incineração de RSU. De acordo com esta Circular, a capacidade poluente das escórias deverá ser determinada através de um ensaio de lixiviação executado de acordo com a norma NF X 31-210. Neste ensaio prepara-se uma suspensão de 1 kg de escórias em 10 litros de água destilada, da qual ao fim de 24 horas de agitação é retirada a solução para análise dos elementos poluentes solúveis.

A capacidade poluente das escórias estudadas neste trabalho foi determinada de acordo com a norma atrás referida e os resultados obtidos são resumidos no Quadro II. Além disso, avaliou-se a capacidade poluente da fracção de escórias de calibre inferior a 0,5 mm através da realização de ensaios de lixiviação de acordo com o protocolo EPtox da Agência Americana de Protecção do Ambiente (USEPA). Neste ensaio utilizou-se a fracção de maior superfície específica, isto é, a mais susceptível de mobilizar os contaminantes eventualmente existentes, bem como uma solução de lixiviação mais agressiva do que a água desionizada, pois o teste usa uma solução acética de pH=5, a relação líquido:sólido de 16:1 e tempo de agitação de 24 horas. Os valores obtidos neste ensaio apresentam-se no Quadro III. De acordo com ele

nenhum dos contaminantes é mobilizado em valor que exceda o valor limite estabelecido pela USEPA, isto é, não há razões para encarar as escórias com um resíduo perigoso (ver Quadro IV).

3 – CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO

A valorização de escórias de incineração de RSU na construção rodoviária é fortemente dependente não só de critérios geotécnicos, mas também de critérios ambientais, sobrepondo-se muitas vezes estes últimos aos primeiros.

Cada um dos critérios referidos é por si só fundamental na avaliação das potencialidades de utilização das escórias no objectivo indicado. No entanto, é de realçar que não devem ser encarados como factores de avaliação isolados, já que podem interagir entre si, tal como demonstra o facto de o coeficiente de permeabilidade e o grau de compactação, entre outros, influenciarem directamente o risco de contaminação do meio envolvente por lixiviação de metais perigosos, sais ou poluentes orgânicos.

Quadro II – Lixiviação de 6 amostras segundo a norma NF X 31-210 (Nicolau, 1999a)

	Intervalo de variação	Valor médio
As (mg/kg MS)		l.d.
Cd (mg/kg MS)		l.d.
Cr ⁶⁺ (mg/kg MS)		l.d.
Hg (mg/kg MS)		l.d.
Pb (mg/kg MS)	2,5 - 4,2	3,4
SO ₄ ²⁻ (mg/kg MS)	l.d. - 8500	2953
COT (mg/kg MS)	170 - 390	235
Fracção solúvel (%)		< 1,6
Taxa de inqueimados (%)		< 5

l.d. = limite de detecção

Quadro III - Lixiviação de uma amostra segundo o protocolo EPtox (Nicolau, 1999b)

Elemento	As	Ba	Cd	Cr	Hg*	Se	Ag	Pb	Cu	Ni	Zn
mg/l	<1.d.	12,9	0,07	<1.d.	3	<1.d.	0,04	1,2	0,8	0,4	8,5

l.d. = limite de detecção; * em µg/l

Quadro IV - Valores limite estabelecidos pela Agência Americana de Protecção do Ambiente.

Elemento	As	Ba	Cd	Cr	Hg	Se	Ag	Pb
Mg/l	5	100	1	5	0,2	1	5	5

Podem ainda ser referidos outros factores que podem influenciar a capacidade poluente das escórias. Estes factores estão essencialmente relacionados com o modo de aplicação das escórias, isto é, se previamente ou durante a colocação estão expostas às águas das chuvas, se vão ser colocadas em zonas inundáveis ou nas proximidades de cursos de água e de locais de captação de águas.

3.1 - Aspectos ambientais

De acordo com a Circular de Maio de 1994 do Ministério do Ambiente Francês existem três categorias de escórias de incineração dos RSU definidas de acordo com o seu potencial poluente:

- categoria V, que permite a valorização imediata das escórias;
- categoria M, que permite que as escórias sejam sujeitas a um período de maturação inferior a um ano no sentido de prepará-las para a valorização;
- categoria S, que obriga à deposição controlada das escórias.

No Quadro V apresentam-se os limites impostos para a classificação das escórias em cada uma das três categorias.

Quadro V - Limites do potencial poluente das EIRSU (Ministère de l'Environnement, 1994).

	Qualidade V	Qualidade M	Qualidade S
As (mg/kg MS)	< 2	< 4	> 4
Cd (mg/kg MS)	< 1	< 2	> 2
Cr ⁶⁺ (mg/kg MS)	< 1.5	< 3	> 3
Hg (mg/kg MS)	< 0.2	< 0.4	> 0.4
Pb (mg/kg MS)	< 10	< 50	> 50
SO ₄ ²⁻ (mg/kg MS)	< 10000	< 15000	> 15000
COT (mg/kg MS)	< 1500	< 2000	> 2000
Fracção solúvel (%)	< 5	< 5	> 5
Taxa de inqueimados (%)	< 5	< 5	> 5

MS = matéria seca

Quadro VI – Critérios geotécnicos (CREED, 1995).

Parâmetros	Modo de utilização	
	Aterro	Camada de forma
Inqueimados	< 3 %	< 3 %
Teor em água natural	< W _{OPN}	< W _{OPN}
Teor em ferros	< 5 %	< 2 %
Teor em finos	80 µm < 12 % 2 mm < 70 %	
Dimensão máxima do grão (D _{máx})	< 30 a 50 mm	
Índice portante inicial (IPI)	> 20 %	
Coeficiente de Los Angeles (LA)	< 50 %	
Coeficiente de Micro-Deval (MDE)	< 45 %	
Azul de Metileno (VBS)	< 0,1 %	
Equivalente de Areia	> 20 %	

W_{OPN} - Teor em água correspondente ao proctor normal

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de lixiviação das escórias de incineração de RSU estudadas verifica-se que estas, de acordo com os limites referidos no Quadro V, são classificadas como pertencendo à categoria V, isto é, podem ser valorizadas de imediato, sem qualquer tratamento.

3.2 - Aspectos técnicos

Como se referiu atrás, para que escórias de incineração de RSU possam ser valorizadas de imediato, sem maturação, devem necessariamente pertencer à *qualidade V*. Porém, esta condição não é por si só suficiente, devendo ser também respeitados critérios que garantam a qualidade técnica do material, enquanto material de construção. Estes critérios, definidos de acordo no CREED (1995) estão indicados no Quadro VI.

Os resultados obtidos nos estudos efectuados com as escórias ensaiadas *frescas* comparados com os valores limites definidos no Quadro VI levam a concluir que o material estudado se apresenta dentro dos limites estabelecidos, excepção feita ao valor do coeficiente de Los Angeles, que embora apresente um valor médio dentro desses limites, atinge em alguns ensaios valores superiores.

4 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

As escórias resultantes da incineração de RSU são materiais capazes de substituir com êxito os materiais tradicionais (solos) na construção rodoviária.

Desde que os critérios ambientais sejam cumpridos, a sua valorização depende da verificação de alguns critérios físico-mecânicos que garantem a qualidade técnica dos materiais, enquanto materiais de construção.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios das escórias consideradas ao longo deste trabalho, pode concluir-se que quando estas são utilizadas *frescas* são um material de aterro de boas características e a sua utilização em camadas de forma está condicionada à associação com ligantes.

Por sua vez, as escórias utilizadas após um período mais ou menos longo de exposição à temperatura e humidade ambiente, apresentam apetência para ser utilizadas na execução de camadas de forma, podendo ou não haver necessidade de lhes associar ligantes, consoante as condições atmosféricas presentes no momento de aplicação em obra.

A capacidade poluente das escórias estudadas, definida com base no ensaio de lixiviação efectuado de acordo com a norma NF X 31-210, permite a sua utilização de imediato, sem sujeição a qualquer maturação, indiciando a salvaguarda dos critérios ambientais e reportando a possibilidade da sua utilização para os critérios geotécnicos.

Acresce referir que os resultados dos ensaios de lixiviação efectuados com base no protocolo EPTox revelam que, de acordo com a legislação dos Estados Unidos, os materiais estudados não oferecem perigosidade, já que os valores dos contaminantes inorgânicos mobilizados não excedem os valores limites estabelecidos por aquela legislação.

Face ao exposto é de concluir que as escórias resultantes da incineração de RSU estudadas oferecem muito boas potencialidades para utilização na construção rodoviária.

AGRADECIMENTOS

Muito especiais ao Serviço Intermunicipalizado de Tratamentos de Lixos da Região Norte – LIPOR pelo financiamento concedido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CREED (Centre de Recherche pour l'environnement et le Déchet du Groupe CGE) - *Les mâchefers des UIOM – production et valorisation*. Paris, Juin, 83 p. 1995.
- LCPC - SETRA - *Réalisation des remblais et des couches de forme*. Guide technique, Fascicule I, Principes généraux, Septembre, 98 p., 1992.
- LCPC - SETRA - *Réalisation des remblais et des couches de forme*. Guide technique, Fascicule II, Annexes techniques, Septembre, 102 p., 1992.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS - *Circulaire mâchefers: project du 9 Mai 1994* Paris: Ministère de l'Environnement, Paris 14 p. 1994.
- NICOLAU, L.V. - *Valorização das escórias resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos*. Volume 1, Relatório Técnico, Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Janeiro, 51 p., 1999a.
- NICOLAU, L.V. - *Valorização das escórias resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos*. Volume 2, Relatório Técnico, Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Janeiro, 128 p., 1999b.
- NICOLAU, L.V., BASTOS, A. M., FIGUEIRAS, J. - *Betões leves fabricados com inertes resultantes de cinzas de incineração de resíduos sólidos urbanos*. Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Março, 12 p., 1999.