

*António Gomes Correia*  
Departamento de Engenharia Civil  
da Universidade do Minho

*António José Roque*  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

*Sandra Ferreira Mestre*  
Departamento de Engenharia Civil  
da Universidade do Minho

*Fernando Castro*  
Departamento de Engenharia Mecânica  
da Universidade do Minho

*Eduardo Fortunato*  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

*Fernando Pardo de Santayana*  
Laboratório de Geotecnia do Cedex

*Luísa Trigo*  
Centro para a Valorização dos Resíduos

# A valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados em obras geotécnicas



→ Um Projecto Nacional



→ A estratégia de gestão para os resíduos em que ainda não é praticável a prevenção da sua produção, deve privilegiar a recuperação destes, nomeadamente através de soluções de valorização. É neste contexto que o Centro para a Valorização de Resíduos (CVR) e a Universidade do Minho (UM) participam num Projecto de Investigação & Desenvolvimento para a valorização de escórias de aciaria, coordenado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). Este projecto contempla a realização de ensaios laboratoriais visando avaliar o desempenho dos agregados siderúrgicos ao nível do aterro, da sub-base e da base de pavimentos.

## Introdução

A actual política comunitária de gestão de resíduos, nomeadamente o Sexto Programa de Acção em matéria de Ambiente ("Ambiente 2010: O Nosso Futuro, A Nossa Escolha"), baseia-se no princípio orientador da hierarquia num sistema integrado de gestão de resíduos, que dá preferência, em primeiro lugar à sua prevenção, em segundo lugar à sua recuperação (o que inclui a reutilização, a reciclagem e a recuperação energética, privilegiando-se a recuperação material) e, por último, à sua eliminação (que compreende a incineração sem recuperação energética e a deposição em aterro). No contexto nacional actual, também internacional, a utilização de resíduos ou de produtos obtidos a partir do seu processamento, que apresentem propriedades mecânicas e ambientais adequadas em obras geotécnicas, permitirá adaptar a sua construção aos princípios do desenvolvimento sustentável, nomeadamente: (1) reduzindo as quantidades de resíduos a depositar em aterro, (2) criando um novo e importante mercado nacional e (3) preservando os materiais naturais. É neste quadro que o Centro para a Valorização de Resíduos e a Universidade do Minho participam num Projecto de I&D, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, intitulado *Aplicação de resíduos em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas – Valorização de escórias de aciaria*, liderado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, e coordena um outro para realização de um trecho experimental, financiado pela Siderurgia Nacional (SN). Estes projectos pretendem contribuir para a criação de uma metodologia mecanicista e ambiental que promova a reutilização de resíduos, em geral, e das escórias de aciaria, em particular, valorizadas pela adequação ao uso dos agregados inertes obtidos da componente não metálica que resulta do seu processamento. Pretende-se, com base nos resultados dos ensaios de laboratório e de campo, elaborar a seguinte documentação técnica: i) especificações técnicas para a utilização dos agregados obtidos das escórias de aciaria nas infraestruturas de transporte e nas obras geotécnicas; ii) um manual de procedimentos com a metodologia de estudo para a utilização de resíduos neste tipo de obras.

## Os projectos do CVR em parceria com o LNEC e a UM para a valorização dos agregados siderúrgicos

Com a implementação dos Projectos, que decorrerão no período 2005-2008, pretende-se promover a valorização das escórias produzidas nos fornos eléctricos de arco da SN da Maia e da SN do Seixal como agregados siderúrgicos inertes, através da sua utilização como material de construção de infraestruturas de transporte e obras geotécnicas.

A valorização das escórias de aciaria será possível se forem encontrados benefícios económicos, o material satisfizer os valores previstos nas especificações de natureza ambiental e de engenharia, e o seu desempenho em obra for equivalente ao dos materiais naturais. Conhecida a experiência de outros países, bem como os dados técnicos já recolhidos no âmbito do Projecto (GOMES Correia et al, 2005; GOMES Correia et al, 2006; ROQUE et al., 2006), em parte apresentados neste trabalho, há motivos para esperar que estes requisitos venham a ser observados pelo material em estudo. Seguindo as recomendações mais relevantes de vários projectos da Comunidade Europeia, o projecto de I&D dará prioridade aos ensaios de laboratório relacionados com as propriedades mecânicas (compactação giratória e os ensaios triaxiais de carga cíclica) e com as propriedades ambientais (lixiviação de poluentes), as quais podem ser relevantes neste tipo de materiais não naturais. O projecto de prestação de serviços do CVR para a SN permitirá calibrar os resultados obtidos em laboratório e avaliar o desempenho dos agregados resultantes das escórias de aciaria quando colocados em obra e a compará-lo com o dos materiais naturais. Para este efeito, será construído um trecho experimental com diversas secções transversais. Este trecho terá umas secções construídas com materiais naturais (secções de referência) e outras com os agregados siderúrgicos, sendo os



→ No intuito de validação em campo destes resultados, a Siderurgia Nacional adjudicou ao CVR, em parceria com a UM e o LNEC, a execução de um trecho experimental com diversas secções transversais, nas quais se aplicarão materiais naturais e os agregados siderúrgicos. Com estes estudos pretende-se contribuir para a criação de uma metodologia mecanicista e ambiental que promova a reutilização dos resíduos, em geral, e das escórias de aciaria, valorizadas pela adequação ao uso dos agregados inertes obtidos da componente não metálica que resulta do seu processamento, em particular, através da sua aplicação na construção de infraestruturas viárias e de obras geotécnicas.

diversos materiais aplicados ao nível do aterro, da sub-base e da base do pavimento. Proceder-se-á à medição de diferentes propriedades a diferentes níveis das secções transversais, para comprovar e avaliar o desempenho mecânico dos materiais, e à avaliação do desempenho ambiental. A documentação técnica que se pretende elaborar refere-se a especificações técnicas para a utilização dos agregados obtidos das escórias de aciaria nas infraestruturas de transporte e nas obras geotécnicas e a um manual de procedimentos com a metodologia de estudo a seguir para a utilização de resíduos neste tipo de obras.

## Produção de escória de aciaria em Portugal

Em Portugal operam duas aciarias de forno eléctrico de arco, uma situa-se em Paio Pires, Seixal (SN Seixal), e a outra em S. Pedro de Fins, na Maia (SN Maia).

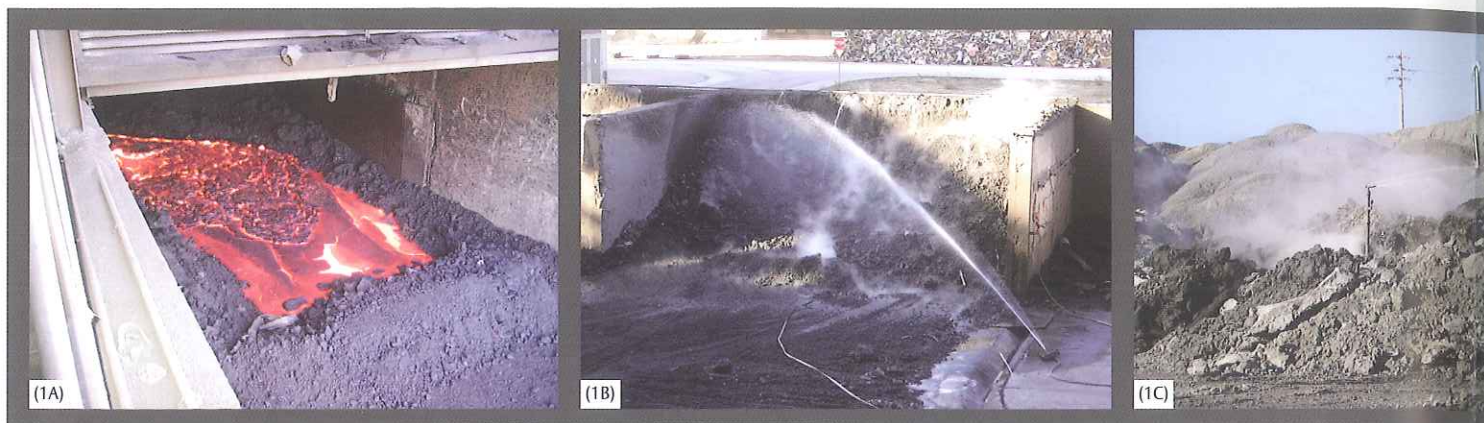
Nas aciarias de forno eléctrico de arco, o processo de produção do aço compreende duas fases: a fase da fusão e a fase da afinação. A principal matéria-prima utilizada na fase de fusão pelos fornos eléctricos de arco das duas siderurgias é a sucata ferrosa. Adiciona-se igualmente nesta fase os componentes, principalmente a cal, que irão dar lugar à formação da escória negra. Na fase da afinação ocorrem três etapas: a primeira corresponde ao período de oxidação, a segunda ao da redução e a última ao do ajuste final da composição. No período de oxidação, injecta-se oxigénio para eliminar os elementos indesejáveis do banho, como sejam o silício, o manganês, o fósforo, entre outros; dá-se a formação de óxidos que passam à escória, queima-se o carbono que é eliminado sob a forma gasosa e produz-se a fervura do banho. No final da fase de oxidação, a escória que flutua sobre o aço líquido é retirada cuidadosamente.

Seguem-se as operações no âmbito do período da redução, que têm por finalidade obter um metal de baixo conteúdo em oxigénio e eliminar a maior parte do enxofre. Para o efeito, é adicionada cal, que actua como dessulfurante, espato, que baixa o ponto de fusão da escória, e alguns elementos desoxidantes para fixar o oxigénio; produz-se uma nova escória dessulfurante e desoxidante, a escória branca. No período de afino final da composição, como o próprio nome indica, são ajustadas as componentes do banho, adicionando ferroligas em pequenas quantidades para melhorar as propriedades. Após a adição espera-se que as adições se dissolvam e se uniformize a composição do banho.

Em 2005, as duas siderurgias produziram em conjunto cerca de 1.500 000 t de aço, a que corresponde aproximadamente 270 000 t de escórias. Removida a componente metálica para a reciclagem ficaram 250 000 t de componentes não metálicos que foram transformados em agregados inertes siderúrgicos para construção (ASIC). Prevê-se, de acordo com os dados transmitidos pelas siderurgias, que a médio prazo se produzam anualmente cerca de 400 000 toneladas de escória. Em termos médios, por cada tonelada de aço líquido são geradas 110 a 150 kg de escórias negras e 20 a 30 kg de escórias brancas.

De entre os dois tipos de escórias produzidas pelas duas empresas siderúrgicas, só as escórias negras são potencialmente valorizáveis em infraestruturas viárias e obras geotécnicas. As escórias brancas, por apresentarem teores muito elevados em cal, não são valorizáveis nestas aplicações. Pelo exposto, no projecto de investigação em curso só está a ser estudada a viabilidade técnica de valorizar as escórias negras em infraestruturas viárias e obras geotécnicas. Assim, nas secções que se seguem, o termo escórias passa a ser utilizado como sinónimo de escórias negras, salvo se for expressamente indicado o contrário.





## Obtenção do ASIC a partir das escórias de forno de arco eléctrico

As escórias negras separadas do aço líquido no final da etapa de oxidação e vazadas em fosso de escória (Figura 1A), só depois de um adequado processamento podem passar à fase da sua valorização como agregado siderúrgico na indústria da construção. Nos estudos agora apresentados, a valorização está direccionada para a construção de infraestruturas de transporte e obras geotécnicas. Conforme indicação das empresas siderúrgicas nacionais, o processamento efectuado sobre as escórias, tendo em vista a sua transformação em agregado siderúrgico, compreende as acções seguidamente listadas em três fases.

### Fase A - Escoamento e arrefecimento da escória

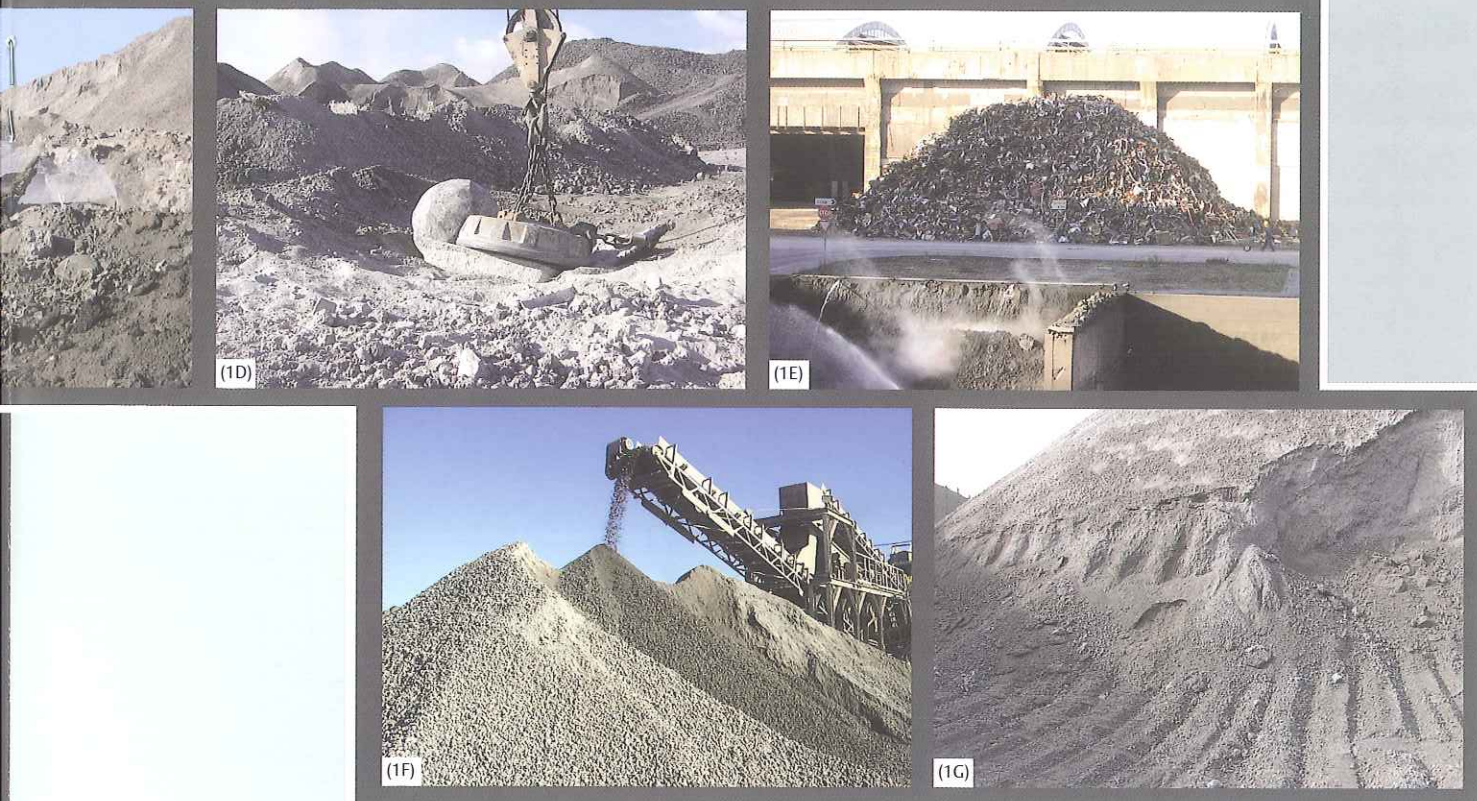
- a. Transferência da escória depositada no fosso para zona impermeabilizada, onde se procederá ao seu arrefecimento por água (Figura 1B), primeiro, e, em seguida, ao seu transporte em camião para a zona de armazenamento/tratamento;
- b. Na zona de armazenamento/tratamento completa-se o arrefecimento da escória, podendo utilizar-se água para acelerar o arrefecimento (Figura 1C) ou aguardar o tempo necessário para arrefecimento ao ar. O resíduo resultante designa-se por escória não processada. Na Lista Europeia de Resíduos (Portaria n.º 209/2004) este resíduo está catalogado no capítulo 10 com o código 10 02 02.

### Fase B - Separação da componente metálica

- a. Fragmentação (Figura 1D), com extracção simultânea de grande parte dos componentes metálicos. Trata-se da remoção das partes metálicas de maiores dimensões, geralmente sobre a forma de placas separadas, apenas com recurso a meios de manipulação física;
- b. Alimentação de tremonha com a escória que resulta do ponto anterior e separação das partes metálica e não metálica com tambores magnéticos. Obtém-se, assim, a parte metálica restante que se destina à sua reutilização na produção do aço (Figura 1E). Na escória que resta apenas passa a haver aparas menores e em pequena quantidade. Na Lista Europeia de Resíduos, este resíduo está catalogado no capítulo 10 com o código 10 02 01 (resíduos do processamento de escórias).



(1 A-G) Processamento da escória de aciaria: acções necessárias à sua valorização como agregado siderúrgico inerte na indústria da construção



### Fase C - Acções necessárias à valorização da parte não metálica: produção de agregado siderúrgico inerte como material de construção

- Separção por peneiração/calibração em fracções granulométricas (Figura 1F) adequadas às diversas aplicações do material na construção;
- Refragmentação mecânica, com eventual moagem, para produzir maior percentagem de finos, e assim obter granulometrias mais finas;
- Eliminação das aparas metálicas de menores dimensões que não tenham sido eliminadas nas fases anteriores, através de passagem com prato magnético e/ou re-processamento, passando novamente o material no rolo magnético;
- Armazenamento e maturação por hidratação ao ar livre, no tempo necessário à neutralização da cal livre remanescente (Figura 1G).

Tendo ainda como base os elementos facultados pelas siderurgias nacionais, acrescenta-se que:

- nas zonas de arrefecimento primário das escórias, que são impermeabilizadas, como já foi referido, existe uma bacia de retenção também impermeabilizada, para reter as partículas de granulometria mais fina que a água possa arrastar;
- no processo de tratamento das escórias não se utiliza qualquer combustível ou produtos que sejam geradores de emissões gasosas; existe apenas a evaporação da água de arrefecimento e algumas poeiras localmente;
- a água utilizada destina-se apenas a arrefecer a escória e a humedecer a parte não metálica a processar, pelo que não é necessário purgar ou efectuar qualquer escoamento de água a encaminhar para o meio hídrico, por necessidades do processo.
- por último, o processamento das escórias não gera quaisquer resíduos, sendo, pelo contrário, um processo que pretende potenciar a valorização de resíduos.





## Perspectivas sobre a viabilidade técnica da utilização do ASIC

### Programa experimental de laboratório

Com o objectivo de avaliar a viabilidade técnica de utilização do ASIC, foi implementado, em laboratório, um vasto programa experimental para estudar as propriedades: químicas (composição química do material e do lixiviado, perda ao rubro e teor em sulfato de magnésio), mineralógicas, geométricas (granulometria, índice de achatamento e índice de forma), e físicas e mecânicas (equivalente de areia, azul de metileno, limites de Atterberg, massa volúmica e absorção de água, resistência à fragmentação - Los Angeles, resistência ao desgaste - micro-Deval, carga pontual, esmagamento, desgaste em meio aquoso, compactação Proctor normal/CBR, compactação Proctor modificado/CBR, fragmentalidade, degradabilidade, resistência ao corte em compressão triaxial, triaxial saturado consolidado drenado em provetes de 30 cm de diâmetro, triaxial cíclico de precisão e compressão unidimensional em provetes de 50 cm de diâmetro).

Neste trabalho apresentam-se apenas alguns dos resultados obtidos nos ensaios realizados para a determinação da composição granulométrica, limites de Atterberg, composição química do agregado siderúrgico, composição química do lixiviado e características de deformabilidade. O principal objectivo do estudo destas propriedades, foi comparar os valores obtidos com os valores que constam das especificações técnicas das Estradas de Portugal, bem como de outros materiais tradicionais, e avaliar a viabilidade técnica de utilização dos agregados provenientes das escórias de aciaria nacionais em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas.

Para o estudo das composições químicas da massa total dos agregados obtidos das escórias e do lixiviado foram recolhidas, nos parques de armazenamento da SN da Maia e SN do Seixal, 5 amostras na pilha com 3 meses de maturação e 5 na pilha com 6 meses de maturação. A composição granulométrica e os limites de Atterberg dos agregados obtidos da escória de aciaria da SN da Maia foram estudados em amostra recolhida em pilha com 6 meses de maturação, e da aciaria da SN do Seixal em amostra recolhida de pilha com granulometria na gama 0-40 mm de diâmetro (não era conhecido o tempo de maturação). A Figura 2A ilustra o parque de armazenamento dos agregados da SN do Seixal e a Figura 2B a colheita da amostra.

### Resultados obtidos e comparação dos resultados obtidos com os das especificações e de outros materiais tradicionais.

Os estudos laboratoriais já realizados envolvendo a caracterização das propriedades químicas, mineralógicas, geométricas, físicas e mecânicas de amostras de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) recolhidas nas instalações da Siderurgia Nacional, quer no Seixal, quer na Maia, mostraram:

- (1) o carácter inerte destas escórias de acordo com os valores constantes do anexo I, do Decreto-Lei 152/2002, de 23 de Maio;
- (2) tratarem-se de materiais de granulometria extensa e bem graduados, sendo a dimensão máxima das partículas de 38.1mm (fig. 3);

(2 A) Parque de armazenamento dos agregados

(2 B) Colheita da amostra

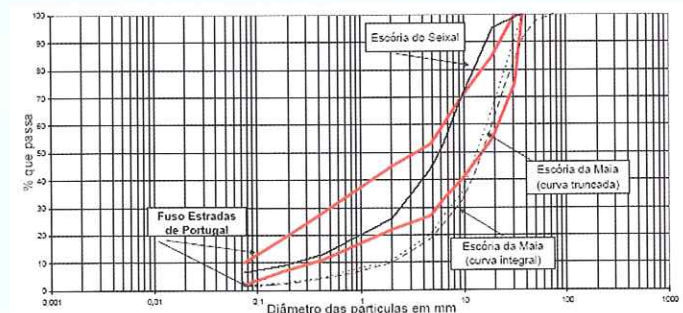


- (3) serem materiais não plásticos, com uma massa volúmica seca máxima elevada,  $2,32 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e um teor em água óptimo baixo (cerca de 5,0%), correspondentes a uma energia de compactação pesada;

- (4) exibirem uma boa resistência à abrasão e ao desgaste, evidenciado por um valor de Los Angeles de 23% e um valor de micro-Deval de 11%;

- (5) apresentarem boas características de resistência e de deformabilidade, mesmo superiores às reveladas pelos materiais tradicionais (fig. 4).

No âmbito dos aspectos de engenharia, procedeu-se à comparação das propriedades índice (granulometria e plasticidade) dos agregados obtidos das escórias de aciaria da SN da Maia e da SN 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, e no âmbito dos aspectos ambientais, à comparação com os valores máximos de admissibilidade previstos na tabela n.º 3 do ponto 2 do Anexo III do Decreto-Lei n.º 152/2002 para os lixiviados dos resíduos inertes.



(3)



Na Figura 3 comparam-se as curvas granulométricas dos agregados obtidos das escórias 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.

Observa-se, que as curvas granulométricas dos agregados obtidos das escórias não se inserem no fuso apresentado.

Porém, entende-se que será viável a sua correcção, mediante ajustamentos no processamento das escórias, que até ao presente não teve em consideração a necessidade de produzir um agregado com uma granulometria específica.

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal 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%. Face aos resultados obtidos com os agregados provenientes das escórias de aciaria ensaiadas, conclui-se que este material satisfaz os requisitos exigidos nas especificações do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal para as aplicações indicadas.

No Quadro 1 apresentam-se os valores dos parâmetros obtidos no lixiviado do ensaio de lixiviação realizado segundo a norma DIN 38414-S4 e os valores máximos de admissibilidade previstos na tabela n.º 3 do ponto 2 do Anexo III do Decreto-Lei n.º 152/2002 para os lixiviados dos resíduos inertes. De entre os vinte parâmetros doseados, verifica-se que todos apresentam valores menores, por vezes significativamente menores, do que os valores máximos de admissibilidade previstos para os resíduos inertes. Nestas circunstâncias, os agregados obtidos da escória de aciaria ensaiados é, do ponto de vista da sua lixiviabilidade, um resíduo inerte. Quanto às características de deformabilidade dos agregados obtidos das escórias verificam-se muito melhores características do que as obtidas em materiais naturais (GOMES CORREIA et al., 2007).

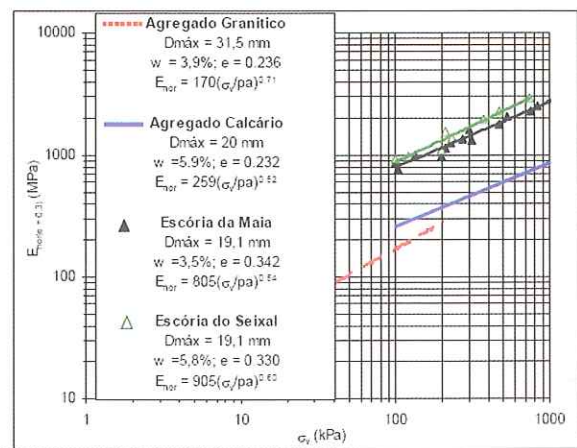
## Considerações finais

A indústria siderúrgica nacional perspectiva produzir a médio prazo 400 000 toneladas de escórias de aciaria. No âmbito das actuais políticas de gestão integrada de resíduos, que privilegiam a valorização e penalizam a eliminação em aterro, está em fase de desenvolvimento um estudo que pretende avaliar, nos aspectos de engenharia e ambientais, a viabilidade técnica de valorização dos agregados inertes obtidos das escórias de aciaria em infraestruturas viárias e obras geotécnicas.

Os resultados já obtidos na experimentação laboratorial, alguns dos quais foram mostrados neste trabalho, indiciam que os agregados siderúrgicos produzidos em Portugal apresentarão, à semelhança dos agregados obtidos das escórias de aciaria produzidas noutros países, características adequadas à sua utilização neste tipo de obras, sem perda da qualidade da construção, sem impactes negativos para a saúde pública e para o ambiente, e possibilitando a preservação dos recursos naturais, nomeadamente pela redução na utilização de agregados naturais. A comprovação destes resultados laboratoriais será feita através do comportamento a ser observado em obra em secções experimentais de pavimentos que serão implementadas em Julho de 2007.

### 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), através do Programa Operacional Ciência e Inovação 2010 (POCI 2010) e do fundo comunitário europeu FEDER.



(3) Comparação das curvas granulométricas dos agregados obtidos das escórias 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) Boas características de resistência e de deformabilidade, mesmo superiores às reveladas pelos materiais tradicionais

(Q1) Valores dos parâmetros medidos no lixiviado e valores máximos de admissibilidade previstos no Decreto-Lei n.º 152/2002 para os resíduos inertes.

Parâmetro	Unidade	Resíduo inerte (Decr.-Lei nº 152/2002)	Lixiviado da escória	Classificação da escória
pH	-	5,5 < x < 12	10,3	inerte
Condutividade eléctrica	mS/cm	6 < y < 50	0,117	inerte
Amónio	mg N/l	5	< 0,13	inerte
AOX	mg Cl/l	0,3	< 0,010	inerte
Arsénio	mg/l	0,1	< 0,0018	inerte
Cádmio	mg/l	0,1	0,01	inerte
Chumbo	mg/l	0,5	< 0,06	inerte
Cianetos	mg/l	0,1	< 0,05	inerte
Cloretos	mg/l	500	< 3	inerte
Cobre	mg/l	2	< 0,025	inerte
COT	mg C/l	40	3,8	inerte
Crómio M	mg/l	0,1	< 0,05	inerte
Crómio total	mg/l	0,5	< 0,05	inerte
Fenóis	mg/l	1	< 0,01	inerte
Fluoretos	mg/l	5	0,04	inerte
Mercurio	mg/l	0,02	< 0,002	inerte
Níquel	mg/l	0,5	< 0,04	inerte
Nitritos	mg/l	3	< 0,04	inerte
Sulfatos	mg/l	500	< 10	inerte
Zinco	mg/l	2	< 0,008	inerte

### Referências:

Gomes Correia, A., Ferreira, S., Araújo, N., Castro, F., Trigo, L., Roque, A.J., Pardo de Santayana, F. e Fortunato, E. - Estudo de viabilidade de aplicação de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro. Relatório CVR 257/2005, Guimarães: CVR, 87 p., 2005.

Gomes Correia, A., Ferreira, S., Castro, F., Trigo, L., Roque, A.J., Pardo de Santayana, F. e Fortunato, E. - Estudo de viabilidade de aplicação do agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) da Siderurgia Nacional do Seixal em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro. Comparação com as características do agregado da Siderurgia Nacional da Maia. Relatório CVR 24/2006, Guimarães: CVR, 47 p., 2006.

Gomes Correia, A., Ferreira, S., Roque, A.J. - Promoting the use of non traditional materials in geotechnical works. XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE - TC3 Workshop Management of materials for infrastructures in urban environments, Madrid, Spain, 23th September, 2007 (in impression).

ROQUE, A. J.; GOMES CORREIA, A.; FORTUNATO, E.; PARDO DE SANTAYANA, F.; CASTRO, F.; FERREIRA, S. M. R.; TRIGO, L. - A Geotecnia na valorização de Agregados siderúrgicos inertes reciclados - Um projecto nacional. 12º Encontro Nacional do Saneamento Básico - Cascais, Outubro 2006.