

# ANALISADORES DE FRX NA OPTIMIZAÇÃO DOS ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS MINEIRAS DEGRADADAS - CASO DA MINA DE SANTO ANTÓNIO – PENEDONO

## CONTRIBUTION OF XRF ANALYZERS TO SITE CHARACTERIZATION STUDIES OF DEGRADED MINING SITES - THE CASE STUDY OF SANTO ANTÓNIO'S MINE – PENEDONO

Roque, Magda, *LNEC e FCUL, Lisboa, Portugal, mcrroque@gmail.pt*

Jorge, Celeste, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, cjorge@lnec.pt*

Almeida, Isabel Moitinho, *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal  
imalmeida@fc.ul.pt*

### RESUMO

As áreas mineiras degradadas (AMD) são locais ambientalmente problemáticos que exigem, na maioria das vezes, estudos de caracterização complexos. O recurso a métodos expeditos, que permitem obter dados fiáveis e a baixo custo, numa fase precoce desses estudos, facilitam a gestão das tarefas subsequentes. É o caso dos analisadores portáteis de fluorescência de raios-X (APFRX), que permitem determinar semi-quantitativamente a concentração em metais pesados e metalóides em solos e resíduos mineiros, *in situ* e *ex situ*. A qualidade dos dados obtidos *in situ* e *ex situ* foi demonstrada em trabalhos anteriores. Na presente comunicação apresentam-se os trabalhos desenvolvidos na área mineira de Santo António, em que se obteve um zonamento da contaminação área, facilitando-se o diagnóstico preliminar do respectivo estado de degradação e a optimização de um programa de amostragem específico.

### ABSTRACT

Degraded mining areas (DMA) are associated to environmental problems that generally require complex site characterization studies. The using of expedite methods, which allow the attainment of reliable data with low costs, facilitate the management of subsequent tasks, if they are used in an early stage of the study. This is the case of field portable X-ray fluorescence analyzers (FPXRFA), which allows the *in situ* and *ex situ* semi-quantification of heavy metals and metalloids concentration in soils and mining wastes. The *in situ* and *ex situ* analytical data quality have already been demonstrated, under other published works. This paper presents the works developed at Santo António's mining site with a FPXRFA. These works allow the determination of contamination distribution. The obtained results permitted a preliminary evaluation of the site's degradation and it helped to optimize a site specific sampling program.

### 1. INTRODUÇÃO

As áreas mineiras degradadas (AMD) são locais ambientalmente problemáticos, requerendo, na maioria dos casos, programas de prospecção exigentes, geralmente associados a custos elevados. Nestes casos, revela-se claramente vantajosa a obtenção de um zonamento preliminar da contaminação num curto período de tempo. A partir desta primeira abordagem, passa-se a dispor de dados que facilitam a optimização dos programas de amostragem e a gestão de outras tarefas de investigação subsequentes, como sejam a definição dos ensaios laboratoriais de identificação e de caracterização geoquímica a efectuar.

Na tarefa de amostragem geoquímica os analisadores portáteis de fluorescência de raios-X (APFRX) permitem obter *in situ*, em poucos minutos e a baixo custo, a semi-quantificação ou quantificação preliminar da concentração de uma série de metais pesados e metalóides, em diferentes tipos de material, incluindo solos e resíduos mineiros. Este procedimento facilita as tarefas de identificação de fontes de contaminação e de localização de *hot-spots* em tempo real, permitindo, simultaneamente, obter um zonamento preliminar da contaminação em locais contaminados, como é o caso da generalidade das AMD, funcionando como ferramenta de diagnóstico preliminar.

A presente comunicação surge no seguimento de trabalhos anteriores sobre a utilização de APFRX (Jorge e Roque, 2005; Roque et al., 2006; Roque e Jorge, 2007 e Roque et al., 2008), nos quais se demonstrou a qualidade analítica dos dados respectivos e a sua potencial aplicabilidade ao estudo de AMD.

Nesta comunicação apresentam-se, assim, os trabalhos desenvolvidos com um APFRX como ferramenta auxiliar de diagnóstico na área mineira de Santo António (Figura 1), considerada pelo ex-IGM (Instituto Geológico e Mineiro) de perigosidade máxima em termos ambientais (Santos Oliveira et al. 2002).

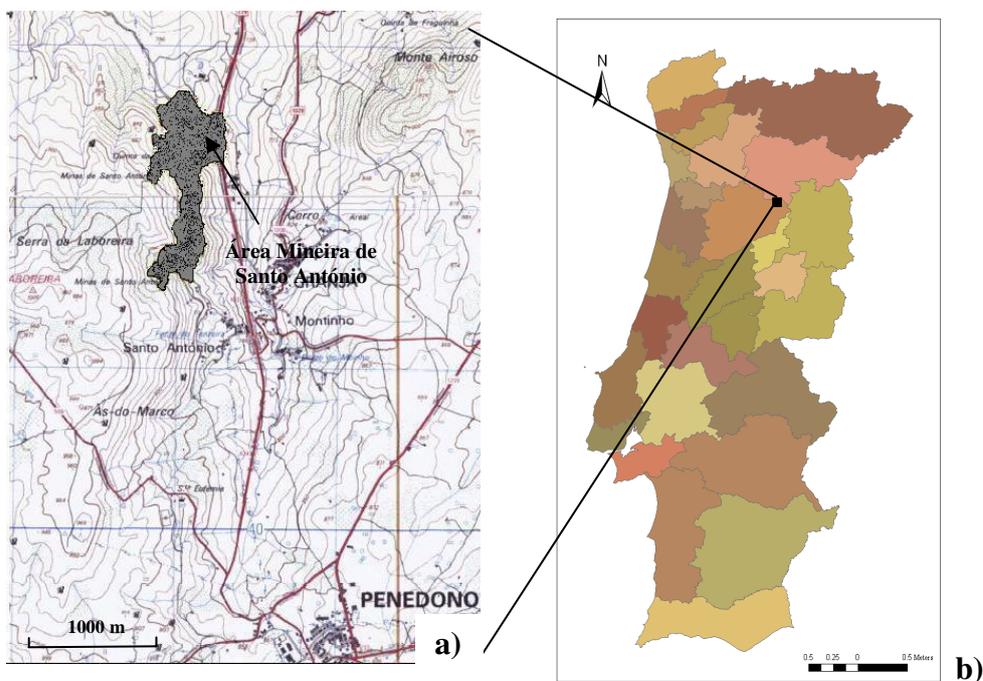


Figura 1 – Localização Geográfica da Área Mineira de Santo António, Penedono: a) Folhas 139 e 149 da Carta Militar de Portugal; b) no Mapa Distrital de Portugal.

## 2. ANALISADORES PORTÁTEIS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

A U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency) concebeu diversos APFRX, designadamente o Analisador Ambiental NITON Série XLi 700 (Figura 2), que operam segundo o Método EPA 6200 e permitem analisar a composição multi-elementar *in situ* ou de amostras preparadas (*ex situ*) de solos, sedimentos e resíduos, incluindo os mineiros, por espectrometria de fluorescência de energia dispersiva de raios-X (EFEDRX).



Figura 2 – Analisador Ambiental NITON SÉRIE XLi 700.

O analisador utilizado no estudo tem capacidade para analisar vinte e quatro elementos químicos, na gama dos metais e metalóides, incluindo os oito metais RCRA - Resource Conservation and Recovery Act: arsénico (As), cádmio (Cd), bário (Ba), crómio (Cr), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), selénio (Se) e prata (Ag). Este equipamento integra três fontes seladas de isótopos radioativos (Fe-55, Am-241 e Cd-109) geradoras de raios-X primários capazes de excitar os átomos das amostras, detectores por análise espectral e programas apropriados de aquisição, registo e processamento informático de dados que permitem a determinação da composição elementar dos diferentes tipos de material.

O equipamento tem capacidade para analisar (identificar e quantificar) os diferentes metais e metalóides em diversos tipos de amostras, designadamente ligas metálicas, metais preciosos, amostras finas e amostras volúmicas. Quanto à análise de amostras volúmicas, que constituem o tipo de amostragem a realizar nas AMD, o APFRX integra dois modos de análise distintos: i) *Modo de Teste Padrão de Solos (TPS)*, especialmente indicado para a análise de amostras com concentrações elementares inferiores a 10 000 ppm (partes por milhão), matrizes compostas por elementos leves e com elementos com número atómico ( $Z$ ) superior ao do ferro (Fe) em concentrações baixas (Fe:  $Z=26$ ); e ii) *Modo de Teste Industrial Cu/Zn/Pb (TI)*, especialmente indicado para a análise de amostras cujas concentrações elementares sejam superiores a 10 000 ppm, com matriz constituídas por elementos não leves e com elementos  $Z$  superior ao do Fe, em concentrações relativamente elevadas.

O APFRX possibilita a determinação da composição química das amostras *in situ* (em campo) ou *ex situ* (em laboratório). Os dados *ex situ* tendem a ser mais fiáveis, uma vez que as amostras são previamente preparadas, segundo um protocolo estabelecido pela U.S.EPA, de forma a minimizar algumas das causas de interferência na qualidade dos dados (p.e. efeitos físicos e efeitos químicos da matriz) (U.S. EPA, 1998 e NITON, 2002). Segundo este ponto vista, os dados produzidos *ex situ* permitem aferir os dados produzidos em campo e controlar a sua qualidade.

### **3. TRABALHOS ANTERIORES**

#### **3.1. Avaliação da Qualidade Analítica dos Dados (*ex situ*)**

Os primeiros trabalhos efectuados tiveram como objectivo avaliar a qualidade analítica dos dados produzidos com os APFRX. Os trabalhos consistiram na análise *ex situ* de amostras de solos e de resíduos mineiros, com concentrações elevadas em metais pesados e/ou metalóides, recolhidas em áreas mineiras nacionais, que foram devidamente preparadas. Os dados obtidos foram tratados estatisticamente e avaliados quanto à sua repetibilidade e reprodutibilidade, segundo critérios enunciados pela U.S. EPA (1998).

Desse primeiro estudo concluiu-se que os dados produzidos pelos APFRX em amostras preparadas (*ex situ*) apresentam uma boa qualidade analítica, sendo repetíveis (coeficientes de variação – CV, quase sempre inferior a 20% para todos os elementos) e revelando-se reprodutíveis (coeficientes de correlação –  $R^2$ , superiores a 0,90 para todos os elementos, com excepção do Fe) quando comparados com o método de referência considerado - espectrometria de emissão de plasma condutivo – ICP-OES, (Jorge e Roque 2005 e Roque et al. 2006)

#### **3.2. Validação dos Dados de Campo (*in situ vs. ex situ*)**

Na sequência dos resultados obtidos nos primeiros trabalhos efectuados com os APFRX, em que se confirmou a repetibilidade e a reprodutibilidade dos dados produzidos, evidenciando-se as suas potencialidades para ser aplicado nos estudos de caracterização das AMD, passou-se a uma nova fase de estudo.

Os trabalhos subsequentes consistiram na realização de um conjunto de análises *in situ* na antiga exploração de ouro (Au) de Santo António, Penedono, e na posterior recolha de quinze (15) amostras para serem analisadas *ex situ*. Pretendeu-se desta forma avaliar o desempenho do analisador numa situação real, por comparação dos resultados obtidos nas análises *in situ* com os seus correspondentes laboratoriais - *ex situ* (Roque e Jorge, 2007; Roque et al. 2008).

Para todos os elementos foram obtidos valores de  $R^2$  superiores a 0,78, com excepção da Ag ( $R^2 = 0,45$ ). Este elemento encontrava-se presente nas diversas amostras em concentrações inferiores ao limite inferior de detecção (LMD) do equipamento, pelo que os resultados não podem ser considerados para efeitos analíticos.

Tendo em consideração a boa correlação entre os dados de campo, onde existem uma série de causas que podem interferir na qualidade dos resultados, e os dados obtidos nas amostras preparadas e ensaiadas em condições de repetibilidade, pode assumir-se que os dados de campo são suficientemente fiáveis para um método de rastreio.

### **4. CASO DE ESTUDO DA MINA DE SANTO ANTÓNIO – PENEDONO**

#### **4.1. Introdução**

As conclusões obtidas na primeira utilização do APFRX na área mineira de Santo António, onde se confirmou a fiabilidade dos dados produzidos em campo, encorajaram a utilização do analisador no rastreio do sector de processamento do minério da área mineira de Santo António (lavarias e depósitos de resíduos).

Tal como já foi referido, a área mineira de Santo António, em Penedono (distrito de Viseu) foi classificada pelo Ex-IGM, com grau de perigosidade máximo em termos ambientais. Nesta área mineira, em especial no sector de processamento do minério, foram identificados diversos problemas de índole ambiental, de entre os quais se salienta a presença de quatro depósitos de resíduos principais (duas escombreyras - ES1 e ES2, um espessador de materiais - ESP, e um aterro - AT) sujeitos a erosão hídrica e eólica (Figura 3a). Identificaram-se na área locais de solos visivelmente degradados e desprovidos de vegetação (Figura 3b), bem como circulação de águas ácidas.

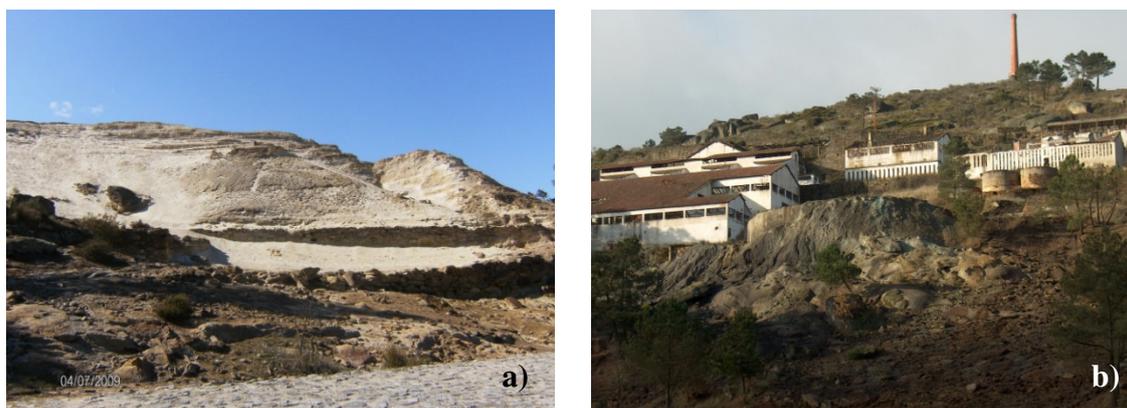


Figura 3 – Área Mineira de Santo António: a) Depósito de Resíduos (escombreyra ES1); b) Área a Jusante das Lavarias.

#### 4.2. Metodologia Aplicada

A metodologia adoptada para o estudo contou com a realização de uma série de análises *in situ*. Os pontos de amostragem foram seleccionados segundo uma malha quadrada, com espaçamento entre os nós definido em função das características específicas de cada local a amostrar, nomeadamente o nível de contaminação previsto.

Assim, para a zona das lavarias, onde os solos apresentam fortes indícios de contaminação e onde existem diversas pilhas de resíduos sem cobertura e amontoados de minério por processar, perspectivou-se uma grande heterogeneidade lateral da contaminação, pelo que se optou por uma malha com um espaçamento de 10 m. Na zona dos depósitos de resíduos principais, uma vez que a composição geoquímica se previa ter menor variação lateral, utilizou-se uma malha com espaçamento entre nós de 20 m. Nas áreas envolventes às escombreyras e nas zonas mais afastadas das lavarias, os solos aparentavam estar pouco contaminados, tendo-se optado por uma malha, também, espaçada de 20 m.

Contudo, uma vez em campo, houve necessidade de ajustar o programa de amostragem, dado que, de um modo geral, a área se caracteriza pela circulação de águas (ácidas), ocorrência de solos com granulometria extensa, existência de áreas com cobertura vegetal rasteira e de outras com maciço rochoso exposto, sem espessura de solo. Assim, procurou-se evitar a realização de análises em locais com as características referidas, uma vez que, segundo a U.S. EPA, estas situações podem condicionar os resultados analíticos produzidos por FRX.

As análises decorreram mantendo as três fontes isotópicas activas em simultâneo, com períodos de rotação entre si de 30 segundos e tiveram a duração total de 90 segundos cada. Cada ponto de amostragem foi ensaiado, primeiro, com TPS e, em seguida, TI.

Após o rastreio do sector de processamento do minério, foram colhidas 8 amostras, em locais que coincidiram com pontos de leitura *in situ*, para realização de análises de confirmação em laboratório credenciado. A realização de análises de confirmação em, pelo menos, 5 % das amostras ensaiadas *in situ*, corresponde a um dos procedimentos de avaliação da qualidade dos resultados recomendados pela U.S. EPA no Método EPA 6200 (U.S. EPA, 1998).

Na Figura 4, encontra-se um mapa da distribuição da amostragem efectuada, com indicação dos pontos ensaiados *in situ* e daqueles que foram submetidos a recolha de amostra para confirmação laboratorial.

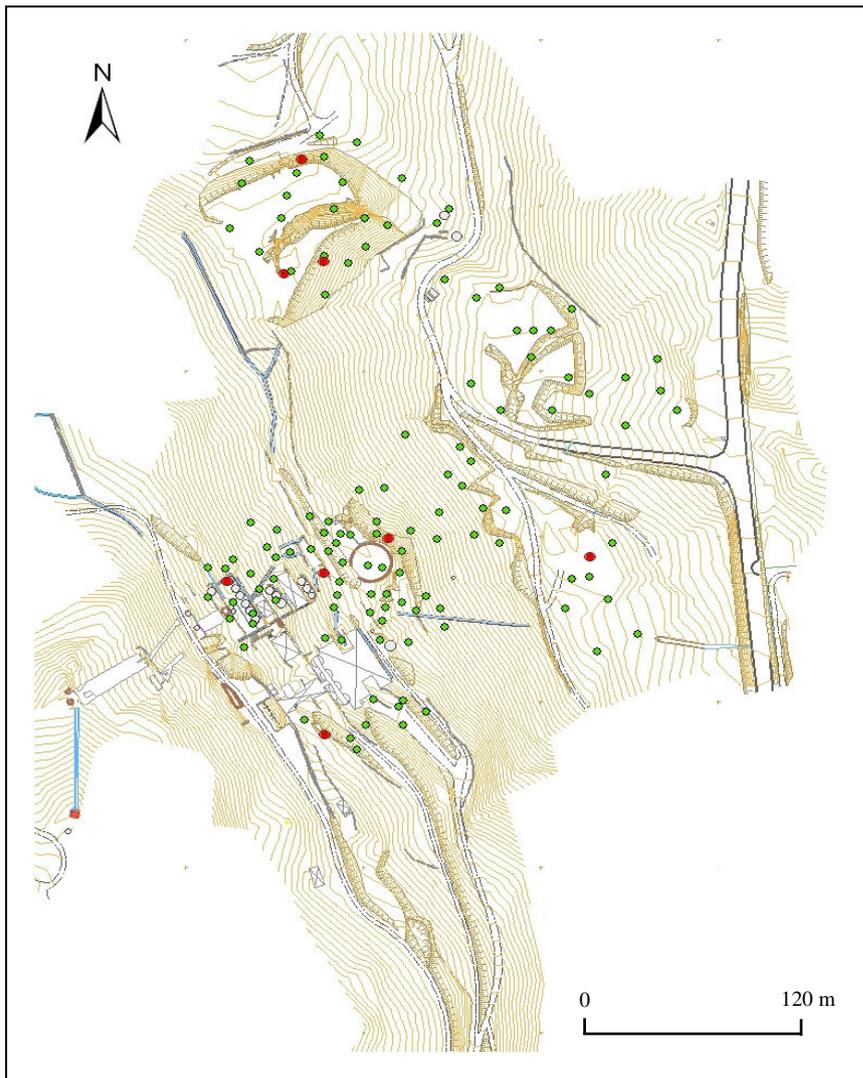


Figura 4 – Localização dos Pontos de Rastreio com FRX e dos Locais de Colheita de Amostras de Confirmação na Área Mineira de Santo António ( ◦ - pontos de amostragem *in situ*; ● - pontos de colheita de amostras de confirmação).

### 4.3. Apresentação e Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos foram modelados em ambiente ArcGis 9.2, utilizando o método de interpolação *inverso do quadrado das distâncias* dos valores médios de concentração elementar em cada ponto de amostragem. Desta forma a obteve-se um zonamento preliminar da contaminação na área em estudo. O zonamento foi definido para os principais elementos

químicos identificados pelo analisador, designadamente Pb, Fe, As, Sn, Zn, Cu, Sb, Cd, Rb e Hg. Na Figura 5 apresenta-se a título de exemplo o zonamento obtido o caso do As.

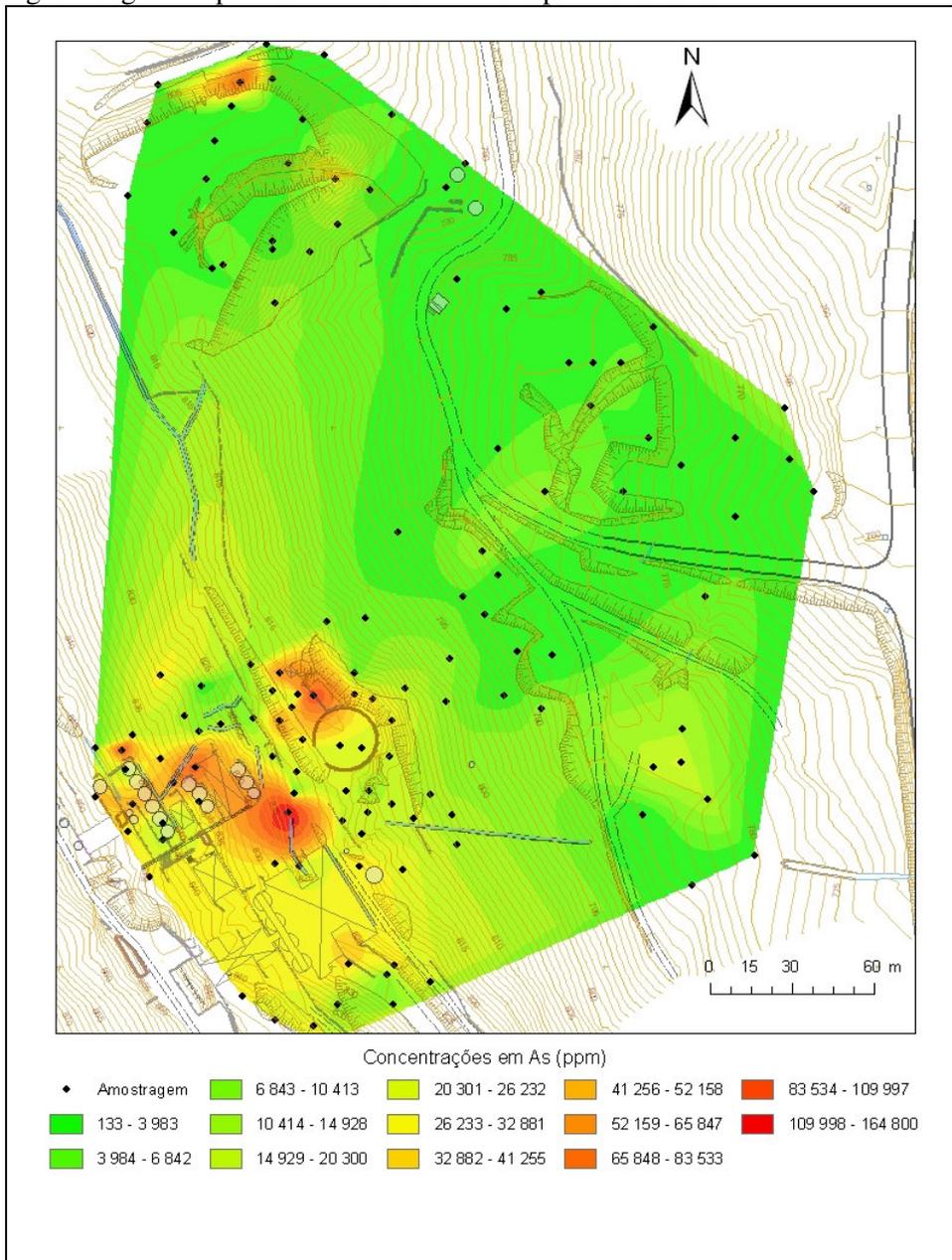


Figura 5 – Distribuição da Concentração de As no Sector de Processamento do Minério da Área Mineira de Santo António.

A análise dos diversos mapas obtidos permitiu concluir que os metais pesados e o As se encontravam preferencialmente acumulados em redor dos edifícios das lavarias e, seguidamente, na área mais imediata a jusante desses edifícios. A acumulação preferencial destes elementos químicos nas zonas referidas coincide com o aspecto degradado que os solos nestes locais, situação evidenciada pela ausência generalizada de vegetação.

Na zona dos depósitos de resíduos (ES1, ES2, ESP e AT), contrariamente ao espectável, as concentrações nos diferentes elementos apresentaram-se, consideravelmente, inferiores às exibidas nos solos da zona das lavarias e a jusante das mesmas, o que se explica com o processo de lixiviação das águas pluviais que percolam os materiais.

No que respeita às concentrações em que os diferentes metais e metalóides foram detectados, verificou-se que os valores mais elevados se obtiveram para o Fe e o As, cujas concentrações se apresentaram, consideravelmente, superiores às exibidas pelos demais elementos químicos. O Fe ocorreu, sistematicamente, em concentrações acima de 2 000 ppm. Esta situação é considerada normal no enquadramento geológico da área, com substrato de natureza granítica e minério rico em minerais férricos (p.e. pirite) explorado. O As, por sua vez, determinou-se em quase toda a área em concentrações, também acima de 2 000 ppm, o que se relaciona com a paragénes mineral do minério explorado (p.e. ricos em arsenopirite).

Relativamente à comparação dos resultados das análises realizadas *in situ* com os resultados obtidos por ICP-OES nas amostras de confirmação, obtiveram-se as concentrações elementares para cada um dos métodos (FRX e ICP-OES) apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Resultados do Rastreio *in situ* e Resultados de Confirmação (ICP-OES).

Ref.	Local	Método analítico	Concentrações Elementares (ppm)					
			Pb	Fe	As	Sn	Zn	Cu
Am 1	ES1	FRX <i>in situ</i>	27	5387	1066	n.d.	31	64
		ICP-OES	28	12700	1140	2	17	16
Am 2	ES1	FRX <i>in situ</i>	n.d.	58530	96674	365	n.d.	159
		ICP-OES	41	45800	>10000	4	9	58
Am 3	ES2	FRX <i>in situ</i>	155	18500	8654	147	40	68
		ICP-OES	215	28000	>10000	6	11	12
Am 4	AT	FRX <i>in situ</i>	70	57100	13941	n.d.	n.d.	104
		ICP-OES	180	83600	>10000	7	86	74
Am 5	Lavarias	FRX <i>in situ</i>	61	87200	27800	120	55	114
		ICP-OES	92	37800	>1000	4	27	95
Am 6	Lavarias	FRX <i>in situ</i>	n.d.	162100	15000	n.d.	n.d.	n.d.
		ICP-OES	147	43700	43100	4	36	91
Am 7	Lavarias	FRX <i>in situ</i>	n.d.	27200	20400	n.d.	n.d.	n.d.
		ICP-OES	43	26800	>10000	6	7	26
Am 8	Lavarias	FRX <i>in situ</i>	537	250800	12600	n.d.	n.d.	335
		ICP-OES	654	199000	9880	9	207	280

Legenda: n.d. – não determinado; ES1 – escombreira 1, ES2 – escombreira 2, AT – aterro.

Numa abordagem prévia, verificou-se que parte dos resultados não podiam ser comparado, porque no rastreio *in situ* não foram identificados pelo método FRX (n.d.) ou porque as análises de confirmação devolveram valores acima dos limites máximos de detecção (LDMax) do método ICP-OES para certos elementos (LDMax = 10 000 ppm). Verificou-se, também, que os elementos Zn e Cu se encontravam, sistematicamente, presentes nas amostras ensaiadas abaixo ou muito próximo dos respectivos LMD do APFRX, pelo que os resultados que se apresentam para estes elementos são, à partida, pouco fiáveis.

Apesar do reduzido número de elementos por amostra, cujos resultados analíticos podem efectivamente ser comparados estatisticamente, foi possível inferir algumas conclusões.

Verificou-se que, de um modo geral, os elementos foram identificados *in situ* em concentrações muito inferiores às obtidas nas respectivas análises de comparação. A amostra Am 6 foi a que apresentou os valores mais discrepantes, enquanto as amostras Am 1, Am 3 e Am 4 apresentaram menores diferenças.

Os melhores resultados, obtidos para as amostras Am 1, Am 3 e Am 4, explicam-se com o facto destas terem sido recolhidas nos depósitos de resíduos, enquanto as restantes foram recolhidas nos solos em redor das lavarias. Os resíduos são bastante homogêneos em termos composicionais e em termos granulométricos e estão desprovidos de matéria orgânica e de detritos estranhos, contrariamente aos solos que apresentam uma granulometria extensa, reduzida espessura (maciço granítico sub-abflorante), algum teor em matéria orgânica (p.e. raízes de plantas) e detritos (p.e tijolo, brita e vidro).

De acordo com os princípios do Método EPA 6200, estas características justificam a melhor qualidade obtida nos resultados destas amostras. Por este motivo, os resultados analíticos destas materiais por FRX tendem naturalmente a ser mais próximos dos respectivos resultados de confirmação (ICP-EOS), os quais requerem amostras devidamente homogeneizadas e calibradas granulometricamente.

O estudo comparativo de resultados permitiu concluir que a amostragem efectuada para a realização de análises de confirmação foi insuficiente. Foram seleccionadas amostras que se comprovou não terem sido recolhidas em locais que reunissem as recomendações da U.S. EPA no Método EPA 6200, designadamente no que respeita ao conteúdo orgânico e à granulometria das amostras. Concluiu-se, também, que para os devidos efeitos de comparação, apesar da U.S. EPA apenas recomendar a confirmação de um total de 5% das análises, deveriam ter sido analisadas mais amostras, sobretudo amostras de cada tipo de material em estudo, ou seja, dos resíduos e, especialmente dos solos, dado serem estas amostras que expressam, à partida, maior heterogeneidade.

Note-se, também, que o facto das análises *in situ* serem limitadas espacialmente à janela do analisador e das análises de confirmação decorrerem sobre amostras mais volumosas, resultantes da mistura de todo o material em redor do ponto análise inicial, contribui para que as amostras de confirmação não sejam exactamente as mesmas ensaiadas *in situ*.

## 5. CONCLUSÕES

Da experiência adquirida com o APFRX na área mineira de Santo António, conclui-se que este é, sem dúvida, um método vantajoso, se aplicado como ferramenta auxiliar de diagnóstico. Contudo, os resultados obtidos no rastreio *in situ* devem ser utilizados com ponderação, uma vez que são apenas semi-quantitativos. Estes dados, ainda que semi-quantitativos, são bastante úteis para a fase de investigação preliminar dos estudos de caracterização, na medida em que permitem identificar fontes de contaminação, localizar *hot spots* e distinguir zonas mais contaminadas das menos contaminadas, dando uma indicação preliminar da concentração elementar das amostras ensaiadas.

A realização de análises *in situ* de qualidade corresponde a um processo particularmente complexo, devido ao facto de dependerem de uma série de situações que podem afectar a sensibilidade dos equipamentos e, conseqüentemente, conduzir a leituras incorrectas.

Contudo, quando utilizados em laboratório (análises *ex situ*, segundo protocolo adequado), os APFRX devolvem resultados analíticos de muito boa qualidade, sendo repetíveis e reprodutíveis quando comparados com outros métodos analíticos de laboratório, nomeadamente o ICP-OES.

No caso particular da área mineira de Santo António, apesar das diferenças obtidas entre os resultados das análises *in situ* e os das análises de confirmação, comprovou-se a utilidade dos APFRX. O facto de ter sido possível definir um zonamento da concentração dos diferentes

elementos químicos presentes na área, possibilitou fazer um diagnóstico preliminar do estado de degradação do local e facilitou, simultaneamente, a otimização das tarefas de amostragem, direcionando o programa de amostragem para as necessidades específicas da área mineira.

Desta forma considera-se que estes equipamentos podem revelar-se úteis nos estudos de caracterização preliminar das AMD, funcionando como ferramenta auxiliar de diagnóstico ou como ferramenta de monitorização pós-reabilitação.

Os novos APFRX disponíveis no mercado têm vindo a sofrer melhorias significativas, nomeadamente no que respeita à gama de valores quantificáveis, ao tipo de fonte geradora de raios-X primários e ao tipo de materiais que analisam, nos quais se incluem os minérios. Nesta perspectiva, surgem novas aplicações para esta tecnologia no contexto dos estudos a desenvolver nas áreas mineiras, que, para além da fase de caracterização ambiental e de monitorização pós-reabilitação, poderá ser alargada aos trabalhos de prospecção e à gestão da exploração das jazidas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) a atribuição da Bolsa de Doutoramento (SFRH /BD/14392/2003).

## REFERÊNCIAS

- EPA (1998). Field Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry for the Determination of Elemental Concentration in Soil and Sediment. *Method 6200*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., USA, 32 p.
- ISO (1994). Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - basic method for determination of repeatability and reproducibility of standard measurement method.
- Jorge, C.; Roque, M. (2005). Implementação da Metodologia de Análise de Solos com Analisador Portátil de Fluorescência de Raios-X – Avaliação da Qualidade Analítica dos Dados. *Relatório 439/05 – DG/NGE*, LNEC, Lisboa, Portugal, 53 p.
- Niton (2002). *NITON XLi 700 Series Environmental Analyser User's Guide*. NITON Corporation, Massachusetts, USA, 115 p.
- Roque, M.; Jorge, C.; Almeida, I. (2006). Avaliação da Qualidade dos Dados Obtidos por FRX em Áreas Mineiras Degradadas. *Actas do 10º Congresso Nacional de Geotecnia*, Lisboa, Portugal, vol. 3, pp. 843-848.
- Roque, M.; Jorge, C.; Almeida, I. (2008). Utilização dos Analisadores Portáteis de FRX como Método Auxiliar de Diagnóstico na Mina de Santo António (Penedono). *Actas do XI Congresso Nacional de Geotecnia IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia*, Coimbra, Portugal, vol. IV, pp. 221-228.
- Roque, M.; Jorge, C. R. (2007). Implementação da Metodologia de Análise de Solos com Analisador Portátil de Fluorescência de Raios-X – Validação dos Resultados das Análises *in situ*. *Relatório LNEC 375/07 – DG/NGE*, LNEC, Lisboa, Portugal, 30 p.
- Santos Oliveira, J. M.; Farinha, J.; Matos, J. X.; Ávila, P.; Rosa, C.; Canto Machado, M. J.; Daniel, F. S.; Martins e Machado Leite, M. R. (2002). Diagnóstico Ambiental das Principais Áreas Mineiras Degradadas do País. *Boletim de Minas*, Lisboa, Portugal, vol. 39, nº2, pp. 67-85.