

2 Considerações sobre Hidrogeotecnia de Pilhas de Estéril

Neste capítulo serão apresentadas algumas importantes considerações sobre os aspectos relacionados à hidrogeotecnia em pilhas de estéril, focalizando principalmente as características hidráulicas do material disposto, problemas de estabilidade gerados a partir das condições de fluxo e, por fim, a vulnerabilidade do material estéril quanto à contaminação do solo e aquíferos.

Cabe lembrar que apesar de existirem diversos grupos de pesquisa interessados nesse tipo de problemas, o foco principal dos empreendedores do setor mineral quanto a disposição de estéril ainda é a redução dos custos de transporte, e não o desenvolvimento de projetos de engenharia adequados, que implicariam melhorias nos métodos de disposição do estéril.

Em pilhas de estéril os principais custos de disposição estão concentrados nas seguintes atividades: drenagem, proteção vegetal, retenção de finos gerados por carreamento de sólidos durante e após a formação da pilha, manutenção ao longo dos anos e transporte do estéril. E de todas estas atividades enumeradas, o mais expressivo é o transporte, estando este dependente basicamente dos equipamentos e perfis de transporte (Franco, 1991).

Apesar disso, este mesmo autor relata que problemas envolvendo custos de manutenção podem gerar valores extremamente significativos ao final da vida útil do depósito, onde a saturação do maciço devida à inexistência de sistemas de drenagem interna e superficial adequados, associada à alta compressibilidade do material disposto conferida pelo lançamento de grandes espessuras, tem gerado grandes deformações e instabilidades generalizadas.

2.1. Características Hidráulicas

Pilhas de estéril são formadas pela disposição de materiais distintos e, na maioria dos casos, sem valor comercial agregado. Podem ser compostas por solos e/ou rochas provenientes, ou não, de uma mesma matriz litológica. Entretanto, mesmo em se tratando de pilhas de estéril homogêneas quanto ao tipo de material

disposto, não é possível atribuir o mesmo adjetivo às suas características hidráulicas.

Estas características hidráulicas são propriedades difíceis de ser estimadas, todavia, são de suma importância para o entendimento dos sistemas de fluxo no interior de seus aterros, sendo em muitas situações as principais responsáveis por problemas de estabilidade e transporte de contaminantes.

Dentre os fatores que influenciam as características hidráulicas das pilhas de estéril pode-se citar como os de maior relevância: a litologia do estéril; métodos de remoção e disposição; tráfego de máquinas e caminhões sobre a pilha; superfície topográfica; direção e mergulho das camadas sotopostas à pilha; idade do estéril e as propriedades físicas e químicas do material estéril.

Com relação aos processos utilizados nas minas para remoção e disposição do estéril, estes criam ambientes favoráveis para a predominância de sistemas heterogêneos de escoamento pelo maciço da pilha, devido à grande variabilidade das propriedades físicas dos estéreis. Tal fato pode ser reforçado, ainda mais, caso o método de deposição ou de disposição utilizado seja de “ponta de aterro” (método descendente).

Segundo Caruccio *et al.* (1984), estes sistemas de escoamento em subsuperfície podem apresentar características de escoamento completamente distintas (similar ao escoamento em um sistema cárstico), nos quais a água percola por grandes vazios e condutos em regime turbulento ou similar ao escoamento por um meio pouco fraturado de um embasamento rochoso.

No passado, alguns estudos mostravam que o sistema de fluxo no interior das pilhas de estéril era definido por um escoamento em meio de poros médios, similar a um aluvião não consolidado. Entretanto, recentes trabalhos de campo e ensaios realizados em pilhas de estéril indicaram que as suposições anteriores não estavam completamente corretas, já que variações de até duas ordens de grandeza foram encontradas por Hawkins (1998), quando comparados os valores de condutividade hidráulica de regiões próximas ao topo e à fundação da pilha.

Todavia, Rehm *et al.* (1980) e Moran *et al.* (1979) constataram um decréscimo na permeabilidade do estéril com o passar dos anos, o que pode ser explicado pelas diferenças encontradas nas propriedades físicas e químicas das rochas dos locais extraídos. No exemplo descrito por eles, o estéril de carvão (encontrado na porção oeste da lavra) era constituído por cimentos fracos,

tendendo a formar largos vazios. E, para a porção norte da lavra, o estéril possuía materiais argilosos expansivos criando condições para uma menor permeabilidade.

Mais do que isso, Hawkins e Aljoe (1991) relatam que lençóis freáticos múltiplos e temporários nos maciços das pilhas de estéril podem apresentar até mesmo condições extremas – tanto para níveis piezométricos muito baixos como também para níveis de artesianismo – observadas durante eventos isolados de recarga do aquífero. As causas para esses fenômenos podem estar relacionadas à diversidade dos estratos litológicos formados durante a disposição do estéril, sendo comum a predominância de zonas (lentes) compostas por tipos de materiais e características hidráulicas completamente distintas.

Outro fato curioso observado por Phelps (1983) aponta para uma redução generalizada da densidade do material estéril em razão do aumento da profundidade da pilha. Esta ocorrência é justificada pela criação de vazios intersticiais decorrentes do deslizamento de fragmentos maiores para a base da pilha de estéril, formando grandes lacunas e vazios entre esses grandes fragmentos de estéril.

Mesmo assim, com propriedades hidráulicas tão distintas e difíceis de serem caracterizadas, o estéril vem sendo utilizado em maciços de barragem conforme relatado por Filho *et al.* (1991).

Nota-se em diversas minas a céu aberto que o método mais utilizado para a formação das pilhas é o do tipo descendente, o que significa que o material estéril proveniente do avanço da lavra é despejado em “ponta de aterro”. Nessas condições, blocos maiores tendem a rolar para a base do talude, enquanto fragmentos médios e pequenos do estéril tendem a permanecer próximos ao topo (Rehm *et al.*, 1980), formando regiões mal graduadas quanto à classificação granulométrica (Figura 1).



Figura 1 – Material estéril depositado na PDE-05, localizada na mina do Andrade, indicando grande heterogeneidade. Segregação do material disposto devido à conformação da pilha, apresentando blocos maiores na base do talude e fragmentos menores na crista e demais regiões.

2.2. Instabilidade Geotécnica Relacionadas às Condições de Fluxo

No passado, a pouca importância atribuída ao entendimento das condições de fluxo superficial e subterrâneo em pilhas de estéril trouxe consequências graves, a exemplo da ruptura de uma pilha de carvão em Aberfan (South Wales). Conforme relatado por McLean e Johnes (2000) nesta tragédia morreram 144 pessoas, após deslizamento da pilha, momento em que a massa de estéril atingiu 20 casas e uma escola no vilarejo. Segundo Robertson *et al.* (1985) as possíveis causas desse acidente estão relacionadas, principalmente, à saturação do maciço da pilha e da redução dos parâmetros de resistência dos materiais dispostos.

Saturações dessa natureza ocorrem devido ao acúmulo de água no interior da pilha (locais mal drenados), associado às mudanças nas propriedades hidráulicas do estéril (permeabilidade), visto que, a longo prazo, a ação do intemperismo e o carreamento de materiais mais finos do estéril propiciam a formação de regiões de baixa permeabilidade e difíceis para percolação de água.

Outra causa também mencionada por Robertson *et al.* (1985) foi a diminuição nos valores dos parâmetros de resistência do estéril. Dependendo das condições climáticas em que o estéril estiver exposto, mais uma vez, a ação do

intemperismo será responsável pela diminuição da resistência ao longo do tempo, podendo causar eventuais instabilidades geotécnicas.

Modos de ruptura essencialmente causados por influência da água em pilhas de estéril são descritos por Caldwell e Moss (1981), conforme apresentado na Figura 2. Dois processos podem ser enumerados como possíveis agentes causadores da ruptura: (i) elevação da superfície freática no maciço das pilhas e (ii) saturação do talude e fluxo superficial paralelo a sua face.

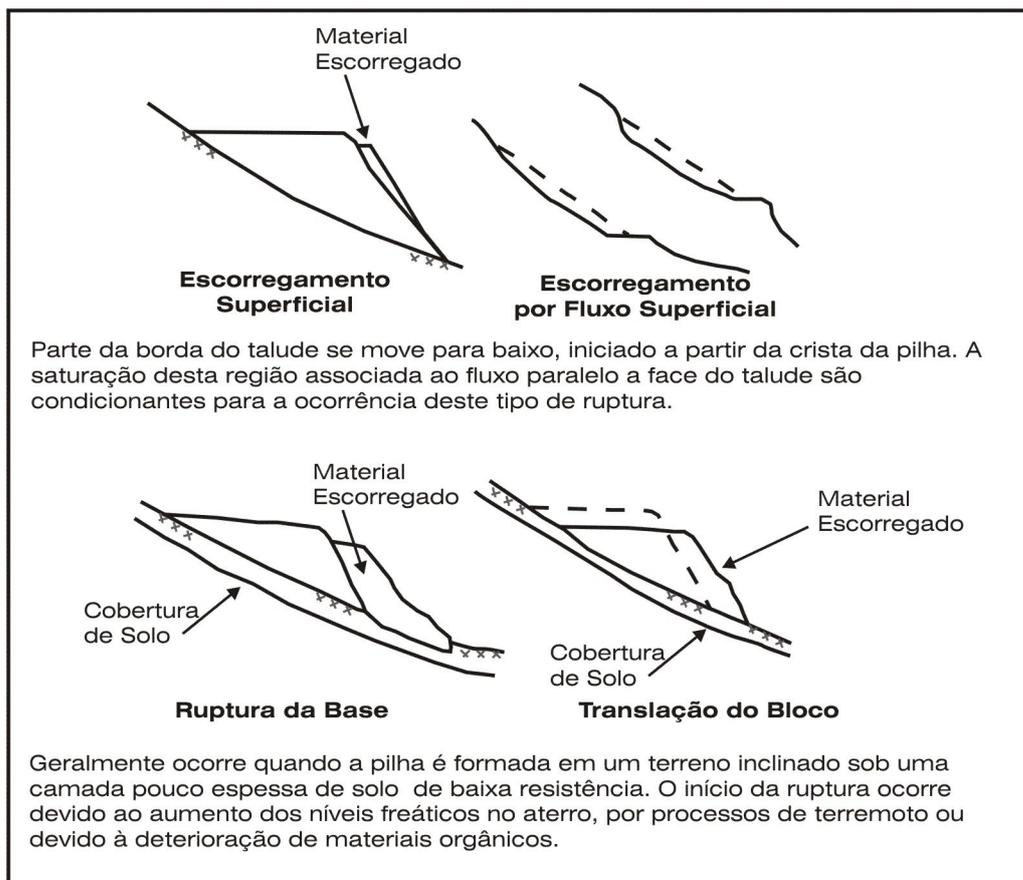


Figura 2 – Modos de ruptura em pilhas de estéril, onde a água é o principal condicionante (adaptado de Caldwell e Moss, 1981).

Grande parte dos problemas de instabilidade geotécnica de taludes de pilhas de estéril, vivenciados por muitas mineradoras, são oriundos do desaguamento inadequado da água superficial e de subsuperfície. Contudo, devido principalmente à ampla diversidade das características físicas do estéril, existem poucas diretrizes funcionais para avaliar o escoamento subterrâneo da água.

Groenewold e Winczewski (1977) observaram que pilhas de estéril de alta transmissividade dispostas sobre superfícies formadas por vales são mais

susceptíveis à subsidência, devido à ocorrência do fenômeno denominado *pipping*⁴, no qual os materiais estéreis granulares finos são carreados em razão do aumento da velocidade da água existente no interior das pilhas.

Contudo, ressalta-se também que, caso o material estéril não tenha sido disposto e revegetado de maneira adequada, em conformidade com as diretrizes estabelecidas nas normas técnicas vigentes,⁵ poder-se-á criar um ambiente favorável à ocorrência de passivos ambientais, como por exemplo, como deslizamentos, carreamento de sólidos para cursos de água e contaminação de solos e aquíferos. Fatores como a topografia da região, intensidade das variáveis climatológicas, tais como precipitação e vento, além das características físicas e químicas do material estéril poderão ainda gerar danos ambientais de maior complexidade.

2.3. Vulnerabilidade à Contaminação

O processo de operação e manutenção de pilhas de estéril vai muito além da estabilidade geotécnica, uma vez que o material estéril encontra-se vulnerável às condições de oxidação, percolação, lixiviação e erosão (Robertson *et al.*, 1985).

O gerenciamento adequado das águas nas pilhas de estéril é fator essencial para minimizar o risco de ocorrência de impactos negativos gerados por estas estruturas. Não raro é a existência de erosões nos taludes das pilhas devido à ação intensa do vento (Schwendiman *et al.*, 1980) e da água (Walters, 1983), porém os processos erosivos são considerados os principais mecanismos de dispersão de contaminantes. A incrementação de medidas mitigadoras para esta ocorrência faz-se obrigatória em novos projetos destas estruturas, frente às exigências da legislação ambiental vigente.

⁴ *Pipping* – fenômeno que ocorre em solos granulares devido à concentração da percolação em zonas mais permeáveis, gerando a ocorrência de tensões efetivas nulas em pontos da superfície de descarga da água subterrânea, ocasionando a erosão progressiva da estrutura (Pinto, 2002).

⁵ Normas técnicas vigentes – atualmente a norma NBR 13029/06 fornece diretrizes para a elaboração e apresentação de projeto de disposição estéril em pilha, no Brasil. Além disso, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2001), através das NRM-01 a NRM-22, apresenta normas reguladoras à mineração. Nos Estados Unidos, a PL 95-97 é uma lei pública para o controle da mineração de superfície (SMCRA, 1977).

Ademais, é de amplo conhecimento que, devido aos episódios de variação do nível de água (zona de flutuação do lençol freático), podem ocorrer reações químicas e físicas nas regiões saturadas e não saturadas do estéril, ocasionando a geração de drenagem ácida (Hawkins, 1998), originando o transporte de contaminantes. Nesse contexto, Robertson *et al.* (1985) indica que medidas de controle e prevenção ao aporte de água no maciço das pilhas com potencial de contaminação são mais eficazes que o próprio controle na saída da água contaminada.

Pilhas de estéril contendo principalmente pirita podem sofrer a oxidação natural dos minerais sulfetados quando expostas à ação combinada da água e oxigênio (Mello e Abrahão, 1998), dando início a geração de drenagem ácida, ou melhor dizendo DAM (drenagem ácida de mina).

A qualidade dos solos e dos recursos hídricos de regiões próximas a minerações nestes casos acaba sendo comprometida seriamente se nenhuma medida mitigadora for efetivamente realizada. E, mesmo existindo materiais de fundação (terreno natural) nas pilhas de estéril que funcionem como uma camada protetora dos agentes contaminadores do solo e da água subterrânea (Haddad, 1991) tais como estes, a oxidação dos sulfetos e conseqüente geração de DAM será inevitável e fatalmente acabará por escoar até um meio permeável ou curso de água localizado a jusante do depósito.

Cada vez mais, novas tecnologias de tratamento de DAM têm surgido no âmbito mundial, seja por neutralização empregando aditivos químicos alcalinos (sistemas ativos) ou por descontaminação da DAM em banhados ou sistemas de terras úmidas (sistemas passivos). Entretanto, estes processos ainda ficam a desejar devendo, no futuro, enfrentar os desafios derivados dos grandes volumes envolvidos em pilhas de estéril associados às condições climáticas específicas do ambiente brasileiro.

Além disso, a demanda do mercado consumidor segue em contramão à urgente necessidade de desenvolver novas tecnologias para amenizar, e até mesmo extinguir, os passivos ambientais gerados dentro de um marco de desenvolvimento que visa a sustentabilidade da sociedade (Menezes *et al.*, 2004).