

ESCÓRIAS DE R.S.U.: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA PARA FINS RODOVIÁRIOS

M.S.W. BOTTOM ASH: MECHANICAL CHARACTERIZATION FOR ROAD PAVEMENT PURPOSES

Reis-Barros, Jorge, *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal,*
jreis@dec.isel.ipl.pt

Lopes, Maria da Graça, *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal,*
glopes@dec.isel.ipl.pt

Gomes Correia, António, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal,* *agc@civil.uminho.pt*

RESUMO

Neste trabalho são estudadas as propriedades mecânicas, tais como a rigidez e a resistência, de escórias provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos na incineradora da Valorsul, S.A.. Pretende-se avaliar, sob o ponto de vista geotécnico, a viabilidade de utilização deste material alternativo nas camadas estruturais de pavimentos rodoviários. Neste sentido, são apresentados resultados provenientes dos seguintes ensaios laboratoriais: análise granulométrica; ensaios C.B.R. e ensaio triaxial estático consolidado não drenado com medição das pressões intersticiais. Este estudo pretende contribuir para a valorização das escórias, cuja produção em Portugal, para 2006, se estima em cerca de 293 000 toneladas por ano. Para além de permitir reduzir a quantidade de resíduos a encaminhar para deposição final, o estudo também implica a diminuição da exploração de agregados naturais.

ABSTRACT

In this work the mechanical properties are studied, such as the stiffness and the strength, of bottom ashes from the incineration of municipal solid wastes in the Valorsul, S.A. incinerator. It is intended to evaluate, under the geotechnical point of view, the viability of using this alternative material in the structural layers of road pavements. In this direction, they are presented results proceeding from the following laboratory tests: grain sized analysis; C.B.R. test and undrained consolidated static triaxial test with measurement of the pore water pressures. This study intends to promote MSW bottom ashes, whose production for 2006, in Portugal, is estimated around 293 000 tons per year. Besides allowing reducing the amount of residues to final deposition, the study also implies the reduction of natural aggregate exploration.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

O consumo de agregados nos países industrializados é muito elevado, cerca de 6 a 8 toneladas por habitante e por ano, sendo apenas suplantado pelo consumo de água, assumindo deste modo um papel muito importante na economia dos países [1]. A indústria da construção de estradas necessita, só na Europa, de mais de 2,5 milhões de toneladas de agregados minerais [2] e na Comunidade Europeia são gastos anualmente muitos biliões de euros com a aplicação de agregados na indústria da construção. No entanto, constrangimentos ambientais têm vindo a

limitar fortemente, em alguns países europeus, a exploração de novas pedreiras e a extracção de agregados aluvionares, tornando cada vez maior a necessidade de utilizar materiais alternativos e subprodutos industriais. Por outro lado, o aumento da industrialização e da população mundial teve como consequência um incremento significativo na produção de resíduos. Só para o ano 2006 está prevista a produção, em Portugal, cerca de 4 648 000 toneladas de resíduos sólidos urbanos (R.S.U.), das quais 22% se prevê virem a ser incineradas. Os resíduos resultantes da combustão constituem cerca de 25%, em peso, do produto inicial, ou seja, cerca de 293 000 toneladas previstas para o ano de 2006. Estes resíduos têm, normalmente, como destino final a deposição em aterro sanitário, quando poderiam ser valorizados. Atendendo à reduzida vida útil dos aterros sanitários e às crescentes exigências de segurança ambiental, é cada vez mais limitada e dispendiosa a deposição de resíduos nestas infra-estruturas.

Como resultado desta conjuntura existe actualmente em toda a Europa uma pressão crescente no sentido de incrementar a utilização de materiais alternativos em aplicações de construção, nomeadamente em infra-estruturas rodoviárias, tendo em vista, por um lado, a redução da quantidade de agregados naturais que têm de ser usados nestas obras e possibilitar, por outro, encorajar o uso de materiais alternativos ao invés de serem enviados para aterro sanitário. Esta situação é expressa, por vezes, sob a forma de legislação directa, outras vezes como planos de acção e directivas orientadoras. A União Europeia estabeleceu metas para incrementar a reciclagem, pelo que em muitos países foram criados impostos para a deposição em aterro, para promover a reciclagem e a valorização energética, *etc.*. Em alguns países foi introduzido, ou está a ser equacionado, um imposto sobre a exploração de agregados naturais. Apesar destas medidas, o uso de materiais alternativos na construção de estradas é ainda baixo. Tal situação está relacionada, por um lado, com a percepção de que estes materiais são resíduos e por isso inferiores, por outro, com razões económicas e, ainda, por subsistirem preocupações relacionadas com o comportamento mecânico e ambiental destes materiais [3], [4]. Os factores económicos, tais como os custos de tratamento e de transporte, ainda limitam o uso de materiais alternativos, particularmente nos países com grandes reservas de agregados naturais. Contudo, em áreas urbanas densamente povoadas, a utilização de materiais alternativos está a tornar-se cada vez mais económica.

Vários estudos e acções de sensibilização têm sido realizados em Portugal por forma a avaliar melhor este tipo de materiais alternativos [3], [5]. No entanto, de acordo com a bibliografia disponível, existem poucos dados sobre o comportamento mecânico das escórias. Acresce o facto de as escórias resultantes da incineração de R.S.U. apresentarem diferentes características, consoante o local onde são produzidas. Por esta razão, as conclusões obtidas, neste âmbito, em alguns países, não podem ser extrapoláveis para a realidade portuguesa.

Este trabalho pretende contribuir para a caracterização mecânica das escórias na perspectiva de avaliar a possibilidade da utilização das mesmas em camadas estruturais dos pavimentos rodoviários. Os resultados apresentados são apenas parte de um estudo efectuado no âmbito de uma dissertação de Mestrado intitulada “Estudo da Utilização de Escórias de R.S.U. na Construção de Pavimentos” [6]. Nesta comunicação privilegiou-se as propriedades mecânicas de uso nas análises estruturais de pavimentos. Naturalmente que os aspectos de natureza ambiental e económica, serão também fundamentais para analisar a viabilidade desta possível utilização das escórias.

1.2 Produção de escórias

As escórias de R.S.U. estudadas neste trabalho são provenientes da central de tratamento de R.S.U. (C.T.R.S.U.) da Valorsul, S.A., localizada em S. João da Talha, concelho de Loures. Da combustão dos R.S.U. resultam escórias, cinzas, resíduos de tratamento de gases e produção de energia eléctrica. As escórias, de aspecto granular e tipicamente de cor cinzenta, são arrefecidas

por projecção de água, sendo posteriormente encaminhadas sobre um crivo vibrante para remover os elementos grossos, maioritariamente metálicos, destinados à indústria recicladora. Posteriormente o material é sujeito a um campo magnético, para serem removidos os elementos ferrosos grossos, também estes enviados para a indústria recicladora. Finalmente, as escórias produzidas são armazenadas para arrefecimento e secagem, sendo posteriormente enviadas para uma Instalação de Tratamento e Valorização de Escórias (I.T.V.E.). Cada lote de escórias é identificado pelo mês de produção da incineradora [7].

Na I.T.V.E é preconizado um processo tecnológico de maturação (tratamento de inertização) das escórias resultantes da incineração e extracção de metais ferrosos e não ferrosos (valorização). As escórias ficam, numa primeira fase, expostas ao ar, durante um período mínimo de três meses, para permitir a maturação das mesmas, reduzindo assim o seu potencial poluente. Numa segunda fase, as escórias são processadas por forma a ficarem isentas de metais ferrosos e não ferrosos, elementos grosseiros e inqueimados. As escórias processadas na I.T.V.E. são posteriormente armazenadas para serem mais tarde valorizadas [3].

Das escórias em bruto que chegam à I.T.V.E., 56,5% tem uma granulometria entre os 10 e os 30 mm, 20,0% tem um granulometria inferior a 10 mm. Os restantes 23,5% são constituídos por, rejeitados com granulometria superior a 30 mm (12,0%) e metais não ferrosos (11,5%) [7]. Uma armazenagem intermédia (3 meses, no mínimo) das escórias antes da utilização é necessária a fim de: i) assegurar uma maturação suficiente; ii) diminuir o teor em água na escória para cerca de 10%; iii) estabilizar quimicamente, por forma a evitar o risco de dilatação posterior; iv) dispor de quantidade suficiente para responder à procura.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Material ensaiado

Os ensaios foram realizados sobre amostras recolhidas na I.T.V.E. da Valorsul, S.A., segundo a norma EN 932-1: Métodos de amostragem. A amostragem realizada pretendeu abranger amostras provenientes de meses de produção diferentes, por forma a avaliar a possível dispersão dos resultados ao longo do ano. Em cada mês caracterizaram-se duas amostras diferentes, a fim de avaliar a variabilidade das suas propriedades no próprio mês. Recolheram-se amostras que sofreram duas sequências do tratamento distintas, para avaliar o efeito da sequência de tratamento sobre as propriedades mecânicas das escórias.

Foram estudadas quatro amostras de escórias referentes a dois meses de laboração da incineradora no ano de 2001: Abril e Junho. Enquanto que a amostra respeitante ao mês de Abril foi previamente processada na I.T.V.E. e posteriormente maturada durante um período de três meses, a amostra do mês de Junho foi primeiramente maturada durante um período de três meses e posteriormente processada na I.T.V.E..

As amostras de escórias estudadas, foram classificadas, atendendo ao seu potencial poluente e segundo a regulamentação francesa [8], como um material inerte, passível de ser utilizado sem necessidade de qualquer tratamento específico.

2.2 Ensaios laboratoriais

O objectivo dos ensaios realizados foi a determinação das propriedades físicas e principalmente mecânicas das escórias por forma a avaliar a possibilidade de estas serem aplicadas em camadas estruturais dos pavimentos rodoviários. Neste contexto privilegiaram-se a rigidez e a resistência mecânica, propriedades necessárias aos métodos de análise estrutural de pavimentos.

Para a caracterização física e mecânica das escórias, e na ausência de exigências específicas para este tipo de material, foram também realizados ensaios índices (granulometria, compactação/C.B.R.), habitualmente utilizados para materiais naturais tradicionalmente empregues na construção rodoviária. Contudo, os resultados destes ensaios, nomeadamente os de natureza empírica como o índice C.B.R., têm uma utilização meramente informativa, visto ainda não haver experiência comparável para estas aplicações.

A revisão bibliográfica realizada mostrou que as propriedades relacionadas com o desempenho mecânico das escórias têm vindo a ser estudadas através de ensaios de C.B.R. (*California Bearing Ratio*) [4]. Tratam-se, portanto, de estudos manifestamente insuficientes para os objectivos de modelação e dimensionamento, atendendo, como referido, à falta de experiência comparável. Para contribuir para a modelação e o dimensionamento dos pavimentos rodoviários com recurso a este tipo de materiais, planearam-se neste estudo um conjunto de ensaios triaxiais de modo a se obterem parâmetros mecânicos (rigidez e resistência mecânica) úteis para este propósito. Efectivamente, em [4] refere-se que a comparação entre os materiais tradicionais e as escórias deve ser avaliada através de resultados de ensaios de compressão triaxial.

3. ENSAIOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Granulometria e classificação AASHTO e USCS

Na figura 1 apresentam-se as curvas granulométricas médias (E-239) [9] das amostras de escórias de dois meses de laboração da incineradora.

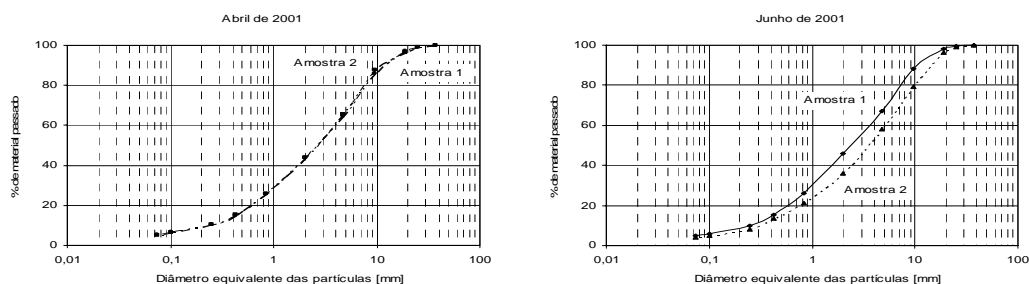


Figura 1– Curvas granulométricas das escórias [6].

De acordo com as curvas granulométricas apresentadas, as escórias podem ser, segundo a classificação do M.I.T. [10], classificadas como um material granular do tipo cascalho arenoso. No quadro 1 apresentam-se alguns parâmetros caracterizadores das curvas granulométricas das escórias estudadas.

Quadro 1– Coeficientes de uniformidade e de curvatura, D_{10} , D_{90} e percentagem de finos [6].

	D_{10}	D_{90}	C_u	C_c	% de finos (< 74 μm)
Valor mínimo	0,233	12,0	16	1,2	3,6
Valor máximo	0,319	15,1	18	1,6	6,8
Média	0,264	13,1	17	1,4	4,8

Estes resultados dos ensaios de análise granulométrica das escórias estudadas permitem as seguintes conclusões: (1) as granulometrias são típicas de solos bem graduados; (2) as escórias têm, em média, 90% em peso de partículas com um diâmetro efectivo inferior a 13,1 mm; (3) a percentagem de finos (< 74 μm), varia entre os 3,6% e os 6,8%; (4) de acordo com a classificação (A.A.S.H.T.O.) [11], embora estabelecida para os solos, as escórias podem ser

classificadas como A-1-a (0); (5) segundo a classificação unificada revista (U.S.C.S.) [12], também para solos, as escórias podem ser classificadas como SW – areia limpa, bem graduada com cascalho. Esta classificação contraria a definida pelo M.I.T. [10], porque a definição da dimensão areia e cascalho é diferente entre estas duas classificações.

Recorrendo-se às tabelas de viabilidade relativa dos materiais tradicionais [13], podem-se avaliar as principais propriedades mecânicas, assim como a sua aptidão como material de construção. Trata-se de um material permeável quando compactado, e evidenciando uma excelente resistência ao corte e reduzida compressibilidade quando compactado e saturado. Como material de construção apresenta uma excelente trabalhabilidade.

As escórias apresentam uma forma das partículas que varia entre as redondas e as sub-angulares a angulares e uma textura superficial que varia entre a áspera e a polida [6]. Estas propriedades influenciam as características mecânicas do material. Um material mais angular necessita de uma maior energia de compactação, o que pode originar o conseqüente esmagamento das partículas e desta forma aumentar a percentagem de finos. Os materiais com partículas arredondadas são, em geral, mais fáceis de compactar do que os materiais com partículas angulares, contudo, os primeiros, são mais instáveis que os materiais angulares [14]. A existência nas escórias de partículas angulares pode explicar algumas das dificuldades encontradas na compactação dos provetes em laboratório.

3.2 Índice de C.B.R.

Os ensaios de C.B.R. foram executados segundo a especificação LNEC E198 (1967) [15], com embebição e com sobrecarga (3 placas). Moldaram-se provetes com graus de compactação em relação ao Proctor Modificado (PM) de 90%, 95% e 100%, de modo a se poder estabelecer relações entre a compactação relativa, o teor em água e o C.B.R. correspondente. Deste modo o valor de C.B.R. pode ser escolhido com base na baridade e no teor em água previstos para uma determinada compactação no campo. A fase de embebição normalizada do ensaio permite observar a eventual expansão da escória em presença da água.

No quadro 2 apresenta-se o grau de compactação, a variação do teor em água face ao teor em água ótimo e o valor do índice de C.B.R. obtidos segundo [15].

De uma forma geral, todos os índices de C.B.R. obtidos para as escórias são idênticos para um mesmo grau de compactação e os seus valores podem ser considerados elevados, sugerindo uma boa capacidade de suporte das escórias e que esses valores são da ordem de grandeza dos geralmente obtidos para os materiais granulares aplicados em camadas de pavimentos. Contudo, não se podem daqui tirar outras conclusões visto tratar-se de um ensaio empírico e não haver experiência comparável.

A amostra 2 de Abril, correspondente a 98% da compactação relativa, apresenta um valor de C.B.R. baixo (52%) bastante inferior aos obtidos para as outras amostras com graus de compactação semelhantes, talvez por o teor em água para estas condições apresentar um valor 2,3% acima do teor em água ótimo, o que pode ter diminuído a sua resistência. Por este facto, este valor de C.B.R. foi considerado anômalo, não sendo por isso considerado na curva de correlação apresentada na figura 2, que traduz para um teor em água, a evolução do índice de C.B.R. das escórias para um dado grau de compactação. As escórias apresentam um valor de C.B.R. compreendido entre os 25% e os 88%, para um grau de compactação de 90% e de 100%, respectivamente. Para um grau de compactação de 95%, as escórias exibem um C.B.R. de 48%. Após os quatro dias de imersão dos provetes, a percentagem de expansibilidade máxima observada num dos provete foi 0,026%. Em outros dois foi medida uma expansibilidade de

0,009%. Nos restantes provetes não se verificou qualquer expansibilidade. As escórias exibiram uma reduzida ou nenhuma expansibilidade nas condições analisadas, o que não deverá levantar qualquer problema quando aplicadas *in situ* em condições de saturação.

Quadro 2– Grau de compactação, teor em água e índice de C.B.R. [6].

Amostra	Grau de compactação (%)	Teor em água (%)	C.B.R. (%)
Am 1 Abril 01	99	$w_{OPM} + 0,0$	85
	94	$w_{OPM} + 0,5$	44
	91	$w_{OPM} - 0,8$	26
Am2 Abril 01	98	$w_{OPM} + 2,3$	52
	96	$w_{OPM} + 1,9$	56
	94	$w_{OPM} + 0,4$	36
Am 1 Junho 01	99	$w_{OPM} + 1,0$	72
	96	$w_{OPM} + 0,7$	56
	90	$w_{OPM} + 1,3$	27
Am2 Junho 01	100	$w_{OPM} + 0,1$	89
	95	$w_{OPM} + 1,8$	56
	92	$w_{OPM} + 1,1$	31

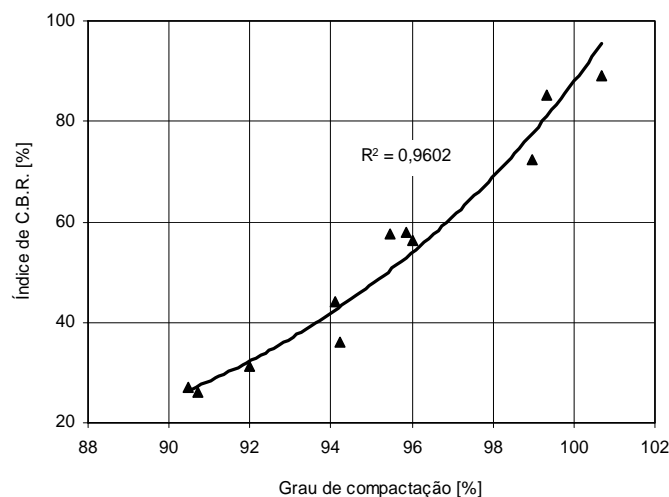


Figura 2– Grau de compactação *versus* índice de C.B.R. ($w \approx w_{OPM}$) [6].

3.3 Rigidez e resistência mecânica

A rigidez e a resistência mecânica são dois aspectos importantes do comportamento mecânico dos materiais. A rigidez traduz os deslocamentos provocados pelas cargas realmente aplicadas e a resistência traduz a máxima carga que uma estrutura pode suportar. Para avaliar a resistência e rigidez das escórias estudadas, realizaram-se vários ensaios triaxiais do tipo consolidado não drenado com medição das pressões intersticiais durante a fase de corte, o que permite avaliar os parâmetros de resistência, quer em tensões totais, quer em tensões efectivas [16]. Anote-se que as câmaras triaxiais utilizadas são as clássicas e não de precisão, não permitindo, portanto, obter parâmetros de rigidez para níveis de deformação inferiores a 1% [17].

Ensaaiaram-se dois tipos de provetes: com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura e com 100 mm de diâmetro de 200 mm de altura. Foi possível ensaiar escórias com uma dimensão máxima de 19,1 mm no caso dos provetes com 150 mm de diâmetro e uma dimensão máxima de 9,52 mm para os provetes de 100 mm de diâmetro. Os provetes foram moldados com um teor em água igual ao teor em água óptimo e com uma massa volúmica igual a 95% da massa volúmica seca máxima obtida no ensaio de compactação Proctor Modificado [18]. O critério de rotura adoptado na interpretação dos ensaios de compressão triaxial foi a razão σ'_1/σ'_3 máxima.

Estes ensaios permitiram avaliar o comportamento do conjunto das escórias, visto o material ensaiado representar 97% da fracção granulométrica nos provetes de 150 mm e 85% nos de 100 mm de diâmetro.

As amostras foram saturadas utilizando a técnica da contrapressão e consolidadas isotropicamente. As deformações volumétricas foram calculadas com base nos registos das variações de volume de água no interior do provete. Procurou-se que as tensões isotrópicas finais cobrissem uma vasta gama de tensões, embora contemplando as tensões instaladas num pavimento. Os provetes foram levados à rotura em condições não drenadas a uma velocidade de deformação imposta de 0,1 mm/min. Durante a fase de corte procedeu-se ao registo das pressões intersticiais. A fase de corte foi dada como concluída quando a força de compressão axial aplicada, permaneceu aproximadamente constante.

O comportamento tensão-extensão típico das escórias em função da tensão de consolidação é o apresentado na figura 3. As escórias evidenciam um comportamento acentuadamente não linear com o nível de tensão de confinamento. À medida que esta aumenta, aumenta também a resistência. Durante a realização dos ensaios, a pressão de confinamento, variou entre os 50 kN/m² e os 500 kN/m², resultando uma tensão deviatória, q, máxima de 461 e 2916 kN/m², respectivamente.

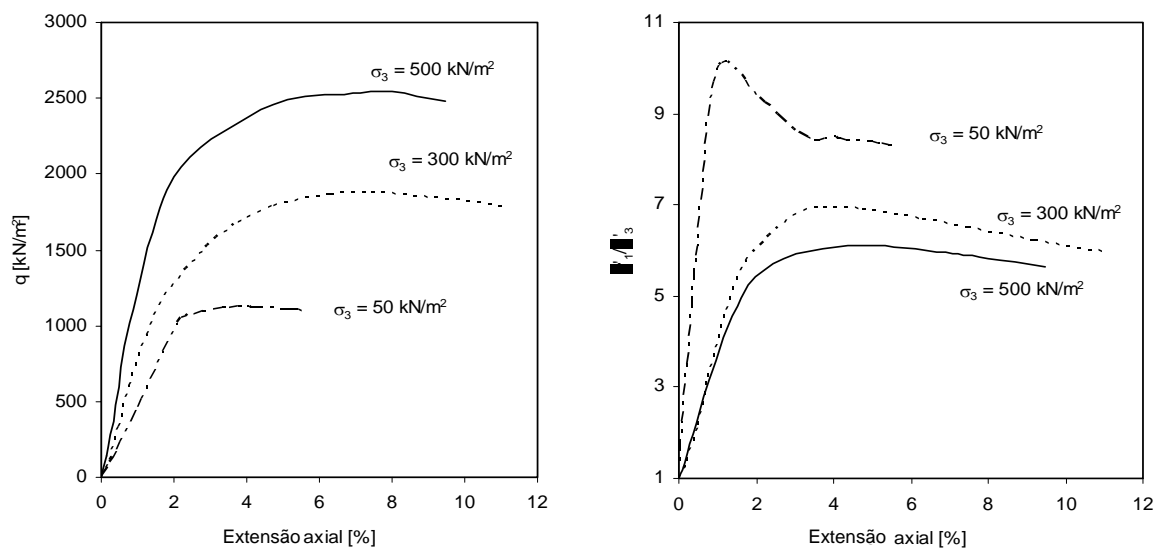


Figura 3– Comportamento tensão-extensão típico das escórias em função da sua tensão de consolidação [6].

O comportamento não linear das escórias com a extensão leva à definição de vários módulos de deformabilidade, função do nível de deformação. Assim, ao contrário de outros materiais em que se pode falar apenas de um módulo de elasticidade para caracterizar o material, nos materiais granulares, há que especificar o módulo que se pretende, associado ao nível de deformação e ao nível de tensão [17].

Para avaliar a rigidez das escórias utilizou-se o módulo secante, associado a um determinado nível de deformação, embora apenas para valores superiores a 1% pelas razões já explicadas.

Pode-se então representar o módulo secante expresso em função do índice de vazios e da tensão na direcção do carregamento por meio da equação, $E_{sec} = C \cdot (\sigma_v)^m$, sendo C uma constante que depende do material e do índice de vazios [19], [20].

Na figura 4 correlaciona-se o módulo de rigidez das escórias em função da tensão de confinamento, σ'_3 , e da tensão vertical, σ'_v , para um nível de extensão de 1%. Não houve nesta análise lugar à correcção do índice de vazios por este não ser significativamente diferente.

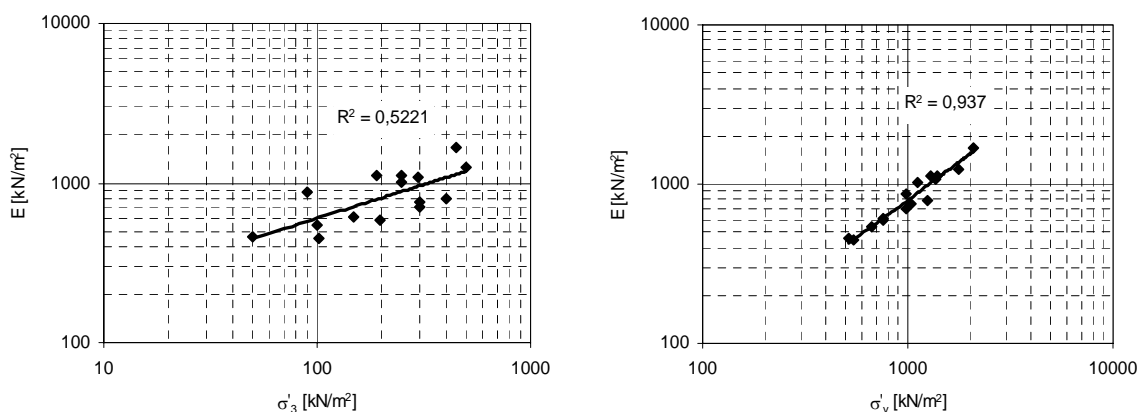


Figura 4– Módulo de rigidez das escórias em função da tensão de confinamento, σ'_3 , e da tensão vertical, σ'_v , para um nível de extensão de 10^{-2} (1%) [6].

Verifica-se, da análise da figura 4, que a rigidez das escórias, traduzida pelo seu módulo secante, para um dado nível de extensão, correlaciona-se melhor com a tensão vertical, tensão no sentido da sollicitação, do que com a tensão de confinamento, σ'_3 , ou a tensão normal média, p , corroborando os resultados de outros autores, nomeadamente para agregados [19], [20].

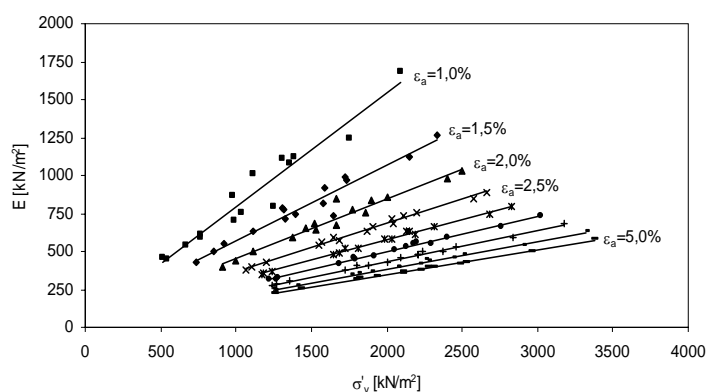


Figura 5– Rigidez das escórias para vários níveis de extensão [6].

Os materiais granulares, assim como as escórias, têm, em qualquer circunstância, um comportamento marcadamente não linear, e o seu módulo de rigidez, depende do nível de tensão actuante. Assim, quanto maior for a tensão aplicada na direcção do carregamento, maior será a sua rigidez nessa direcção.

Na figura 5 apresentam-se os módulos de rigidez vertical evidenciados pelas escórias para os vários níveis de deformação e de tensão vertical. Anote-se que estes níveis de deformação são muito superiores aos existentes nas camadas de um pavimento [17]. Contudo, poder-se-á recorrer a curvas de degradação típicas de materiais granulares para corrigir estes valores para níveis de deformação mais compatíveis com os observados nas condições de serviço dos pavimentos [21].

Os valores dos parâmetros de resistência das escórias (valores de pico e do estado crítico) foram obtidos indirectamente a partir da transformada da envolvente de *Mohr-Coulomb* em termos de tensões efectivas apresentada na figura 6.

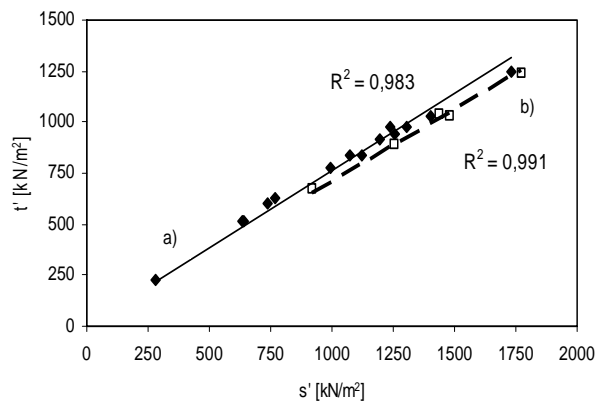


Figura 6– Transformada da envolvente de *Mohr-Coulomb* em termos de tensões efectivas [6]
a) valores de pico; b) valores do estado crítico.

O valor do ângulo de atrito interno efectivo de pico e do estado crítico obtido para as escórias foi de 49° e de 42°, respectivamente. A coesão efectiva é aproximadamente nula. A aparente angulosidade das partículas das escórias contribui para valores elevados de resistência ao corte, medidos pelo ângulo de atrito interno.

O comportamento evidenciado pelas escórias de R.S.U. compactadas com a energia do Proctor Modificado [18], é semelhante ao das areias densas, traduzindo na gama de tensões ensaiadas um comportamento dilatante das mesmas.

4. CONCLUSÕES

As poucas experiências realizadas em estradas europeias onde as escórias foram aplicadas, mostraram que o pavimento possuía uma capacidade resistente tão boa quanto a obtida empregando agregados naturais, tendo mesmo evidenciado um melhor desempenho *in situ* do que o esperado com base nos resultados de ensaios de laboratório [22]. Na maioria dos países não existem especificações técnicas para a construção de estradas com materiais alternativos, utilizando-se as especificações relativas aos materiais naturais.

Procurando avaliar a viabilidade da utilização de escórias nas camadas estruturais do pavimento, está em desenvolvimento um projecto de investigação financiado pelo Instituto Politécnico de Lisboa, cujo principal objectivo consiste em comparar o comportamento dos agregados naturais com as escórias de R.S.U. caracterizadas a partir de ensaios em laboratório e *in situ*. Para tal começou-se por efectuar a sua caracterização mecânica, apresentando-se alguns dos resultados neste artigo. Seguidamente proceder-se-á à construção de um trecho experimental para definir

métodos pelos quais a aplicabilidade da utilização de escórias na construção de estradas possa ser avaliada sob circunstâncias reais.

Do estudo das propriedades mecânicas das escórias de R.S.U. estudadas é possível concluir que:

- As escórias apresentam alguma variabilidade granulométrica entre as amostras estudadas, contudo, e de um modo geral, as escórias de R.S.U. são um material bem graduado, de granulometria extensa que apresentam um $D_{máx.}$ de 30 mm e em média cerca de 6% de material com dimensão inferior a 0,074 mm.
- O índice de C.B.R. medido após 4 dias de embebição variou entre os 25% e os 88%, consoante a energia de compactação utilizada na moldagem dos provetes.
- A rigidez das escórias, avaliada através do seu módulo secante, e determinada em provetes moldados com o teor em água óptimo (PM) e com um grau de compactação de 95% do ensaio Proctor Modificado (PM), assume valores dependentes do nível de deformação e do nível de tensão na direcção do carregamento.
- A resistência das escórias avaliada através do ângulo de atrito interno em tensões efectivas é da ordem dos 49° e de 42°, para os valores de pico e do estado crítico, respectivamente.

5. AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial é dirigido à Valorsul, S.A., particularmente ao Eng.º Carlos Dinis de Sousa, por toda a imprescindível colaboração prestada.

Agradece-se ao Instituto Politécnico de Lisboa por ter financiado o projecto de investigação que possibilitou a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Directorate-general for Energy and Transport, European Commission, COST 337: Unbound Granular Materials for Road Pavements, Final Report of the Action, European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research, October 2000.
- [2] Regueiro, M., Barros, G., “Los áridos en Europa: Minería y desarrollo sostenible”, Seminário sobre agregados, L.N.E.C., Março de 2003.
- [3] Reis-de-Barros, J., Lopes, M. G., “Estudo da Utilização de Escórias de R.S.U. na Construção de Pavimentos”, Conferência Científica e Tecnológica em Engenharia, 6 a 10 de Maio de 2002.
- [4] Arm, M., “Engineering properties of MSWI bottom ash, evaluated from triaxial tests”, Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, WASCON2003, San Sebastián, 2003.
- [5] Seminário sobre Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2004.
- [6] Reis-Barros, Jorge, “Estudo da Utilização de Escórias de R.S.U. na Construção de Pavimentos”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006 (em preparação).
- [7] PROET – Projectos, Engenharia e Tecnologia, S.A., Memória Descritiva do Projecto de uma Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos dos Municípios de Amadora, Lisboa, Loures e Vila Franca de Xira, Volume I – Peças Escritas, Lisboa, Novembro 1996.

- [8] Ministério do Ambiente, “Circulaire n.º 94-IV-I du mai 1994 relative à l’élimination des mâchefers d’incinération des résidus urbains”, Journal Officiel de la République Française, 1994.
- [9] Especificação LNEC E239, “Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida”, LNEC, Lisboa, 1970.
- [10] Especificação LNEC E219, “Prospecção geotécnica de terrenos. Vocabulário”, LNEC, Lisboa, 1968.
- [11] Especificação LNEC E240, “Solos. Classificação para fins rodoviários”, LNEC, Lisboa, 1970.
- [12] ASTM D2487-00, “Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)”, Annual book of ASTM standards, Section 4: construction, volume 04.08, American Society for Testing and Materials, 2001.
- [13] Carter, M., Bentley, S.P., “Correlation of soil properties”, Pentech Press, London, 1991.
- [14] Arm, M., “Variation in Mechanical Properties of MSW Incinerator Bottom Ash. Results From Triaxial Tests”, Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, WASCON2003, San Sebastián, 2003.
- [15] Especificação LNEC E198, “Solos. Determinação do C.B.R.”, LNEC, Lisboa, 1967.
- [16] British Standard 1377: Part 8 “British Standard Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes – Part 8. Shear strength tests (effective stress)”, British Standards Institution, 1990.
- [17] Gomes Correia, A. “Características de Deformabilidade dos Solos que Interessam à Funcionalidade das Estruturas”, Revista GEOTECNIA, nº 100, 2004.
- [18] Especificação LNEC E197, “Solos. Ensaio de compactação”, LNEC, Lisboa, 1966.
- [19] Jamiolkowski, M, Ladd, C.C., Germaine, J. T., Lancellota, R., “New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils”, Theme Lecture. Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, vol. 1, Balkema, Rotterdam, 1985, pp. 57-112.
- [20] Gomes Correia, A., Anh Dan, L.Q., Shinoda, M., Tatsuoka, F. and Koseki, J. “Young’s and Shear Moduli under Different Isotropic and Anisotropic Stress Conditions of Granular Materials”, Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Balkema. 2001, pp.209-215.
- [21] Tatsuoka, F.; Ishihara, M.; Uchimura, T.; Gomes Correia, A. “Non-Linear Resilient Behaviour of Unbound Granular Materials Predicted by Cross-Anisotropic Hypo-Quasi-Elasticity Model”, Unbound Granular Materials. Laboratory testing, in situ testing and modelling, Editor: A. Gomes Correia. A. A. Balkema, Rotterdam, 1999, pp. 197-204.
- [22] Reid, J.M., et al., ALT-MAT: Alternative Materials in road construction, Interim Report, Deliverable D4, Volume 3, Version 1.0, Contract No.:RO-97-SC.2238, Project Founded by the European Commission Under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, June 1999.