

# APROVEITAMENTO DE ESCÓRIAS DE ACIARIA EM INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES – ESTUDOS E APLICAÇÕES EM PORTUGAL E NO BRASIL

Bruno Guimarães Delgado<sup>1</sup>, António Viana da Fonseca<sup>2</sup>, Eduardo Fortunato<sup>3</sup> e Laura Motta<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Porto, FEUP, CONSTRUCT-Geo, Rua Dr. Roberto Frias S/N, 4200-465, Porto, Portugal  
email: [brunogdelgado@hotmail.com](mailto:brunogdelgado@hotmail.com)      <http://www.fe.up.pt>

<sup>2</sup> Universidade do Porto, FEUP, CONSTRUCT-Geo, Rua Dr. Roberto Frias S/N, 4200-465, Porto, Portugal

<sup>3</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Dep. de Transportes, Av. do Brasil 101, 1700-066, Lisboa, Portugal

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Dep. de Geotecnia, Rua Horácio Macedo Bloco G 101 Cidade Universitária, 21941-450, Rio de Janeiro, Brasil

---

## Sumário

*O conceito de economia circular tem impulsionado estudos visando o aproveitamento de resíduos industriais. Os agregados britados de escória de aciaria estão disponíveis abundantemente, tanto em Portugal como no Brasil, e as possibilidades do seu aproveitamento têm sido investigadas nos dois países, com resultados promissores, seja como material granular para aterro, sub-base e base de pavimentos rodoviários, seja como agregado para composição de misturas betuminosas, seja ainda como material granular para camadas de sub-balastro e de balastro de vias-férreas. Neste artigo apresentam-se alguns estudos e aplicações desenvolvidos por diversos autores, nos dois países.*

---

**Palavras-chave:** Escória de aciaria; Aterros; Pavimentos rodoviários; Vias-férreas.

## 1 INTRODUÇÃO

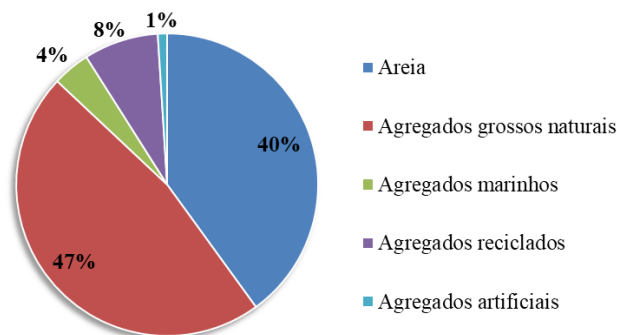
A procura de agregados para a indústria da construção civil não para de crescer em todo o mundo. Estima-se que esta seja a indústria que mais consome recursos naturais no planeta, correspondendo a cerca de 15 a 50% do consumo total. O consumo de agregados naturais na construção civil varia entre 1 e 8 toneladas por habitante por ano [1], sendo que grande parte deste consumo é destinado à construção de infraestruturas de transportes (rodovias e ferrovias) [2]. A Fig. 1 apresenta a proporção de agregados produzidos na União Europeia (UE) no biénio 2017-2018 segundo a UEPG [3], podendo observar-se a importância dos agregados naturais.

A exploração contínua de recursos naturais, como a pedra de boa qualidade, conduz a impactos ambientais negativos, em particular o progressivo esgotamento de tais recursos. Assim, a UE tem dado prioridade ao aproveitamento de subprodutos industriais com características técnicas adequadas aos fins em causa [4].

Por outro lado, segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), a produção mundial de aço bruto aumentou de  $3 \times 10^7$  t em 1901 para  $1,33 \times 10^9$  t em 2008. No processo de fabrico do aço gera-se como rejeito a escória de aciaria, que corresponde a cerca de 12% a 16% em massa da produção daquele produto [5]. Em 2008 foram geradas aproximadamente  $1,9 \times 10^8$  t de escória em todo o mundo. Como exemplo, refira-se que só em Portugal estima-se uma geração a médio prazo de aproximadamente  $4 \times 10^5$  t por ano de escória [6].

As escórias de alto forno e as escórias de aciaria são obtidas no processo de fabricação do ferro gusa e do aço, respectivamente. Tanto umas como outras podem ser de vários tipos, dependendo do processo e dos fornos utilizados na obtenção dos produtos primários. Em geral, as escórias de alto forno apresentam boa resistência mecânica e estabilidade química. Porém, estes materiais, principalmente as escórias arrefecidas ao ar, exibem uma desvantagem em relação aos materiais tradicionais, nomeadamente o facto de usualmente terem baixa resistência à fragmentação e ao desgaste, o que, segundo o guia SAMARIS [7], inviabiliza a sua aplicação em

camadas superficiais de pavimentos expostas a cargas de tráfego elevadas, como por exemplo na camada de balastro de via-férrea, sendo a sua utilização apenas recomendada em aterros e camadas inferiores de pavimentos rodoviários. Tal aspeto não se verifica no caso das escórias de aciaria. Estudos com escórias de aciaria, devidamente curadas e quimicamente estabilizadas, vêm mostrando que estes materiais podem apresentar níveis de desgaste e de fragmentação inferiores aos dos agregados convencionais, como por exemplo os obtidos a partir de rocha granítica britada, possibilitando assim a sua utilização em camadas superficiais, desde que se considerem os requisitos das respectivas especificações técnicas [8].



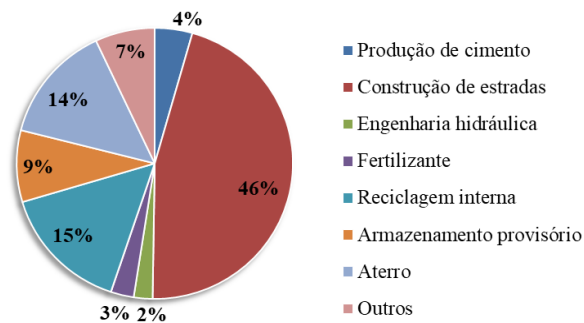
**Fig.1. Proporção de agregados produzidos na União Europeia no biénio 2017-2018 [3].**

As escórias de aciaria são um subproduto industrial que, de um modo geral, têm vindo a ter cada vez mais aceitação no mercado, em parte devido ao melhoramento e modernização do processo de produção do aço – gerando um subproduto de qualidade superior ao que se verificava alguns anos atrás, principalmente quanto à homogeneidade do produto final –, mas também devido a preocupações económicas e ambientais.

Em Portugal, os agregados obtidos a partir do processamento da escória de forno de arco elétrico encontram-se classificados como agregados inertes [9], tendo dado origem à denominação comercial “Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)”. No Brasil, em geral, ainda não se dispõe de uma classificação comercial para estes materiais, pelo que ainda se colocam problemas relativos à expansibilidade e heterogeneidade na morfologia das partículas constituintes [5], o que não inviabiliza a sua aplicação mas requer a avaliação das suas características caso a caso.

A associação Europeia que representa os produtores e transformadores metalúrgicos, a *EuroSlag*, publicou em 2016 dados relativos a aplicação de escórias de aciaria na Europa. A *EuroSlag* destacou nessa publicação que as principais aplicações do material no âmbito europeu ocorrem em: pavimentos rodoviários, aterros em geral, obras de engenharia hidráulica, como fertilizante, na produção de cimento e reutilizado como matéria-prima na produção de aço, sendo que grande parte não é ainda aproveitado, ficando depositado em aterros sem aplicabilidade imediata, conforme mostra a Fig. 2 [10].

Segundo o reportado em [11], no Brasil, a exemplo do que ocorre na Europa, a principal aplicação das escórias de aciaria é na construção de rodovias, representando aproximadamente 46,6% do volume total, seguido do uso em aterros em geral (15%), havendo ainda uma parte significativa colocada em aterros provisórios sem aplicabilidade imediata (30,9%). Na publicação é destacado ainda que uma pequena parcela já vem sendo utilizada na camada de balastro de vias-férreas (6,2%) [11], porém ainda com carácter essencialmente experimental. Este padrão na distribuição do aproveitamento das escórias de aciaria, onde a maior parte das aplicações se dão no âmbito rodoviário, parece ser uma regra geral nos países industrializados e produtores de aço. É de salientar que em alguns países o aproveitamento das escórias está já muito generalizado. Na Alemanha, por exemplo, do total de escórias de aciaria produzidas, 70% é aplicada na construção civil (pavimentos, aterros em geral e estruturas hidráulicas), 12,6% é reciclada, 6% é utilizada como fertilizante e somente 11,4% é destinada a aterros provisórios, sem aplicabilidade imediata [12].



**Fig. 2. Distribuição das aplicações de escória de aciaria na Europa em 2016 [10].**

Em alguns casos, a aplicação destes materiais na Europa está enquadrada por regulamentação [7]. Também nos Estados Unidos da América, por exemplo, o manual da AREMA [13] apresenta alguns requisitos para aplicação deste material como constituinte da camada de balastro das vias-férreas.

Neste trabalho referem-se alguns estudos e aplicações que têm vindo a ser realizados por vários autores, em Portugal e no Brasil, que visam avaliar a possibilidade de utilizar as escórias de aciaria em obras de infraestruturas de transportes. Para além da apresentação das características destes materiais, pretende-se contribuir para a divulgação dos mesmos, no sentido de aumentar a sua utilização, e com isso evitar a sua acumulação em depósito, o que acaba por constituir um passivo ambiental.

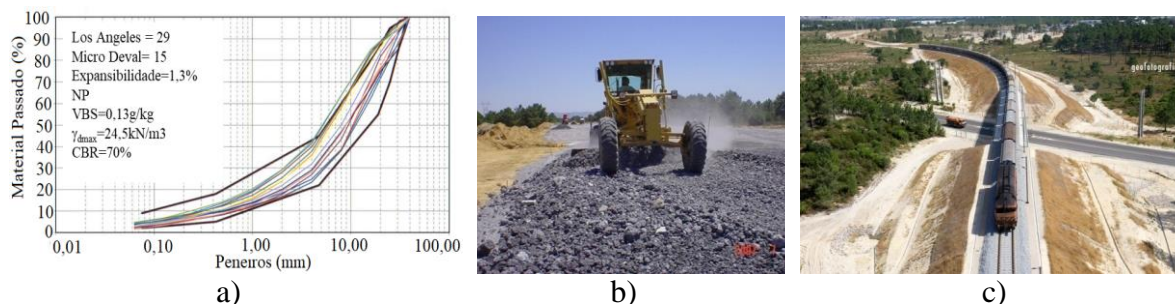
## 2 ESTUDOS E APLICAÇÕES DE ESCÓRIAS DE ACIARIA

### 2.1 Aterros de infraestruturas de transportes

Como referido, uma aplicação de agregados siderúrgicos que vem sendo realizada com sucesso é a construção de aterros, particularmente para estradas e vias-férreas. Tal utilização, segundo dados da *EuroSlag* [10], representou até 2016, na Europa, aproximadamente 14% em massa do total de aplicações de agregados siderúrgicos.

No ano de 2007 foi construído em Portugal um aterro de uma via-férrea com agregado siderúrgico, em que foram utilizadas cerca de  $280 \times 10^3$  t de ASIC, num ramal de aproximadamente 3,8 km, junto à fábrica do Seixal da Siderurgia Nacional [14]. O ASIC, que foi utilizado em duas granulometrias distintas, nomeadamente 0/40 mm e 0/100 mm, mostrou-se estável na presença de água, possibilitando a aplicação do material sob quaisquer condições meteorológicas. Ambas as granulometrias cumpriram amplamente os requisitos normativos estabelecidos para materiais de aterro, sendo que a granulometria 0/40 mm atendeu ainda às características impostas para a camada de leito da via (camada de apoio do sub-balastro), que possui requisitos mais exigentes do que o restante aterro. O valor do módulo de deformabilidade, medido em contínuo pelo equipamento *Portancemètre* no topo desta camada, foi sempre superior ao valor mínimo estabelecido em projeto (80 MPa). Na Fig. 3a apresenta-se alguma informação relativa aos materiais utilizados, obtida durante o controlo de qualidade da obra, nomeadamente curvas granulométricas, valores medidos de Los Angeles, Micro Deval, Expansibilidade, Azul de Metileno, peso volúmico seco máximo e CBR. Na Fig. 3b e na Fig. 3c apresenta-se, respectivamente, um aspeto do espalhamento do ASIC nas camadas do aterro ferroviário e a obra já concluída e em operação.

Uma outra aplicação realizada em Portugal com ASIC teve lugar também em 2007, no âmbito da construção de um trecho experimental na estrada EN 311, de Fafe a Várzea Cova. Foram construídas e ensaiadas três estruturas diferentes, com seções instrumentadas, variando os materiais do corpo de aterro, da camada de leito do pavimento e da camada de base, da seguinte forma: i) na Seção 1, aterro e camada de leito de pavimento em saibro granítico e camada de base em Agregado Britado de Granulometria Extensa (ABGE), também de granito; ii) na seção 2, aterro e camada de leito de pavimento em saibro granítico e camada de base em ASIC; e iii) na seção 3, aterro, camada de leito de pavimento e camada de base em ASIC. O aterro tem cerca de 60 m de comprimento e altura mínima de aproximadamente 3 m. Este itinerário tem uma plataforma de 11,5 m de largura, compreendendo duas faixas de rodagem (7,0 m) e duas bermas (com 2,5 m de largura cada) e um Tráfego Médio Diário Anual de Veículos Pesados (TMDA) no intervalo de 300 a 500 [15].



**Fig. 3. Aplicação de ASIC na construção de um aterro ferroviário em Portugal: a) resumo de algumas características dos materiais utilizados; b) detalhe durante a construção; c) via em operação [14].**

O referido trecho experimental foi avaliado em várias fases, ao longo de aproximadamente 10 anos. A Seção 3, com aterro em ASIC, mostrou melhor comportamento mecânico, avaliado por meio de ensaios com defletómetro de impacto pesado (*Falling Weight Deflectometer - FWD*), seja a curto, seja a longo prazo, quando comparada com as demais seções, construídas com materiais naturais [15].

Analisando os resultados da instrumentação do trecho rodoviário experimental, no qual foi possível medir os assentamentos em cada camada ao longo da estrutura, verificaram-se maiores assentamentos na fundação da seção com ASIC, na fase inicial, devido provavelmente à maior densidade deste material, ainda assim com um valor máximo absoluto registado de apenas 1 mm. Posteriormente, os assentamentos na fundação foram praticamente nulos. Relativamente ao corpo do aterro, verificou-se um assentamento duas vezes superior na camada de saibro granítico em relação ao registado no ASIC (ainda assim com valores inferiores a 1 mm), medido a uma altura de 1,6 m da fundação, traduzindo assim um melhor desempenho da camada construída com ASIC.

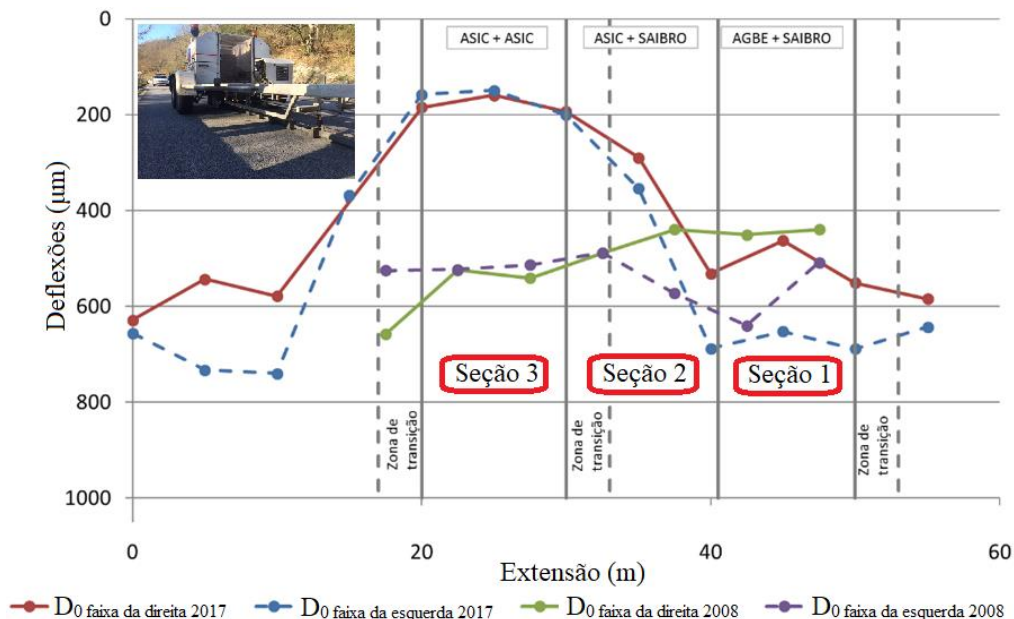
Relativamente aos aspetos ambientais, foi realizada uma campanha de monitorização para avaliar a composição química de amostras de lixiviados recolhidos em dois lisímetros instalados no trecho (um na seção construída em ASIC e outro na seção em saibro granítico). As análises mostraram que o ASIC pode ser considerado um material inerte, na medida em que a sua lixiviabilidade não contribuiu para a degradação da qualidade dos solos e das águas superficiais e subterrâneas, não constituindo risco para a saúde pública [15].

Dessa forma, este extenso trabalho de caracterização e monitorização possibilitou aos autores desse estudo concluir que é adequado utilizar ASIC em aterros para infraestruturas de transportes e, ainda, ao nível das camadas de base e de sub-base, na forma de material granular britado, aplicação que se apresenta em seguida.

## 2.2 Camada granular de pavimentos rodoviários

Relativamente ao emprego de escória de aciaria como camada granular de pavimentos rodoviários, os resultados de monitorização periódica do trecho experimental descrito no item 2.1 (EN 311), obtidos durante cerca de dois anos e meio após a conclusão da rodovia, mostraram que o desempenho mecânico da estrutura do pavimento, avaliado através de ensaios de *FWD*, era melhor nas seções construídas com ASIC do que naquelas construídas com materiais naturais (saibro granítico e ABGE). Este comportamento foi particularmente evidente quando o pavimento foi solicitado por cargas mais elevadas [15]. As deflexões registradas à superfície na zona construída sobre o ASIC foram cerca de cinco vezes inferiores às registradas nas zonas construídas com materiais naturais.

Cerca de 10 anos após a construção do trecho experimental, foram realizados novos ensaios de *FWD* para avaliar as deflexões na superfície do pavimento. Realizaram-se ensaios em diversos locais do pavimento, em ambas as vias, com aplicação sucessiva de três níveis de carga (30 kN, 47 kN e 65 kN) sobre uma placa de 0,45 m de diâmetro [15]. Na zona em que se utilizou ASIC as deflexões medidas sob a placa de carga foram significativamente inferiores às medidas em 2008; nas outras zonas foram superiores às medidas nessa data. Estes resultados parecem indicar que, ao longo do tempo, a estrutura do pavimento se tornou mais rígida nas zonas em que se aplicou ASIC e mais deformável nas demais, sugerindo, mais uma vez, um melhor comportamento das seções com ASIC. Na Fig. 4 são comparados os resultados dos ensaios de *FWD*, para a carga de 47 kN, realizados nas campanhas de 2008 e de 2017.



**Fig. 4. Comparação das deflexões máximas ( $D_0$ ) medidas em 2008 e em 2017, por meio de ensaios de FWD (equipamento no canto superior esquerdo), em ambas as vias para uma carga de 47 kN [15].**

Um outro extenso estudo laboratorial conduzido em Portugal simulou em laboratório as condições de carregamento cíclico de longo prazo a que agregados siderúrgicos inertes estariam submetidos como camada granular em pavimentos, com resultados favoráveis à utilização do material [6].

Quanto ao emprego de agregados siderúrgicos em obras rodoviárias no Brasil, em [16] ratifica-se o reportado em [11], informando que tais aplicações representam aproximadamente 47% do total, o que significa um volume superior a 1,4 milhões de toneladas aplicadas em pavimentação rodoviária no país.

De acordo com o referido em [16], diversas vantagens, de cunho técnico, económico e ambiental, relativamente ao emprego de agregados siderúrgicos em camadas de pavimentos rodoviários, são mencionadas por diversos autores, sendo que relativamente aos aspetos técnicos, comparativamente com materiais naturais britados, destaca-se: i) maior durabilidade; ii) dureza superior; iii) melhor resistência ao congelamento e degelo, apesar do maior gradiente térmico; iv) melhor atrito pneu-pavimento e uma melhor adesividade quando utilizado como agregado em misturas betuminosas; v) maior densidade; vi) possibilidade de se executar camadas menos espessas, e vii) maior capacidade de suporte, expressa por elevados valores de CBR.

Em [17] é salientado que em face de uma macro-fábrica normalmente mais homogénea do que a dos agregados naturais, os agregados siderúrgicos podem ser britados na granulometria requerida em partículas geralmente cúbicas, possibilitando boa trabalhabilidade e compactação, quando aplicados em camadas de pavimentos.

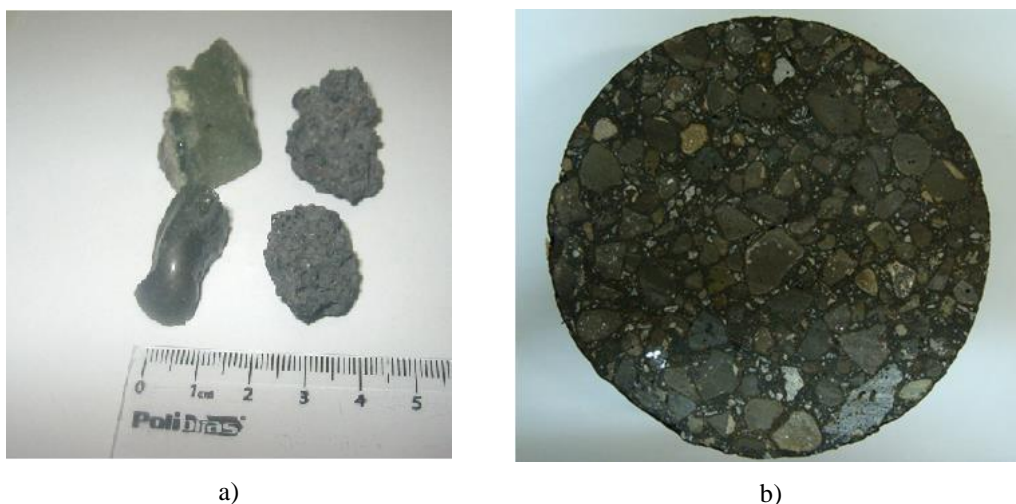
No Brasil foram já realizadas algumas aplicações bem sucedidas de agregados siderúrgicos em camadas de pavimentos, podendo referir-se, como exemplo: a construção da rodovia BR 393, no trecho de contorno da cidade de Volta Redonda, estado do Rio de Janeiro, onde se empregou agregados siderúrgicos em todas as camadas do pavimento; e a construção do trecho norte da BR 101, no estado do Espírito Santo [16].

### 2.3 Agregado em misturas betuminosas

O aproveitamento de agregados siderúrgicos em misturas betuminosas é também uma área em que se desenvolveram diversos estudos, tanto em Portugal como no Brasil. No Brasil destacam-se, entre outros, diversos trabalhos desenvolvidos na Universidade Federal do Rio de Janeiro e no Instituto Militar de Engenharia, que incluíram ensaios de laboratório e avaliação de trechos experimentais, e que concluíram ser adequado o uso da escória em misturas betuminosas para pavimentação rodoviária.



Em diversos desses trabalhos obtiveram-se algumas conclusões a respeito da utilização de escórias em misturas betuminosas, nomeadamente: i) em [18] o autor chama atenção para o facto de a escória ter cumprido todos os requisitos técnicos necessários, sendo vantajosa a sua utilização do ponto de vista económico, relativamente à brita natural, até distâncias de transporte de 120 km; ii) em [5] o autor obteve bons resultados, mas chama atenção para a grande heterogeneidade morfológica das partículas (Fig. 5a); iii) em [19], um trabalho premiado pelo IBP (Instituto Brasileiro do Petróleo, Gás e Biocombustíveis), são apresentadas comparações entre o comportamento resiliente de misturas betuminosas com uso de escórias e com agregados naturais britados, com resultados favoráveis aos primeiros; e iv) em [20] apresentam-se resultados favoráveis à substituição de agregados naturais em misturas betuminosas descontínuas do tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*), onde a dureza e a forma das partículas de escória possibilitaram um melhor desempenho mecânico da mistura desde que o processo de “cura”, no sentido de reduzir a expansão da escória utilizada na mistura, seja eficaz (Fig. 5b).



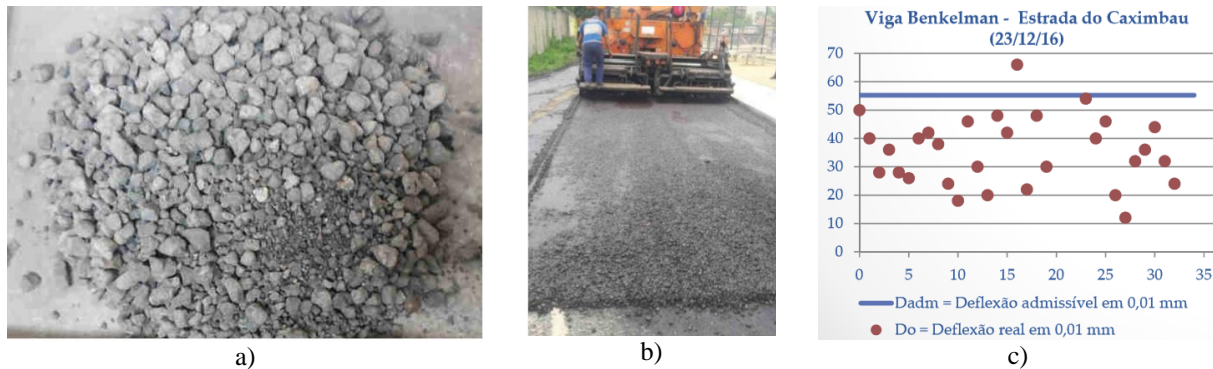
**Fig. 5. Estudos com incorporação de escórias em misturas betuminosas: a) heterogeneidade das partículas [5]; b) provete de mistura betuminosa tipo SMA com incorporação de escória de aciaria [20].**

Observa-se que, em geral, os principais problemas relatados nos estudos desenvolvidos no Brasil fazem referência à heterogeneidade e à expansão do material. No entanto, estudos mais recentes já apresentam resultados de ensaios de expansão com valores inferiores ao limite de 3% estabelecido pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – Brasil) e relatos de uma aparente maior homogeneidade morfológica dos grãos [21, 22]. Este aspeto foi controlado em Portugal, por meio de melhoramentos do processo de produção do aço e do processo de cura da escória, no sentido de garantir homogeneidade morfológica e estabilidade química ao agregado siderúrgico [9].

Em [22] são relatados estudos com a incorporação de escória de aciaria em misturas betuminosas do tipo pré-misturado a frio (PMF), que incluíram ensaios de laboratório e de campo, por meio de viga *Benkelman*, num trecho experimental construído com revestimento em PMF de espessura igual a 5 cm, para vias com baixo volume de tráfego. O autor desse estudo concluiu favoravelmente ao emprego da escória como agregado para misturas do tipo PMF, ressaltando que a mistura com escória apresentou resultados superiores em ensaios de fadiga comparativamente a misturas do tipo PMF sem escória, e níveis aceitáveis de deflexão do pavimento no trecho experimental, medidos em ensaios de campo. Na Fig. 6a é apresentada a escória utilizada em [22], na Fig. 6b a construção do revestimento em PMF com incorporação de escória e na Fig. 6c os resultados dos ensaios de campo, com utilização de viga *Benkelman*, onde se observa que a grande parte dos valores de deflexão se situa abaixo do limite máximo admissível, calculados segundo a norma DNER-PRO 269/1994 [23].

Alguns estudos conduzidos em Portugal, como por exemplo os apresentados em [4], [24] e [25], também reportaram resultados favoráveis ao uso dos agregados siderúrgicos em misturas betuminosas. Tais estudos destacaram o excelente comportamento mecânico observado, principalmente devido aos aspetos morfológicos das partículas do agregado siderúrgico e à sua elevada resistência à fragmentação e ao desgaste.

Em 2006 foi feita em Portugal uma aplicação de escória como agregado em mistura betuminosa para regularização do pavimento, nas instalações da Siderurgia Nacional, no Seixal. Após três anos de utilização o pavimento apresentava bom estado; ainda assim, é de salientar que o local tinha baixo volume de tráfego [4].



**Fig. 6. Estudo com incorporação de escórias em misturas do tipo PMF: a) aspeto geral do agregado de escória utilizado; b) execução do revestimento em PMF; c) resultados de ensaios de campo [22].**

## 2.4 Camada de balastro de vias-férreas

Uma das aplicações mais interessantes para os agregados siderúrgicos nas vias-férreas, face à possibilidade de redução de custos e impactos ambientais, dada a frequente disponibilidade destes materiais nas proximidades das ferrovias a custos muito reduzidos, é como substituto de rocha natural britada na camada de balastro. Em [26] é reportado que em diversos países os agregados siderúrgicos já vêm sendo utilizados como material de balastro em vias-férreas. Em [11] é referido, porém, que tais iniciativas têm sido desenvolvidas de maneira aleatória, sem uma avaliação do comportamento mecânico do material quando submetido ao estado de tensão típico da via-férrea em que o material está a ser aplicado, e a maior parte das pesquisas conduzidas até ao momento apenas avaliam o material no que se refere aos valores limite das propriedades índice estabelecidas nas diversas normas internacionais, as quais foram essencialmente desenvolvidas para balastro de rocha natural britada.

Um outro aspeto que tem sido discutido é a possibilidade de o agregado siderúrgico, quando utilizado na camada de balastro, vir a interferir no circuito de via prejudicando o sistema de sinalização e ocasionando possíveis interrupções no tráfego, essencialmente em períodos chuvosos. No entanto, em [11] foram realizados testes de resistência elétrica onde foi possível constatar que os agregados siderúrgicos analisados apresentaram valores superiores deste parâmetro quando comparados com britas de gnaise, e situavam-se dentro do limite preconizado em [13], desde que tivessem sido previamente curados antes da aplicação, garantindo baixos níveis de hidróxido de cálcio livre, tendo sido o material considerado eletricamente inerte para aplicação em camada de balastro em vias-férreas, o que é corroborado em [16].

Em [16] destaca-se, ainda, que no Brasil as experiências realizadas com agregado siderúrgico como material de balastro em vias-férreas têm apresentado bons resultados comparativamente com agregados naturais, visto que o balastro de material siderúrgico possui uma maior resistência ao desgaste e à abrasão e elevado peso específico, o que possibilita uma maior estabilidade para a via-férrea.

Em [27] é relatada uma experiência brasileira com o emprego de escórias de aciaria como camada de balastro na Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM). No entanto, o autor do estudo conclui que a experiência não foi positiva devido à expansibilidade do agregado utilizado, o que gerou excesso de fragmentação das partículas, com a consequente evolução granulométrica e geração de finos. A aplicação foi assim suspensa até que se estabelecessem critérios para a estabilização química da escória antes da aplicação na camada de balastro. Este problema tem sido relatado por outros investigadores no Brasil e está relacionado com a necessidade de qualificação da escória obtida no país para aproveitamento comercial na forma de agregado siderúrgico.

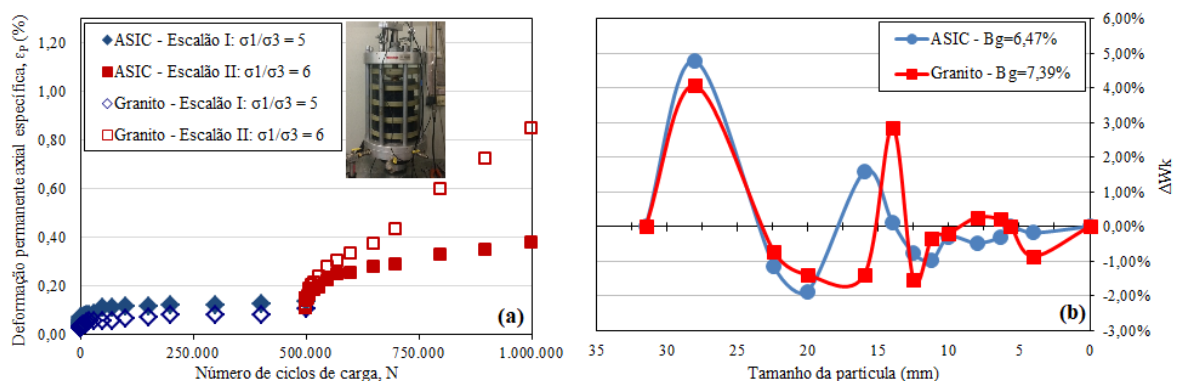
Em novembro de 2017 foi construído no Brasil um ramal ferroviário, em via dupla com extensão total de 1,7 km, dentro do pátio da Companhia Siderúrgica do Atlântico (CSA), localizado no estado do Rio de Janeiro, de

propriedade da siderúrgica Ternium S.A. A linha foi construída para o transporte de placas de aço para o mercado nacional, ligando à rede da MRS Logística S.A. Utiliza bitola larga (1,60 m), carris do tipo TR-68, travessas de madeira e escória de aciaria tipo LD na camada de balastro. A escória utilizada foi obtida na própria CSA, após processo de cura que variou de 8 a 10 meses. O material foi previamente caracterizado com base nos parâmetros índice da norma Brasileira NBR 5564 - Via férrea: lastro ferroviário: requisitos e métodos de ensaio [28], tendo sido considerado satisfatório. A Fig. 7a mostra um aspecto da via em construção e na Fig. 7b mostra-se a linha já em operação, com destaque para um detalhe do material utilizado na camada de balastro. Aparentemente o material é relativamente homogêneo em termos de morfologia e não existem indícios de mau comportamento da estrutura.



**Fig. 7. Ramal ferroviário da CSA construído no Brasil com balastro de escória de aciaria: a) aspecto da construção; b) via em serviço e detalhe do material da camada de balastro.**

Ensaio triaxiais em escala reduzida de 1:2,5, com tensão de confinamento constante de 70 kPa e escalões sucessivos de tensão de desvio cíclica, compatíveis com vias do tipo *heavy haul*, conduzidos em Portugal com o ASIC [8], permitiram constatar que, comparativamente à rocha granítica britada (ambos com a mesma curva de distribuição granulométrica – AREMA N. 24 [13] – e níveis de compactação inicial similares), o agregado siderúrgico apresentou maiores valores de módulo de resiliência e menores taxas de incremento da deformação permanente (Fig. 8a), após muitos ciclos de carga e descarga ( $0,5 \times 10^6$ /escalão de carga). Além disso, o material apresentou menor quebra e desgaste das partículas, após sucessivos escalões de carga, o que é traduzido pela diferença nos índices de quebra ( $B_g$ ), calculados em função da variação da massa das partículas de determinada dimensão ( $\Delta W_k$ ), segundo a proposta de Marsal [29] (Fig. 8b).



**Fig. 8. Comparação entre balastro de ASIC e de granito: a) deformação permanente em dois escalões de carga sucessivos e aspecto da câmara triaxial onde decorreram os ensaios; b) índice de quebra ( $B_g$ ) devido aos ensaios de deformação permanente [8].**



### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dos estudos e aplicações aqui apresentados, conclui-se que parece ser possível utilizar agregados siderúrgicos obtidos a partir de escórias de aciaria nas diversas aplicações em infraestruturas de transportes, nomeadamente como aterro, como material granular para base e sub-base de pavimentos rodoviários, como agregado de misturas betuminosas e como material granular para as camadas de sub-balastro e de balastro de vias-férreas.

As atuais normas portuguesas e brasileiras poderiam ser revistas no sentido de permitir tais utilizações, havendo, no entanto, que continuar a desenvolver estudos que suportem essas decisões. Um aspeto fundamental para que essas aplicações tenham sucesso é a garantia da qualidade do agregado siderúrgico, o que se considera ser uma condição expectável no contexto de mercados cada vez mais exigentes.

Considerando os volumes envolvidos, a utilização de agregado siderúrgico em infraestruturas de transporte pode traduzir-se por um contributo importante para a sustentabilidade ambiental da indústria da construção.

### 4 AGRADECIMENTOS

Este estudo foi realizado com o suporte do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil) e da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil). Agradecimentos ao Laboratório de Geotecnia (LabGeo) do Departamento de Engenharia Civil da FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil e à COPPE/UFRJ (Coordenação dos Programas de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Brasil) pela colaboração interinstitucional. Agradecimentos às empresas Siderurgia Nacional S.A. e Ternium S.A. pela cedência de materiais para os estudos e informação.

### 5 REFERÊNCIAS

1. M.B. Leite, Tese de Doutorado, *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2001.
2. R. Pestana, Dissertação de Mestrado, *Contribuição para o estudo do comportamento mecânico de resíduos de construção e demolição aplicados em estradas de baixo tráfego*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2008.
3. UEPG, *The European Aggregates Industry, Annual Statistics 2017-2018*, disponível em: [http://www.aniet.pt/fotos/editor2/uepg\\_annual\\_review\\_2017-2018\\_003\\_.pdf](http://www.aniet.pt/fotos/editor2/uepg_annual_review_2017-2018_003_.pdf) (consultado em 02 de janeiro de 2019), 2018.
4. P.J.G. Marques, Dissertação de Mestrado, *Contribuição para o estudo da viabilidade de escórias de aciaria em misturas betuminosas*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2009.
5. V.T.F. Castelo Branco, Tese de Doutorado, *Caracterização de misturas com o uso de escória de aciaria como agregado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
6. S.M.R. Ferreira, Tese de Doutoramento, *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares. Aplicação às escórias de aciaria nacionais*, Universidade do Minho, Escola de Eng. Guimarães, Portugal, 2010.
7. Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure – SAMARIS, European Commission 5th Framework Program, *Deliverable D29: Guide on techniques for recycling in pavement structures*, 2006.
8. B. Delgado, A. Viana da Fonseca, E. Fortunato & D. Coelho, Análise comparada de um agregado de escória de aciaria como material alternativo para lastro de vias-férreas por meio de ensaios triaxiais monotônicos e cíclicos, *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica*, Salvador, Brasil, 2018.
9. A. Gomes Correia, A.J. Roque, S.M.S. Ferreira & E. Fortunato, Case study to promote the use of industrial byproducts: the relevance of performance tests, *Journal of ASTM International*, 9(2), 1-18, 2012.

10. EuroSlag, *The European Slag Association, Legal Status of Slag, Position Paper*, Disponível em: <http://www.euroslag.com/products/statistics/2016/> (consultado em 02 de janeiro de 2019), 2016.
11. G.M. de Sousa, Dissertação de Mestrado, *Estudo experimental de escórias de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas*, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2007.
12. T. Merkel, Successful utilization of steel slag in Germany, *Proceedings of 2nd European Slag Conference - Engineering of Slags, A Scientific and Technological Challenge*, Düsseldorf, 9-11 October 2000.
13. American Railway Engineering Maintenance-of-way Association – AREMA, *Manual for Railway Engineering*, Vol. I a IV, Lanham, 2013.
14. D. Miguel, *Comunicações do Seminário sobre Valorização de Resíduos em Infraestruturas de Transportes e Obras Geotécnicas, Aplicação a Agregados Siderúrgicos Inertes para a Construção (ASIC)*, A Aplicação no Ramal Ferroviário de Acesso à Siderurgia Nacional do Seixal, Lisboa, 10-11 Dezembro 2007.
15. E. Fortunato, A.J. Roque & A. Gomes Correia, Comportamento estrutural de trecho rodoviário construído com Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC), *Atas do 16º Congresso Nacional de Geotecnia*, Ponta Delgada, Açores, Portugal, 2018.
16. D.C. Pena, Dissertação de Mestrado, *Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação*, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, 2004.
17. A. Machado, Dissertação de Mestrado, *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2000.
18. J. Alvarenga, Dissertação de Mestrado, *Um estudo de avaliação estrutural e econômica de pavimentos flexíveis de escória de aciaria*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
19. H.B. de Freitas, Dissertação de Mestrado, *Misturas asfálticas de módulo elevado com uso de escórias de aciaria como agregado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
20. D.S. Tavares, Dissertação de Mestrado, *Avaliação laboratorial de mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
21. K.A. Costa, Dissertação de Mestrado, *Um método para beneficiamento de escórias visando aplicação em pavimentação*, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
22. R.C.B.A. Lopes, *Pré-misturado a frio contendo agregado siderúrgico: Uma alternativa viável para pavimentos de baixo volume de tráfego*, Apresentação, I Simpósio IME: Aplicação de Agregado Siderúrgico em Projetos de Infraestrutura de Transportes, 2017.
23. DNER-PRO 269/1994, *Projeto de restauração de pavimentos flexíveis*, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, Brasil, 1994.
24. J.M.L. Crucho, Dissertação de Mestrado, *Contribuição para o estudo da resistência à fadiga de misturas betuminosas com incorporação de ASIC*, IST, Lisboa, Portugal, 2011.
25. R.M.A. Andrade, Dissertação de Mestrado, *Caracterização laboratorial de misturas betuminosas com incorporação de Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2015.
26. G.L.C. Rodrigues, Dissertação de Mestrado, *Caracterização e avaliação da expansibilidade de escórias de aciaria LD não tratadas e tratadas*, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, 2007.
27. F.S. Ribeiro, Tese de Doutorado, *Contribuição para análise do custo do ciclo de vida de um sistema de gerência de pavimento ferroviário*, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2017.
28. ABNT, NBR 5564, *Via férrea – lastro ferroviário – requisitos e métodos de ensaio*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
29. R.J. Marsal, Large scale testing of rockfill materials, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation*, 93(SM2), 23-47, 1967.