

# CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIAS COM VISTA À SUA UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DE SUB-BASE E BASE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Characterization of bottom ashes aiming its use in stabilized base courses

Luís Vaz Nicolau\*

M. Lurdes Lopes\*\*

Ana Maria Bastos\*\*

Joaquim Figueiras\*\*\*

António Cardoso\*\*\*\*\*

**RESUMO** - A valorização energética dos resíduos sólidos urbanos, RSU, origina gases de combustão, águas de lavagem contaminadas e resíduos sólidos não combustíveis, os quais são constituídos, em grande percentagem, pelas escórias, que representam cerca de 30% da massa dos RSU incinerados e apresentam um aspecto de saibro grosseiro. O estudo de soluções para a utilização das escórias 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 das escórias por ela produzidas como materiais de construção civil e obras públicas. Numa primeira fase, uma amostra de escórias foi caracterizada laboratorialmente do ponto de vista geotécnico e ambiental. Os ensaios realizados permitiram concluir que as escórias estudadas são materiais capazes de substituir com êxito os materiais tradicionais (solos) na construção de leitos de pavimento ou aterros rodoviários. O presente trabalho emana de uma segunda fase desse estudo, na qual se procurou avaliar as potencialidades de aplicação de escórias de incineração de RSU em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários. O estudo foi desenvolvido utilizando o mesmo material que foi usado na caracterização laboratorial realizada na 1ª fase do trabalho. Os resultados que se apresentam e analisam permitem um posicionamento optimista no que se refere às potencialidades de utilização de escórias de incineração de RSU na construção rodoviária, nomeadamente na pavimentação de estradas secundárias.

**ABSTRACT** - The process of burning municipal solid waste, RSU, generates combustion gases, wastewater and residues, which are essentially constituted by bottom ashes. These ones represent approximately 30% of the municipal solid waste burned and resemble well-graded gravel. In these circumstances, the study of solutions concerning the upgrading of bottom ashes are 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. In a first stage, a sample of bottom ashes was evaluated from mechanical and environmental viewpoints. Test results indicate bottom ashes could be used as a substitute of soils in granular sub-bases or embankment applications. The present paper corresponds to

---

\* Aluno de Doutoramento da FEUP

\*\* Professora Auxiliar da FEUP

\*\*\* Professor Catedrático da FEUP

\*\*\*\*\* Professor Associado Agregado da FEUP.

the second stage of this research, where the viability of reusing municipal solid waste bottom ash in road bases of secondary roads was studied. The study was developed with the same material used in the geotechnical and environmental characterization. The results presented and analysed in this paper show good perspectives concerning the viability of using municipal solid waste bottom ash in road bases.

## 1 - INTRODUÇÃO

O estudo apresentado neste trabalho é a continuação de um outro já realizado (Nicolau *et al.*, 1999) tendo ambos por objectivo principal a valorização correcta e segura das escórias resultantes da incineração dos resíduos sólidos urbanos na construção rodoviária.

Assim, numa 1ª fase uma amostra de escórias foi caracterizada sob o ponto de vista geotécnico e ambiental, e, numa 2ª fase, a que corresponde o presente trabalho, efectuou-se a caracterização mecânica das misturas das escórias com cimento. Pretendeu-se, deste modo, alargar o campo de utilização das escórias à área da pavimentação rodoviária.

Pese embora o facto de a aplicação agora estudada ser mais dispendiosa, não só pela utilização do cimento, mas sobretudo pela necessidade de haver um controlo mais efectivo das propriedades dos resíduos de incineração, ela apresentou-se tecnicamente muito interessante. Isto porque sob o ponto de vista ambiental é sabido que o controlo referido é naturalmente benéfico, para além da mistura resultante ser evidentemente menos contaminante devido à acção ligante do cimento.

Como os resultados mecânicos obtidos foram satisfatórios, e a capacidade poluente das escórias isoladas, realizada na 1ª fase do trabalho (Nicolau *et al.*, 1999), também o foi, a sua utilização nas camadas dos pavimentos apresenta-se bastante promissora. Acresce no entanto referir que o estudo realizado não foi mais do que um passo importante no processo complexo de valorização de escórias da incineração dos RSU's, pois, apesar dos resultados animadores obtidos, torna-se indispensável a sua confirmação, não só laboratorial, com recurso a mais amostras, mas também com resultados obtidos na monitorização de trechos experimentais.

## 2 - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS RESÍDUOS DE INCINERAÇÃO

A amostra era constituída por um volume aproximado de 3 m<sup>3</sup> de escórias provenientes de uma central londrina, cujos processos de tratamento apresentam características semelhantes àqueles que são utilizados na LIPOR II. Tal como já foi referido, esta amostra foi inicialmente avaliada do ponto de vista geotécnico e ambiental (Nicolau *et al.*, 1999). Os Quadros 1, 2 e 3 resumem os resultados obtidos.

Com base nos resultados poderá ser referido que:

- do ponto de vista geotécnico, o Guia Técnico do LCPC – SETRA *Réalisation des remblais et des couches de forme*, Fascicule I, II; 1992, permitiu a classificação da amostra de escórias frescas na categoria D<sub>2</sub>, dos solos insensíveis à água, os quais são materiais com características excelentes para utilização na construção de aterros, ao passo que as escórias expostas por 10 meses à temperatura e humidade ambiente tiveram um comportamento semelhante ao das rochas siliciosas de dureza média, podendo ser empregues na execução de leitos de pavimento;
- de acordo com os limites impostos pela Circular de Maio de 1994 do Ministério do Ambiente Francês, a amostra de escórias estudada foi classificada como pertencendo à categoria V, isto é, pode ser valorizada de imediato. Além disso, avaliou-se a capacidade poluente da fracção de escórias de calibre inferior a 0,5 mm, tal como é indicado pelo protocolo EPTox da Agência Americana de Protecção do Ambiente

(USEPA), cujos resultados indicaram que nenhum dos contaminantes é mobilizado em valor que exceda o valor limite estabelecido pela USEPA, isto é, não há razões para encarar a amostra referida como um resíduo perigoso.

**Quadro 1** – Resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica das escórias (Nicolau *et al*, 1999).

Classificação	Parâmetros	Ensaio		Resultados	
				Intervalo de variação	Valor médio
Solos	Natureza	Granulometria	% material inferior 2 mm	31,0 – 43,5	35,2
			% material inferior 80 µm	4,7 – 12,9	7,9
		Características Argilosas	I <sub>p</sub> (%)		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 <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	14,7 – 15,0	14,9
			W <sub>OPN</sub> (%)	21,0 – 22,0	21,5
		CBR (%)		40 – 49	43
		IPI (%)		59 – 74	65
Rochas	Fragmentabilidade (%)		2,0 - 2,1	2,1	
	Degradabilidade (%)		1,0 – 1,0	1,0	

**Quadro 2** – Lixiviação de 6 amostras segundo a norma NF X 31-210 (Nicolau *et al*, 1999).

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

1.d. = limite de detecção

**Quadro 3** – Lixiviação de uma amostra segundo o protocolo EPtox (Nicolau, 1999)

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

### 3 – APLICAÇÕES POSSÍVEIS

Os resíduos de incineração podem ter destinos muito variados, sendo o mais usual a deposição em aterros controlados que, teoricamente, não é mais do que uma forma de eliminação, relegando o controlo dos eventuais danos ambientais para a monitorização desses aterros. Esta solução pode ter custos ambientais muito elevados, os quais têm levado vários países a desenvolver esforços no sentido de tornar viável a valorização das escórias na construção civil, nomeadamente na construção rodoviária. Na Europa essa valorização tem sido feita fundamentalmente na construção de aterros rodoviários e leitos de pavimento. Porém, recentemente tem-se assistido a um esforço de aplicação das escórias nas camadas das estradas, com especial relevo para as sub-bases de materiais ligados com cimento, sabendo-se dos benefícios ambientais que lhes estão naturalmente associados (Goacolou *et al.*, 1995). Já nos Estados Unidos dá-se prioridade à valorização das escórias de RSU's associadas a ligantes, especialmente ligantes betuminosos.

O presente estudo experimental versou a possibilidade de aplicação das escórias ligadas com cimento em sub-bases e bases de pavimentos rodoviários. Como se poderá constatar, ao longo deste trabalho, este tratamento revelou-se muito interessante, capaz de produzir sub-bases com características mecânicas semelhantes às dos materiais convencionais. Por outro lado, nestas aplicações antevê-se a redução da capacidade poluente tradicionalmente associada à utilização dos resíduos de incineração dos lixos urbanos nas aplicações convencionais.

### 4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Por razões ligadas com a quantidade de material disponibilizado só foi possível no trabalho experimental estudar a variação de um único parâmetro, que foi a dosagem do ligante. Teria sido de interesse indiscutível estudar outros, tais como: a natureza do ligante ou a inclusão de inertes convencionais nas misturas.

Na grande generalidade dos casos, os estudos correntes de solo-cimento compreendem unicamente a realização de ensaios de compactação e de resistência à compressão simples, apesar de uma camada tratada com cimento se comportar como uma laje funcionando à flexão (Correia e Nunes, 1990). A razão deste facto tem a ver com a circunstância de para os solos correntes haver, por norma, informação técnica suficiente e correlações entre os diferentes ensaios que fazem com que os resultados daqueles ensaios sejam suficientes.

Porém, o mesmo não se pode dizer em relação ao comportamento das escórias, o qual ainda não está estudado suficientemente, pelo que se achou útil a realização dos ensaios seguintes:

- compactação;
- resistência mecânica;
- compressão simples;
- compressão diametral;
- flexão;

- flexão sob acção de cargas cíclicas;
- determinação da lei de fadiga à flexão.

O ensaio de compactação foi realizado conforme a especificação do LNEC: E262-72, tendo sido utilizada a energia de compactação pesada. O teor em cimento adoptado, de acordo com a especificação E304-74, foi de 5% em peso, tendo em conta a classificação do material como um solo do tipo A-1-a.

A realização dos provetes para posteriores ensaios à compressão e à flexão fez-se de acordo com a norma da ASTM: D1632-87. Os provetes prismáticos, com dimensões de 76x76x290 mm<sup>3</sup>, foram moldados por compressão estática, ao passo que os provetes cilíndricos, com 102 mm de diâmetro e 116 mm de altura, foram compactados do mesmo modo que os provetes usados nos ensaios de compactação. As características de moldagem foram o teor em água óptimo e o peso volúmico seco máximo do ensaio de compactação pesada.

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado conforme a norma da ASTM: D1633-84 (ver Fig. 1a)). Os provetes foram ensaiados à rotura a uma velocidade aproximada de 1 mm/minuto.

Relativamente ao ensaio de compressão diametral, o carregamento foi feito numa prensa com a velocidade de aproximação dos pratos de 0,5 kN/s (ver Fig. 1b)).

No que respeita à resistência à flexão, os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM: D1635-87. Os provetes foram ensaiados num dispositivo constituído por uma base, com dois roletes para apoio dos provetes distanciados de três vezes a sua altura, e de uma placa de topo, com dois roletes para aplicação da carga distanciados um terço do vão (ver Fig. 1c)). No sistema utilizado a velocidade de deformação foi de 0,02 mm/segundo.

No ensaio à flexão sob acção de cargas cíclicas, a aplicação destas cargas foi feita através de um sistema servo-hidráulico.

## **5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS**

### **5.1 – Ensaio estático**

Os resultados dos ensaios de compactação pesada efectuados sobre a mistura de escórias com 5% em peso de cimento conduziram a um peso volúmico seco de 16 kN/m<sup>3</sup> para um teor em água óptimo de 19,8 %.

Os resultados dos ensaios mecânicos estão apresentados no Quadro 4.

Os valores da resistência à compressão simples ( $R_{cs}$ ) aos 7 dias evidenciaram um ganho considerável de resistência com o aumento do teor em cimento de 3 para 5%. O mesmo não se pode dizer no que respeita à dosagem mais elevada, dando a ideia de que o teor óptimo em água obtido para a mistura com 5% de cimento possa ter conduzido a uma quantidade de água bastante inferior à que seria obtida para a mistura com 7% de cimento. Os resultados permitiram considerar todas as formulações aceitáveis, tendo em vista os requisitos da utilização de solo-cimento como material de sub-base e base de pavimentos referidos na especificação E304-74, a qual indica o valor mínimo de aproximadamente 2 MPa para a tensão de rotura por compressão aos 7 dias.

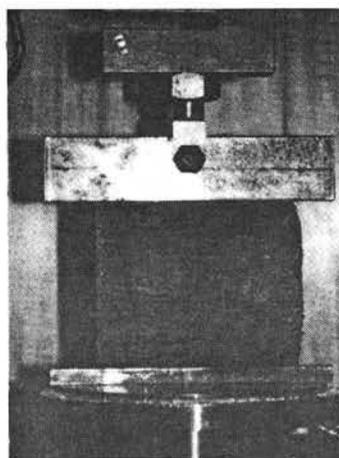
Da interpretação dos resultados dos ensaios de compressão diametral ( $R_{cd}$ ), após 7 dias de cura, ressaltou o ganho de resistência à tracção com o aumento do teor em cimento, mais significativo no aumento da dosagem de 3 para 5%.

Os ensaios de flexão foram realizados com a aplicação da carga de flexão numa direcção perpendicular à da aplicação da carga durante a compactação. Devido à falta de material,

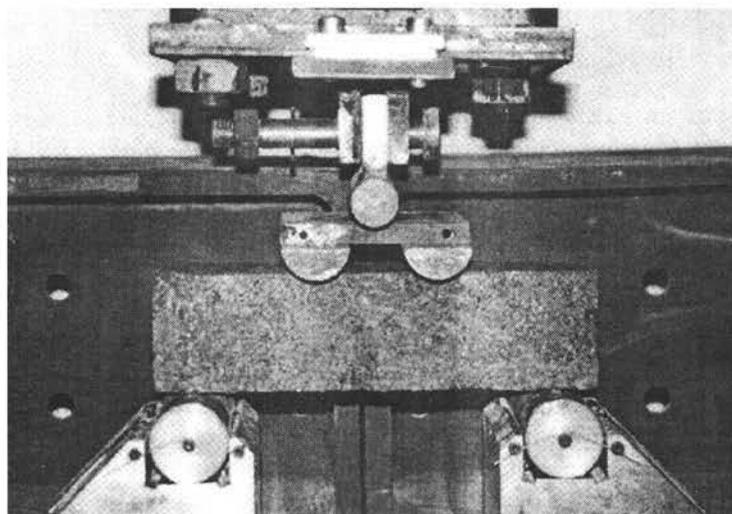
optou-se pela avaliação de uma única mistura. Os resultados encontrados indicaram uma resistência à flexão ( $R_f$ ) de aproximadamente 673 kPa.



a) Compressão Simples



b) Compressão Diametral



c) Flexão

Fig. 1 – Ensaio estático sobre os provetes escórias – cimento.

**Quadro 4 – Resultados dos ensaios estáticos.**

Mistura	Teor em cimento	R <sub>CS</sub> (MPa)				R <sub>cd</sub> (MPa)				R <sub>f</sub> (MPa)	
		7 dias		60 dias		7 dias		60 dias		60 dias	
A	3%	P1	2,78	-	-	P1	0,29	-	-	-	-
		P2	3,43			P2	0,28				
		P3	2,83			P3	0,24				
		<b>Média</b>	<b>3,01</b>			<b>Média</b>	<b>0,27</b>				
B	5%	P1	4,16	P1	4,33	P1	0,38	P1	0,58	P1	-
		P2	3,78	P2	4,10	P2	0,35	P2	0,50	P2	0,70
		P3	3,62	P3	5,10	P3	0,39	P3	0,59	P3	0,64
		<b>Média</b>	<b>3,85</b>	<b>Média</b>	<b>4,51</b>	<b>Média</b>	<b>0,37</b>	<b>Média</b>	<b>0,55</b>	<b>Média</b>	<b>0,67</b>
C	7%	P1	4,08	-	-	P1	0,43	-	-	-	-
		P2	3,51			P2	0,41				
		P3	4,03			P3	0,41				
		<b>Média</b>	<b>3,87</b>			<b>Média</b>	<b>0,42</b>				

## 5.2 – Correlações entre os valores obtidos nos ensaios

Sabe-se da análise do comportamento do betão o quanto é difícil relacionar tensões de rotura de compressão com tensões de rotura de flexão e tracção. Tendo isto em mente e o número reduzido de ensaios realizados, o que a seguir se apresenta não pode ser mais do que uma previsão das correlações possíveis entre as várias tensões.

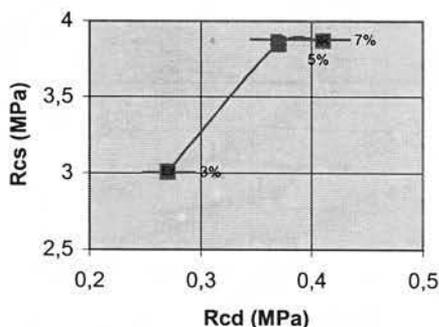
Na Fig. 2 relacionam-se os valores obtidos para as resistências à compressão simples e diametral aos 7 dias. Ressalta a influência das variações do teor em cimento para ambos os ensaios, exceptuando-se, como já foi referido, o caso relativo à tensão de rotura de compressão simples para o teor em cimento mais elevado. Aparentemente, mantendo-se os parâmetros de compactação considerados, não há vantagens, em termos de resistência à compressão simples, em alterar a dosagem de cimento de 5 para 7%.

Relativamente à mistura B pretendeu-se avaliar a variação da resistência no tempo comparando os valores encontrados para provetes ensaiados aos 7 e 60 dias. Constatou-se que o acréscimo maior se verificou nos ensaios de determinação da resistência à compressão diametral, com um ganho de aproximadamente 50% nos dois primeiros meses de idade.

## 5.3 – Comportamento do material sob acção de cargas cíclicas

Os ensaios de flexão sob cargas cíclicas foram conduzidos sobre provetes submetidos a 60 dias de cura em câmara húmida. A técnica do ensaio consistiu em registar o número de ciclos

ao fim do qual, e para um nível de carga determinado, se deu a rotura do provete. Foram realizados ensaios para quatro níveis de tensão diferentes, função da carga de rotura de flexão estática, a uma frequência de 2 Hz.



**Fig. 2** – Relação entre as resistências à compressão simples e diametral.

Os ensaios assim realizados conduziram aos resultados apresentados no Quadro 5.

**Quadro 5** – Relação entre a resistência à flexão e o número de ciclos.

$\sigma/\sigma_0^*$	Número de Ciclos
0,70	7226
0,60	174531
0,55	500 000**
0,50	1 000 000**

\*razão entre os valores das resistência à flexão para um determinado nº de ciclos e com carregamento único.

\*\* a rotura do provete não ocorreu para o nº de ciclos indicado.

Devido ao número reduzido de provetes ensaiados, e sabendo-se da dispersão que normalmente está associada a este tipo de ensaios, os resultados pretenderam, mais do que determinar a lei de fadiga, dar a conhecer o comportamento do material quando sujeito a um número elevado de ciclos. Assim, para este material os resultados indicaram que a resistência à flexão a um milhão de ciclos é pelo menos 50% da resistência estática.

Relativamente ao ensaio realizado para o valor da resistência à flexão correspondente a 55% da resistência estática, apenas se sabe que o número de ciclos correspondente é superior aos 500 000 efectuados. Isto porque o programa usado, o qual limita o nº de ciclos ao valor máximo de 500 000, obrigaria à repetição do ensaio, à semelhança do que aconteceu para o nível de carga inferior (50% da resistência estática), não fosse o provete ter ficado danificado, impossibilitando a continuação do ensaio.

Realce-se o facto de o provete, que foi ensaiado durante 1 milhão de ciclos, ter sido, após concluído o ensaio de fadiga, submetido a uma ensaio de flexão de carregamento único. O valor encontrado, cerca de 898 kPa, foi bastante superior ao valor obtido para os provetes anteriormente ensaiados, sugerindo um ganho considerável de resistência devido à acção cíclica das cargas de fadiga.

## 6 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica das misturas de escórias com diferentes percentagens de cimento conclui-se que:

- todas as formulações estudadas apresentam características mecânicas suficientes quando analisadas do ponto de vista da sua utilização como material em sub-bases e bases de pavimentos;
- o ensaio de compressão diametral parece ser o mais sensível às variações, quer do teor em cimento, quer da idade dos provetes;
- é aceitável a adopção de um limite de fadiga da ordem dos 50% da tensão de rotura estática na fase de projecto.

Deste modo, poder-se-á afirmar que a utilização de escórias resultantes da incineração dos resíduos sólidos urbanos é promissora, pelo menos do ponto de vista mecânico, desde que sejam implementados Planos de Qualidade ao nível da sua produção, armazenamento e colocação em obra.

No entanto, existem certos aspectos que, pela sua importância, merecem ser devidamente analisados em estudos subsequentes. De entre esses aspectos destacam-se os ambientais, nomeadamente os relacionados com a compreensão do papel efectivo do ligante na redução da perigosidade dos lixiviados perigosos para o meio envolvente. Outro aspecto, não menos importante, prende-se com o estudo da possibilidade de reacções expansivas provocadas pelo alumínio existente nas escórias, reacções essas que ao ocorrerem podem danificar a camada de desgaste, aumentando os custos de manutenção das vias, mesmo que as características mecânicas do material não sejam afectadas.

Face ao exposto conclui-se que as escórias resultantes da incineração de RSU estudadas oferecem muito boas potencialidades para utilização na construção rodoviária, desde que correctamente valorizadas.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D 1632-87. *Standard practice for making and curing soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 1987.
- ASTM D 1633-84. *Standard test method for compressive strength of moulded soil-cement cylinders*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, 1987.
- ASTM D 1635-87. *Standard test method for flexural strength of soil-cement using simple beam with third-point loading*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, 1987.
- Correia, A. G. e Nunes, M. M. *Comportamento mecânico de misturas de areia e detritos de britagem de calcário estabilizadas com cimento*. Seminário sobre aplicação de cimento em pavimentos, LNEC, 3 a 5 de Dezembro, p. 138 a 152, 1990.
- Goacolou, H. ; Seigneurie, C. ; Josen, C. ; Pascual, C. e Troesch, O. *Scorcim pour la valorisation des mâchefers en travaux routiers*. Revue générale des routes et des aérodomes, nº 729, Mai, 6 p., 1995.

- LNEC – *Especificação do LNEC: E 262-1972. Solo-Cimento. Ensaio de compactação.* LNEC, 1972.
- LNEC – *Especificação do LNEC: E 304-1974. Pavimentos Rodoviários. Solo-cimento.* LNEC, 1974.
- Ministère de L'Environnement Français - *Circulaire mâchefers: project du 9 Mai 1994 Paris:* Ministère de l'Environnement, Paris, 14 p., 1994.
- Nicolau, L. V.; Bastos, A. M.; Lopes, M. L.; Figueiras, J.; Almeida, M. F. e Cardoso, A. *Caracterização de escórias com vista à sua valorização na construção rodoviária.* Revista de Geotecnia n° 87, Novembro, 10 p., 1999.
- SETRA – LCPC. *Réalisation des remblais et des couches de forme.* Guide technique, Fascicule I, Principes généraux, Septembre, 98 p., 1992.
- SETRA – LCPC. *Réalisation des remblais et des couches de forme.* Guide technique, Fascicule II, Annexes techniques, Septembre, 102 p., 1992.