

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

Study methodology for promoting non-traditional materials in transportation infrastructures and geotechnical works. The steel slags of National Steel Industry: Characterization and geomechanical monitoring

Gomes Correia, António

Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt

Ferreira, Sandra

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

Roque, António José

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, aroque@lnec.pt

Fortunato, Eduardo

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, efortunato@lnec.pt

Cavalheiro, António

Siderurgia Nacional, Seixal, Portugal, acavalheiro@seixal.snlongos.pt

Resumo: A Siderurgia Nacional (SN) estima a produção anual de escórias de aciaria em cerca de 270 000t. A gestão deste importante volume de resíduos constituiu uma fonte de preocupação para a Empresa e para o País. Neste contexto a Fundação para a Ciência e a Tecnologia e a SN apoiam um Projecto de I&D 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 dos agregados siderúrgicos, em particular. Neste trabalho apresenta-se a metodologia utilizada, na caracterização e monitorização geomecânica, para estudar a viabilidade de aplicação dos agregados siderúrgicos nacionais em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas bem como, resultados de ensaios que evidenciam o excelente desempenho mecânico destes materiais.

Abstract: The Portuguese Steel Companies (PSC) estimates the annual production of steel slag in about 270,000t. The management of this important volume of waste represents a significant source of concern for the PSC and for the country. The Portuguese Foundation for Science and Technology and the PSC financially support a R&D Project named “Application of waste in transportation infrastructures and geotechnical constructions – Re-use of steel slags”. This project pretends to contribute for a mechanistic and environmental methodologies that promotes the re-use of the wastes in general and the steel aggregates, in particularly. This paper presents the methodology used in the characterization and geomechanical monitoring for study the viability of application of national steel aggregates in transportation infrastructures and geotechnical works, as well as, test results that show the excellent mechanical performance of these materials.

1 INTRODUÇÃO

Dado ser muito recente a utilização dos materiais alternativos em construções de infraestruturas de transporte e obras geotécnicas, 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 que substituam os materiais naturais têm que respeitar os mesmos requisitos que os materiais naturais. Contudo, vem-se observando que tal prática não é adequada, não devendo os materiais alternativos ser estudados através de ensaios empíricos e correlações desenvolvidas para materiais naturais, que não prevêem correctamente o comportamento destes materiais, quando colocados em obra.

É neste sentido que o 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”, pretende contribuir para a criação de uma metodologia mecanicista e ambiental que promova a reutilização de resíduos, em geral, e das escórias processadas em Agregados Siderúrgicos Inertes para a Construção (ASIC), em particular. Este Projecto pretende ainda elaborar, com base nos resultados dos ensaios de laboratório e de campo, especificações técnicas para a utilização dos agregados siderúrgicos nas infraestruturas de transporte e nas obras geotécnicas e um manual de procedimentos com a metodologia de estudo para a utilização de resíduos.

Neste trabalho apresenta-se a metodologia de estudo realizada para a caracterização e monitorização geomecânica dos ASICs quando estes são utilizados nas infraestruturas de transporte. Apresentam-se os resultados obtidos em laboratório relacionados com as propriedades índice (geométricas, físicas e mecânicas) e com as propriedades de deformabilidade, as quais são muito importantes no tipo de aplicação referida. Os resultados são comparados com os obtidos em materiais especificados para as camadas estruturais dos pavimentos, nomeadamente um agregado granítico e um agregado calcário. Compara-se o comportamento mecânico expectável entre os ASICs e os materiais naturais, quando se utilizam os ensaios empíricos (LA, MDe e CBR) e os ensaios mecanicistas (triaxial de precisão). Finalmente, apresentam-se alguns dos resultados obtidos da monitorização de um trecho experimental, onde se utilizaram os ASICs e materiais tradicionais, nomeadamente as deflexões máximas da estrutura obtidas através de ensaios de deflectómetro de impacto pesado, FWD.

A caracterização e monitorização geoambiental dos ASICs pode ser encontrada num outro trabalho apresentado neste seminário (Roque et al., 2009).

2 METODOLOGIA DE ESTUDO UTILIZADA PARA ESTUDAR A VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DOS ASICS EM INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE

No sentido de avaliar a viabilidade técnica de utilização dos ASICs, produzidos pela Siderurgia Nacional (da Maia e SN do Seixal), na construção de infraestruturas viárias e obras geotécnicas, o Projecto de I&D deu prioridade aos ensaios de laboratório relacionados com as propriedades mecânicas e ambientais, bem como aos ensaios de campo, envolvendo monitorização do mesmo tipo de propriedades, seguindo as recomendações mais relevantes dos projectos da Comunidade Europeia (COURAGE 1999, ALT-MAT 1999 e SAMARIS 2005) relacionados com os materiais não tradicionais.

Assim, primeiramente foi realizada a caracterização geomecânica laboratorial dos ASICs, a qual envolveu um vasto programa experimental, onde se estudaram as propriedades índice (geométricas, físicas e mecânicas utilizando ensaios empíricos) e as propriedades mecânicas usando ensaios mecanicistas (relacionadas com a deformabilidade e a resistência).

As propriedades índice determinadas, relativas às propriedades geométricas, referem-se à granulometria, índice de achatamento (IA) e de forma (IF). Quanto às propriedades físicas determinou-se o equivalente de areia (EA), o valor de azul de metileno (VBS), os limites de Atterberg designadamente, os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), a densidade das partículas (Gs), a massa volúmica (ρ) e absorção de água (Abs). As propriedades mecânicas determinadas, utilizando os ensaios empíricos, referem-se à resistência à fragmentação - Los Angeles (LA), à resistência ao desgaste - micro-Deval (MD), à carga pontual, ao esmagamento, ao desgaste em meio aquoso, à fragmentalidade, à degradabilidade, à compactação Proctor normal/CBR e à compactação Proctor modificado/CBR.

As propriedades mecânicas relacionadas com a compressibilidade e a resistência foram determinadas através de ensaios mecanicistas, os quais caracterizam bem o comportamento geomecânico dos materiais. Os ensaios realizados foram o ensaio de compressão unidimensional em provetes de 500mm de diâmetro, o ensaio triaxial saturado consolidado drenado em provetes de 300mm de diâmetro e resistência ao corte em compressão triaxial e triaxial cíclico de precisão em provetes de 150mm de diâmetro.

Após a caracterização laboratorial e no sentido de calibrar e validar os resultados mecanicistas laboratoriais, bem como avaliar o desempenho do ASIC quando colocado em obra, e compará-lo com o dos materiais naturais, construiu-se e instrumentou-se um trecho experimental localizado na estrada nacional EN311 entre Fafe e Várzea-Cova. O trecho experimental foi construído com três secções distintas, com 10m de comprimento cada e uma altura de aterro de 3m, no mínimo. Assim, construiu-se (1) uma secção correspondente aos materiais tradicionais de construção rodoviária, constituída por saibro granítico, no corpo do aterro e na camada de leito de pavimento, e por agregado britado de granulometria extensa (ABGE) na camada de base (designada por ABGE + Saibro); (2) uma outra com saibro granítico, no corpo do aterro e na camada de leito de pavimento, e ASIC na camada de base (designada por ASIC + Saibro) e (3) uma última secção com aterro, camadas de leito de pavimento e base granulares em ASIC (designada de ASIC + ASIC).

Durante a construção do trecho instrumentaram-se as diferentes camadas (aterro, leito de pavimento, base, regularização e desgaste) para comprovar e avaliar o desempenho mecânico e ambiental dos materiais. No corpo do aterro foram colocadas marcas superficiais para medição de deslocamentos superficiais verticais (assentamentos), placas para medição dos deslocamentos verticais internos (designados por varões extensiométricos) e, dois lisímetros para avaliar a evolução da massa poluente, um localizado na secção ABGE + Saibro e o outro na secção ASIC + ASIC. No topo da camada do leito do pavimento colocaram-se extensómetros verticais para medição das

extensões de compressão e na base da camada de regularização colocaram-se extensómetros horizontais para medição das extensões de tracção. Nas camadas betuminosas (regularização e desgaste) foram colocados termopares para medição da temperatura. Uma descrição mais detalhada sobre a construção e a instrumentação pode ser consultada em Gomes Correia et al. (2008a).

Em resumo, a monitorização geomecânica realizada refere-se a: a) deslocamentos verticais internos (assentamentos) do corpo do aterro, medidos através de varões extensométricos verticais; b) deslocamentos superficiais verticais (assentamentos), medidos através de marcas superficiais; c) deflexões da estrutura (camadas do pavimento + base +leito de pavimento + aterro), medidas com o deflectómetro de impacto pesado (FWD); d) extensões positivas (de compressão) transmitidas ao topo da camada de leito de pavimento, medidas através de extensómetros verticais; e) extensões negativas (de tracção) transmitidas à base da camada de regularização, medidas através de extensómetros horizontais (transversais e longitudinais); f) temperaturas da camada de pavimento, medidas através de termopares.

Durante a construção do trecho experimental procedeu-se ao controle de compactação através dos parâmetros de estado e através da determinação da deformabilidade dos materiais. Os parâmetros de estado dos materiais (peso volúmico e/ou o teor em água “in situ”) foram controlados através dos ensaios correntes utilizados para o efeito, nomeadamente o ensaio de garrafa de areia, utilizado na secção construída em saibro granítico e o ensaio de membrana, utilizado no controle de compactação da secção construída em ASIC. Para o controle de compactação realizada através da determinação da deformabilidade dos materiais, foram executados ensaios de controlo pontual, designadamente, o de carga com pneu, o deflectómetro de impacto pesado (FWD), o deflectómetro de impacto ligeiro (DIP), o Geogauge e o de carga estático com placa, e os de controlo em contínuo, o “Portancemètre”.

Os resultados obtidos em todos os ensaios, laboratoriais e de campo, podem ser encontrados em Gomes Correia et al. (2005, 2006, 2008b, 2009).

3 CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DOS ASICS E DOS AGREGADOS NATURAIS

3.1 Propriedades e índice e classificação

Algumas das propriedades índice (geométricas, físicas e mecânicas) obtidas para os ASICs da Maia e do Seixal estão apresentadas no Quadro 1. Neste quadro comparam-se ainda os valores encontrados para os ASICs, relativos às propriedades índice, com os publicados na bibliografia para os agregados naturais de diferentes origens geológicas (agregados gnaíssico, granítico e calcário). Os agregados naturais foram estudados no âmbito de um projecto europeu (COURAGE, 1999).

Do Quadro 1 verifica-se que relativamente às características granulométricas os ASICs apresentam granulometria extensa. Quanto às propriedades físicas e mecânicas podemos

concluir que os ASICs são materiais não 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. Trata-se de um material 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%. Da análise do Quadro 1 verifica-se ainda que, globalmente, os valores encontrados para os dois ASICs são relativamente semelhantes. Estas propriedades índice obtidas para os ASICs, caem dentro das especificações estabelecidos para os materiais naturais britados no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP) para as camadas de base, sub-base e leito de pavimento como já descrito em Gomes Correia et al. (2005), (2006) e Roque et al. (2006).

Quadro 1 – Propriedades índice obtidas para os ASICs do Seixal e da Maia e para os agregados naturais

Propriedade	Parâmetro	Unidade	ASIC		Agregado		
			Seixal	Maia	Gnaíssico	Granítico	Calcário
Geométricas	D_{\max}	mm	38,1	76,1	-	-	-
	Cu	-	33,20	9,64	-	-	-
	Cc	-	4,30	1,95	-	-	-
	IF	-	6	7	30	7	17
Físicas	EA	(%)	80	100	-	-	-
	VBS	(%)	0	0	-	-	-
	LL	(%)	NP	NP	29	NP	NP
	LP	(%)	NP	NP	20	NP	NP
	ρ_{dOPM}	10^3 kg/m^3	2,32	2,43	2,19	2,29	2,21
	w_{OPM}	(%)	5,0	3,45	6,25	5,4	4,0
Mecânicas	LA	(%)	23	28	16	28	19,4
	MDe	(%)	11	11	9,8	-	12,2
	CBR	(%)	100	72	270	140	-

D: Diâmetro; Cu: Coeficiente de uniformidade; Cc: coeficiente de curvatura; OPM: Proctor modificado; ρ_d : Massa volúmica seca; w: Teor em água; CBR: Califórnia Bearing Ratio; NP: Não plástico

Da análise do Quadro 1 verifica-se também que os valores encontrados para o IF para os ASICs e o agregado granítico são similares e os valores encontrados para o LA do ASIC da Maia e agregado granítico são iguais. Os valores de CBR determinados com uma sobrecarga reproduzida por 3 placas e embebido durante 4 dias foram relativamente baixos comparativamente com os valores encontrados para os agregados naturais, mas ainda assim substancialmente superiores aos valores habitualmente especificados nos cadernos de

encargos para as camadas de sub-base, leito de pavimento e aterro. Dado que, estes valores de CBR são dados através de ensaios empíricos eles devem ser vistos com algumas reservas, como se comentará na secção 3.4. Refira-se que, no âmbito de um projecto europeu (ALT-MAT, 1999), alguns resíduos mostraram um desempenho mecânico em campo melhor do que o esperado a partir dos resultados dos ensaios empíricos. Pelo que, o dimensionamento deve basear-se em ensaios mecanicistas. Isto revela a necessidade de se alterar os princípios da caracterização dos materiais, fortalecendo as bases racionais (abordagem mecanicista) em detrimento dos ensaios empíricos.

A Figura 1 apresenta a classificação dos agregados (ASICs e agregados naturais), baseada na classificação francesa (NF P 18-101, 1990), através dos resultados obtidos para as propriedades mecânicas índice. Da figura verifica-se que o ASIC da Maia pertence à classe C e o ASIC do Seixal pertence à classe B, similar aos agregados de calcário e gnaíssico.

De acordo com a norma europeia EN 13242 (2002), os ASICs do Seixal e da Maia são ambos MDe20 e LA25 e LA30, respectivamente. Os materiais naturais (agregados calcário e gnaíssico) são ambos MDe20, tal como os ASICs. De acordo com os valores de LA, os agregados calcário e gnaíssico são LA20 e o agregado granítico é um LA30. Estas classificações sugerem que os agregados naturais têm propriedades mecânicas índice melhores do que o ASIC da Maia. Contudo, esta avaliação deve ser tida com as devidas reservas, como se demonstrará na secção 3.4.

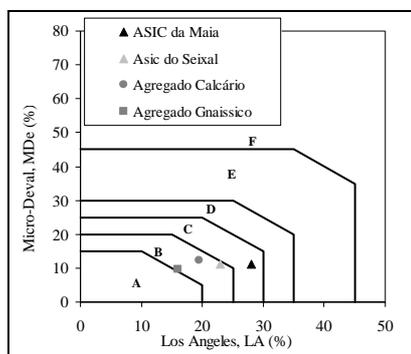


Figura 1 – Classificação dos agregados através das suas propriedades mecânicas índice

3.2 Propriedades relativas à compressibilidade uniaxial

As propriedades relativas à compressibilidade uniaxial foram determinadas através do ensaio de compressão unidimensional, a qual foi realizado sobre um provete de 500mm de diâmetro e 470mm de altura. O provete ensaiado foi construído com um teor em água de 3% ($w_{OPM}=0,45\%$) e uma massa volúmica de $2,37 \text{ kg/m}^3$ ($G_c = 97,5\%$). Durante o ensaio realizaram-se ciclos de carga e descarga; no primeiro ciclo, o provete foi carregado até uma tensão axial de cerca de 1,1MPa e de seguida foi descarregado até se atingir cerca de 0,1MPa; no segundo ciclo, o provete foi carregado até se atingir cerca de 2MPa e foi novamente descarregado até cerca de 0,5MPa; antes do terceiro ciclo, o provete foi molhado e foi novamente carregado até cerca de 2MPa, antes de se fazer a descarga final (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**). Da análise da **Erro! A origem da**

referência não foi encontrada. pode constatar-se que o comportamento do material é não linear e a molhagem parece ter pouca influência no seu comportamento. O módulo edométrico secante calculado no último ciclo de carga é de cerca de 2GPa.

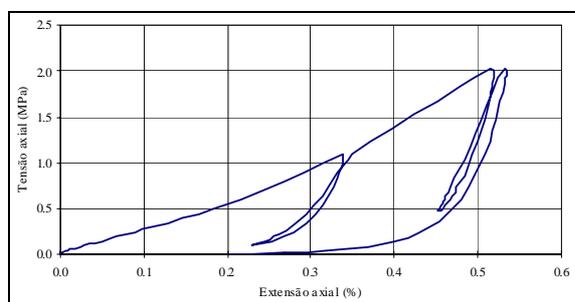


Figura 2 – Relação entre a deformação axial e a tensão axial

3.3 Propriedades relativas à resistência ao corte

Para se estudarem as propriedades de resistência ao corte dos ASIC da Maia realizaram-se ensaios triaxiais convencionais sob provetes grandes dimensões (150mm diâmetro e 300mm de altura) e de muito grandes dimensões (300mm diâmetro e 700mm altura). Atendendo à dimensão das câmaras utilizadas seleccionou-se para ensaio apenas a fracção do material com dimensões inferiores a 19,1mm (designado de material truncado) e 50,8mm (designado por material integral) no caso da câmara triaxial de grande e muito grandes dimensões, respectivamente. As características de compactação dos provetes ensaiados, bem como a tensão de confinamento aplicada a cada um dos provetes estão apresentadas no **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Quadro 2 – Condições de compactação dos provetes

Material	Truncado			Integral				
	σ_3 (kPa)	w%	e_0	ρ_d ($\times 10^3$ kg/m ³)	σ_3 (kPa)	w%	e_0	ρ_d ($\times 10^3$ kg/m ³)
	100	200	300	100	200	300		
	3,6	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0		
	0,314	0,339	0,338	0,380	0,390	0,400		
	2,48	2,43	2,44	2,37	2,35	2,34		

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresentam-se, no diagrama [s, t], os resultados obtidos em ambos os materiais. Da comparação dos resultados verifica-se que as rectas encontradas correspondentes aos estados de tensão associados às resistências máximas (ou de pico) são semelhantes, estando a recta obtida para o material integral ligeiramente abaixo da obtida no material truncado. O valor do ângulo de atrito interno de pico (ϕ) encontrado no material integral (39°) é ligeiramente inferior ao encontrado no material truncado (42,5°). Quanto aos valores de coesão encontrados estes são de 195,7kPa no material integral e 227,6kPa no material truncado.

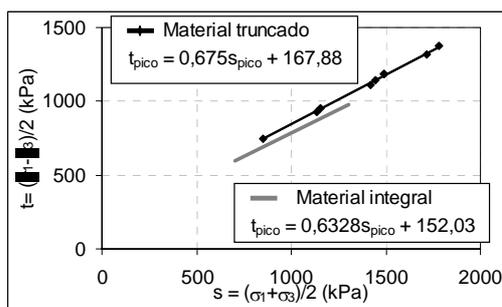


Figura 3 – Diagrama [s, t] para o material integral e para o material truncado

3.4 Propriedades relativas à deformabilidade

Para se estudarem as propriedades de deformabilidade dos ASIC realizaram-se ensaios triaxiais de precisão, com o equipamento existente no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. As características de compactação dos provetes estudados (com um diâmetro de 150mm e altura de 300mm) do material truncado estão apresentadas no Quadro 3 e, como se pode verificar, os materiais são compactados para um estado denso, representativo dos valores encontrados nos pavimentos. No mesmo quadro apresentam-se também as características de compactação de um agregado granítico (0/31,5) e de um agregado calcário (0/20), materiais tradicionais especificados para as camadas estruturais dos pavimentos.

Quadro 3 – Características de compactação dos provetes

Material	ρ_d (10^3kg/m^3)	w (%)	Gc (%)
ASIC do Seixal	2,31	5,8	99,5
ASIC da Maia	2,43	3,5	100
Agregado granítico (0/31,5)	2,19	3,9	94,8
Agregado calcário (0/20)	2,13	3,9	96,8

Os resultados dos ensaios, para um nível de deformação axial da ordem dos 4×10^{-5} , são apresentados na Figura 4a). A análise dos resultados é feita em termos de tensões totais e como se pode verificar o módulo de deformabilidade vertical (E_v) é definido por uma lei potência, a qual não inclui a tensão lateral, σ_h , como variável, tal como acontece também nos materiais naturais (Gomes Correia et al., 2001). Esta análise conduz a uma potência n de valor igual a 0,59 e 0,53 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 do módulo de deformabilidade são muito elevados, aproximadamente 1GPa para uma tensão vertical da ordem dos 200kPa.

Na Figura 4b) comparam-se os valores dos módulos de deformabilidade dos ASICs, em função da tensão total, com os valores obtidos em materiais tradicionais especificados para as camadas estruturais dos pavimentos, nomeadamente, um agregado granítico (0/31,5)

(valores obtidos por Gomes Correia et al. 2001) e um agregado calcário (0/20) (valores apresentados por Gomes Correia 2004). Para se proceder à comparação dos quatro materiais em termos da sua deformabilidade, os resultados dos ensaios foram normalizados para um índice de vazios de valor igual a 0,3, eliminando, assim, a influência do índice de vazios inicial. Detalhes desta normalização podem ser encontrados em Gomes Correia et al. (2005).

Como se pode verificar da Figura 4b), os valores encontrados para o módulo de deformabilidade dos ASICs são muito superiores aos encontrados nos agregados naturais. Isto revela, que os ASICs nacionais têm melhores propriedades mecânicas (deformabilidade) do que os materiais normalizados para as camadas de base.

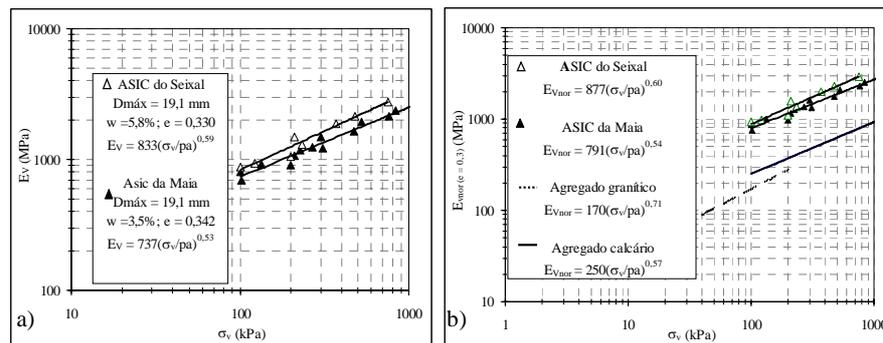


Figura 4 – a) Evolução do módulo de deformabilidade com a tensão total; b) Comparação dos módulos de deformabilidade dos ASICs com os agregados naturais

Comparando os resultados obtidos das propriedades índice mecânicas (LA e MDe) e os valores encontrados para os módulos de deformabilidade (ensaios mecanicistas), para os ASICs e os agregados naturais, verifica-se que os ASICs apresentam melhores propriedades mecânicas do que as expectáveis através dos resultados dos ensaios mecânicos empíricos (ensaios CBR, LA e MDe). Isto revela a necessidade de alterar os princípios de caracterização dos materiais, fortalecendo as bases racionais (abordagem mecanicista) e de dar menor ênfase aos ensaios empíricos, especialmente no caso de materiais não tradicionais.

4 MONITORIZAÇÃO GEOMECÂNICA

No sentido de calibrar e validar os resultados mecanicistas laboratoriais, bem como avaliar o desempenho do ASIC quando colocado em obra, e compará-lo com o dos materiais naturais, construiu-se e instrumentou-se um trecho experimental localizado na estrada nacional EN311 entre Fafe e Várzea-Cova. Como já referido na secção 2, o trecho experimental foi construído com três secções distintas, com 10m de comprimento cada e uma altura de aterro de 3m, no mínimo. Na Figura 5 apresenta-se o esquema das secções tipo, espessura das camadas e localização da instrumentação no trecho experimental.

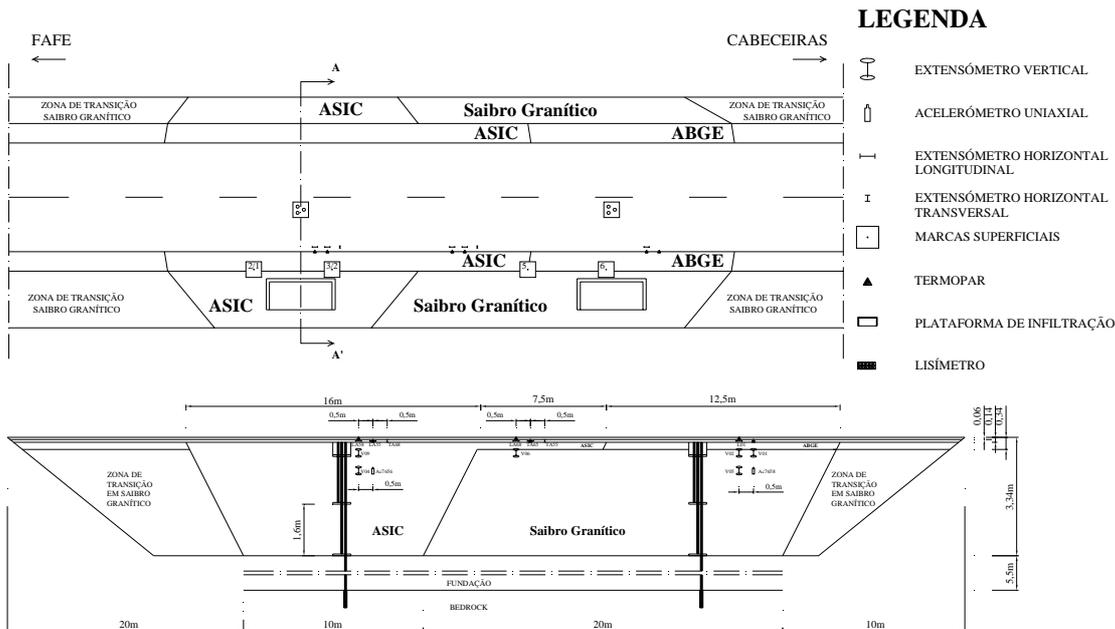


Figura 5 – Esquema das secções e localização da instrumentação no trecho experimental

A monitorização do comportamento mecânico da estrutura, formada pelas camadas betuminosas do pavimento, pela camada de base granular, pela camada de leito de pavimento e pela plataforma superior do aterro, realizou-se através de campanhas de ensaios FWD. No sentido de avaliar a influência do nível de tensão no comportamento mecânico dos materiais, os ensaios FWD foram efectuados para 3 níveis diferentes de carga, designadamente 20, 30 e 47kN. A Figura 6a) apresenta, a título de exemplo, as deflexões máximas obtidas numa das campanhas de monitorização realizadas. Como se pode verificar do gráfico da Figura 6a) para cargas baixas, as deflexões, nas diferentes secções, são muito semelhantes. Contudo, para cargas elevadas (Força de 47kN) as deflexões na secção construída com ASIC são muito inferiores às verificadas nos materiais naturais. Isto deve-se ao facto do aumento da carga induzir uma maior tensão vertical nos materiais granulares e a esse aumento corresponder um maior módulo de deformabilidade no ASIC que no agregado granítico, utilizado na construção do trecho.

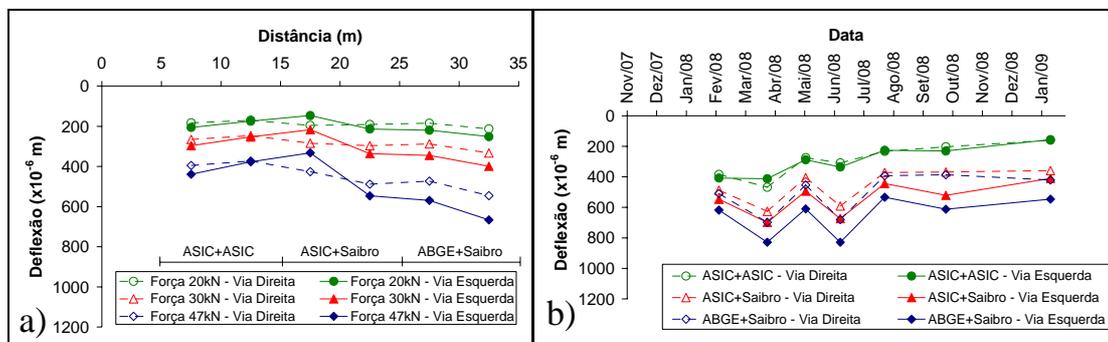


Figura 6 – Evolução das deflexões máximas na campanha de ensaios FWD: a) numa campanha de monitorização; b) para uma carga próxima de 47kN

Na Figura 6b) apresentam-se as curvas de evolução da deflexão máxima, para uma carga aproximadamente igual a 47kN. Como se pode verificar das campanhas de observação já efectuadas, o desempenho mecânico da estrutura do pavimento avaliado através de ensaios FWD é melhor nas secções com os ASIC do que com os materiais tradicionais, corroborando assim, tanto os resultados obtidos em laboratório como os resultados obtidos aquando do controlo da qualidade de construção do trecho experimental.

5 CONCLUSÕES

Esta investigação promove a reutilização das escórias de aciaria processadas (ASIC) como um material substituto dos agregados naturais quando utilizado nas infraestruturas de transporte e obras geotécnicas. Assim, contribui técnica e cientificamente para a aplicação dos princípios de desenvolvimento sustentável na construção, especialmente nos trabalhos geotécnicos.

Baseando-nos nos resultados obtidos dos ensaios empíricos para os ASICs da Maia e do Seixal, verificou-se que materiais preenchem praticamente os requisitos dos materiais naturais especificados no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP) para as camadas de base, sub-base e leito de pavimento. Os ensaios laboratoriais mecanicistas mostraram que os ASICs apresentam melhores propriedades mecânicas (deformabilidade) do que os materiais normalizados para as camadas de base. Estes resultados mostram que os ASICs nacionais podem ser utilizados em obras geotécnicas e muito particularmente nas infraestruturas de transporte (camadas de aterro, leito de pavimento, sub-base e base).

O estudo realizado mostra ainda que os ensaios empíricos, quando aplicados a materiais não tradicionais, devem ser vistos com algumas reservas e, por conseguinte, a caracterização destes materiais deve ser alterada, dando-se maior ênfase à base racional em detrimento da base empírica. Os ensaios realizados aquando da construção e das campanhas de monitorização realizadas num trecho experimental, onde se utilizaram os ASICs e os materiais naturais, confirmam estas constatações. As campanhas de observação já efectuadas no trecho experimental mostram que o desempenho mecânico da estrutura do pavimento e do seu suporte, avaliado através de ensaios FWD, é melhor nas secções com os materiais ASIC do que com os materiais tradicionais (saibro granítico e ABGE), corroborando assim, tanto os resultados obtidos em laboratório como os resultados obtidos aquando do controlo da qualidade de construção do trecho experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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., Anhdan L. Q., Koseki J. & 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, pp. 209-215.
- Gomes Correia, A. (2004). “Evaluation of mechanical properties of unbound granular materials for pavements and rail tracks”, *Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavements and Railway Design and Construction*, Eds Gomes Correia e Loizos, Milpress, Rotterdam, pp. 35-59.
- Gomes Correia, A., Ferreira, S., Araújo, N., Castro, F., Trigo, L., Roque, A. J., Pardo de Santayana, F. & 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*, 87 páginas.
- Gomes Correia, A., Ferreira, S., Castro, F., Trigo, L., Roque, A. J., Pardo de Santayana, F. & 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*, 47 páginas.
- Gomes Correia, A., Roque, A. J., Martins J. P., Caldeira L., Ferreira, S., & Fortunato, E. (2008a) “Trecho experimental no itinerário E.N. 311 entre Fafe/Várzea Cova. Metodologia da construção e instrumentação. Relatório final”, *Relatório CVR 1/2008*, 13 páginas.
- Gomes Correia, A., Roque, A. J., Martins J. P., Caldeira L., Ferreira, S., & Fortunato, E. (2008b) “Trecho experimental no itinerário E.N. 311 entre Fafe/Várzea Cova. Metodologia da construção e instrumentação. Relatório final”, *Relatório CVR 2/2008*, 20 páginas.
- Gomes Correia, A., Roque, A. J., Martins J. P., Caldeira L., Ferreira, S., & Fortunato, E. (2009) “Trecho experimental no itinerário E.N. 311 entre Fafe/Várzea Cova. Observação e monitorização do comportamento mecânico e ambiental. Relatório anual (2008)”, *Relatório CVR 1/2009*, 23 páginas.
- Roque A. J., Gomes Correia A., Fortunato E., Pardo de Santayana F., Castro F., Reis Ferreira S. M. & 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 (in printing).
- 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar o seu agradecimento à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo apoio financeiro concedido a este estudo (Processo POCI/ECM/56952/2004), À Câmara Municipal de Fafe, que permitiu a construção do trecho experimental num troço da EN 311 entre Fafe e Cabeceiras de Basto. À CJR Empreiteiros, que construiu o aterro do trecho experimental. À Geocontrolo, que controlou a compactação com o Portancemètre. À BBF-Tecnologias do Ambiente, que construiu os lisímetros.