

SISTEMATIZAÇÃO DOS PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EM ÁREAS MINEIRAS DEGRADADAS

Systematization of geotechnical problems in Degraded Mine Areas

Violeta Isabel Monteiro Ramos*

Celeste Rosa Ramalho Jorge**

Maria Isabel Gonçalves Fernandes***

RESUMO – São vários os problemas geotécnicos que ocorrem após o encerramento de uma mina, entre os quais se destacam a instabilidade de taludes, a subsidência, a degradação de acessos mineiros e a instabilidade de estruturas de armazenamento de resíduos. Este último problema é o mais comum em Portugal, país onde existem cerca de 175 áreas mineiras abandonadas, cujo estado de degradação merece uma rápida e eficaz intervenção.

SYNOPSIS – There are several problems which occur after mine closure, including, among other, slope instability, subsidence, mining access degradation and instability of mining waste structures. This last problem is the most common in Portugal, a country where there are about 175 degraded mine areas, whose degradation state deserves a fast and efficient intervention.

PALAVRAS CHAVE – Áreas Mineiras Degradadas, Problemas geotécnicos, Contexto português.

1 – INTRODUÇÃO

Desde os tempos mais remotos, a Humanidade é dependente dos recursos que o planeta possui, tais como os solos, as rochas e os minérios. No caso dos minérios, a aprendizagem da sua utilização possibilitou um grande desenvolvimento nas tarefas diversas do quotidiano e mais tarde na indústria. A exploração das jazidas minerais tornou-se, assim, uma actividade que foi crescendo a partir da sua descoberta, sem os cuidados necessários de segurança, inicialmente a muito pequena escala, e, nos séculos XIX e XX, a muito grande escala, quer por meio de explorações a céu aberto quer por meio de explorações subterrâneas. Finalizada a extracção dos minérios, até muito recentemente as áreas mineiras eram abandonadas sem que houvesse qualquer tipo de preocupação com os problemas geotécnicos e ambientais que foram gerados durante a exploração ou que, posteriormente, pudessem surgir.

Nesta Nota Técnica apresenta-se uma síntese dos principais problemas geotécnicos que podem ocorrer em resultado do abandono de áreas mineiras.

* Geóloga, Bolseira de Doutoramento, Centro de Geologia da Universidade do Porto.

E-mail: violetaramos@fc.up.pt

** Investigadora Auxiliar, Departamento de Geotecnia, Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. E-mail: cjorge@lnec.pt

*** Professora Auxiliar, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território/Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. E-mail: ifernand@fc.up.pt

2 – PROBLEMAS GEOTÉCNICOS

Os tipos de problemas geotécnicos que se manifestam nas Áreas Mineiras Degradadas (AMDs) estão, directamente, relacionados com o processo de exploração utilizado, ou seja, o subterrâneo, a céu aberto ou o misto. Referem-se seguidamente os aspectos relativos a explorações a céu aberto.

2.1 – Específicos de explorações a céu aberto

Nas explorações a céu aberto são utilizados dois métodos de desmonte característicos, nomeadamente o ataque por flanco de encosta e a abertura de uma corta. Consequentemente, os principais problemas geotécnicos verificados relacionam-se, essencialmente, com a instabilidade de taludes e a inundação das cortas.

2.1.1 – *Instabilidade de taludes*

Numa exploração a céu aberto são vários os parâmetros relativos às formações geológicas, ou resultantes da exploração, susceptíveis de desempenharem um papel importante na estabilidade dos taludes de cortas. Entre os principais, encontram-se (Poulard e Salmon, 2002): a natureza do maciço rochoso (características físicas dos materiais), as variações laterais de fácies, as descontinuidades geológicas (planos de estratificação, falhas, diaclases, etc.), a geometria dos taludes de escavação (inclinação e altura), as solicitações que possam ser exercidas sobre a frente de escavação (cargas, vibrações, etc.) e a presença de água. Este último parâmetro é um dos factores com maior relevância nos problemas de instabilidade. A combinação dos parâmetros referidos anteriormente pode levar a várias manifestações de instabilidade (Figura 1).



Fig. 1 – Corta com taludes instáveis.

Segundo Poulard e Salmon (2002) é possível dividir os diferentes tipos de instabilidade em dois grandes grupos: rupturas que se desenvolvem, habitualmente, em maciços rochosos fracturados, em que os mecanismos de instabilidade mais característicos são a queda de blocos, o escorregamento planar ou em cunha e o toppling; e rupturas que afectam as frentes constituídas por materiais mais brandos, com comportamento mecânico típico de um solo, em que os mecanismos de instabilidade característicos são o escorregamento circular e os fenómenos de erosão regressiva.

A identificação dos diferentes tipos de instabilidade susceptíveis de afectar uma exploração permite definir quais as medidas de mitigação mais adequadas a aplicar para garantir a segurança da situação existente.

2.1.2 – Inundação das cortas

Muitas explorações a céu aberto tomam determinada geometria constituindo como que uma depressão, por vezes profunda, para onde drenam as águas superficiais. Muitas vezes acontece que estas depressões se estendem muito abaixo do nível freático, o que requer a extracção da água subterrânea durante os trabalhos de exploração. Se for esse o caso, quando os trabalhos de extracção cessam, a bombagem das águas é interrompida e o vazio remanescente é, normalmente, preenchido por uma mistura de água subterrânea, de águas de escorrência superficial e, por vezes, por águas oriundas de zonas vizinhas contaminadas, criando uma lagoa (Figura 2). A qualidade final da água da lagoa resultante é difícil de prever e depende de factores tais como: a) qualidade inicial da água subterrânea; b) litologia das paredes da depressão; c) estado de contaminação da área circundante e d) relação evaporação-precipitação (Doupé e Lymbery, 2005).



Fig. 2 – Corta inundada.

O problema geotécnico mais grave que se poderá verificar em consequência da inundação das cortas decorre da percolação da água nas discontinuidades do maciço envolvente, quer nas paredes da corta quer no fundo da mesma. A pressão exercida pela água sobre os planos de discontinuidade do maciço pode causar instabilidade dos taludes da corta.

2.2 – Específicos de explorações subterrâneas

Quando os jazigos de minérios a explorar se encontram a grandes profundidades, torna-se necessário proceder à extracção dos respectivos materiais através da abertura de uma rede de cavidades subterrâneas. Como tal, os problemas geotécnicos que ocorrem neste tipo de explorações relacionam-se com: a instabilidade de terrenos; a degradação de aberturas/acessos mineiros; e a inundação das cavidades subterrâneas.

2.2.1 – Instabilidade de terrenos

O colapso de um terreno ocorre quando este sofre um movimento vertical descendente acompanhado por forças horizontais de tracção, em resultado da não existência de um suporte subjacente. Neste caso há uma perda da capacidade de suporte do conjunto ou existe um aumento da deformação do maciço. Tais factos resultam da presença de cavidades subterrâneas em maciços de fraca qualidade mecânica ou indevidamente explorados. Os efeitos verificados podem variar desde assentamentos da ordem dos milímetros, até colapsos de grande extensão (Arnal *et al.*, 2003).

Segundo Arnal *et al.* (2003), o método de exploração escolhido para a extracção mineira é determinante nos processos de instabilidade que se venham a desenvolver. Aqueles autores referem que os métodos que deixam vazios residuais importantes susceptíveis de evoluir ao longo do tempo, após o cessar definitivo dos trabalhos (ex. exploração por câmaras e pilares) são aqueles que são susceptíveis de originar problemas geotécnicos mais graves.

A tipologia dos fenómenos de instabilidade de terrenos verificados à superfície numa antiga zona mineira é essencialmente de dois tipos (Arnal *et al.*, 2003), distinguindo-se os fenómenos localizados ou de extensão limitada (colapsos localizados) e os fenómenos de grande extensão (subsidência e colapsos em massa).

2.2.1.1 – Fenómenos localizados

De uma maneira geral, fala-se de colapso quando o rebaixamento da superfície ocorre de uma forma descontínua no tempo (por episódios rápidos) e/ou isolados no espaço (formação de fracturas, de figuras de arrancamento¹, de crateras, etc.) (Arnal *et al.*, 2003).

Os colapsos são caracterizados por um movimento gravitacional de componente essencialmente vertical, que pode atingir uma amplitude sensivelmente igual à altura da cavidade subjacente ou à abertura da camada explorada. São fenómenos muito específicos que apenas afectam as explorações subterrâneas em que foram utilizadas técnicas que permitem a persistência de vazios subterrâneos (Arnal *et al.*, 2003).

A ruptura do tecto de uma cavidade é uma instabilidade localizada, característica de maciços estratificados ou cortados por descontinuidades. Inicia-se pelo abatimento do tecto de uma cavidade subterrânea de pequena extensão, localizada a pequena profundidade. Este movimento é materializado pelo aparecimento súbito à superfície de um funil com alguns metros de raio e de profundidade (Arnal *et al.*, 2003) (Figura 3). Este tipo de colapso desenvolve-se preferencialmente nas zonas das galerias (cruzamento de galerias, pilares em ruínas, câmaras vazias ou parcialmente preenchidas por material), onde o respectivo tecto apresenta grandes vãos não suportados. A presença de um terreno suprajacente pouco espesso, constituído por materiais pouco compactos e pouco resistentes (ex. areias, margas, entre outros), facilita a propagação da instabilidade em direcção à superfície e, conseqüentemente, o surgimento desta forma (Tritsch, 2000; Poulard e Salmon, 2002).

A geometria de um funil de colapso é resultante das características da exploração subterrânea (geometria, natureza, espessura, presença de água, etc.) e do mecanismo que a origina. O diâmetro e a profundidade dos funis variam entre 1 e 20 m, em função da profundidade, da altura ou do volume de vazios, assim como também da natureza dos terrenos suprajacentes aos vazios e do seu empolamento (depois da derrocada, os terrenos ocupam um maior volume do que aquele que ocupavam no seu estado inicial) (Arnal *et al.*, 2003; Zihri, 2004).

À superfície, este tipo de perturbação é característico de explorações parciais a pequena profundidade e de cavidades naturais, independentemente da profundidade a que estas últimas se encontrem. A sua ocorrência é frequente e perigosa, visto que pode verificar-se no topo de todos os tipos de vazios, mesmo nos de extensão média (antigas galerias e poços), ocorrendo de forma rápida e imprevisível (Tritsch, 2000; Arnal *et al.*, 2003).

As principais causas que dão origem a este tipo de fenómeno são a localização dos trabalhos mineiros a pequena profundidade, a existência de terrenos suprajacentes de fraca qualidade, a presença de descontinuidades e a dissolução de rochas. Para além destas, o rebaixamento do nível freático, os períodos de pluviosidade intensa e os sismos são factores que também contribuem para a ocorrência de colapsos localizados (Singh e Dhar, 1997).

¹ Registo do tipo de movimento na superfície de ruptura.



Fig. 3 – Funil de colapso de perfil simétrico com $D \approx 12\text{m}$ (Arnal *et al.*, 2003).

Devido à fraca extensão do fenómeno, as consequências à superfície são, em geral, limitadas. Contudo, as repercussões podem tornar-se extremamente graves, se o processo se desenvolver sob uma construção ou uma qualquer infra-estrutura (Arnal *et al.*, 2003).

2.2.1.2 – Fenómenos de grande extensão

Entre os fenómenos de grande extensão é possível distinguir o colapso em massa e a subsidência.

1) Colapso em massa

O colapso em massa caracteriza-se por uma ruptura dos terrenos superficiais, como consequência da ruína dos trabalhos subjacentes, afectando uma área considerável. Os mecanismos susceptíveis de originar este tipo de fenómeno diferem quanto ao tipo de exploração e à natureza do maciço encaixante (Arnal *et al.*, 2003).

Contrariamente aos colapsos localizados, os colapsos de grande extensão podem surgir em explorações bastante profundas (até 200 m). No entanto, estes tipos de colapsos são menos frequentes do que os colapsos localizados (Watelet, 1998).

Numa cavidade situada a pequena ou a média profundidade, a ocorrência de um colapso em massa afecta uma grande área da superfície, provocando uma cratera de abatimento com fundo plano (Figura 4), rodeada por fracturas sub-verticais, cujo movimento relativo pode atingir alguns metros. De acordo com as dimensões da cavidade subterrânea, as manifestações deste tipo de colapso são bastante variáveis, podendo variar desde crateras pouco mais significativas do que um *funil* de colapso até extensas áreas com vários hectares (Tritsch, 2000).

Os mecanismos susceptíveis de originar este tipo de fenómeno (ruptura de uma parede numa exploração filoniana, ruptura do tecto numa exploração, que dê lugar a vazios, ou ruptura de pilares abandonados em estado de ruína) variam consoante o tipo de exploração e a natureza do maciço encaixante. Um colapso em massa ocorre quando é ultrapassada uma largura de exploração crítica, normalmente da mesma ordem de grandeza da espessura dos terrenos suprajacentes (Zihri, 2004).

Apesar de menos frequentes do que os fenómenos de subsidência, que serão referidos mais à frente, os colapsos podem ter consequências bastante mais graves. Estes podem levar à destruição de edifícios ou de infra-estruturas (podendo verificar-se a perda de vidas humanas) quando se desenvolvem em zonas urbanizadas².

² Em Portugal, muitas povoações nasceram sobre explorações mineiras.



Fig. 4 – Zona de abatimento de fundo plano (Arnal *et al.* 2003).

Os colapsos em massa podem dar origem a movimentos bruscos/espontâneos (em maciços homogêneos ou estratificados e resistentes) ou progressivos (em maciços estratificados ou descontínuos e pouco resistentes). Os colapsos espontâneos são os mais destrutivos. Fazem-se acompanhar de uma grande libertação de energia, que se manifesta sob a forma de ondas sísmicas (Tritsch, 2000). Para além do desabamento dos trabalhos subterrâneos e da queda brusca de terrenos à superfície, o efeito de deslocação do ar, pelo volume de material abatido (por vezes milhares de metros cúbicos) pode ser devastador (Zihri, 2004).

Em numerosos casos, a ruína dos vazios subterrâneos faz-se por etapas sucessivas e induz apenas a um assentamento progressivo da superfície. Tal não impede que surjam fracturas ou figuras de arrancamento ao nível do solo, susceptíveis de provocar uma importante degradação dos edifícios ou infra estruturas situadas à superfície (Arnal *et al.*, 2003; Zihri, 2004).

2) Subsidência

A subsidência manifesta-se por uma depressão topográfica em forma de bacia de grande extensão, resultante da deformação progressiva dos terrenos suprajacentes a uma exploração mineira, sem ruptura frágil significativa. Geralmente, este fenómeno de grande extensão horizontal é sintomático de explorações realizadas a grande profundidade (Arnal *et al.*, 2003).

Nas condições mais frequentes de ocorrência do fenómeno de subsidência, o abatimento manifesta-se por uma redução da cota à superfície, conseguido pelo estabelecimento de um novo estado de equilíbrio das condições do maciço, estável no tempo (Arnal *et al.*, 2003).

O deslocamento vertical medido no centro da bacia, gerada durante este abatimento progressivo, não deverá ultrapassar um valor denominado por amplitude de subsidência máxima. Este valor é dependente da largura dos trabalhos subterrâneos, da natureza dos vazios (extensão, deslocamento vertical, preenchimento, etc.), assim como da espessura e da natureza dos terrenos de cobertura (Arnal *et al.*, 2003).

As consequências mais graves, à superfície, provocadas por fenómenos de subsidência são, geralmente, aquelas que afectam a estabilidade das estruturas e das infra-estruturas, para além das alterações da topografia da superfície, que acarretam o risco de acumulação de água na área abrangida (Arnal *et al.*, 2003; Zihri, 2004). Os danos ocorridos à superfície nas estruturas e infra-estruturas resultantes das extensões ou dos encurtamentos gerados pela subsidência relacionam-se com (Arnal *et al.*, 2003): a altura das obras suprajacentes (as estruturas mais altas são as mais sensíveis), a posição em relação à bacia (as que se encontram próximo do ponto de inflexão são as mais vulneráveis) e a natureza do solo e o tipo de fundações.

2.2.1.3 – Sistematização dos fenómenos de instabilidade

No Quadro 1 encontram-se resumidas as condições de geração dos fenómenos associados à instabilidade de terrenos em zonas mineiras abandonadas.

Quadro 1 – Condições de geração dos fenómenos de instabilidade.

	Tipo de fenómeno	Profundidade da exploração	Método de exploração	Manifestação à superfície
Fenómenos localizados	Calapso localizado	0 a 100m	Todos os métodos de exploração que possam dar lugar a vazios ou quando estes últimos surjam devido à limpeza do material de enchimento da cavidade.	Fenómeno de fraca extensão que se expressa sob a forma de um funil de perfil simétrico ou assimétrico, dependendo das características físicas dos terrenos suprajacentes.
Fenómenos de grande extensão	Calapso em massa	Até 200m		Afecta uma grande área da superfície, provocando uma cratera com fundo plano, rodeada por fracturas.
	Subsidência	Característica de grandes profundidades.		Manifesta-se por um assentamento da superfície, afectando uma extensa área.

2.2.2 – Degradação de aberturas/acessos mineiros

As aberturas mineiras, como poços de extracção/ventilação, emboquilhamento de galerias e galerias, sofrem degradação após o abandono da mina e são, muitas vezes, deixadas sem qualquer tipo de protecção ou da sinalização, comportando riscos para as populações e para os animais, uma vez que constituem zonas de armadilha (*vd.* Figura 5a). A queda accidental em qualquer uma das estruturas mencionadas, pode provocar ferimentos graves e até mesmo a morte. Para além do risco de queda, a presença de gases tóxicos, nestes locais pouco arejados, pode levar à asfixia e à intoxicação dos intrusos. O risco de afogamento também deverá ser considerado, uma vez que as estruturas de acesso aos trabalhos mineiros se encontram muitas vezes inundadas (*vd.* Figura 5b) (Poulard e Salmon, 2002).

Outras aberturas não seladas podem apresentar, igualmente, um risco de colapso. Os abatimentos de poços ou de galerias materializam-se, geralmente, pelo surgimento súbito de colapsos onde o diâmetro pode atingir algumas dezenas de metros. Num contexto de excepção (presença de terrenos empoçados próximos da superfície), poderão ocorrer aluimentos com diâmetros da ordem das centenas de metros (Arnal *et al.*, 2003; Zihri, 2004).

Segundo Arnal *et al.* (2003), o aluimento da superfície em volta de um orifício mineiro pode resultar de: remobilização espontânea e/ou dinâmica dos terrenos superficiais que caem bruscamente e se precipitam dentro dos poços e de antigos trabalhos, gerando, assim, um aluimento à superfície; ruptura da selagem de um orifício (alguns poços ou galerias antigos foram obturados de um modo artesanal e não apresentam nenhuma garantia de segurança); ruptura do revestimento de poços ou de galerias (fadiga do revestimento e/ou aumento da pressão dos terrenos/material suprajacentes); ruptura dos terrenos encaixantes (propagação à superfície de colapsos originados no tecto de uma galeria pouco profunda).



Fig. 5 – a) Poço/tanque de decantação degradado e desprotegido.
b) Boca de galeria inundada e desprotegida.

2.2.3 – Inundação das cavidades subterrâneas

Após o abandono da exploração subterrânea, tal como foi referido para a exploração a céu aberto, a interrupção da bombagem das águas subterrâneas que afluem à mina pode conduzir à inundação de todas as cavidades. Neste contexto, certos circuitos hidráulicos antigos e locais de descarga natural de água são reactivados, enquanto que os vazios criados pela exploração poderão gerar curto-circuitos hidráulicos, provocando o aparecimento de novos pontos de exurgência. O regime hidráulico geral é, assim, modificado e evolui para um novo estado de equilíbrio, diferente daquele que existia antes da exploração mineira (Collon, 2003), verificando-se a subida do nível freático ou de outros níveis de água subterrânea e o potencial aparecimento de instabilidade de terrenos, com subsequente alteração da rede hidrográfica.

Para além dos impactes quantitativos/hidrodinâmicos referidos, o cessar dos trabalhos mineiros tem impactes qualitativos/geoquímicos sobre as águas subterrâneas e superficiais. Em termos qualitativos, a lixiviação dos trabalhos mineiros, do maciço da jazida e/ou dos materiais de preenchimento das cavidades, altera a geoquímica da água (superficial e subterrânea), com repercussões na sua qualidade. A água passa a transportar metais e sais que podem ser extremamente nocivos para a fauna e para a flora (GISOS, 2003).

2.3 – Comuns a todos os tipos de explorações mineiras

A indústria mineira é uma actividade que gera um volume muito elevado de resíduos de diferentes espécies. Em qualquer dos casos de exploração subterrânea ou a céu aberto, estes resíduos são depositados em estruturas apropriadas. Estas estruturas são identificadas como escombreyras, no caso de materiais granulares secos e como barragens de rejeitados, de decantação e de lamas, no caso de materiais fluidos ou lamas.

Os problemas geotécnicos associados a este tipo de estruturas de armazenamento de resíduos são de extrema importância e neles há a considerar a instabilidade de escombreyras e de barragens de rejeitados e de lamas, e a drenagem mineira.

2.3.1 – Instabilidade de escombreyras e de barragens de rejeitados e de lamas

Faz-se referência à instabilidade das estruturas de armazenamento de resíduos em áreas mineiras por ser, talvez, o problema geotécnico mais vulgar dessas áreas, quer activas quer abandonadas.

Segundo Robertson e Skermer (1988) existem dois tipos de acções que podem causar instabilidade deste tipo de materiais: as súbitas, causadas por eventos intensos ou extremos como inundações e sismos, e as lentas, mas contínuas, como a acção da água, de agentes químicos e biológicos e do vento.

Como já foi referido, a água é um dos factores mais importantes no desencadeamento dos fenómenos de instabilidade. Esta exerce, geralmente, acções que podem ocorrer isolada ou conjuntamente, sendo as mais relevantes as seguintes: aumento da pressão neutra na escombreira devido à subida do nível freático, por condições climáticas (períodos muito chuvosos) ou outras, redução da coesão dos materiais constituintes da pilha de estéreis e arrastamento de partículas por uma superfície de escoamento preferencial, gerando uma superfície de fraqueza desencadeadora de ruptura.

Foi ainda demonstrado por Blight (1989), que determinados parâmetros, como a distribuição do tamanho das partículas dos materiais rejeitados, a inclinação e a extensão de um talude, podem afectar seriamente o grau de erosão de uma escombreira (ravinamento) (Figura 6), sendo este o aspecto mais comum que se observa nos materiais depositados à superfície.

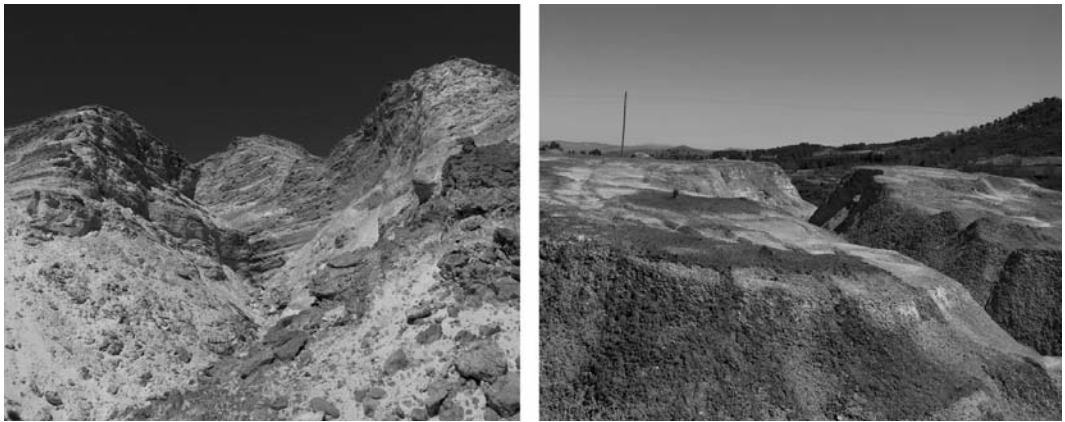


Fig. 6 – a) Escombreira instável e ravinada. b) Lamas acumuladas em barragens de rejeitados que constituem actuais escombreiras de materiais finos e que apresentam nítido ravinamento.

A necessidade de dar ênfase à ruptura das barragens de lamas/rejeitados justifica-se porque a sua acção é muito destrutiva e as consequências ambientais muito nefastas, fazendo-se sentir a dezenas de quilómetros da origem.

2.3.2 – Drenagem mineira

Designa-se por drenagem mineira (DM) a geração de efluentes cuja qualidade difere daquela da água de origem, durante a actividade mineira e/ou após o seu abandono. A sua formação resulta da percolação de materiais depositados à superfície (estéreis, rejeitados de tratamento, etc.) pelas águas de precipitação atmosférica e por outras águas superficiais, com formação de efluentes muito ácidos e/ou poluentes, e da inundação de cavidades de exploração abandonadas, com repercussões do ponto de vista químico (dissolução de minerais neo-formados durante a exploração, ricos em metais) nas águas superficiais e subterrâneas que limitam a sua utilização (Collon, 2003).

2.3.2.1 – Drenagem mineira ácida (DMA)

O caso mais frequente de drenagem mineira é a drenagem mineira ácida, caracterizada por apresentar um pH inferior a 5. A formação da DMA está relacionada com a presença de sulfuretos

(S^{2-}), de enxofre (S) ou de tiossais ($S_2O_3^{2-}$) em contacto com água e oxigénio (condições oxidantes). As águas ácidas resultam da oxidação da pirite (FeS_2), normalmente catalizada por bactérias (Rose e Cravotta, 1998). Outros sulfuretos, como a blenda (ZnS), a galena (PbS), a calcopirite ($CuFeS_2$), a pirrotite (Fe_7S_8) e a arsenopirite ($FeAsS$), podem também contribuir para o fenómeno de formação de águas ácidas (Collon, 2003).

A atenuação natural deste fenómeno pode dar-se após algumas dezenas ou centenas de anos do encerramento da actividade. Por vezes, quando a fonte de sulfuretos se esgota rapidamente ou quando ocorrem modificações das condições hidrogeológicas, a atenuação natural pode ocorrer ao fim de alguns anos (Berguer *et al.*, 2000).

A paragem da bombagem para manter o rebaixamento do nível freático pode ser uma das causas da geração de DMA. Esta é sentida inicialmente mas, se houver total submersão dos trabalhos mineiros, a geração de DMA diminui podendo ser controlada.

2.3.2.2 – Impacte ambiental da drenagem mineira

Os ecossistemas aquáticos são os principais visados pela drenagem mineira. A emissão de efluentes ricos em metais (Al, Fe e Mn), metais pesados (Zn, Cd, Ni, Cu, Hg e Pb) e outros elementos e/ou substâncias, como o As e o CN^- , em meio ácido levam a uma deterioração da qualidade da água e dos sedimentos. Esta alteração progressiva tem como consequência a mudança nas comunidades de macro-invertebrados bentónicos e de peixes – a biodiversidade diminui, as populações são reduzidas e as espécies mais tolerantes à poluição são favorecidas (Collon, 2003).

Mesmo presentes em fracas concentrações, os metais pesados e os elementos traço são tóxicos para os peixes e macro-invertebrados bentónicos. Tais elementos concentram-se em sedimentos e algas lacustres e fluviais a jusante das áreas mineiras, contaminando progressivamente as populações bentónicas. Estas últimas acabam por funcionar como veículo de transferência dos elementos tóxicos, acabando por se acumular nos tecidos musculares e hepáticos dos invertebrados bentónicos e dos peixes, podendo provocar a morte destes (Collon, 2003). Estes metais entram na cadeia alimentar e atingem, por esta via, o Homem.

A DMA pode, igualmente, conduzir à degradação das comunidades vegetais presentes nas margens dos efluentes, resultando na morte de espécies arbóreas, arbustivas e herbáceas não tolerantes à acidificação do solo (Figura 7). Precipitados de cor ferruginosa são outra das expressões da DMA, contribuindo para um impacte visual ao nível da paisagem (Collon, 2003).



Fig. 7 – Árvore morta devido à presença de um canal de DMA.

2.3.2.3 – Impacte sobre a saúde humana e as infra-estruturas

Outro impacte relacionado com as águas de drenagem mineira resulta do uso destas no consumo humano, no espelho de água de lugares lúdicos, na irrigação e no uso industrial. Além do referido, a acidez dos efluentes mineiros promove a corrosão das infra-estruturas mineiras e de equipamentos variados. A presença de sulfatos, de magnésio e de potássio acelera a corrosão das canalizações metálicas permitindo, assim, a solubilização de metais. Por sua vez, uma água muito cálcica pode levar à deposição de calcário em condutas e em electrodomésticos (Collon, 2003).

A drenagem mineira é acompanhada por uma solubilização de elementos mais ou menos prejudiciais à saúde humana e animal, assim como à existência de vegetação. O maior perigo para a saúde humana advém da ingestão directa de metais pesados em solução nas águas de DMA (Collon, 2003), por contaminação das águas subterrâneas e das águas superficiais de abastecimento particular ou público.

3 – PANORAMA DA SITUAÇÃO EM PORTUGAL

Actualmente, em Portugal, estão identificadas 172 AMDs que se distribuem pelas regiões Norte (39), Centro (87), Alentejo (42) e Algarve (4). A exploração em 39 minas foi efectuada apenas a céu aberto, tendo em outras 93 sido utilizados métodos de exploração exclusivamente subterrâneos; 38 tiveram uma exploração mista e em 2 o tipo de exploração não é identificado.

Os principais problemas geotécnicos referidos no presente trabalho são, em grande parte, comuns às áreas mineiras degradadas portuguesas (Jorge *et al.*, 2008; Ramos, 2008). De seguida faz-se uma apresentação dos problemas tendo em conta o tipo de exploração realizado.

3.1 – Problemas específicos de explorações a céu aberto

Em 77 AMDs existentes em Portugal, os trabalhos decorreram a céu aberto.

Relativamente à instabilidade de taludes de escavação há a referir que existem, pelo menos, 16 AMDs que apresentam más condições de estabilidade (ex. Cótimos e Mata da Rainha). Quanto ao problema de inundação das cortas, há a referir que existem, no mínimo, 19 áreas mineiras cujas cortas se encontram inundadas (ex. Maria Dónis e Tarouca).

3.2 – Problemas específicos de explorações subterrâneas

Nas 131 AMDs onde foi realizada exploração por métodos subterrâneos verificam-se os problemas típicos deste tipo de exploração e que são: a instabilidade de terrenos, a degradação de aberturas/acessos mineiros e a inundação das cavidades subterrâneas, conforme já referido.

Foram identificados problemas de instabilidade de terrenos em, pelo menos, 7 áreas mineiras. Em 4 destas áreas verificam-se fenómenos de subsidência, enquanto que em 3 ocorrem fenómenos de instabilidade geral. Dois exemplos significativos verificam-se na antiga área mineira e povoação de Argozelo e na antiga área mineira e povoação de Aljustrel. Problemas de degradação de aberturas/acessos mineiros foram identificados, aproximadamente, em 20 áreas mineiras, com colapsos associados a estas estruturas mineiras subterrâneas (ex. Covas e Serra da Bofeta). Por sua vez, a inundação das cavidades subterrâneas ocorre em, pelo menos, 18 áreas mineiras (ex. Vieiros e Alto do Sião).

3.3 – Problemas comuns a todos os tipos de explorações mineiras

No geral, das 172 AMDs existentes em Portugal, pelo menos 41 apresentam graves problemas de instabilidade associados a estruturas de armazenamento de resíduos (ex. Herdade da Tinoca e

Mortórios). Pelo menos 34 AMDs apresentam problemas de DMA (ex. Miguel Vacas e Terramonte). Porém, a DMA deverá ocorrer na grande maioria das AMDs, considerando-se muito optimista o número de minas acima referido.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

São vários os problemas geotécnicos que se verificam após o abandono de uma exploração mineira – subsidência, colapsos localizados, instabilidade de taludes, grandes volumes de resíduos acumulados em condições de estabilidade precária (escombreyas e barragens de resíduos), cortas inundadas, depressões/vazios com grandes desniveis, entre outros. Como tal, o processo de encerramento de uma área mineira deverá ser sempre considerado aquando do planeamento da sua exploração evitando assim problemas graves que colocam em risco a segurança das populações na vizinhança das AMDs. Contudo, os problemas existentes não se restringem apenas à vertente geotécnica, sendo quase primordial considerar a vertente ambiental, a qual pode pôr em risco a saúde pública e a subsistência dos ecossistemas envolventes. Esta última componente tem uma acção mais alargada no espaço, podendo estender-se muito para além dos limites físicos das AMDs.

Com o objectivo de possibilitar uma fácil consulta do tipo de problemas geotécnicos passíveis de serem identificados nas AMDs procedeu-se a uma sistematização dos mesmos, tendo em consideração o levantamento bibliográfico realizado. Apesar do trabalho ser dirigido para a vertente geotécnica, não se pode dissociar da mesma todos os aspectos nefastos resultantes da acumulação de resíduos, formação de águas ácidas, dispersão de poeiras contaminadas, etc..

A partir desta sistematização e tendo em conta a herança extremamente pesada das AMDs existente em Portugal, procurou-se fazer um levantamento preliminar dos tipos de problemas e da sua ocorrência, não pretendendo, no entanto, ser exaustivo, mas contribuir para uma imagem geral da situação à data do início do século XXI.

Actualmente, muitos projectos de reabilitação de AMDs já foram apresentados e alguns estão em vias de concretização. Verifica-se que algumas das intervenções iniciais não foram totalmente bem sucedidas (ex. Jales e Miguel Vacas), tendo sido necessária uma segunda fase de intervenção (ex. Jales).

Cabe, neste momento, às entidades responsáveis pelas AMDs, e sua respectiva reabilitação, prestar a devida atenção aos problemas mencionados, com o objectivo de uma real melhoria das condições existentes, com benefícios múltiplos para as populações locais e regionais e para os ecossistemas.

5 – AGRADECIMENTOS

A primeira autora manifesta o seu agradecimento ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, instituição que a acolheu durante a realização de Estágio Profissionalizante.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnal, C., Messin, M., Salmon, R., Verdet, T., Zihri, G. avec la collaboration de Deschanel, J. L., Dodeler, V., Deck, O., Merad, M. (2003). *Risques liés aux ouvrages souterrains. Détermination d'une échelle de dommages. Rapport final*. BRGM/RP-52634, 212 pp., 45 fig., 79 tabl., 3 ann., France.
- Berguer, A. C., Bethke, C. M., Krumhansl, J. L., (2000). *A process model of natural attenuation in drainage from historic mining district*. Applied Geochemistry, vol. 15, pp. 655-666.

- Blight, G. E. (1989). *Erosion losses from the surfaces of gold tailing dams*. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 89 (1), pp. 23-29.
- Collon, P. (2003). *Évaluation de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère Lorrain. De l'expérimentation en laboratoire à la modélisation in situ*. Institut National Polytechnique de Lorraine. École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy. Laboratoire Environnement, Géomécanique Ouvrages.
- Doupé R. G., Lymbery, A. J. (2005). *Environmental risks associated with beneficial end uses of mine lakes in Southwestern Australia*. Technical Communication. Mine Water and the Environment 24, pp. 134-138, Springer-Verlag.
- GISOS (2003). *Synthèse des travaux de recherche, 1999-2002*. France.
- Jorge, C., Ramos, V., Fernandes, I. (2008). *Principais aspectos geotécnicos relativos a áreas mineiras degradadas*. Actas do XI Congresso Nacional de Geotecnia e IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Coimbra, 8 pp.
- Poulard, F., Salmon, R. (2002). *Proposition d'une méthode d'analyse et de hiérarchisation des risques résiduels liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier*. Programme EAT-DRS-03. Unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechniques. Direction des Risques du Sol et du Sous-sol, France.
- Ramos, V. (2008). *Problemas geotécnicos em áreas mineiras degradadas*. Trabalho realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, no âmbito do Estágio Profissionalizante, e apresentado no Dep. de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 95 pp.
- Robertson, A., MacG., Skermer, N. A. (1988). *Design considerations for the long term stability of mine wastes*. First International Environmental Workshop, Australian Mining Industry Council, Darwin, Australia.
- Rose, A. W., Cravotta, C. A., III (1998). *Geochemistry of coal-mine drainage*. In Brady K. B. C., Smith, M. W., Schueck, J., (eds). Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Preservation in Pennsylvania: Harrisburg, Pa, Pennsylvania Department of Environmental Protection, 5600-BK-DEP2256, pp. 1.1-1.22, U.S.A..
- Singh, K., Dhar, B. B. (1997). *Sinkhole subsidence due to mining*. Geotechnical and Geological Engineering 15, pp. 327-341.
- Tritsch, J. J. (2000). *Évaluation des aléas aux cavités souterraines*. Synthèse du groupe de travail du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. INERIS, Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol, France.
- Watelet, J. M. (1998). *Méthodologie d'analyse des dangers appliqué à l'exploitation des carrières souterraines, Rapport final*. INERIS SSE-99-21 EP48/R01.
- Zihri, G. (2004). *Risques liés aux ouvrages souterrains: constitution d'une échelle de dommages*. Thèse de doctorat, INPL/ENSMN-LAEGO, École Doctorale PROMEN, Spécialité Génie Civil – Hydrosystèmes – Géotechnique.