

**A UTILIZAÇÃO DOS AGREGADOS SIDERÚRGICOS INERTES PARA A  
CONSTRUÇÃO EM OBRAS GEOTÉCNICAS –  
PERSPECTIVA GEOMECÂNICA**

**USE OF NATIONAL INERT SIDERUGICAL AGGREGATES FOR  
CONSTRUCTION IN GEOTECHNICAL WORKS –  
GEOMECHANICAL OVERVIEW**

Reis 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**

Actualmente, existe uma forte pressão para a utilização de materiais alternativos em construções de infraestruturas de transporte e obras geotécnicas, 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. Neste trabalho apresenta-se a caracterização geomecânica dos Agregados Siderúrgicos Inertes para a Construção (ASICs) e comparam-se os resultados obtidos com os previstos em especificações nacionais para as camadas estruturais dos pavimentos. Da análise dos resultados, verifica-se que os ASICs apresentam melhores propriedades mecânicas do que os materiais naturais. Além disso, os ensaios empíricos, unicamente válidos para os materiais e para as condições em que foram desenvolvidos, quando aplicados aos ASICs devem ser analisados com algumas reservas.

**ABSTRACT**

Nowadays, there is strong pressure to use alternative materials in construction of transport infrastructures and geotechnical works. The possibility of re-use of these materials benefits environmental issues, resulting in reduction of deposits and exploitation of natural materials. This paper presents the geomechanical characterization of Inert Steel Aggregates for Construction (ISACs) and compared the results with those in the national specifications for the structural layers of transport infrastructures. The results show that ASICs exhibit better mechanical properties than natural materials. Furthermore, empirical tests, only validated to the materials and conditions for which where developed, when applied to ASICs must be used with some reserves.

**1. INTRODUÇÃO**

As políticas ambientais têm vindo a limitar fortemente a extracção de materiais naturais e a incentivar estudos visando promover a possível utilização de resíduos nas obras de engenharia. A utilização de produtos obtidos a partir do processamento de resíduos, que apresentem propriedades mecânicas e ambientais adequadas em obras de engenharia, permitirá adaptar a sua utilização aos princípios do desenvolvimento sustentável.

Sendo os agregados naturais, o terceiro recurso natural mais utilizado em todo o mundo, e a indústria produtora de aço, uma grande geradora de resíduo (escórias) com potencial de ser valorizável como agregados, o estudo desses resíduos é fundamental. De facto, a Siderurgia Nacional (SN) prevê que a médio prazo a produção anual de escórias de aciaria nos seus fornos de arco eléctricos seja em cerca de 400 000 toneladas e a gestão deste importante volume de resíduos constituiu uma fonte de preocupação para a Empresa e para o País. É neste quadro que a SN e a Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) apoiam um Projecto de Investigação e Desenvolvimento, que decorreu no período 2005-2009, intitulado “*Aplicação de resíduos em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas – Valorização de escórias de aciaria*”. O Projecto de I&D é coordenado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e participam também a Universidade do Minho (UM) e o Centro para a Valorização de Resíduos (CVR). Este Projecto conta ainda com o apoio das Estradas de Portugal (EP) e do Instituto dos Resíduos (IR).

No entanto, dado ser muito recente a utilização dos materiais alternativos, as especificações técnicas existentes, na sua maioria de natureza empírica, ainda continuam fortemente associadas às propriedades obtidas com os materiais naturais. Nestes casos, os materiais alternativos têm que respeitar os mesmos requisitos que os materiais naturais. Contudo, vem-se observando que tal prática não é adequada uma vez que, os ensaios empíricos e correlações desenvolvidas para os materiais naturais não prevêem correctamente o comportamento dos materiais alternativos, quando colocados em obra. Assim, o Projecto de I&D contribuiu para a criação de uma metodologia mecanicista e ambiental para promover a reutilização de resíduos, em geral, e das escórias nacionais processadas em Agregados Siderúrgicos Inertes para a Construção (ASIC), em particular (Gomes Correia et al. 2009). O Projecto pretende ainda elaborar, com base nos resultados dos ensaios de laboratório e de campo, especificações técnicas para a utilização dos ASICs nas infraestruturas de transporte e nas obras geotécnicas e um manual de procedimentos com a metodologia de estudo para a utilização de resíduos em geral.

Neste trabalho apresenta-se a caracterização geomecânica dos ASICs e comparam-se os resultados obtidos com os previstos em especificações nacionais para as camadas estruturais dos pavimentos. Além disso, comparam-se os desempenhos mecânicos previstos para os ASICs através dos resultados dos ensaios empíricos (LA e MDe) com o desempenho mecânico previsto através dos ensaios mecanicistas (ensaios triaxiais de precisão e também de cíclicos de precisão com aplicação de tensão lateral constante - realizado segundo a norma europeia EN 13287-7:2004). Os desempenhos mecânicos expectáveis através dos ensaios empíricos e dos ensaios mecanicistas obtidos para os ASICs são ainda confrontados com os dos materiais naturais e a validação dos resultados laboratoriais é realizada através de um trecho experimental

Relativamente às propriedades ambientais, apesar de não serem apresentadas neste trabalho verificou-se que os ASICs satisfazem os requisitos ambientais nacionais em vigor, como demonstraram Roque et al. (2006 e 2009).

## **2. PROPRIEDADES ÍNDICE E MECANICISTAS**

No Quadro 1, apresentam-se, sucintamente, as propriedades índice (geométricas, físicas e índices mecânicos) e mecanicistas (compressibilidade, deformabilidade e resistência) dos dois ASICs produzidos na Siderurgia da Maia, designados neste trabalho por ASIC da Maia e ASIC do Trecho) e dos ASICs produzidos na Siderurgia do Seixal, designados por ASIC do Seixal.

De acordo com as propriedades geométricas obtidas para os ASICs verifica-se que relativamente às características granulométricas estes materiais apresentam granulometria extensa. Quanto às propriedades físicas podemos concluir que os ASICs são materiais não

## Contribuições Recentes para o Projecto, a Construção, a Exploração e a Reabilitação

plásticos e com uma massa volúmica seca máxima elevada (da ordem dos 2,3 a  $2,4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) e um teor em água óptimo baixo (entre 3,5 a 5%) correspondentes a uma energia de compactação pesada. Quanto aos índices mecânicos, tratam-se de materiais de boas resistências à fragmentação e ao desgaste, traduzidas por um valor de Los Angeles da ordem dos 25% e um valor de micro-Deval de 11%. Trata-se também de materiais com valores de CBR baixos, cerca dos 90%, quando comparado com os valores encontrados na bibliografia (da ordem dos 300%, SAMARIS, 2005).

No que concerne às propriedades mecanicistas, nomeadamente, às propriedades de compressão uniaxial verifica-se que o módulo edométrico secante ( $E_{edo}$ ) obtido para o ASIC da Maia é muito elevado (2GMPa). Dos resultados obtidos para a resistência ao corte verifica-se que os valores de ângulo de atrito de pico,  $\phi_p$  ( $^\circ$ ), para os ASICs da Maia e do Trecho são bastante elevados, superiores a  $41^\circ$ . Estes valores elevados para o ângulo de atrito estão de acordo com os encontrados na bibliografia, onde se verifica que os agregados siderúrgicos apresentam um valor de ângulo de atrito, normalmente, entre os  $40^\circ$  a  $45^\circ$ .

Quadro 1 - Propriedades Índice e Mecanicistas dos ASICs Nacionais

Propriedade	Parâmetros	Valor		
		Maia	Trecho	Seixal
Geométricas	Dimensão máxima das partículas: $D_{max}$ (mm)	76,1	50,8	38,1
	Coefficiente de uniformidade: Cu	9,64	13,3	33,2
	Coefficiente de curvatura: Cc	1,95	2,1	4,3
	Índice de lamelação (%)	10	5	5
	Índice de alongamento (%)	7	6	6
Físicas	Equivalente de Areia: EA (%)	100	-	80
	Valor de azul de metileno: VBS (%)	0	0	0
	Limites de Atterberg	NP	NP	NP
	Absorção de água: Abs (%)	2,59	2,09	3,87
	Densidade das partículas: Gs	3,26	3,26	3,07
Mecânicas	Massa volúmica seca máxima: $\rho_{dOPM}$ ( $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )	2,43	2,39	2,32
	Teor em água: $w_{OPM}$ (%)	3,45	4,80	5,0
	CBR Imediato (%)	72	92	100
	Los Angeles: LA (%)	28	-	23
	Micro-Deval: MDe (%)	11	-	11
Compressibilidade	$E_{edo}$ (MPa)	2000	-	-
Resistência ao corte	$\phi_p$ ( $^\circ$ )	42,5	41,0	-
	Coesão: c (kPa)	227,6	216	-
Deformabilidade	$E_{(0,35; 1\%; 1500 \text{ kPa})}$ (MPa)	~130	~140	-
	$E_{(0,35; 0,05\%; 1500 \text{ kPa})}$ (MPa)	~1230	-	-
	$E_{(0,35; 0,004\%; 1500 \text{ kPa})}$ (MPa)	~3207	~3512	~4035
	$E_{(p=300\text{kPa}; q=475\text{kPa})}$ (MPa)	~720	-	-
	$\epsilon_{1c}$ ( $\times 10^{-4}$ )	6,98	-	-

Para se compararem os resultados obtidos nos diferentes materiais, os módulos de deformabilidade corrigidos para um índice de vazios de 0,35 e correspondente a um nível de deformação de 0,004% (ensaios triaxiais de precisão), foram determinados para uma tensão vertical arbitrária de 1500kPa ( $E_{(0,35; 0,004\%; 1500 \text{ kPa})}$ ). O mesmo procedimento foi feito no caso do módulo de deformabilidade secante correspondente a um nível de deformação de 1% ( $E_{(0,35; 1\%; 1500 \text{ kPa})}$ ), obtido dos resultados dos ensaios triaxiais clássicos e no caso do módulo de deformabilidade correspondente a um nível de deformação de 0,05%, ( $E_{(0,35; 0,05\%; 1500 \text{ kPa})}$ ), obtidos do ensaio triaxial cíclico com aplicação de tensão lateral constante. Detalhes dos procedimentos de ensaios triaxiais realizados (ensaios clássicos de precisão e cíclico) e da normalização efectuada, podem ser encontrados em Gomes Correia et al. (2009) e em Reis

Ferreira (2010). Dos resultados apresentados no Quadro 1 os valores do módulo de deformabilidade de referência são muito elevados para os dois níveis de deformação, superiores a 3,2GPa e a 130kPa para um nível de deformação de  $4 \times 10^{-5}$  e 1%, respectivamente. O valor encontrado para o módulo de deformabilidade de referência para o nível de deformação de 0,05%, no ASIC da Maia também é muito elevado (1,2GPa) Estas características, elevados módulos de deformabilidade, são muito relevantes quando se pretendem utilizar os materiais em infraestruturas de transporte.

No mesmo quadro apresentam-se ainda o valor do módulo de deformabilidade característico ( $E_c$ ) e a deformação vertical permanente característica ( $\epsilon_{1c}$ ), definidos na norma europeia EN 13286-7 (2004) e obtidos para o ASIC da Maia. O valor do  $E_c$  apresentado é correspondente a um valor de tensão normal média ( $p$ ) de 300kPa e de desvio ( $q$ ) de 475kPa ( $E_{C(p=300kPa; q=475kPa)}$ ). O valor de  $\epsilon_{1c}$ , tal como referido na EN 13286-7 (2004) é determinado pela diferença entre o valor da deformação axial permanente obtida no ciclo 20000 e 100, durante a primeira fase do ensaio, ou seja o acondicionamento do ensaio. Mais detalhes sobre o equipamento utilizado e o procedimento de ensaio podem ser encontrados em Gomes Correia et al. (2010) e Reis Ferreira (2010). Os resultados obtidos evidenciam um valor bastante elevado do módulo de deformabilidade característico (720MPa) e um valor bastante baixo da deformação axial permanente característica ( $\sim 7 \times 10^{-4}$ ), evidenciando um muito bom desempenho mecânico dos ASICs.

### **3. COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES ÍNDICE COM OS VALORES ESTABELECIDOS PARA OS MATERIAIS BRITADOS NATURAIS NOS CADERNOS DE ENCARGOS DAS ESTRADAS DE PORTUGAL PARA AS CAMADAS DE BASE, SUB-BASE E LEITO DE PAVIMENTO**

No âmbito dos aspectos de engenharia, procede-se de seguida à comparação das propriedades índice dos ASICs da Maia, do Trecho e do Seixal, com os valores estabelecidos para os materiais naturais britados no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal para as camadas de base, sub-base e leito de pavimento.

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (2007) especifica que os materiais naturais britados a aplicar em camadas de base e sub-base de pavimento devem ser não plásticos e que os mesmos materiais em camada de leito de pavimento devem apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%. Quanto ao índice de lamelação e alongamento o Caderno de Encargos especifica que os materiais naturais a aplicar em camadas de base não deve ultrapassar os 35%. Quanto aos valores de Los Angeles, o Caderno de Encargos especifica que os materiais britados naturais quando utilizados nas camadas de base e leito de pavimento devem ter um valor máximo de 40%, e quando utilizados na camada de sub-base os valores não devem ser superiores a 45%. Os Cadernos de Encargos das EP especificam ainda fusos granulométricos, nos quais as curvas granulométricas dos materiais devem cair de forma a poderem ser aplicados ao nível das diferentes camadas dos pavimentos.

O Quadro 2 sumaria as propriedades índice dos ASICs e as especificações dos cadernos de encargos das Estradas de Portugal para os materiais naturais britados a aplicar em camadas de base, sub-base e leito de pavimento. Na Figura 1 comparam-se as curvas granulométricas dos ASICs com o fuso granulométrico especificado no Caderno de Encargos das EP para os materiais e aplicações anteriormente referidas.

Quadro 2 - Propriedades Índice dos ASICs e Especificações do Caderno de Encargo das Estradas de Portugal para os Materiais Naturais Britados a Aplicar em Camadas de Base, Sub-Base e Leito de Pavimento

Propriedade	Parâmetro	ASIC			Valor Admissível		
		Maia	Trecho	Seixal	Leito	Sub-base	Base
Índices físicos e geométricos	w <sub>L</sub> (%)	NP	NP	NP	25*	NP	NP
	IP (%)	NP	NP	NP	6*	NP	NP
	VBS (%)	0	0	0	2*	-	-
	EA (%)	100	-	80	30**	45**	50**
	Lamelação (%)	10	5	-	-	-	35*
	Alongamento (%)	7	6	-	-	-	35*
Índices mecânicos	LA(%)	28	-	23	40*	45*	40*

\*Valor máximo; \*\*Valor mínimo

Da análise conjunta do Quadro 2 e da Figura 1 verifica-se que os resultados obtidos nos ASICs caem nos parâmetros especificados para a utilização de material em camadas de base, sub-base e leito de pavimento. Exceptua-se, no entanto, os parâmetros relacionados com a granulometria. Refira-se, contudo, que apesar da correcção da granulometria ser possível os ASICs produzidos na SN da Maia e na SN do Seixal já foram utilizados em campo e se observou um bom desempenho na compactação. O ASIC produzido na SN da Maia foi utilizado nas camadas de aterro, leito de pavimento, sub-base e base num trecho experimental, realizado no itinerário EN 311 entre Fafe/Várzea Cova, e o ASIC do Seixal foi utilizado como material de aterro e de leito de via, num ramal ferroviário que liga a Siderurgia Nacional do Seixal à Rede Ferroviária Nacional (Duarte et al., 2009).

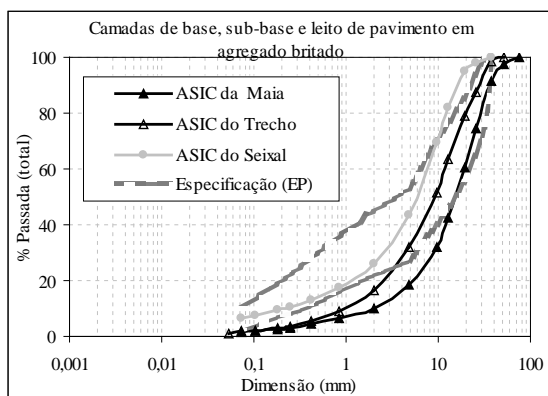


Figura 1 – Comparação das Curvas Granulométricas dos ASICs com o Fuso Granulométrico Especificado no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal para os Materiais Naturais Britados a Aplicar em Camadas de Base, Sub-Base e Leito de Pavimento

## 4. CLASSIFICAÇÃO DOS ASICs

### 4.1. Classificação Empírica

O sistema de caracterização da aptidão dos materiais amplamente utilizado no domínio rodoviário em Portugal é baseado na classificação francesa (NF P 18-321, 1982). Esta classificação qualifica a aptidão dos agregados em função dos valores obtidos nos ensaios de Los Angeles (LA) e micro-Deval em meio húmido (MDe). Segundo a referida norma os agregados podem ser classificados, do ponto de vista mecânico, em 5 classes, onde à classe A (baixos valores de LA e MDe) pertencem os materiais com melhores características mecânicas e à classe F pertencem os materiais com piores características mecânicas. Segundo esta

classificação o ASIC da Maia pertence à classe C e o ASIC do Seixal, pertence à classe B. Assim, de acordo com esta classificação o ASIC do Seixal apresenta melhores características mecânicas do que o ASIC da Maia.

Actualmente, as novas normas europeias também permitem classificar os agregados, e de acordo com a norma europeia NP EN 13242 (2002), os ASICs do Seixal e da Maia são ambos MDe20 e LA25 e LA30, respectivamente.

#### 4.2. Classificação Mecanicista

Baseando-se nos estudos realizados por Paute et al. (1994), onde estudaram o comportamento reversível de 14 agregados naturais, através de ensaios triaxiais cíclicos, em França, foi proposta uma nova classificação para estes materiais (NF P98-129:1994). De acordo com a norma francesa NF P98-129 (1994), a aptidão mecânica dos agregados é baseada no valor do módulo de deformabilidade característico,  $E_c$ , determinado para uma tensão de  $p=250kPa$  e  $q = 500kPa$  e no valor da deformação axial permanente característica,  $\varepsilon_{1c}$ , o qual define a resistência do material às deformações permanentes. O parâmetro  $\varepsilon_{1c}$ , é determinado a partir dos resultados obtidos durante a primeira fase de ensaio, onde se faz o acondicionamento dos provetes e é determinado pela Expressão (1) onde  $\varepsilon_{1p}(20000)$  é a deformação axial permanente acumulada até ao ciclo 20000, ou seja, no final do acondicionamento, e  $\varepsilon_{1p}(100)$  é a deformação axial permanente acumulada nos primeiros 100 ciclos.

$$\varepsilon_{1c} = \varepsilon_{1p}(20000) - \varepsilon_{1p}(100) \quad [1]$$

Os parâmetros ( $E_c$  e  $\varepsilon_{1c}$ ) são obtidos sobre o material compactado para um teor em água igual ao óptimo menos 2% e para uma densidade igual a 97% referida à densidade do ensaio Proctor modificado.

Segundo a norma francesa (NF P98-129, 1994), são definidas 4 classes de materiais, de C1 (excelente) até C4 (marginal). O agregado com um melhor desempenho mecânico será aquele que apresentar uma elevada rigidez e uma baixa susceptibilidade às deformações permanentes. No Quadro 3 apresentam-se os valores admissíveis para cada uma das classes dos agregados.

Actualmente, também a norma europeia (EN 13286-7, 2004) permite classificar os materiais e determinar a sua aptidão quando colocados nas camadas dos pavimentos. Segundo a norma europeia, EN 13286-7 (2004), tal como para a norma francesa, NF P98-129 (1994), a classificação dos agregados é determinada a partir dos valores encontrados para  $E_c$  e  $\varepsilon_{1c}$ , determinados sobre as condições de ensaio e de compactação anteriormente referidas. Com base nos valores encontrados para os dois parâmetros são definidas três classes de aptidão mecânica, C1 a C3 (ver Quadro 3).

Quadro 3 - Classes de Desempenho dos Agregados Segundo as Normas NF P98-129 (1994) e EN 13286-7 (2004)

Classe	NF P98-129, 1994		EN 13286-7, 2004	
	$E_c$ MPa	$\varepsilon_{1c}$ ( $10^{-4}$ )	$E_c$ (MPa)	$\varepsilon_{1c}$ ( $\times 10^{-4}$ )
C1	$E_c \geq 500$	$\varepsilon_{1c} \leq 100$	$E_c \geq 500$	$\varepsilon_{1c} \leq 25$
C2	$E_c \geq 500$ $300 \leq E_c < 500$	$100 < \varepsilon_{1c} \leq 150$ $\varepsilon_{1c} \leq 150$	$E_c \geq 500$ $250 \leq E_c < 500$	$25 < \varepsilon_{1c} \leq 60$ $\varepsilon_{1c} \leq 60$
C3	$E_c \geq 300$ $120 \leq E_c < 300$	$150 < \varepsilon_{1c} \leq 200$ $\varepsilon_{1c} \leq 200$	$E_c \geq 250$	$\varepsilon_{1c} > 60$
C4	$E_c \geq 120$	$\varepsilon_{1c} > 100$	-	-

Ec: Módulo característico;  $\varepsilon_{1c}$ : Deformação permanente característica

Do ensaio triaxial cíclico realizado para estudar o comportamento reversível, realizados sobre o ASIC da Maia, obteve-se para a deformação axial característica o valor de  $6,98 \times 10^{-4}$  e um valor para o módulo de deformabilidade característico de 720MPa, determinado para um valor de  $q=475\text{kPa}$  e de  $p=300\text{kPa}$  (próximo aos valores preconizados pelas normas:  $q=500\text{kPa}$  e  $p=250\text{kPa}$ ). De acordo com estes valores o ASIC da Maia pertence à classe C1, quer se utilize a classificação propostas pela norma francesa ou europeia, ou seja, são materiais com propriedades mecânicas excelentes. Refira-se, contudo, que a classificação do ASIC da Maia foi obtida nas condições de estado previstas nas duas normas (teor em água igual ao óptimo menos 2% e para uma densidade igual a 97% referida à densidade do Proctor modificado), mas para um procedimento de ensaio com tensão lateral constante e não variável, como preconizado pelas normas. Saliente-se, no entanto, que dos estudos efectuados por Brown e Hide (1975) os ensaios a tensão lateral variável (TLV) ou constante (TLC) conduzem a valores do módulo reversível similares, desde que a tensão de confinamento nos ensaios TLC seja igual ao valor médio da tensão utilizada nos ensaios TLV.

## **5. COMPARAÇÃO DAS CLASSIFICAÇÕES EMPÍRICA E MECANICISTA. VALIDAÇÃO EM CAMPO**

Na Figura 2 comparam-se os desempenhos mecânicos de diferentes agregados naturais e materiais alternativos quando se utilizam os ensaios empíricos (LA e MDe) e os ensaios mecanicistas. Na Figura 2a) apresenta-se a classificação de diversos agregados naturais (resultados apresentados por Paute et al., 1994) e dos ASICs da Maia e do Seixal, baseada nos resultados dos ensaios empíricos (norma NF P 18-321, 1982). Na Figura 2b) apresenta-se a classificação dos mesmos materiais, baseada nos resultados dos ensaios mecanicistas (norma NF P98 129,1994). Na mesma figura apresentam-se ainda os valores obtidos para uma escória de aciaria, um agregado calcário e um resíduo de construção e demolição (RCD), cujos resultados foram apresentados por Grégoire et al. (2009). Os valores do módulo característico e da deformação característica, obtidos Grégoire et al. (2009), foram também determinados através do procedimento de ensaio com tensão lateral constante, para um valor de  $q=400\text{kPa}$  e de  $p=233\text{kPa}$ .

Da análise da Figura 2a) verifica-se que o ASIC da Maia apresenta um comportamento mecânico inferior a alguns agregados naturais, nomeadamente os agregados provenientes de rochas eruptivas, aluviões e de rochas calcárias duras. Contrariamente, da análise da Figura 2b) verifica-se que o ASIC da Maia, bem como os outros dois materiais não naturais (escória de aciaria e RCD), apresentam um comportamento mecânico superior aos agregados naturais, anteriormente referidos. Ou seja, a partir dos resultados dos ensaios mecanicistas, verifica-se que os ASICs têm um melhor desempenho mecânico do que os materiais naturais e do que o esperado através dos resultados dos ensaios empíricos (MDe e LA). Além disso, como mostraram Paute et al. (1994), mesmo no caso dos materiais naturais, os agregados calcários provenientes das rochas brandas, com uma classificação mecânica empírica muito desfavorecida (Classe E) apresentam um comportamento mecânico muito superior ao esperado, superando até materiais com classe mecânica empírica muito superior (agregados eruptivos e calcários duros).

Os resultados apresentados na Figura 2c), do módulo de deformabilidade para um nível de deformação da ordem dos  $4 \times 10^{-5}$ , em função da tensão vertical e corrigidos para um índice de vazios de valor igual a 0,35, para três materiais naturais utilizados em camadas de base (Agregado Granítico 0/31,5 e 0/19 e Agregado Calcário 0/19) e para os ASICs nacionais comprovam mais uma vez o melhor desempenho mecânico dos ASICs nacionais, relativamente aos agregados naturais. Refira-se que os resultados apresentados para o Agregado Granítico 0/31,5 foram obtidos por Coronado (2005) e os restantes foram obtidos por Reis Ferreira (2010).

Os resultados apresentados na Figura 2d), das deflexões máximas em função da carga aplicada, medidas durante os ensaios Falling Weight Deflectometer (FWD), numa campanha de monitorização realizadas num trecho experimental, onde foram utilizados os ASICs ao nível das camadas de aterro, leito de pavimento e base comprovam o melhor desempenho mecânico dos ASICs, relativamente aos materiais naturais.

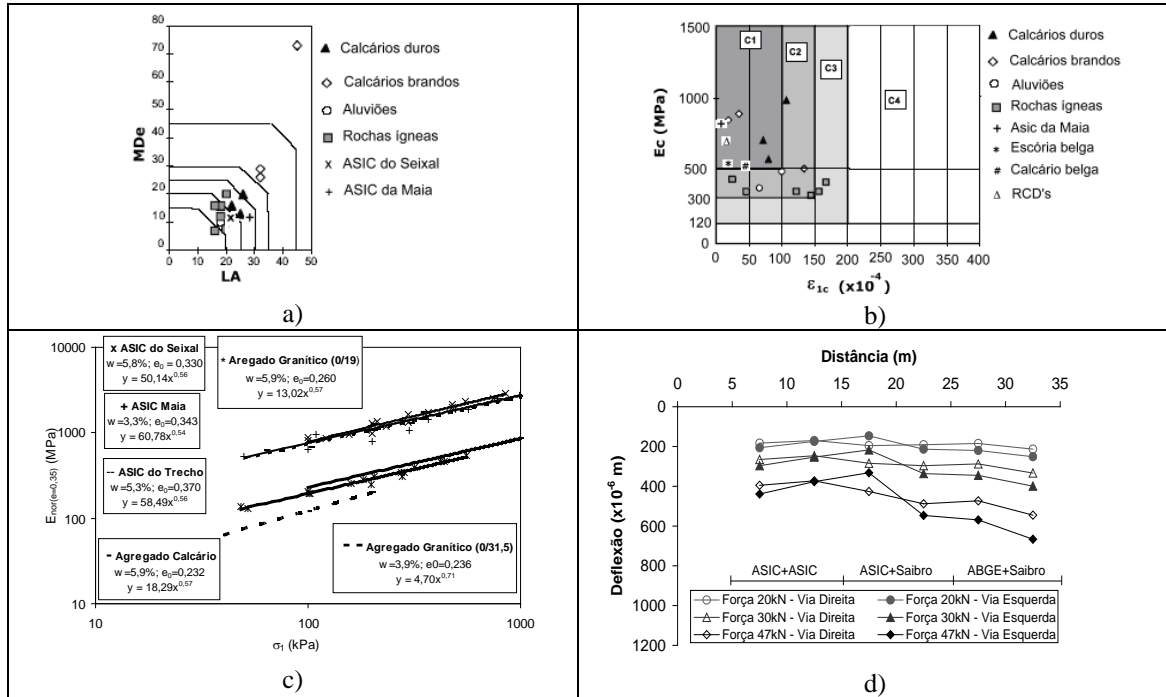


Figura 2 – A Evidência da Não Correlação entre as Classificações Baseadas em Ensaios Empíricos e Mecanicistas

Também num projecto europeu recente (ALT-Mat, 1999) alguns resíduos mostraram um desempenho mecânico em campo superior ao esperado através dos resultados dos ensaios empíricos. Estas constatações, melhor desempenho em campo do que o esperado através dos ensaios empíricos têm vindo a ser observadas, quer para materiais naturais, quer para resíduos (Paute et al. 1994, Reid 2001, Gomes Correia e Lacasse, 2005). Isto revela a necessidade de alterar os princípios de caracterização dos materiais, dando-se maior ênfase à base racional (aproximação mecanicista) em detrimento aos ensaios empíricos. Consequentemente, o dimensionamento dos materiais deve basear-se em ensaios de performance relacionada.

A classificação mecânica apresentada nas normas NF P98-129 (1994) e EN 13286-7 (2004), baseadas em ensaios mecanicistas, são muito mais realistas visto que os parâmetros mecânicos que utiliza referem-se ao comportamento mecânico do material integral, com a sua granulometria e condições de estado (compacidade e teor em água) e não a uma única fracção do material, a qual pode não ser representativa do comportamento global do material. Assim, deve-se utilizar as classificações com base nos ensaios mecanicistas, com vista a uma melhor racionalização na utilização dos agregados naturais e sobretudo quando se utilizam os materiais alternativos.

## 6. CONCLUSÕES

Do estudo realizado verificou-se que os ASICs apresentam melhores propriedades mecânicas do que os materiais naturais. Além disso, os ensaios empíricos, quando aplicados a estes materiais



devem ser utilizados com algumas reservas. De facto, os princípios da caracterização dos materiais devem ser alterados, dando-se maior ênfase à base racional em detrimento da base empírica, pelo menos no caso dos materiais não tradicionais. A validação dos resultados laboratoriais obtidos através dos ensaios, edométrico, triaxial clássico, triaxial de precisão e triaxial cíclico de precisão, foi comprovada através de resultados de campo obtidos com a realização de um trecho experimental. Os resultados dos ensaios realizados aquando da construção e das campanhas de monitorização, confirmam o bom desempenho mecânico dos ASICs.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores desejam manifestar o seu agradecimento à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelos apoios financeiros concedidos, à Bolsa de Doutoramento em Empresa (referência SFRH/BDE/15661/2007 e à Bolsa de Doutoramento (referência SFRH/BD/32571/2006), financiadas por fundos nacionais do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior e ao Projecto de I&D (Processo POCI/ECM/56952/2004) financiado através do Programa Operacional Ciência e Inovação 2010 (POCI 2010) e do fundo comunitário europeu 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
- Brown, S. F.; Hyde, A.F.L. (1975). Significance of Cyclic Confining Stress in Repeated Load Triaxial Testing of Granular Material. *Transportation Research Record*, N.º. 537, pp. 49-58.
- Coronado, O. G. (2005). *Etude du comportement mécanique de matériaux granulaires compactés non saturés sous chargements cycliques*. Tese de Doutoramento. Ecole Centrale Paris.
- Duarte, M. J., Midões, T. e Ventura, C. (2009). Ramal ferroviário da siderurgia nacional. Uso do ASIC em camadas de aterro e camadas de coroamento/leito de via ferroviária. *Seminário sobre a Valorização de Resíduos em Obras geotécnicas - Caracterização e medidas para o desenvolvimento do sector*. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. Actas in CD-ROM.
- EN 13286-7 (2004). *Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7: Cyclic loading triaxial test for unbound mixtures*.
- Estradas de Portugal (2007). *Caderno de Encargos*. Almada, paginação múltipla.
- Gomes Correia, A.; Lacasse, S. (2005). Technical session 2e: marine & transportation geotechnical engineering. *Proceedings of 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan, pp. 1707-1710.
- Gomes Correia, A., Roque, A. J., Reis Ferreira, S., Fortunato, E. e Cavalheiro, A. (2009). Metodologia de estudo para a valorização de materiais não tradicionais em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas. O caso das escórias de aciaria da siderurgia nacional: caracterização e monitorização geomecânica. *Seminário sobre a valorização de resíduos em obras geotécnicas. Caracterização e medidas para o desenvolvimento do sector*, Aveiro, Portugal, Actas (CD-ROM).
- Gomes Correia, A., Araújo, N. e Reis Ferreira, S. (2010). Triaxial cíclico de grandes dimensões para o estudo de geomateriais sob carregamento cíclico. *Actas do 12º Congresso Nacional de Geotecnia*. Em impressão.
- Grégoire, C., Dethy, B., Detry, J.; Gomes Correia, A. (2009). Characterizing natural and recycled granular materials for (sub)base layers of roads by cyclic triaxial testing.

- Proceedings of 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields*, Campaign, EUA, Vol. 1 , pp. 215-223.
- Paute, J.L., Horny, P.; Benaben, J.P. (1994). Comportement Mécanique des Graves Non-Traitées au Triaxial à Chargement Répétés. *Bulletin de Liaison de Laboratoires Central des Ponts et Chaussées*, N.º 190, pp. 27-38.
- NP EN 13242 (2002) – *Agregados para materiais tratados com ligantes hidráulicos e materiais não tratados utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária*.
- NF P 98-129 (1994). *Graves non traitées: Définition, Composition, Classification*.
- NF P 18-321 (1982). *Aggregates - Characteristics of aggregates intended for road works*.
- Reid, J. M. (2001). The use of alternative materials in road construction. Disponível em [www.viastrade.it/letteratura/materiali/TRL\\_TO\\_ALT\\_MAT.pdf](http://www.viastrade.it/letteratura/materiali/TRL_TO_ALT_MAT.pdf). Acesso em 14/12/2009.
- Reis Ferreira, S. M. (2010). *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares. Aplicação às escórias de aciaria nacionais*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho (Em impressão).
- 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, Actas (CD-ROM).
- Roque, A. J., Gomes Correia, A., Castro, F., Silva, S. e Cavalheiro, A. (2009). Metodologia de estudo para a valorização de materiais não tradicionais em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas. O caso das escórias de aciaria da siderurgia nacional: caracterização e monitorização geoambiental. *Seminário sobre a valorização de resíduos em obras geotécnicas. Caracterização e medidas para o desenvolvimento do sector*, Aveiro, Portugal, Actas (CD-ROM).
- 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.