

Caracterização inorgânica de cinza volante de uma estação de incineração de resíduos sólidos urbanos com vista à sua eventual reciclagem

Inorganic characterization of fly ash from municipal solid waste incinerator aiming their recycling

A. Varela¹, A. B. Ribeiro², O. Monteiro¹, A.T. Lima^{2,3},
H. Domingues¹ & M. A. Castelo-Branco¹

RESUMO

As cinzas volantes de estações de incineração de resíduos sólidos urbanos (EIRSU) são consideradas resíduos perigosos. De forma a reduzir o seu impacto ambiental, estas cinzas são normalmente submetidas a estabilização (inertização por adição de cimento) antes de um destino final adequado (deposição em aterro sanitário). Tal traduz-se por um aumento do volume das cinzas, gasto de matérias-primas e área de aterro, não sendo garantida a sua inocuidade a longo prazo. As cinzas constituem um problema de gestão de resíduos, tanto mais que a sua produção tem tendência a crescer, tornando-se premente estudar vias alternativas de tratamento que visem a posterior reciclagem/reutilização, baseadas num desenvolvimento sustentado e sem esquecer o princípio da precaução.

O processo electrodialítico (PE) parece

ser, no caso destes resíduos, uma técnica de remediação promissora. Este processo baseia-se na aplicação de uma corrente contínua, de baixa intensidade, à matriz contaminada. O campo eléctrico gerado funciona como “agente de limpeza”, efectuando-se a remoção dos contaminantes da matriz, pela acção combinada do movimento electrocinético, com o princípio da electrodialise. Os contaminantes são mobilizados para um dos compartimentos dos eléctrodos/electrólitos, dos quais poderão posteriormente ser removidos. Está em curso o Projecto POC-TI/AGG/45073/2002, que tem como objectivo estudar a aplicação do PE na remoção de contaminantes de cinzas volantes de EIRSU, para uma possível reciclagem da cinza tratada (correctivo de solos ácidos,—incorporação em materiais de construção ou outras), e ainda, a recuperação dos metais pesados, para posterior reutilização.

¹ Estação Agronómica Nacional, Dep. Ciência do Solo, Av. República, 2784-505 Oeiras, Tel: (+351) 214 403 500 – Fax: (+351) 214 416 011 – E-mail: adelia.varela@gmail.com; ² Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Tel: (+351) 212 948 300 – Fax: (+351) 212 948 554 – E-mail: abr@fct.unl.pt; ³ Bolseira do Projecto POCTI/AGG/45073/2002

No presente trabalho apresenta-se a caracterização inorgânica de uma cinza volante de EIRSU.

ABSTRACT

Fly ashes from municipal solid waste incinerators (MSWI) are considered hazardous waste. In Portugal, they are expected to increase over time which poses a growing concern about the waste management issue they represent. The use of landfills for fly ash disposal is currently the main option in many countries. Since a variety of heavy metals concentrate in fly ash, mainly deposited on the surface of particles, making them more apt to leach, the ash need to be stabilized prior to disposal, to reduce their environmental impact, which is done by the addition of cement.

The electrodialytic process (ED) promisingly removes heavy metals from fly ash, enabling their further valorisation (e.g. as a soil amendment or for incorporation in construction products) and the recovery of heavy metals for further reuse. The ED uses a low-level dc current as the "cleaning agent", combining the electrokinetic movement, with the principle of electrodialysis. The Project POCTI/AGG/45073/2002, currently being carried out, aims at studying the application of the ED, in order to maximize heavy metals removal from this contaminated media.

In this work the inorganic fraction of fly ash are characterized.

INTRODUÇÃO

A incineração, processo químico por via térmica, consiste numa solução tecnológica de tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), permitindo a redução do seu volume

até 90% (Bajeat, 1993; Martinho e Gonçalves, 2000). Este processo de combustão controlada tem como um dos seus objectivos a recuperação da energia calorífica produzida (White *et al.*, 1995). No entanto, a incineração de uma tonelada de RSU gera, em média, entre 250 a 300 kg de escórias e 25 a 50 kg de cinzas volantes (Le Goux e Le Douce, 1995; Chandler *et al.*, 1997), que contêm elevadas concentrações de compostos orgânicos e inorgânicos tóxicos em diversas formas (óxidos, hidróxidos, carbonatos, cloretos, silicatos, sulfatos, fosfatos, fluoretos) (Pedersen, 2002; Ferreira *et al.*, 2003a).

Em Portugal, em 2002, foram produzidas cerca de 232 kton de escórias e cinzas, e estima-se que a produção em 2006 seja de 293 kton. Este aumento origina uma preocupação crescente sobre a gestão destes resíduos (INR, 2000).

Para além dos diferentes tipos e quantitativos de resíduos sólidos gerados com a combustão de RSU, também, sob o ponto de vista da ecotoxicidade, estes resíduos são classificados de forma distinta. Ao nível da União Europeia (UE), as cinzas volantes são consideradas como resíduos perigosos (Decisão da Comissão nº 2000/532/CE, de 3 de Maio de 2000, que substituiu os textos legislativos da Directiva do Conselho nº 94/904/CE e da Decisão da Comissão nº 94/3/CE). A sua deposição só poderá, por isso, ser efectuada em aterros destinados a este tipo de resíduos, ou, alternativamente, serem previamente submetidas a um tratamento de estabilização, antes da sua deposição em aterro para resíduos inertes (Nunes, 2004).

Na incineração de RSU, à fracção de cinza residual que é transportada com a coluna de gases resultantes da combustão dos RSU e capturada nos filtros/precipitadores colocados à saída da câmara de combustão é designada como cinza volante (Pedersen,

2002). Esta fracção está geralmente mais enriquecida com metais mais voláteis, como por exemplo cádmio (Cd), chumbo (Pb) e zinco (Zn). Este enriquecimento aliado a uma maior área específica das partículas que constituem esta fracção tornam-na potencialmente poluente e por esse motivo, a Agência Europeia do Ambiente determina que todas as cinzas sejam inertizadas antes da sua deposição em aterro (EEA, 2000).

Apesar da deposição em aterro das cinzas volantes ser ainda a principal opção, em muitos países existe investigação no sentido de se encontrar outros métodos de inertização. Os métodos com maior expressão são os seguintes: i) estabilização física, química e vitrificação (Eighmy *et al.*, 1997; Eighmy *et al.*, 1998; Sorensen *et al.*, 2000); ii) solidificação (Yang *et al.*, 1998; Wiles, 1996) e iii) extracção e separação dos sais solúveis e metais pesados (Hong *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2001; Katsuura *et al.*, 1996; Kosson *et al.*, 1996).

Um dos métodos de extracção dos metais pesados consiste no processo electrodialítico (PE). O PE tem vindo a revelar-se uma técnica promissora na remoção de metais pesados e contaminantes orgânicos, quer *in-situ* quer *on-site*, de solos, lamas, resíduos de madeira tratada, cinzas e sedimentos (Ribeiro e Mexia, 1997; Ribeiro, 1998; Ribeiro *et al.*, 2000; Ribeiro *et al.*, 2004; Ottosen *et al.*, 2002; Ottosen *et al.*, 2003). Esta técnica de electro-remoção recorre à acção de um campo eléctrico como “agente de limpeza”, transportando os poluentes da matriz, essencialmente por electromigração e/ou electrosmose, para um dos compartimentos dos eléctrodos/electrólitos, dos quais podem ser removidos. A remoção dos metais pesados da cinza, para um nível inferior ao considerado como contaminante, poderá permitir a posterior valorização da cinza (Ferreira *et al.*, 2003b) e a reutilização dos metais pesados.

No sentido de se otimizar, essencialmente através do PE, a remoção de metais pesados existentes nas cinzas volantes, visando a sua posterior valorização, está em curso o Projecto POCTI/AGG/45073/2002 -“Remoção de contaminantes de cinzas volantes de estações de incineração de resíduos sólidos urbanos com vista à sua valorização”.

A caracterização química das cinzas volantes constitui uma etapa essencial para a avaliação da eficácia do PE na remoção de metais pesados, assim como a sua potencial capacidade poluente. Na mineralização de metais e sais das cinzas têm sido utilizados como extractantes, água, soluções ácidas ou alcalinas, reagentes complexantes (Bipp *et al.*, 1998; van der Bruggen *et al.*, 1998; Katsuura *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2001; Hong *et al.*, 2000).

Neste trabalho, apresentam-se os resultados da caracterização química da fracção sólida de cinzas volantes realizada por dois métodos: água-régia (ácido clorídrico + ácido nítrico) e mistura triácida (ácido nítrico + ácido clorídrico + ácido fluorídrico).

Apresentam-se ainda resultados, em função da variação do pH, do grau de solubilidade de alguns elementos existentes nesta fracção sólida das cinzas volantes (Castelo Branco *et al.*, 2004), uma vez que influenciam a biodisponibilidade e a mobilidade dos constituintes, sendo os testes de solubilidade muitas vezes utilizados para caracterizar a perigosidade dos resíduos (Wiles, 1996; Kosson *et al.*, 1996).

MATERIAL E MÉTODOS

Durante um período de três semanas foram recolhidas amostras de cinzas volantes (macro-amostra) da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (EIR-SU) da VALORSUL, situada na área da grande Lisboa, Portugal. Esta macro-

amostra consiste numa mistura das cinzas recolhidas na caldeira, das cinzas volantes e de resíduos de tratamento de gases, uma vez que nesta Central estes resíduos são recolhidos em conjunto.

Esta macro-amostra foi dividida em sub-amostras que foram homogeneizadas durante 24 horas num agitador mecânico. De cada sub-amostra recolheram-se quantidades de cinza de modo a constituir-se uma amostra representativa a ser utilizada para a sua caracterização.

Na caracterização química da fracção sólida das cinzas volantes, a extracção dos elementos por água régia (7,5 mL de HCl + 2,5 mL de HNO₃) foi realizado de acordo com a norma ISO 11466 (1995). A extracção com a mistura triácida (5 mL de HNO₃ + 1 mL de HCl + 2 mL de HF) foi realizada segundo a metodologia recomendada para digestão de cinzas em microondas Anton Paar "Multiwave 3000", em vasos fechados, com rotor HF 100-16, com sensores de infra-vermelhos, temperatura e pressão. Todas as extracções foram efectuadas em duplicado e os elementos analisados foram K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Na, Cd, Cr, Pb e Ni que foram doseados por espectrofotometria de absorção atómica com chama no aparelho PERKIN-ELMER (modelo 300).

No teste de solubilidade ensaiado, para variação do pH da cinza adicionaram-se soluções de ácido nítrico (HNO₃) a 65% com diferentes molaridades 0,05 M, 0,1 M, 0,13 M, 0,17 M, 0,2 M, 0,25 M, 0,3 M, 0,33 M, 0,37 M, 0,4 M, 0,5 M, 0,55 M, 0,6 M e 0,7 M e determinaram-se: K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Na, Cd, Cr, Pb e Ni (Castelo Branco *et al.*, 2004).

No esquema analítico foi incorporado o material de referência padrão (2690 Coal fly ash) da NIST.

O pH das cinzas e dos extractos do teste de solubilidade foi determinado por potenciometria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor do pH das cinzas foi alcalino (11,9). No Quadro 1 são apresentados os resultados dos elementos extraídos pela água régia e pela mistura triácida.

A média dos teores dos elementos extraídos pelos dois métodos analíticos foram interpretados pelo teste *t*-student com o auxílio do programa Statgraphics 5.

QUADRO 1 – Caracterização química da cinza volante pela água régia e mistura triácida; EL – Elemento; ARC – Água-régia Concentração ; MTC - Mistura triácida Concentração.

EL	ARC	MTC	<i>p</i> ⁽¹⁾
K (g kg ⁻¹)	30,9	31,8	n.s.
Ca (g kg ⁻¹)	222	102	**
Mg (g kg ⁻¹)	8,7	9,4	n.s.
Na (g kg ⁻¹)	33,5	31,4	*
Fe (g kg ⁻¹)	14,6	11,9	*
Mn (mg kg ⁻¹)	424	476	n.s.
Cu (mg kg ⁻¹)	496	517	n.s.
Zn (mg kg ⁻¹)	6155	7433	**
Cd (mg kg ⁻¹)	88	84	n.s.
Cr (mg kg ⁻¹)	164	226	**
Pb (mg kg ⁻¹)	1393	2514	*
Ni (mg kg ⁻¹)	89	113	n.s.

⁽¹⁾ - Significativo para uma probabilidade **p*< 0,05, ***p*< 0,01; n.s. – não significativo

Entre as concentrações dos elementos extraídas pela mistura triácida e pela água-régia verifica-se que os teores de Zn, Cr, Pb, obtidos pela mistura triácida, foram significativamente superiores, os de Ca, Fe e Na significativamente inferiores e os teores de K, Mg, Mn, Cu, Cd e Ni não foram significativamente diferentes (Quadro 1).

No teste do grau de solubilidade de alguns elementos existentes na fracção sólida de cinzas volantes (Castelo Branco *et al.*, 2004) a interpretação dos resultados indicava que o K e Na poderiam estar essencialmente na forma de cloretos (van der Sloot, 1999; Pedersen, 2002). Esta

forma é muito solúvel em meio aquoso mas insolúvel em ácidos (Hogman, C. D., 1945). Em relação aos resultados obtidos nas duas extracções referidos no Quadro 1, confirmou-se que o K, nas cinzas, está na forma de cloretos uma vez que os seus teores não foram significativamente afectados nem pela variação nem pela concentração dos ácidos. No entanto, a extracção de Na pela água-régia mostrou-se significativa-

mente mais eficaz ($p < 0,05$) (Quadro 1). Apesar deste elemento estar na forma de cloretos, o seu aumento de solubilidade, embora pouco acentuado, para valores de $pH < 5$ (Fig. 1) indica que também pode estar na forma de óxidos. Esta forma é ligeiramente solúvel em ácidos o que justifica os maiores teores extraídos pelo extractante com maiores concentrações de ácido (água-régia).

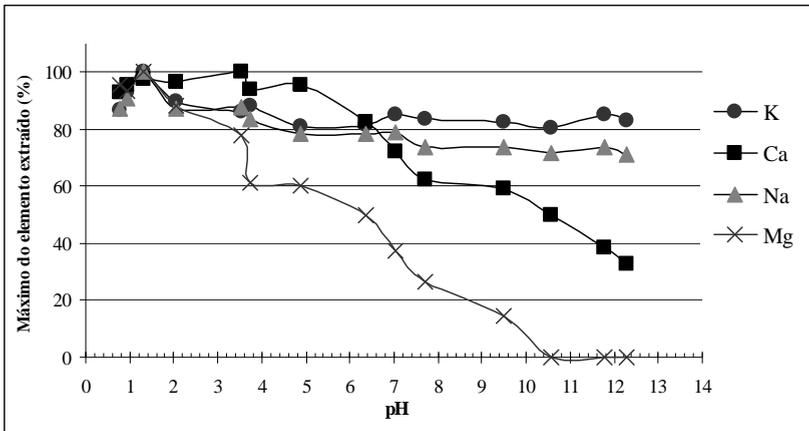


Figura 1 – Solubilidade do K, Ca, Na e Mg em função da variação de pH

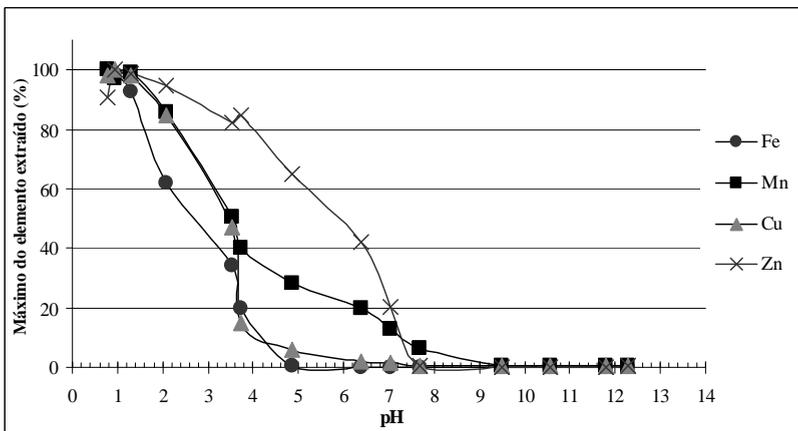


Figura 2 – Solubilidade do Fe, Mn, Cu e Zn em função da variação de pH

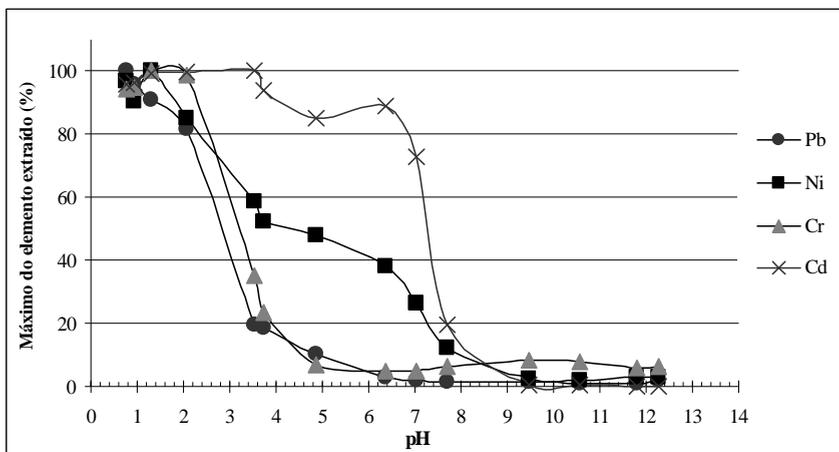


Figura 3 – Solubilidade do Pb, Ni, Cr e Cd em função da variação de pH

A curva da variação de solubilidade do Ca (Castelo Branco *et al.*, 2004) indica (Fig. 1) que este elemento pode estar presente nas cinzas na forma de óxido, carbonato e hidróxido (Flyvbjerg & Hjelmar, 1997). Estas formas são solúveis em ácidos (Hogman, C.D., 1945), mas a maior proporção de ácido clorídrico na água-régia pode justificar a solubilidade do Ca existente na forma de carbonatos (Shuman, 1991) e os teores significativamente superiores ($p < 0,01$) quando extraídos por este método.

Na mistura triácida (Quadro 1) o teor de Fe foi significativamente inferior ($p < 0,05$), e significativamente superiores os de Pb ($p < 0,05$), os de Zn e os de Cr ($p < 0,01$). As curvas da variação de solubilidade destes elementos (Fig. 2 e 3) indicam que estes estão na forma de óxidos, que normalmente são solúveis em ácidos. Contudo, a maior extração de Pb, Zn e Cr pela mistura triácida pode indicar que se encontram, nas cinzas, essencialmente na forma de óxidos cristalinos mais extraíveis por ácido nítrico ou de silicatos mais solúveis pelo ácido fluorídrico (Bekectt, 1989; Shuman, 1991).

Os teores de Mg, Mn, Cu, Cd e Ni extraídos pelos dois métodos não foram significativamente diferentes. Este facto pode ser justificado por estes elementos estarem na cinza, como indica a curva de solubilidade (Figuras 1, 2, 3), essencialmente na forma de óxidos que, como já foi referido, são solúveis em ácido. Contudo, os resultados da extração de Mg, Mn, Cu e Ni pela mistura triácida foram ligeiramente superiores o que indica não só a presença destes na forma de óxidos amorfos como também na de óxidos cristalinos ou de silicatos que são mais solúveis pelo ácido nítrico e pelo ácido fluorídrico respectivamente (Bekectt, 1989; Shuman, 1991).

CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos verificamos que a mineralização da cinza com vista ao doseamento dos vários elementos está dependente da forma como estes se encontram na cinza. Assim os que estão em formas de sais facilmente solúveis (ex. NaCl e KCl) podem ser extraídos por uma solução

aquosa. Os elementos existentes em formas de óxidos, a extração que contém maior proporção de ácido nítrico (mistura triácida) parece mais eficaz uma vez que vai permitir não só a extração das formas amorfas como as cristalinas. Para os elementos ligados aos carbonatos, a digestão pelo método de água-régia permite uma maior extração do elemento (ex. Ca) visto o ácido clorídrico, presente em maiores proporções, ser mais eficaz na destruição dos carbonatos. A adição de ácido fluorídrico na digestão só será importante quando pretendermos obter a destruição total da matriz de sílica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à VALORSUL a disponibilização da amostra de cinzas. Este trabalho foi realizado no âmbito do Projecto POCTI/AGG/45073/2002, aprovado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, e POCTI com fundos FEDER.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bajeat, P. 1993. *Incinération des résidues urbains technique – réglementation – perspectives d' évolution. Agence de l' Environnement et de la Maîtrise de l' Energie* (ADEME). Angers, 48 p.
- Beckett, P.H.T. 1989. The use of extractants in studies on trace metals in soils, sewage sludges, and sludge-treated soils. *Advances in Soil Science*, **9**: 144-176.
- Bipp, H.P., Wunsch, P., Fischer, K., Bieniek, D. & Kettrup, A. 1998. Heavy metal leaching of fly ash from waste incineration with gluconic acid and a molasses hydrolysate. *Chemosphere*, **36**(11): 2523-2533.
- Castelo Branco, M. A., Lima, A. T., Monteiro, O., Domingues H., Ribeiro, A. B., Castro, A. & Gonçalves M. C. 2004. Efeito da variação do pH na solubilidade de uma cinza volante de uma estação de incineração de resíduos sólidos urbanos. *8ª Conferência Nacional de Ambiente*, Lisboa, 27-29 de Outubro de 2004, 10 pp. CD-ROM.
- Chandler, A., Eighmy, T., Hartlén, J., Hjelm, O., Kosson, D., Sawell, S., van der Sloot, H. & Vehlouw, J. 1997. *Municipal solid waste incineration residues*. Studies in Environmental Science (eds.), vol. 67, Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, 974 pp.
- EEA 2000. Dangerous substances in waste. Prepared by: Schmid, J.; Elser, A.; Strobel, R.; ABAG-itm, M.Crowe, EPA, Ireland. European Environment Agency, Copenhagen.
- Eighmy, T. T., Crannell, B. S., Butler, L. G., Cartledge, F. K., Emery, E. F., Oblas, D., Krzanowski, J. E., Eusden, J. D. Jr., Shaw, E. L. & Francis, C. A. 1997. Heavy metals stabilization in municipal solid waste combustion dry scrubber residue using soluble phosphate. *Environmental Science & Technology*, **31**: 3330-3338.
- Eighmy, T. T., Crannell, B. S., Krzanowski, J. E., Butler, L. G., Cartledge, F. K., Emery, E. F., Eusden, J. D. Jr., Shaw, E. L. & Francis, C. A. 1998. Characterization and phosphate stabilization of dust from the vitrification of MSW combustion residues. *Waste Management*, **18**: 513-524.
- Ferreira, C., Ribeiro, A. & Ottosen, L. 2003a. Heavy metals in MSW incineration fly ashes. *Journal de Physique*, **107**(IV): 463-466.
- Ferreira, C., Ribeiro, A. B. & Ottosen, L. M. 2003b. Possible applications for municipal solid waste fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, **B96**: 201-216.

- Flyvbjerg, J. & Hjelmar, O. 1997. Restprodukter fra røggasrensning ved affaldsforbrænding 3. Udredning af mulighederne for oparbejdning, genanvendelse og deponering, *Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen*, Nr. 92, 1997, VKI og Miljø- og Energiministeriet 1997 (in Danish).
- Hogman, C. D. 1945. *Hanbook of Chemistry & of Physics*, 29th Edition.
- Hong, K. J., Tokunaga, S., Ishigami, Y & Kajiuchi, T. 2000. Extraction of heavy metals from MSW incineration fly ash using saponins. *Chemosphere*, **41**: 345-352
- INR, 2000. Plano de Acção para os Resíduos Sólidos e Urbanos 2000-2006. Instituto dos Resíduos, Lisboa.
- ISO 11466 1995. Soil quality - Extraction of trace metals soluble in *aqua regia*. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization. 6 p.
- Katsuura, H., Inoue, T., Hiraoka, M. & Sakai, S. 1996. Full-scale plant study on fly ash treatment by acid extraction process. *Waste Management*, **16**(5-6): 491-499.
- Kosson, D. S., Van der Sloot, H.A. & Eighmy, T. T. 1996. An approach for estimation of contaminant release during utilisation and disposal of municipal solid waste combustion residues. *Journal of Hazardous Materials*, **47**: 43-75.
- Le Goux, J-Y et Le Douce, C. 1995. *L'incinération des déchets ménagers*. Economica (eds.), Paris, France, 226 pp.
- Martinho, M. G. M. & Gonçalves, M. G. P. 2000. *Gestão de resíduos*. Universidade Aberta, 281 p.
- Mortvedt, J.J. 1991. Micronutrient fertilizer technology. p. 523-548. In J.J. Mortvedt et al. (ed.). *Micronutrients in agriculture*. 2nd ed. SSSA Book Ser. 4. Soil Sci. Soc. Am., Madison.
- Nunes, N. C. L. S. 2004. *Contributo para a avaliação da ecocompatibilidade de novos materiais para a construção civil*. Dissertação de Doutoramento, FCT/UNL, 433p.
- Ottosen, L. M., Eriksson, T., Hansen, H. K. & Ribeiro, A. B. 2002. Effects from different types of construction refuse in the soil on electro-dialytic remediation. *Journal of Hazardous Materials*, **B91**: 205-219.
- Ottosen, L. M., Kristensen, I. V., Pedersen, A. J., Hansen, H. K., Villumsen, A. & Ribeiro, A. B. 2003. Electro-dialytic removal of heavy metals from different solid waste products. *Separation Science and Technology*, **38**(6): 1269-1289.
- Pedersen, A. J. 2002. Electro-dialytic removal of heavy metals from fly ashes; Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, 151 p.
- Ribeiro, A. B. 1998. *Use of Electro-dialytic Remediation Technique for Removal of Selected Heavy Metals and Metalloids from Soils*. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Denmark, ISBN 87-986871-0-7, 320 pp.
- Ribeiro, A. B. & Mexia, J. T. 1997. A dynamic model for the electrokinetic removal of copper from a polluted soil. *Journal of Hazardous Materials*, **56**: 257-271.
- Ribeiro, A. B., Mateus, E. P., Ottosen, L. M. & Bech-Nielsen, G. 2000. Electro-dialytic removal of Cu, Cr and As from chromated copper arsenate-treated timber waste. *Environmental Science & Technology*, **34**(5): 784-788.
- Ribeiro, A. B., Rodríguez-Maroto, J. M., Mateus, E. P. & Gomes, H. 2004. Removal of organic contaminants from soils by an electrokinetic process: the case of atrazine. Experimental and modeling. *Chemosphere*, (in press).
- Shuman, L. M. 1991. Chemical forms of micronutrients in soils. p. 113-144. In J.J. Mortvedt et al. (ed.). *Micronutrients in*

- agriculture*. 2nd ed. SSSA Book Ser. 4. Soil Science Society America, Madison.
- Sorensen, M., Stackpoole, M., Frenkel, A., Korshin, G. & Christensen, T. H. 2000. Aging of iron (hydr)oxides by heat treatment and effects on HM binding. *Environmental Science & Technology*, **34**: 3991-4000.
- Van der Bruggen, B., Vogels, G., Van Herck, P. & Vandecasteele, C. 1998. Simulation of acid washing of municipal solid waste incineration fly ashes in order to remove heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, **57**: 127-144.
- Van der Sloot, H.A., Cnubben, P.A.J.P. & Scharff, H. 1999. Predominantly inorganic equilibrium disposal: part of the total concept sustainable recycling and storage of solid waste. *Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 4-8 October 1999.
- Wang, K., Chiang, K., Lin, K. & Sun, C. 2001. Effects of a water-extraction process on heavy metal behavior in municipal solid waste incinerator fly ash. *Hydrometallurgy*, **62**: 73-81.
- White, P., Frank, M. & Hindle, P. 1995. *Integrated solid waste Management. A lifecycle inventory*. Blackie Academic & Professional. London.
- Wiles, C. C. 1996. Municipal solid waste combustion ash: State-of-the-knowledge. *Journal of Hazardous Materials*, **47**: 325-344.
- Yang, G., Chou, S. & Hsu, T. 1998. Effects of chelant (EDTA) addition on properties of cement-solidified municipal incinerator fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, **58**: 153-164.
- Yang, G. C. C. & Tsai, C. M. 1998. A study on heavy metal extractability and subsequent recovery by electrolysis for a municipal incinerator fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, **58**: 103-120.