

ESTUDO DA LIXIVIAÇÃO DO AGREGADO PROVENIENTE DE ESCÓRIAS DE ACIARIA DE FORNO DE ARCO ELÉCTRICO EM LABORATÓRIO E NO CAMPO

STUDY OF THE LEACHING OF THE AGGREGATE COMING FROM ELECTRICAL ARC FURNACE STEEL SLAG IN LABORATORY AND IN FIELD

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

Castro, Fernando, *Centro para a Valorização de Resíduos, Universidade do Minho, CT2M, Guimarães, Portugal, fcastro@dem.uminho.pt*

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

Silva, Susana, *Centro para a Valorização de Resíduos, Guimarães, Portugal, asilva@cvresiduos.pt*

Cavalheiro, António, *Siderurgia Nacional Empresa de Produtos Longos, Seixal, Portugal, acavalheiro@seixal.snlongos.pt*

RESUMO

A utilização de resíduos em obras geotécnicas é equacionável se não existirem riscos para o meio ambiente e para a saúde pública. Os resíduos que satisfazem estes requisitos são os resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes, sendo a sua classificação efectuada com base na comparação dos valores de lixiviação obtidos em ensaios laboratoriais normalizados com os valores limites de lixiviação previstos pela legislação portuguesa. Estudos de lixiviação de resíduos referem que os valores de lixiviação dos ensaios laboratoriais são conservativos comparativamente com os observados no campo. A confirmarem-se estes resultados, a legislação em vigor pode ser penalizadora do encaminhamento dos resíduos para as obras. Neste trabalho apresentam-se os resultados dos ensaios de lixiviação efectuados em laboratório e no campo com agregados provenientes de escórias de aciaria de forno de arco eléctrico.

ABSTRACT

The use of waste in geotechnical works is feasible if there aren't risks for the environment and for the public health. The waste that meets these requirements is the waste admissible in landfills for inert waste, being its classification carried out on the basis of the comparison of the leaching values obtained in standard laboratory tests with the leaching limit values foreseen in the Portuguese legislation. Waste leaching studies mentioned that the leaching values of the laboratory tests are conservatives in comparison with the obtained ones in the field. In the case of these results to be confirmed, the legislation in force harms can be harmful of the use of waste in the public works. In this paper the results of the leaching tests performed in laboratory and in the field with aggregates coming from electrical arc furnace steel slag are presented.

1. INTRODUÇÃO

Comparativamente com os materiais granulares naturais, aos resíduos é exigida não só a sua caracterização geotécnica, como também a ambiental, esta com o objectivo de evidenciar o potencial poluente do material para o meio ambiente e para a saúde pública.

Comprovando-se que essa perigosidade ambiental não existe, não há nenhuma razão para que estes materiais alternativos não possam ser aplicados em obra, se estiver garantido um comportamento adequado destas ao longo do tempo de vida útil. Deve-se mesmo afirmar que nestas condições, isto é, de adequação ambiental e mecânica dos materiais alternativos para aplicação em obra, se devia privilegiar, no quadro de uma política de construção sustentável e de gestão de recursos adequada, a sua utilização em detrimento da dos materiais naturais. As razões são diversas, nomeadamente: 1) preservação de recursos naturais não renováveis; 2) redução do consumo energético e da emissão para a atmosfera de gases com efeito estufa; 3) prolongamento do período de exploração dos aterros de resíduos; 4) diminuição do custo das obras; e 5) criação de um novo mercado de produtos, com dimensão nacional.

É neste quadro que entre 2005 e 2009, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), a Universidade do Minho (UM) e o Centro para a Valorização de Resíduos (CVR) conceberam e implementaram, com o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia e da Siderurgia Nacional Empresa de Produtos Longos, um Projecto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico (I&DT), com o objectivo de contribuir para a criação de uma metodologia ambiental e mecanicista que promovesse a aplicação de resíduos, em geral, e das escórias de aciaria, em particular, em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas. Para além disso, com base nos resultados dos ensaios de laboratório e de campo obtidos ao longo da execução do Projecto, intitulado *Aplicação de resíduos em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas – Valorização de escórias de aciaria*, elaboraram-se: 1) especificações técnicas para a utilização dos agregados provenientes das escórias de aciaria em infraestruturas de transporte e em obras geotécnicas; 2) e um manual de procedimentos com a metodologia de estudo a seguir para promover a valorização dos resíduos neste tipo de obras. Com base no trabalho desenvolvido, o resíduo “escória de aciaria” é presentemente, depois do seu processamento nas instalações das Siderurgias Nacionais, comercializado como agregado reciclado com a designação “Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção – ASIC”, o que vem permitindo às Siderurgias Nacionais, situadas na Maia (SN Maia) e no Seixal (SN Seixal), escoar as cerca de 250 000 toneladas anualmente produzidas. Nesta comunicação passa por isso a designar-se as escórias de aciaria de forno de arco eléctrico como “ASIC”.

Se em Portugal estes projectos de demonstração são da maior importância ao desenvolvimento do mercado dos agregados reciclados, em países como a Alemanha, a Dinamarca e a Holanda, por exemplo, as taxas de valorização de diferentes tipos de resíduos são da ordem de 100%.

Como mencionado acima, a utilização dos resíduos, ou dos agregados provenientes destes, em obra só é permitida pelas entidades reguladoras do sector se o estudo das suas características ambientais evidenciar que não há risco para o meio ambiente e para a saúde pública. No país, os resíduos que satisfazem estes requisitos são os resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes, sendo a sua classificação efectuada com base na comparação dos valores de lixiviação obtidos em ensaios laboratoriais normalizados com os valores limites de lixiviação previstos pela legislação portuguesa.

Acontece, porém, que os ensaios de lixiviação em laboratório são realizados em condições muito diferentes das existentes em obra, havendo estudos, como o Projecto ALT-MAT (1999), que mencionam que a lixiviação de resíduos efectuada em laboratório é conservativa relativamente à de campo, o que pode inviabilizar a reciclagem de alguns resíduos.

Pelas indicações expostas no parágrafo anterior e atendendo ao reduzido número de estudos em que se tenha procedido à lixiviação dos resíduos em laboratório e no campo, no Projecto de I&DT referido procedeu-se à realização de ensaios de lixiviação em laboratório e num trecho experimental em aterro. Nesta comunicação apresentam-se os resultados obtidos.

2. CLASSIFICAÇÃO DA PERIGOSIDADE AMBIENTAL DOS RESÍDUOS

Existem vários métodos para avaliar o potencial poluente dos resíduos, estabilizados ou não, do qual depende a possibilidade de os depositar em aterros de resíduos ou a viabilidade de os reciclar. Actualmente, os ensaios de lixiviação são os métodos mais utilizados.

No país, a perigosidade ambiental dos resíduos pode ser avaliada com base nos critérios de admissão de resíduos em aterro (Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto), os quais estipulam valores limites de lixiviação obtidos em ensaios realizados de acordo com a EN 12457-Parte 2 (relação líquido, L para sólido, S, é igual a 10 l/kg e a dimensão das partículas inferior a 4 mm) ou com a EN 12457-Parte 4 (L/S é igual a 10 l/kg e a dimensão das partículas inferior a 10 mm).

Os critérios de admissão de resíduos em aterro previstos na legislação em vigor não parecem, porém, os mais adequados para classificar os resíduos tendo em vista a sua reciclagem em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas. Por um lado, pelo facto de serem muito diferentes as condições de realização do ensaio de lixiviação laboratorial, previsto pela legislação, e as condições observadas em obra, havendo evidências de que a lixiviação em laboratório é conservativa comparativamente à de campo (ALTMAT, 1999). Por outro, os resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes são depositados em infraestruturas que têm na sua base um sistema de protecção ambiental constituído por uma barreira de segurança de 1 m espessura e condutividade hidráulica inferior ou igual a 1×10^{-7} m/s. Entende-se que a metodologia mais adequada para avaliar a perigosidade ambiental de um resíduo a aplicar numa infraestrutura de transporte ou numa obra geotécnica seria preferencialmente com base em critérios de desempenho e não em critérios prescritivos.

Na falta de regulamentação específica para a reciclagem de resíduos em obras geotécnicas, nomeadamente no domínio da protecção do meio ambiente e da saúde pública, devem ser tidas em consideração algumas medidas na fase de execução dos projectos. Na Circular de 9 de Maio de 1994 do Ministério do Ambiente francês, que definiu as regras de utilização das escórias de incineração dos resíduos sólidos urbanos em infra-estruturas rodoviárias na perspectiva de assegurar a protecção do meio ambiente e da saúde pública, referem-se algumas dessas medidas:

- depositá-las numa cota topográfica que as deixe ao abrigo dos níveis mais altos de água conhecidos,
- não as utilizar como material drenante,
- protegê-las da água das chuvas,
- prever um procedimento de estaleiro permitindo limitar a sua exposição à chuva,
- excluir a sua utilização para preenchimento de trincheiras comportando canalizações metálicas,
- aplicá-las no exterior do perímetro de protecção das captações de alimentação em água potável,
- não as utilizar a uma distância mínima de 30 m de cursos de água,
- construir aterros até 3 m de altura, sem nenhum dispositivo de infiltração, na condição de que tivesse à superfície um estrutura de rodovia ou de estacionamento, um edifício coberto ou um recobrimento vegetal sobre um substrato de pelo menos 0,5 metros.

As preocupações centram-se na necessidade de se evitar o contacto prolongado com água meteórica e subterrânea, evitar a poluição dos recursos hídricos e o contacto com alguns materiais.

Piantone e Autret (2008) referem que esta Circular constituiu o texto fundador da via de utilização das escórias de incineração dos resíduos sólidos urbanos e foi seguida pela grande maioria dos intervenientes no sector, mas que devia ser revista atendendo aos conhecimentos entretanto adquiridos.

3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DO ASIC

Para o estudo das composições química e mineralógica da fracção global do ASIC foram recolhidas 5 amostras em pilha de 3 meses de maturação e 5 em pilha de 6 meses de maturação, nos parques de armazenamento da SN Maia (Gomes Correia et al., 2005) e da SN Seixal (Gomes Correia et al., 2006).

No Quadro 1 apresentam-se as composições químicas médias do ASIC da SN Maia e do ASIC da SN Seixal, aos 3 e 6 meses de maturação. Os teores foram obtidos por espectrometria de fluorescência de raios X, para uma base de 100% em peso. As três espécies químicas em maior percentagem são o óxido de ferro (Fe_2O_3), o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de silício (SiO_2), que no conjunto de todas as análises químicas, variam, respectivamente, entre 30,40-48,23%, 23,80-35,21% e 11,96-15,72%. No seu conjunto estes elementos totalizam entre 81,33-84,44% da composição química das escórias de aciaria. Para além destes elementos, existem mais quatro elementos em que a percentagem é sempre superior a 1%: Crómio (Cr), entre 1,50-1,97%, óxido de magnésio (MgO), entre 2,72-4,44%, manganês (Mn), entre 3,79-3,89% e óxido de alumínio (Al_2O_3), entre 3,63-5,91%. Conjuntamente com os três elementos em maior percentagem, totalizam cerca de 97% da massa química total das escórias de aciaria.

As composições químicas obtidas para os ASIC das duas SN em amostras colhidas em pilhas com os períodos de maturação já indicados, mostram que a variabilidade composicional intra-SN é menor, para a maior parte das espécies químicas, do que a variabilidade composicional inter-SN.

A análise mineralógica foi realizada por difracção de raios X e complementada por observação em microscopia electrónica de varrimento. Na SN Maia foram identificados os minerais seguintes: wustite ($\text{Fe}_{0,965}\text{O}$), hematite (Fe_2O_3), kirschsteinite ($\text{Ca}(\text{FeO}_{0,69}\text{MgO}_{0,31})\text{SiO}_4$) e akermanite ($\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$) e na SN Seixal: wustite, silicato de cálcio (Ca_2SiO_4) e ghelenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$).

A realização do ensaio do sulfato de magnésio permitiu avaliar a alterabilidade do material quando sujeito aos agentes atmosféricos, em especial nas baixas temperaturas. Para tal, seguiu-se a norma portuguesa NP 1378-1976, a qual se destina a fixar o modo de determinar a alteração sofrida por um agregado devido à acção de uma solução saturada de sulfato de magnésio. No ensaio utilizou-se uma solução de sulfato de magnésio que a 21 °C apresentava uma densidade de cerca de 1,3.

Fez-se uma apreciação quantitativa (por peneiração e determinação da perda de massa) e qualitativa (por observação visual) da alteração sofrida pelo agregado, quando submetido, alternadamente, a imersões na referida solução e a secagens em estufa, realizando-se cinco ciclos completos de imersão e secagem. O agregado foi dividido em provetes de agregado fino (material que passa no peneiro de 4,75 mm) e agregado grosso (material que é retido no referido peneiro), não sendo consideradas as fracções granulométricas correspondentes a menos de 5% da porção total tomada. Os resultados quantitativos mostram que as perdas dos provetes foram insignificantes ($\leq 0,3\%$) e os resultados qualitativos que nenhuma partícula sofreu fissuração ou fragmentação, verificando-se apenas uma ligeira esfoliação.

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

Quadro 1 - Composição Química do ASIC da SN Maia e do ASIC da SN Seixal

Espécie química	ASIC da SN Maia				ASIC da SN Seixal			
	Pilha com 3 meses de maturação		Pilha com 6 meses de maturação		Pilha com 3 meses de maturação		Pilha com 6 meses de maturação	
	Média	Des. Padrão	Média	Des. padrão	Média	Des. padrão	Média	Des. padrão
MgO(%)	2,72	0,06	3,32	0,29	4,44	0,40	4,05	0,84
Al ₂ O ₃ (%)	4,20	0,10	3,63	0,10	5,77	0,15	5,91	0,27
SiO ₂ (%)	11,96	0,10	12,56	0,10	15,72	0,26	15,54	0,40
P ₂ O ₅ (%)	1,23	0,03	1,04	0,04	0,68	0,04	0,71	0,02
SO ₃ (%)	0,31	0,01	0,29	0,02	1,09	0,29	0,90	0,22
K ₂ O (%)	0,05	0,01	0,08	0,01	0,05	0,01	0,04	0,01
CaO (%)	24,19	0,79	23,80	1,04	35,21	1,14	34,57	0,77
TiO ₂ (%)	0,73	0,02	0,74	0,02	0,76	0,03	0,74	0,04
V (%)	0,09	0,01	0,09	0,00	0,08	0,00	0,07	0,00
Cr (%)	1,97	0,09	1,93	0,09	1,50	0,04	1,51	0,05
Mn (%)	3,89	0,14	3,88	0,08	3,92	0,29	3,79	0,39
Fe ₂ O ₃ (%)	48,23	0,89	48,08	1,22	30,40	0,70	31,80	1,59
Cu (%)	0,04	0,00	0,04	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00
Zn (%)	0,07	0,01	0,07	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00
Sr (%)	0,03	0,00	0,03	0,00	0,04	0,00	0,03	0,00
ZrO ₂ (%)	0,04	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,03	0,00
Ba (%)	0,11	0,06	0,15	0,01	0,15	0,01	0,14	0,01

Obs.: O símbolo < (menor) significa que a concentração do elemento era inferior ao limite de quantificação do método utilizado.

4. CARACTERIZAÇÃO DA LIXIVIABILIDADE DO ASIC EM LABORATÓRIO

A lixiviabilidade do ASIC só foi estudada nas amostras recolhidas na SN Maia. No Quadro 2 apresentam-se, para alguns elementos, os valores de lixiviabilidade extremos obtidos nas 5 amostras recolhidas nas pilhas com 3 e 6 meses de maturação. Nos restantes elementos, os valores apresentados correspondem à lixiviabilidade de uma única amostra, recolhida na pilha com 3 meses de maturação.

À data de realização dos ensaios, a legislação em vigor era o Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio, e não o Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto, pelo que na realização dos ensaios foi adoptada a norma DIN 38414-S4 e não a EN 12457-Parte 2 ou a EN 12457-Parte 4, mencionadas na secção 2 desta comunicação. No lixiviado da amostra recolhida na pilha com 3 meses de maturação foram determinados todos os parâmetros constantes da tabela n.º 3 do Anexo III do Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio.

Comparando os valores de lixiviação obtidos com os valores limites de lixiviação previstos na tabela n.º 3 do ponto 2 do anexo III do Decreto-Lei n.º 152/2002 para os resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes, verifica-se que todos os elementos apresentam valores menores, por vezes significativamente menores, do que os valores limites de lixiviação exigidos. Nestas circunstâncias, o ASIC é, do ponto de vista da sua lixiviabilidade, e em acordo com os requisitos previstos no Decreto-Lei n.º 152/2002, um resíduo admissível em aterros para resíduos inertes.

Quadro 2 - Composição Química do Lixiviado do ASIC da SN Maia Produzido em Laboratório

Parâmetro	ASIC da pilha com 3 meses de maturação ^(a)	ASIC da pilha com 6 meses de maturação ^(a)	Valor limite de lixiviação ^(b)	Classificação ^(c)
pH (-)	9,8-10,9*	10,3-11,0*	5,5<x<12	Inerte
Cond. eléct. (mS/cm)	0,098-0,151*	0,115-0,243*	6<y<50	Inerte
COT (mg C/l)	3,8	—	40	Inerte
Arsénio (mg/l)	<0,0018	—	0,1	Inerte
Cádmio (mg/l)	<0,009-0,01*	<0,009*	0,1	Inerte
Cobre (mg/l)	<0,025*	<0,025*	2	Inerte
Crómio VI (mg/l)	<0,05	—	0,1	Inerte
Crómio total (mg/l)	<0,06*	<0,06*	0,5	Inerte
Mercurio (mg/l)	<0,002	—	0,02	Inerte
Níquel (mg/l)	<0,04*	<0,04*	0,5	Inerte
Chumbo (mg/l)	<0,06*	<0,06*	0,5	Inerte
Zinco (mg/l)	<0,008*	<0,008*	2	Inerte
Fenóis (mg/l)	<0,01	—	1	Inerte
Fluoretos (mg/l)	0,04	—	5	Inerte
Cloretos (mg/l)	<3*	<3*	500	Inerte
Sulfatos (mg/l)	<10*	<10*	500	Inerte
Nitritos (mg/l)	<0,04	—	3	Inerte
Amónia (mg/l)	<0,13*	<0,13*	5	Inerte
Cianetos (mg/l)	<0,05	—	0,1	Inerte
AOX (mg Cl/l)	<0,01	—	0,3	Inerte

COT: Carbono Orgânico Total. AOX: Haletos Orgânicos Adsorvíveis.

^(a) - Valores com "*" provêm de cinco ensaios de lixiviação, os restantes de um único ensaio.

^(b) - Previsto no Decreto-Lei n.º 152/2002 para resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes.

^(c) - Classificação com base no Decreto-Lei n.º 152/2002.

Obs.: O símbolo < (menor) significa que a concentração do elemento era inferior ao limite de quantificação do método utilizado.

5. CARACTERIZAÇÃO DA LIXIVIABILIDADE DO ASIC NO CAMPO

O estudo da lixiviabilidade do ASIC no campo foi efectuado num trecho experimental em aterro, construído ao km 13+600 da estrada nacional EN 311 que liga Fafe a Cabeceiras de Basto. Para o efeito, o aterro foi instrumentado com um lisímetro, concebido no LNEC. A Figura 1 mostra a sua localização no trecho experimental, em planta (Figura 1a) e em corte (Figura 1b). A figura também ilustra a instrumentação da secção do trecho experimental construída com o saibro granítico. Os resultados da lixiviação referentes a este lisímetro podem ser consultados em Roque et al. (2009). O perfil longitudinal do trecho experimental apresentado na Figura 2 mostra as diferentes secções de que o mesmo é constituído.

O lisímetro é composto por quatro componentes fundamentais: i) a área de alimentação, que coincide com o topo da coluna de material a lixiviar; ii) a coluna de material a lixiviar; iii) a bacia de recepção do lixiviado, que se situa na base da coluna de lixiviação; e iv) o reservatório de recolha do lixiviado, situado no exterior do aterro.

A construção do lisímetro foi iniciada pela bacia de recepção, com a abertura de uma vala com cerca de 2 m x 1 m x 0,40 m (comprimento, largura, profundidade). A bacia de recepção ficou

instalada na segunda camada de ASIC compactado no aterro, ilustrando a Figura 3a) a fase inicial da sua escavação. No revestimento basal (fundo e paredes laterais) da bacia de recepção aplicaram-se, de cima para baixo, os seguintes geossintéticos: geotêxtil, geomembrana e geotêxtil. As funções do geotêxtil é proteger a geomembrana ao punçamento e a da geomembrana é impermeabilizar a base da bacia de recepção. A instalação dos geossintéticos foi efectuada pela Empresa BBF – Tecnologias do Ambiente. A Figura 3b) mostra a fase de instalação da geomembrana. A vala escavada para a formação da bacia de recepção foi preenchida com seixo rolado médio a grosso, previamente lavado (Figura 3c). No topo da camada de seixo colocou-se um geotêxtil com função de filtro. A ligação da bacia de recepção ao reservatório de recolha do lixiviado resultante da percolação de água através de uma coluna de ASIC com as dimensões 2,0m x 1,0m x 1,4m (comprimento, largura, altura) foi assegurada através de um tubo em PVC, ligado à base da bacia de recepção (Figura 3d).

A lixiviação do ASIC foi principalmente efectuada através da rega da plataforma do lisímetro (topo da coluna de ASIC) com água proveniente de um autotanque. Com este procedimento, possível devido à elevada condutividade hidráulica do ASIC, pretendeu-se reduzir o tempo necessário para a caracterização da lixiviabilidade do material no campo. A lixiviação que não se deveu à alimentação do lisímetro pela água do autotanque foi produzida pela água da precipitação atmosférica. Durante a lixiviação admite-se que o lixiviado produzido no exterior da coluna do lisímetro terá uma contribuição desprezável na alimentação da bacia de recepção.

No total recolheram-se 11 amostras de lixiviado (ASIC 1 a ASIC 11), tendo o volume total acumulado recolhido sido de 2961,5 l, como mostra o Quadro 3. Destas amostras, apenas quatro, ASIC 6 e ASIC 9 a ASIC 11, resultaram da alimentação do lisímetro por água de precipitação atmosférica. A água do autotanque foi recolhida num ribeiro situado junto do trecho experimental, em Novembro de 2007, tendo sido amostrada para análise química e constituição de branco.

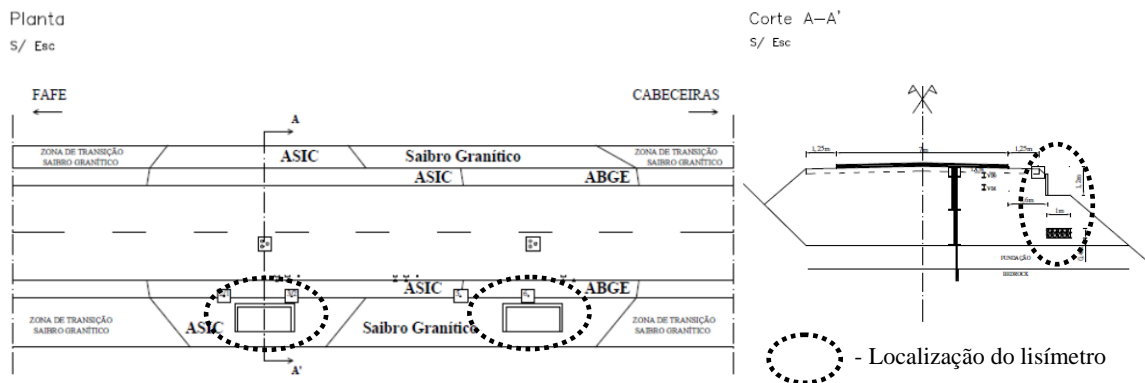


Figura 1 – Localização dos Lisímetros no Trecho Experimental em Aterro (adaptado de Gomes Correia et al., 2008).

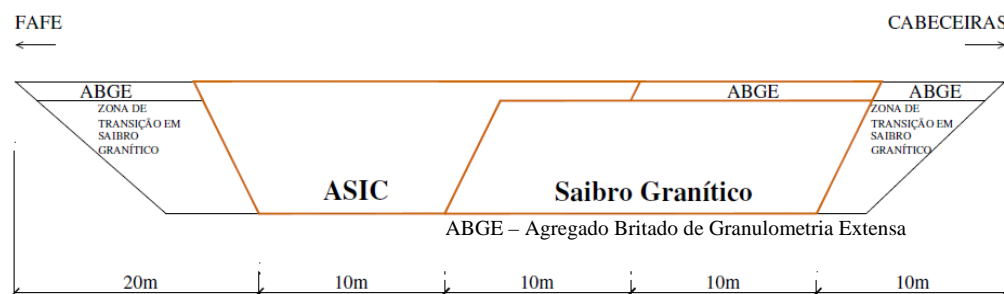


Figura 2 – Perfil Longitudinal do Trecho Experimental em Aterro (Gomes Correia et al., 2008).



(a) - Abertura da vala



(b) - Instalação da geomembrana



(c) - Vala preenchida com seixo rolado



(d) - Ligação da bacia de recepção ao reservatório

Figura 3 – Fases Construtivas do Lisímetro no Trecho Experimental em Aterro.

Quadro 3 - Composição Química do Lixiviado do ASIC Produzido no Trecho Experimental em Aterro

Parâmetro	ASIC 1 (113,5 l) ^(a)	ASIC 2 (248,5 l)	ASIC 3 (408,5 l)	ASIC 4 (568,5 l)	ASIC 5 (808,5 l)	ASIC 6 ^(b) (1048,5 l)	ASIC 7 (1583,5 l)	ASIC 8 (2586,5 l)	ASIC 9 ^(b) (2711,5 l)	ASIC 10 ^(b) (2836,5 l)	ASIC 11 ^(b) (2961,5 l)
pH (-)	11,5	11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cond. eléct. (mS/cm)	25,6	2,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
COT (mg C/l)	18,9	29,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Arsénio (mg/l)	<0,002	<0,002	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cádmio (mg/l)	<0,009	<0,009	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cobre (mg/l)	0,076	0,15	0,11	0,06	0,04	0,08	<0,025	<0,025	0,03	<0,025	0,03
Crómio VI (mg/l)	<0,05	0,17	0,14	0,1	0,08	0,06	<0,05	<0,05	0,1	<0,05	0,1
Crómio total (mg/l)	0,3	0,3	0,18	0,06	0,05	0,08	<0,05	<0,05	0,08	<0,05	0,06
Merúrio (mg/l)	<0,001	<0,001	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Níquel (mg/l)	<0,04	<0,04	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Chumbo (mg/l)	<0,06	<0,06	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Zinco (mg/l)	<0,006	<0,006	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fenóis (mg/l)	0,02	0,04	<0,01	0,02	0,07	0,09	0,09	0,09	0,02	0,01	0,08
Fluoretos (mg/l)	1,19	0,02	0,82	0,79	0,28	0,43	0,26	0,23	0,35	0,3	0,32
Cloretos (mg/l)	183	136	103	51	58	66	9	7	19	20	11
Sulfatos (mg/l)	431,28	411	170	106	135	175	58	24	98	64	81
Nitritos (mg/l)	14	0,09	0,11	4	2	<0,04	1	1	<0,04	0,5	<0,04
Amónia (mg/l)	<0,13	<0,13	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cianetos (mg/l)	<0,05	<0,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AOX (mg Cl/l)	0,02	0,03	0,027	0,016	—	—	—	—	—	—	—

COT: Carbono Orgânico Total; AOX: Haletos Orgânicos Adsorvíveis.

^(a) - Volume de lixiviado recolhido no lisímetro. O volume total acumulado recolhido foi de 2961,5 l.

^(b) - Lixiviado produzido no lisímetro por água de precipitação atmosférica. Nas restantes amostras, o lixiviado foi produzido por água proveniente de autotanque.

Obs.: O símbolo < (menor) significa que a concentração do elemento era inferior ao limite de quantificação do método utilizado.

No total recolheram-se 11 amostras de lixiviado (ASIC 1 a ASIC 11), tendo o volume total acumulado recolhido sido de 2961,5 l, como mostra o Quadro 3. Destas amostras, apenas quatro, ASIC 6 e ASIC 9 a ASIC 11, resultaram da alimentação do lisímetro por água de precipitação atmosférica. A água do autotanque foi recolhida num ribeiro situado junto do trecho experimental, em Novembro de 2007, tendo sido amostrada para análise química e constituição de branco.

Os valores de lixiviação obtidos nas 11 amostras recolhidas são apresentados no Quadro 3, tendo-se analisado os mesmos parâmetros dos ensaios laboratoriais, ou seja, os previstos na tabela n.º 3 do ponto 2 do anexo III do Decreto-Lei n.º 152/2002. Por motivos financeiros, foi definido um critério que não obrigasse à determinação de todos os parâmetros em todas as amostras, como seja o de não continuar a dosear os elementos cuja concentração estivesse abaixo do limite de quantificação do método utilizado.

Os resultados obtidos foram comparados com os valores limites de lixiviação previstos no Decreto-Lei n.º 152/2002, mas nesta análise é necessário salvaguardar, por um lado, que os valores limites de lixiviação previstos na legislação foram definidos para o ensaio de lixiviação realizado em laboratório segundo a norma DIN 38414-S4 e, por outro, que a relação líquido, L, para sólido, S, prevista nesta norma é de 10 l/kg, diferente da obtida no campo.

Na amostra ASIC 1, a relação L/S é de cerca de 0,05 l/kg, portanto com uma diluição muito inferior à do ensaio de laboratório realizado segundo a norma DIN 38414. Mesmo assim, verifica-se que os valores de lixiviação são inferiores ou mesmo significativamente inferiores aos valores limites de lixiviação previstos no Decreto-Lei n.º 152/2002, com excepção dos nitratos, cujo valor é superior ao legislado. Ao longo da lixiviação verifica-se que os teores dos elementos em maior concentração em ASIC 1 diminuíram muito rapidamente. Por exemplo, os sulfatos diminuíram de 431 mg/l, em ASIC 1, para 81 mg/l, em ASIC 11, ou seja, cerca de 5 vezes e os cloretos diminuíram de 183 mg/l, em ASIC 1, para 11 mg/l, em ASIC 11, ou seja, cerca de 16 vezes. O valor da condutividade eléctrica, que traduz a concentração iónica na solução, é um bom indicador global da diminuição da carga iónica no lixiviado, ao baixar de 25,6, em ASIC 1 para 2,2 mS/cm, em ASIC 2. Na amostra ASIC 5 todos os elementos apresentam valores inferiores aos valores limites de lixiviação previstos na legislação já enunciada. Com as simplificações e salvaguardas apresentadas mais acima, pode concluir-se que a lixiviação efectuada no lisímetro também evidencia que o ASIC não representa um risco para o meio ambiente e para a saúde pública.

6. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentou-se o estudo da lixiviabilidade de um Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC), proveniente do processamento de escórias de aciaria de forno de arco eléctrico das siderurgias nacionais, que teve por objectivo avaliar a sua perigosidade para o meio ambiente e para a saúde pública quando aplicado em obra.

Os ensaios de lixiviação efectuados em laboratório, segundo a norma indicada na legislação em vigor à data da realização do estudo, mostraram que os valores de lixiviação do ASIC cumpriam os requisitos mínimos previstos pela mesma legislação para os resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes. Os resíduos classificados nesta categoria têm merecido a aprovação da entidade reguladora nacional para a sua valorização em obra. Os ensaios de lixiviação efectuados no campo também mostraram que havia uma fraca lixiviabilidade do ASIC e que a sua concentração diminuía muito rapidamente e desde a fase inicial da lixiviação.

Importa no entanto referir que a actual avaliação da perigosidade ambiental dos resíduos poderá não ser a mais indicada para aplicar à valorização de resíduos em obras de engenharia civil, e geotécnicas em particular, e estar eventualmente a prejudicar a reciclagem de alguns resíduos neste tipo de aplicações. Algumas das razões que suportam esta afirmação são as seguintes:

- os ensaios de lixiviação realizados em laboratório e previstos pela legislação não traduzem as condições reais de lixiviação no campo;
- os estudos internacionais indicam que os valores de lixiviação dos ensaios laboratoriais são conservativos comparativamente com os observados no campo;
- a classificação dos resíduos que vem sendo adoptada é específica para a admissão de resíduos em aterro.

Tendo por base os conhecimentos actualmente existentes, justificava-se a elaboração de uma regulamentação específica para a avaliação da viabilidade ambiental da utilização dos resíduos em obras geotécnicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o apoio financeiro concedido a este estudo (Projecto PPCDT/ECM/56952/2004), através do Programa Operacional Ciência e Inovação 2010 (POCI 2010) e do fundo comunitário europeu FEDER. Agradecem também o apoio da Empresa BBF – Tecnologias do Ambiente, que disponibilizou e instalou os geossintéticos necessários à construção dos lisímetros e a colaboração da Câmara Municipal de Fafe.

REFERÊNCIAS

- ALT-MAT (1999). Alternative materials in road construction. Project Funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, 1998/1999.
- Gomes Correia, A., Ferreira, S., Araújo, N., Castro, F., Trigo, L., Roque, A. J., Pardo de Santayana, F. e Fortunato, E. (2005). *Estudo de viabilidade de aplicação de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro*. Relatório CVR 257/2005, Guimarães, 87 p.
- Gomes Correia, A., Ferreira, S., Castro, F., Trigo, L., Roque, A. J., Pardo de Santayana, F. e Fortunato, E. (2006). *Estudo de viabilidade de aplicação do agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) da Siderurgia Nacional do Seixal em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro. Comparação com as características do agregado da Siderurgia Nacional da Maia*. Relatório CVR 24/2006, Guimarães, 47 p.
- Gomes Correia, A., Martins, J. P., Ferreira, S., Roque, A. J., Caldeira, L. e Fortunato, E. (2008). *Trecho experimental no itinerário EN 311 Fafe/Várzea Cova. Metodologia da construção e instrumentação*. Relatório CVR 1/2008, Guimarães, 14 p.
- Piantone, P. e Autret, E. (2008). *Mâchefers d'incinération des ordures ménagères. État de l'art et perspectives*. Dunod, Paris, France, 235 p.
- Roque, A. J., Gomes Correia, A., Castro, F., Silva, S., Cavalheiro, A. (2009). Caracterização e monitorização geoambiental. O caso das escórias de aciaria da Siderurgia Nacional. *Actas do Seminário sobre Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas. Caracterização e Medidas para o Desenvolvimento do Sector*. Aveiro, 12 p.