

UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS NÃO TRADICIONAIS EM TRABALHOS GEOTÉCNICOS – VALORIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS NACIONAIS

USE OF NON TRADITIONAL MATERIALS IN GEOTECHNICAL WORKS – VALORISATION OF NACIONAL STEEL SLAGS

Ferreira, Sandra, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal,*
sandraferreira@civil.uminho.pt

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

Roque, António José, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,*
aroque@lnec.pt

Cavalheiro, António, *Siderurgia Nacional, Seixal, Portugal*
acavalheiro@seixal.snlongos.pt

RESUMO

Para avaliar a viabilidade de utilização dos ASIC (Agregado Siderúrgico Inerte para Construção) produzidos pela Siderurgia Nacional, em obras geotécnicas, estudam-se em laboratório as suas propriedades mineralógicas, químicas, geométricas, físicas e mecânicas. Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos para as propriedades mecânicas designadamente, a rigidez estudada através de um equipamento triaxial de precisão. Os resultados são comparados com os obtidos em materiais especificados para as camadas de base dos pavimentos, quer em Portugal, quer em França (agregados granítico 0/31,5 e calcário 0/19, respectivamente). Da comparação dos resultados conclui-se que os ASIC apresentam propriedades mecânicas superiores às dos agregados naturais. Estes resultados enfatizam que os ASIC nacionais podem ser utilizados em obras geotécnicas, muito particularmente nas infra-estruturas de transporte.

ABSTRACT

To evaluate the re-use of ASIC (Inert Steel Aggregate for Construction) produced by Siderurgia Nacional in geotechnical constructions viability, a huge laboratory experimental programme was implemented to study the mineralogical, chemical, geometrical, physical and mechanical properties. In this paper are presented the results obtained by laboratory performance-related tests for mechanical properties, namely the stiffness, studied by means of precision triaxial tests. The results obtained for the two steel slags, were compared with a standard base course materials used at Portugal and at France (granite 0/31,5 and limestone aggregate 0/19, respectively). The results obtained show that ASIC have better mechanical properties than a standard base course materials. These results emphasize that the ASIC produced at Portugal could be used in geotechnical works, and particularly in transportation infrastructures.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com os ensaios e os critérios normalmente utilizados para os materiais naturais, os materiais não tradicionais (resíduos) foram no passado considerados inapropriados para trabalhos geotécnicos, nomeadamente quando utilizados nas camadas granulares, quer dos pavimentos quer das vias-férreas. Actualmente, há uma pressão crescente para a reutilização destes materiais, uma vez que, a possibilidade de uma eventual reutilização privilegia as questões ambientais, traduzindo-se na redução de depósitos e na minimização de exploração de

materiais naturais. É no entanto necessário demonstrar que a utilização de materiais não tradicionais, em detrimento dos naturais, irá assegurar, no mínimo, a mesma qualidade de construção e desempenho a longo prazo.

Neste sentido, está em curso actualmente um projecto nacional, onde se estão a estudar as escórias de aciaria produzidas a nível nacional pela Siderurgia Nacional (SN) valorizadas pela adequação ao uso dos Agregados Siderúrgicos Inertes para Construção (ASIC) obtidos da componente não metálica que resulta do seu processamento. Refira-se que a SN estima a produção anual de escórias de aciaria em cerca de 270 000t, nos seus fornos de arco eléctrico do Seixal e da Maia, e a gestão deste importante volume de resíduos constitui uma fonte de preocupação para a Empresa e para o País. É neste quadro que a SN apoia um Projecto de I&D, que decorre no período 2005-2009, intitulado, “Aplicação de resíduos em infra-estruturas de transporte e obras geotécnicas – Valorização de escórias de aciaria”. Este projecto pretende contribuir para a criação de uma metodologia mecanicista e ambiental que promova a reutilização de resíduos, em geral, e do ASIC em particular.

Seguindo as recomendações mais relevantes dos projectos da Comunidade Europeia (COURAGE 1999, ALT-MAT 1999 e SAMARIS 2005), este projecto dá prioridade aos ensaios de laboratório relacionados com as propriedades ambientais, as quais são relevantes para os materiais não naturais, e de engenharia, bem como os ensaios em campo, envolvendo monitorização. Até ao momento realizaram-se todos os ensaios de laboratório relacionados com as propriedades de engenharia e ambientais. De forma a calibrar os resultados de laboratório e avaliar o desempenho “in situ” dos materiais naturais e dos ASIC, foi construído um trecho experimental com diferentes secções instrumentadas, na estrada nacional EN311 entre Fafe e Várzea Cova. A avaliação do desempenho ambiental está a ser realizada através da análise química dos lixiviados recolhidos nos lisímetros, construídos na base do aterro do trecho experimental.

Para avaliar a viabilidade de utilização dos ASIC, produzidos pela SN (designados de ASIC do Seixal e ASIC da Maia), nas infra-estruturas de transporte e obras geotécnicas, implementou-se um vasto programa de estudo experimental onde se estudaram as propriedades mineralógicas, químicas (ASIC e análise dos lixiviados, perda ao rubro e ensaio de sulfato de magnésio), geométricas (granulometria, índice de forma e de alongamento), físicas e mecânicas (equivalente de areia, azul de metileno, limites de Atterberg, resistência à fragmentação - Los Angeles, resistência ao desgaste - Micro-Deval, peso específico, absorção de água, CBR/compactação leve, CBR/compactação pesada, compressão triaxial, triaxiais de precisão, fragmentabilidade, degradabilidade, compressão triaxial consolidada não drenada para amostras com 300mm de diâmetro, compressão unidimensional para amostras de 500mm de diâmetro, esmagamento e carga pontual).

O objectivo deste estudo foi o de comparar os valores obtidos para os ASIC, com os valores referidos nas especificações nacionais para os materiais naturais que possuem características adequadas para a sua aplicação em infra-estruturas de transporte. Alguns destes resultados, designadamente as propriedades ambientais (análise química dos ASIC e dos lixiviados) e de engenharia (granulometria, limites de Atterberg), foram já apresentados por Roque et al. (2006). É importante salientar que, relativamente às propriedades ambientais os ASIC foram classificadas na categoria dos resíduos inertes.

Neste artigo são apresentados os resultados obtidos em laboratório relacionados com as propriedades mecânicas, designadamente a rigidez, para os dois ASIC. A rigidez dos ASIC compactados foi estudada através de um equipamento triaxial de precisão, presente no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Os resultados são comparados com

os obtidos em materiais especificados para as camadas estruturais dos pavimentos, quer em Portugal (agregado granítico 0/31,5), quer em França (agregado calcário 0/19).

2. MATERIAL, EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO DE ENSAIO

2.1. Material

Os ensaios foram realizados sobre dois ASIC produzidos pela Siderurgia Nacional, designados de ASIC da Maia e ASIC do Seixal. Os detalhes da obtenção dos ASIC foram apresentados por Roque et al. (2006). Os resultados são comparados com os obtidos em materiais especificados para as camadas estruturais dos pavimentos (agregado granítico 0/31,5 e agregado calcário 0/19). As características das curvas granulométricas, para todos os materiais, estão indicadas no Quadro 1 e as curvas são apresentadas na Figura 1. As curvas obtidas do ensaio Proctor modificado e os resultados do ensaio são apresentados na Figura 2 e Quadro 2, respectivamente.

Quadro 1- Características geométricas das curvas granulométricas dos materiais

Material	D _{max} (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cu	Cc
ASIC do Seixal (0/19)	19,1	0,20	2,20	5,30	7,10	36	3,4
ASIC da Maia (0/19)	19,1	0,84	4,60	8,80	11,00	13	2,3
Agregado Granítico (0/31,5)	31,5	0,23	3,11	8,46	12,14	53	3,5
Agregado Calcário (0/19)	19,1	0,20	2,00	5,00	6,80	34	2,9

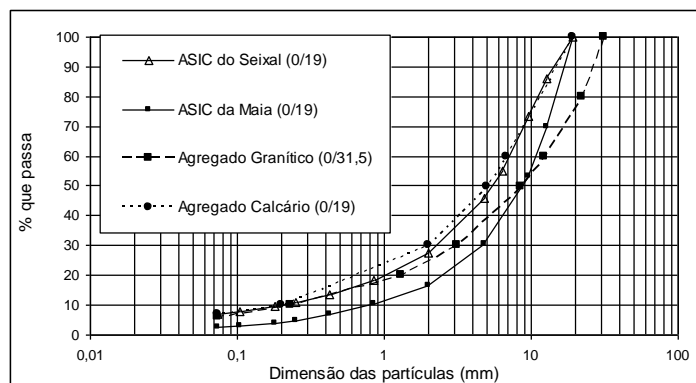


Figura 1 – Curvas granulométricas

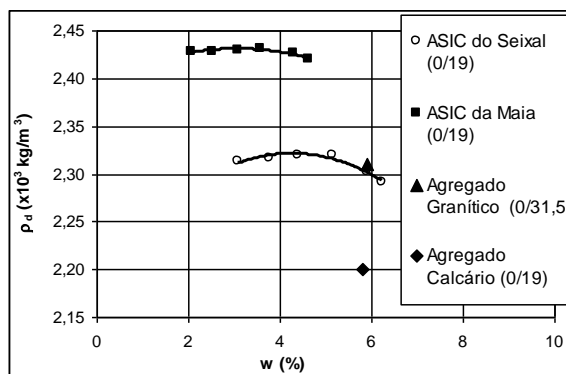


Figura 2 – Curvas do ensaio Proctor modificado para os ASIC da Maia e do Seixal e valores encontrados para os agregados granítico (0/31,5) e calcário (0/19)

Quadro 2 - Resultados do ensaio Proctor modificado

Material	ρ_d ($\times 10^3$ kg/m ³)	w (%)
ASIC do Seixal	2,32	5,00
ASIC da Maia	2,43	3,45
Agregado Granítico (0/31,5)	2,31	5,90
Agregado Calcário (0/19)	2,20	5,80

2.2. Equipamento

As características de deformabilidade dos ASIC são avaliadas através de ensaios triaxiais de precisão, com o equipamento existente no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Este equipamento está instrumentado internamente e as deformações radiais e axiais são medidas localmente através de 3 LDT's (Local Deformation Transducer) verticais e um LDT horizontal. Os LDT's foram construídos na Universidade do Minho. Estes transdutores foram inicialmente desenvolvidos por Goto et al. (1991), na Universidade de Tóquio. O equipamento triaxial está ainda instrumentado com uma célula de carga interna e um transdutor de pressão. Na Figura 3, as duas fotografias mostram o equipamento e o detalhe dos transdutores de deslocamento utilizados durante o ensaio (lado esquerdo e direito, respectivamente).

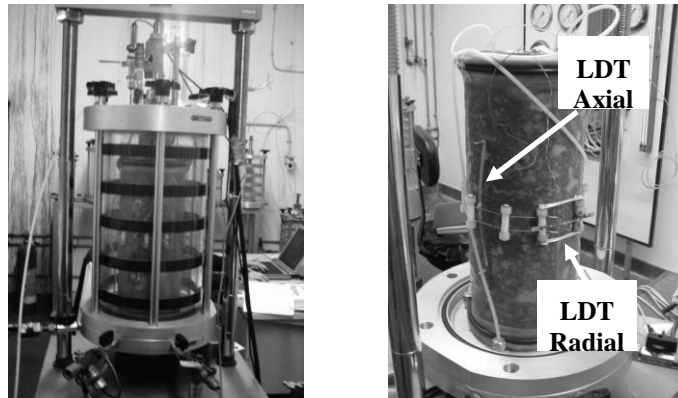


Figura 3 – Equipamento triaxial de precisão existente na Universidade do Minho

2.3. Preparação das amostras

O procedimento de preparação das amostras é o mesmo em todos os ensaios: os ASIC são peneirados para eliminar a presença dos elementos indesejados (superiores a 19,1mm), de seguida é misturado com a quantidade de água necessária e colocada num saco plástico fechado por um período de 24 horas para que se estabeleça o equilíbrio hídrico. As amostras foram compactadas em 6 camadas através de um martelo vibrante com um peso estático com cerca de 7kg e uma base com 146mm de diâmetro. O tempo de vibração em cada camada é controlado através da densidade seca pretendida para as amostras. As dimensões das amostras ensaiadas são de 150mm de diâmetro e 300mm de altura. No Quadro 3 apresentam-se as características de compactação das amostras, e como se pode verificar os materiais são compactados para um estado muito denso, representativo dos valores encontrados nos pavimentos.

Quadro 3- Características de compactação das amostras

Material	ρ_d ($\times 10^3$ kg/m ³)	w (%)	Gs	e
ASIC do Seixal	2,31	5,8	3,07	0,330
ASIC da Maia	2,43	3,5	3,26	0,343

2.4. Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio usado no estudo das características de deformabilidade dos ASIC utiliza várias tensões. Para cada tensão de confinamento (100, 200 e 300kPa) e após a consolidação, os ensaios iniciam-se com uma aplicação de carregamento deviatórico até cerca de 1×10^{-3} da deformação axial, de forma a se obter o decaimento das curvas do módulo de deformabilidade com o nível de deformação. A velocidade de carregamento é cerca de 0,03mm/min. Durante o processo de descarga foram realizados ciclos de carga/descarga de tensão vertical de muito pequena amplitude para diferentes níveis de tensão de desvio (aproximadamente para o valor de tensão máxima de desvio que foi aplicada à amostra (q_{max}), para $q_{max}/2$ e q próximo de 0kPa). Na Figura 4-a) apresenta-se um exemplo do procedimento de ensaio, para uma dada tensão de confinamento. Para cada nível foram aplicados cinco ciclos de carga/descarga de pequena amplitude. A amplitude é controlada de forma a se garantir que os ciclos são fechados e lineares, para se avaliar o módulo de deformabilidade elástico (ver Figura 4-b).

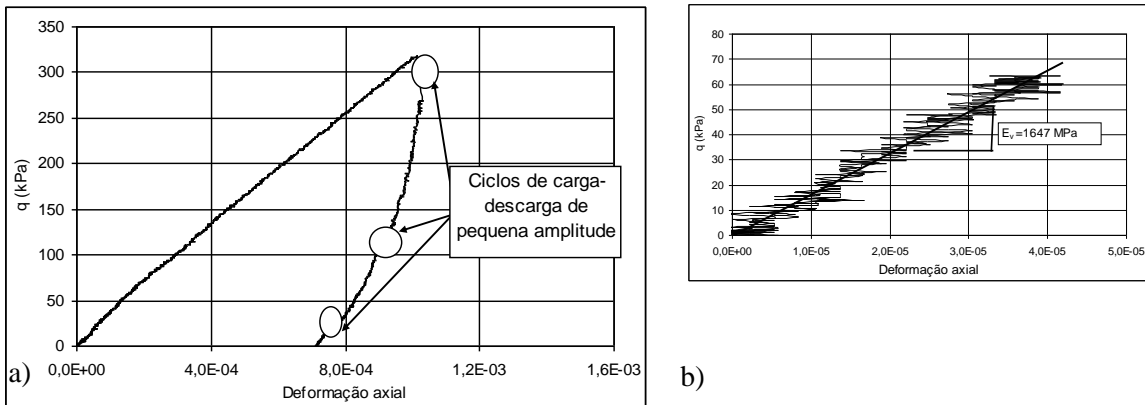


Figura 4 a) – Exemplo do procedimento de ensaio para uma determinada tensão de confinamento; b) Exemplo de um ciclo de carga/descarga de pequena amplitude

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os valores do módulo de deformabilidade foram calculados a partir da tensão de desvio dividida pela deformação axial, como ilustrado na Figura 4-b). Estudos anteriores (Hoque e Tatsuoka 1998 e Gomes Correia et al. 2001) mostraram que o módulo de deformabilidade no domínio das pequenas deformações (E_v) é definido por uma lei potência, a qual não inclui a tensão lateral σ_3 como variável (ver equação 1). A lei potência que descreve tal comportamento é dada pela equação (1).

$$E_v = C \left(\frac{\sigma_v}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

Os resultados dos ensaios, para um nível de deformação axial de 4×10^{-5} , são apresentados na Figura 5. A análise dos resultados é feita em tensões totais e os valores foram normalizados para uma pressão p_a de valor 100kPa. Como podemos verificar a análise em tensões totais conduz a uma potência n de valor igual a 0,6 e 0,52 para os ASIC do Seixal e da Maia, respectivamente. Estes valores, para a potência, são similares aos normalmente encontrados para os materiais naturais, que rondam os 0,5. A partir do gráfico pode-se também verificar que os valores encontrados para o módulo de deformabilidade são muito elevados quando comparados com os

dos materiais naturais, pelo que estes resultados revelam um comportamento mecânico excelente para os ASIC produzidos na Siderurgia Nacional.

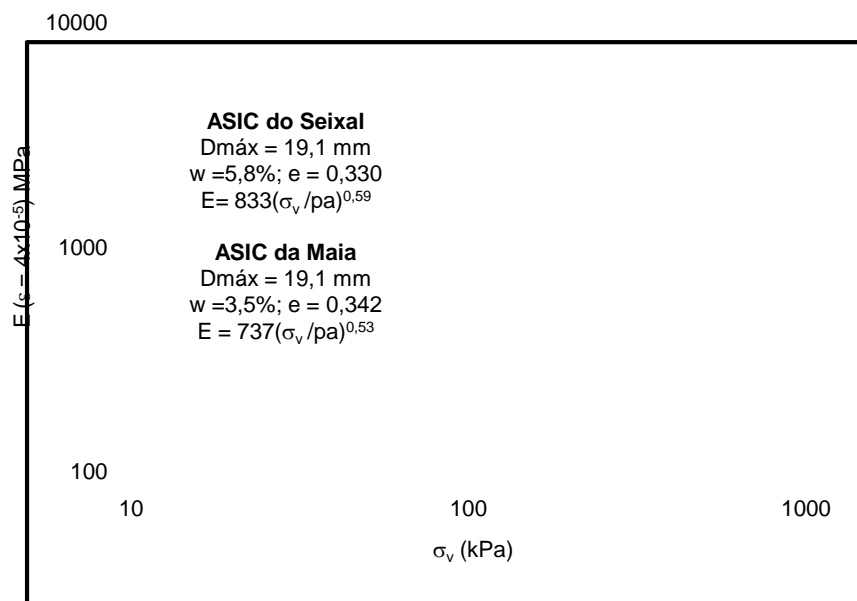


Figura 5 – Evolução do módulo de deformabilidade com a tensão vertical total

4. COMPARAÇÕES ENTRE OS ASIC E OS AGREGADOS NATURAIS

Os resultados para os ASIC são comparados com os obtidos num agregado granítico (0/31,5) e um agregado calcário (0/19). Estes materiais foram já utilizados em camadas de base nos pavimentos, em Portugal (agregado granítico 0/31,5), e em França (agregado calcário 0/19).

Os resultados apresentados para o agregado granítico (0/31,5) foram obtidos por Gomes Correia et al. (2001) e a rigidez dos materiais foi estudada através de um equipamento triaxial de precisão com amostras prismáticas de 580mm de altura e 230mm lado. As deformações axiais e laterais foram medidas com LDT's. Os resultados apresentados referem-se a uma amostra compactada para uma densidade seca de $2,19 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ e um teor em água de 3,9%.

Os resultados apresentados para o agregado calcário (0/19) foram obtidos por Coronado et al. (2004, citado por Gomes Correia 2004). Coronado et al. (2004) estudou as características de deformabilidade do agregado de calcário (0/19) através de um equipamento triaxial de precisão com amostras de 300mm de altura e 150mm de diâmetro. As deformações axiais e radiais foram também obtidas com recurso a LDT's. Os resultados apresentados referem-se a uma amostra compactada para uma densidade seca de $2,13 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ e um teor em água de 3,9%.

Para se proceder à comparação, os resultados dos ensaios dos quatro materiais foram corrigidos para eliminar o efeito do índice de vazios inicial e normalizados para um índice de vazios de valor igual a 0,3. O valor normalizado foi calculado utilizando a equação (2), onde $f(e)$ é a função de índice de vazios e E^* é o valor medido na amostra. A função de índice de vazios utilizada para se proceder à normalização foi a proposta por Iwasaki et al. (1978), cuja equação é dada pela equação (3).

$$E = E^* \frac{f(0,3)}{f(e)} \quad (2)$$

$$f(e) = \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} \quad (3)$$

Na Figura 6 apresentam-se os resultados obtidos do módulo de deformabilidade em função da tensão total, após a referida normalização. Como se pode verificar da figura, os valores encontrados para o módulo de deformabilidade dos ASIC são muito superiores aos encontrados nos agregados naturais (cerca de 4 vezes superior aos valores encontrados para o agregado granítico 0/31,5). Isto revela, quanto às características mecânicas, que os ASIC exibem melhores propriedades do que os materiais naturais especificados para as camadas de base. Estes resultados, conjuntamente com os apresentados por Gomes Correia et al. (2005), Gomes Correia et al. (2006) e Roque et al. (2006), enfatizam que os ASIC nacionais podem ser utilizados em obras geotécnicas, e muito particularmente nas infra-estruturas de transporte (taludes, camadas de leito de pavimento e de base).

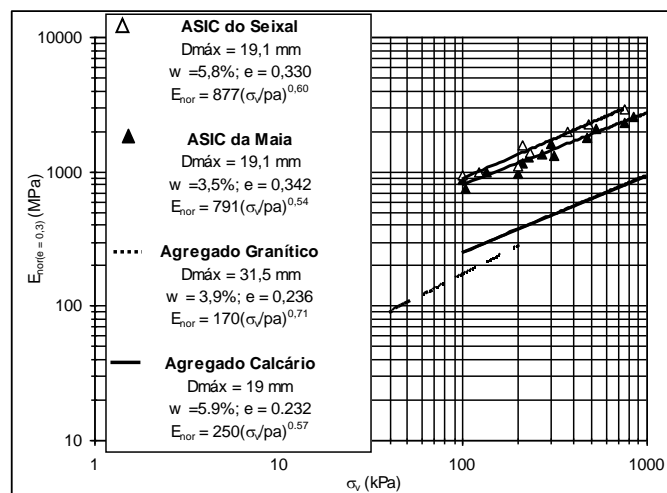


Figura 6 – Comparação das propriedades mecânicas dos ASIC com os agregados naturais

5. CONCLUSÕES

Este estudo contribuiu técnica e cientificamente para a aplicação do desenvolvimento dos princípios da sustentabilidade à construção, especialmente às obras geotécnicas. O trabalho de investigação promove em particular a utilização dos ASIC como um substituto dos materiais tradicionais aplicados na construção das infra-estruturas de transporte, contribuindo para a preservação de fontes naturais (materiais naturais) e para a redução dos volumes de resíduos a serem depositados em aterros.

Dos resultados apresentados verificou-se, por um lado, que os ASIC nacionais apresentam um bom desempenho na compactação e, por outro, que a influência da tensão total vertical no módulo de deformabilidade, no domínio das muito pequenas deformações (E_v), é descrita por uma lei potência, não incluindo a tensão lateral σ_3 como variável, tal como acontece para os materiais naturais. Da análise dos resultados em tensões totais verificou-se também que o valor da potência n encontrada para os ASIC (0,6 para o ASIC do Seixal e 0,52 para o ASIC da Maia) é similar aos valores normalmente encontrados para os materiais naturais que rondam os 0,5.

Os resultados mostraram também que os ASIC nacionais têm propriedades mecânicas melhores do que os materiais especificados para a utilização em camadas de base (agregado granítico 0/31,5 e agregado calcário 0/19). Esses resultados enfatizam que os ASIC nacionais podem ser utilizadas em obras geotécnicas e muito particularmente nas infra-estruturas de transporte

(aterro, camadas de leito de pavimento, sub-base e base). Contudo, é necessária a validação dos resultados laboratoriais, a qual está a ser realizada através de um trecho experimental, já construído na estrada nacional EN311 entre Fafe e Várzea Cova.

Este material poderá competir com os agregados naturais na construção das infra-estruturas de transporte ou outras obras geotécnicas, se forem encontrados benefícios económicos, os materiais satisfizerem as especificações ambientais e de engenharia, e o seu desempenho em campo for tão bom quanto o dos materiais tradicionais. Atendendo há experiência em outros países, bem como dos dados técnicos já obtidos no âmbito do projecto (Gomes Correia et al. 2005 e Gomes Correia et al. 2006) há razões para esperar que esses requisitos sejam preenchidos pelos ASIC da Siderurgia Nacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer à SN e à FCT pelo suporte financeiro prestado a este projecto (POCI/ECM/56952/2004), através do Programa POCI 2010 e fundo comunitário FEDER.

REFERÊNCIAS

- ALT-MAT (1999). Alternative materials in road construction. Project Founded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme.
- COURAGE (1999). Construction with unbound road aggregates in Europe. *Final report*, 123 p.
- Gomes Correia, A. (2004). "Evaluation of mechanical properties of unbound granular materials for pavements and rail tracks". *Proc. of the International Seminar on Geotechnics in Pavements and Railway Design and Construction*. Eds Gomes Correia e Loizos, Milpress, Rotterdam, 35-59.
- Gomes Correia A., Anhdan L. Q., Koseki J. e Tatsuoka F. (2001). "Small strain stiffness under different isotropic and anisotropic stress conditions of two granular granite materials, Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials". Eds Tatsuoka, Shibuya and Kuwano. Balkema, Swets and Zeitlinger, 209-215.
- Gomes Correia, A., Ferreira, S., Araújo, N., Castro, F., Trigo, L., Roque, A.J., Pardo de Santayana, F. e Fortunato, E. (2005). "Estudo de viabilidade de aplicação de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro". *Relatório CVR 257/2005*, Guimarães: CVR, 87 p.
- Gomes Correia, A., Ferreira, S., Castro, F., Trigo, L., Roque, A.J., Pardo de Santayana, F. e Fortunato, E. (2006). "Estudo de viabilidade de aplicação do agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) da Siderurgia Nacional do Seixal em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro. Comparação com as características do agregado da Siderurgia Nacional da Maia". *Relatório CVR 24/2006*, Guimarães: CVR, 47 p.
- Goto S., Tatsuoka F., Shibuya S., Kim Y-S. e Sato T. (1991). "A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory." *Soils and Foundations*, Vol. 31, Nº 1, 169-180.
- Hoque E. e Tatsuoka F. (1998). "Anisotropy in the elastic deformation of materials". *Soils and Foundations*, Vol. 38, Nº.1, 163-179.
- Iwasaki T., Tatsuoka F. e Takagi Y. (1978). "Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading". *Soils and Foundations*, Vol 18, Nº 1, 39-50.
- Roque A. J., Gomes Correia A., Fortunato E., Pardo de Santayana F., Castro F., Reis Ferreira S. M. e Trigo L. (2006). "A Geotecnia na valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados – Um projecto nacional", *12º Encontro Nacional do Saneamento Básico*, Cascais, Portugal.
- SAMARIS (2005). Sustainable and advanced materials for road infrastructures, Project Funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 5th Framework Programme.