

Revisão de Metodologia para Dimensionamento de Drenos de Fundo de Pilhas de Estéril

Aloysio Portugal Maia Saliba

Depto. Eng. Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, asaliba@ehr.ufmg.br

Fernando Portugal Maia Saliba

Tec3, Belo Horizonte, Brasil, fsaliba@tec3engenharia.com.br

Evandro de Ávila Gimenes

Consultor Geotécnico, Vancouver, Canadá, evandro_gimenes@yahoo.com

José Mário Queiroga Mafra

VOGBR, Belo Horizonte, Brasil, jmafra@vogbr.com.br

Márcio Figueiredo de Resende

Potamos, Belo Horizonte, Brasil, marcio.resende@potamos.com.br

Enicarlos Pereira Gonçalves

Núcleo de Geotecnia, UFOP, Ouro Preto, Brasil, enicarlos_goncalves@yahoo.com.br

RESUMO: Nas operações de mineração são gerados materiais estéreis, que são armazenados empilhados. A demanda por minerais tem feito com que essas pilhas apresentem porte significativo, e os custos envolvidos em sua operação têm representado parcela importante dos custos de operação da mina, demandando esforços no aperfeiçoamento dos critérios de dimensionamento e segurança. Saliba et al (2010) apresentaram metodologia para dimensionamento de drenos de fundo em pilhas de estéril a partir da aplicação de um balanço hídrico e de equações de fluxo apropriadas a cada regime de escoamento, admitindo o depósito composto por material homogêneo e isotrópico, para determinar as contribuições ao dreno de fundo pela pilha e pelo aquífero. Toda a vazão de contribuição seria imediatamente conduzida pelo sistema de drenos, desconsiderando qualquer capacidade de armazenamento nos poros do material depositado e admitindo que o fluxo de água na pilha seria totalmente coletado pelo sistema de drenos de fundo. No entanto, surgências nas faces das pilhas reais são comuns, mesmo em funcionamento adequado dos drenos de fundo, e atribuídas à anisotropia criada pelo método de disposição ascendente e à distância a percorrer pelo fluxo, que pode ser menor em direção à face que em direção ao dreno. Este trabalho propõe alterações nessa metodologia, resultado de sua aplicação em diversos projetos de drenagem interna de pilhas de estéril. Recomenda-se que a recarga anual média, e não a recarga mensal média máxima, seja aplicada para o dimensionamento dos drenos de fundo. São feitas observações relativas aos critérios de dimensionamento, tais como a consideração da capacidade de armazenamento de água nos poros dos materiais depositados, a admissibilidade do estabelecimento de uma superfície freática máxima para efeitos de estimativa da capacidade da seção drenante, e a avaliação da anisotropia e heterogeneidade do material depositado. Um estudo de caso é desenvolvido para um depósito existente, comparando-se valores calculados e medidos na saída do dreno.

PALAVRAS-CHAVE: Pilhas de Estéril, Drenos de fundo, Dimensionamento.

1 INTRODUÇÃO

Nas operações da indústria extrativa mineral são gerados produtos e materiais estéreis, os quais devem ser adequadamente dispostos, sendo usualmente empilhados. A demanda por minerais observada nos últimos anos tem feito com que esses depósitos apresentem centenas de hectares de área de contribuição, altura máxima de centenas de metros e centenas de milhões de metros cúbicos de capacidade.

Ao atingirem esse porte, aumentaram também a necessidade de aperfeiçoamento dos critérios de dimensionamento e segurança. Com a eliminação da limitação de altura construtiva para as pilhas e a adoção de critérios redundantes, verifica-se, em alguns casos, a existência de um sistema de drenagem interna robusto, mas com vazão modesta se comparada àquela fruto do dimensionamento.

Ao atingirem esse porte, os custos envolvidos na operação dessas estruturas têm representado parcela importante dos custos de operação da mina, sendo necessários esforços no aperfeiçoamento dos critérios de dimensionamento e segurança.

Saliba *et al* (2010) apresentaram metodologia para dimensionamento de drenos de fundo em pilhas de estéril, em que se propunha a aplicação de um balanço hídrico e de equações de fluxo apropriadas ao regime de fluxo em questão. Naquele trabalho, o depósito era composto por um material homogêneo e isotrópico, sendo determinadas as recargas pela pilha e a contribuição de águas subterrâneas para o sistema de drenos de fundo.

Segundo a metodologia proposta naquele trabalho, toda a vazão de contribuição deveria ser imediatamente desaguada pelo sistema de drenos, desconsiderando qualquer capacidade de armazenamento de água nos poros do material depositado. Além disso, ao considerar o meio isotrópico, admitiu-se que o fluxo de água na pilha seria totalmente coletado pelo sistema de drenos de fundo.

No entanto, surgências nas faces das pilhas reais são observadas, mesmo em funcionamento adequado dos drenos de fundo, sendo decorrentes da anisotropia criada durante a disposição. Essa anisotropia é ainda potencializada pela variação da granulometria

do estéril originado nas diferentes frentes de lavra, pela segregação física durante a construção de cada bancada, pela construção de camada de fôrro para melhoria da capacidade de suporte à tráfego de equipamentos durante os períodos chuvosos ou mesmo pela utilização de materiais de baixa permeabilidade (colúvio, por exemplo) disposto nas primeiras camadas sobre o sistema de drenagem interna para protegê-lo do tráfego de equipamentos pesados. Tais fatores criam caminhos preferenciais paralelos às camadas de disposição e resultam no aparecimento de surgências na face dos taludes do depósito.

Após seis anos de aplicação da metodologia proposta por Saliba *et al* (2010) e da observação dos aspectos supracitados, este trabalho propõe algumas alterações importantes, resultado de sua aplicação em diversos projetos de drenagem interna de pilhas de estéril.

2 A EXPERIÊNCIA CANADENSE

Tendo em vista a relevante experiência canadense no empilhamento de materiais estéreis, realizou-se uma breve revisão bibliográfica da literatura técnica proveniente da Província da Columbia Britânica a respeito dos princípios de projeto relacionados à drenagem de fundo destes depósitos.

Deve-se notar que as condicionantes de projeto que se aplicam àquela região do globo são diferentes das condições hidrológicas e geotécnicas existentes em nosso país. No entanto, é possível relatar os aspectos que se julgam mais condizentes com a realidade de clima e geologia brasileiros.

As normas técnicas canadenses (Piteau, 1991) que governam o projeto de sistemas de drenagem de pilhas procuram atender critérios de cheias ou precipitações de projeto, concomitante com uma descarga de efluente com boa qualidade de água. O projeto necessita de dados fidedignos de precipitações e cheias extremas. Além disso, o movimento da água no interior e ao redor das pilhas de estéril constituem o caminho de fluxo para sedimentos e outros contaminantes migrarem da pilha para o meio ambiente, daí a importância de uma abordagem geral.

Os principais fatores condicionantes do movimento de água no interior de uma pilha de estéril incluem: a) infiltração; b) escoamento superficial; c) evaporação; d) condutividades hidráulicas e gradientes hidráulicos; e) estratificação ou canalização de fluxo no interior da pilha; f) precipitação ou dissolução química dos minerais, que podem condicionar o fluxo.

Lighthall *et al* (1985) resumem a prática canadense nos projetos de mineração de carvão e metais com utilização de enrocamento nos drenos de fundo. Na realidade os casos relatados em sua maioria eram de pilhas relativamente pequenas em relação à ocupação do vale, funcionando praticamente como um barramento de enrocamento com fluxo interno. Ou seja a capacidade do dreno de fundo deve conduzir as cheias de montante da pilha, além da vazão de infiltração. Tipicamente os drenos nesta prática de engenharia apresentam capacidade para vazões na faixa de 30 m³/s e seções típicas nos drenos da ordem de 400 m² de área.

Em geral, nos projetos canadenses considera-se vazão de 200 anos de recorrência durante operação e vazão máxima provável no caso de fechamento da pilha, com atenuação do efeito do fluxo através do enrocamento. A saída do dreno é dimensionada para descarregar a vazão de projeto sem comprometer a estabilidade de pé da pilha. Caso as vazões não possam ser acomodadas pelo dreno de fundo sem um alteamento da linha freática a montante, canais de desvio são escavados lateralmente à pilha.

Um dos principais trabalhos científicos que se preocuparam com os aspectos hidrogeológicos em pilhas de estéril foi realizado na Universidade de *British Columbia* (Smith *et al*, 1995). Trata-se de um de um esforço de colaboração entre universidade, empresas de mineração e Departamento de Recursos Minerais, Petróleo e Energia da *Columbia Britânica*, em que foram analisados dados de monitoramento de fluxo de água no interior de pilhas de estéril. Além dos dados de caracterização hidrológica e geotécnica, dados de piezometria e vazão de saída dos drenos de fundo foram analisados.

Um dos aspectos interessantes do trabalho

relaciona-se à classificação de modelos hidroestratigráficos das pilhas estudadas, que dependem dos tipos de estéril e dos métodos construtivos adotados. Esta metodologia permite diferenciar comportamentos que vão desde fluxo em meio poroso em materiais mais finos (cascalho arenoso) até a condução do fluxo em materiais de granulometria maior.

A limitação mais significativa do banco de dados coletado foi que em nenhuma das minas analisadas conseguiu-se um registro completo de parâmetros necessários para caracterização hidrológica, revelando a dificuldade de se generalizar os comportamentos de fluxo. Na opinião dos autores, a fim de melhor se entender a hidrologia de uma pilha de estéril seria necessário medir, em ordem de prioridade:

- Perfis de umidade e temperatura na zona não saturada;
- Elevação do nível de água;
- Vazões de descarga na saída dos drenos de fundo; e ainda
- Precipitação e temperatura do ar.

Exceto pelos perfis de umidade e temperatura, já é prática corrente no Brasil realizar o monitoramento das demais variáveis, o que torna viável efetuar o balanço hídrico dos depósitos para determinar possíveis vazões de descarga nos drenos. No entanto, iniciativas de divulgação desses dados ainda são escassas.

3 METODOLOGIA

Saliba *et al* (2010) indicam dois regimes de escoamento podem ocorrer nos fluxos coletados por drenos de uma pilha de estéril: regimes laminar e turbulento, definidos a partir das condições de declividade e do material drenante.

No regime laminar, em que a Lei de Darcy é válida, a vazão conduzida é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico:

$$Q = k i A \quad (1)$$

na qual Q é a vazão conduzida pelo dreno (m³/s), k é a condutividade hidráulica do meio poroso (m/s), i é o gradiente hidráulico (m/m), usualmente admitido igual à declividade do fundo (regime permanente) e A é a área da

seção transversal do dreno (m²).

No regime turbulento, a velocidade média de fluxo turbulento (v_T) assume a forma (Saliba *et al*, 2010):

$$v_T = k_T i^n \quad (2)$$

na qual i é o gradiente hidráulico (m/m), k_T é a condutividade no fluxo turbulento (L/T) e n é um expoente que tende a 0,5. Uma das equações dessa forma utilizadas no cálculo da velocidade de escoamento em drenos de enrocamento é a equação de Wilkins (Li *et al*, 1998):

$$v_v = W R_h^{0,5} i^{0,54} \quad (3)$$

na qual v_v é a velocidade efetiva do escoamento (m/s), W é uma constante igual a 5,25 m^{0,5}/s, R_h é raio hidráulico médio (m), definido como razão entre o volume dos vazios e área superficial das partículas. Se compararmos a equação [3] e a Lei de Darcy, o termo $W R_h^{0,5}$ pode ser entendido como uma “permeabilidade em regime turbulento” (k_T).

Li *et al* (1998) observaram que o regime de fluxo era turbulento quando o número de Reynolds (Re) era maior que 200. O número de Reynolds do escoamento que ocorre nos vazios do dreno pode ser estimado a partir da equação (Li *et al*, 1998):

$$R_e = \frac{v_v R_h}{\nu} \quad (5)$$

na qual v_v é a velocidade efetiva (m/s) e ν é a viscosidade cinemática da água, da ordem de 10⁻⁶ m²/s nas condições de operação dos drenos de fundo (20°C).

Considerando que a massa de blocos seja igual a um conjunto de esferas Taylor (1948 apud Li *et al*., 1998) propôs que:

$$R_h = \frac{e D_{50}}{6r_E} \quad (6)$$

na qual e é o índice de vazios do maciço formado pelos blocos de rocha ou cascalho, D_{50} é o diâmetro representativo do enrocamento, r_E é o fator de forma, igual a 1 para enrocamento composto por esferas. No caso de enrocamento

anguloso como o resultante de britagem, o fator de forma (r_E) pode ser calculado por:

$$r_E = \frac{d A_{sup}}{6V_{bloco}} \quad (7)$$

na qual d é o diâmetro da esfera (m), A_{sup} é a área superficial do bloco de rocha (πd^2 para esfera, em m²) e V_{bloco} é o volume do bloco de rocha área superficial do bloco ($\pi d^3/6$ para esfera, em m³).

Uma vez classificado o escoamento, Saliba *et al* (2010) dimensionam o dreno a partir da condutividade hidráulica do material drenante, do gradiente hidráulico, assumido igual ao do terreno, e das vazões de projeto.

Segundo Penman (1971 apud Cruz *et al*, 2009), quando a permeabilidade do material drenante é menor ou igual a 10⁻⁵ m/s, deve-se analisar o fluxo pela equação de Darcy. Caso o material drenante possua mais de 30% de partículas passantes na peneira de 1”, deve ser tratado como solo e o fluxo através dos vazios estimado pela equação [1] (Leps, 1973). A Tabela 1 apresenta alguns valores do termo $W R_h^{0,5}$ da equação [3] para alguns diâmetros comumente empregados nos materiais drenantes.

Tabela 1. “Permeabilidades” em regime turbulento estimadas pela Equação [3].

D_{50} (mm)	e	n	R_h (mm)	k_T (m/s)
19,1	0,20	0,17	2,3	0,25
50,8	0,20	0,17	6,1	0,41
152,4	0,23	0,19	19,1	0,71
203,2	0,23	0,19	24,4	0,81
609,6	0,24	0,19	79,0	1,47
1219,2	0,25	0,20	163,3	2,13

Fonte: Leps, 1973.

A premissa de que o gradiente hidráulico do dreno deve ficar restrito à declividade do dreno tem resultado em drenos excessivamente grandes. Isto porque, nesta hipótese, admite-se que toda a vazão coletada precisa ser conduzida pelo dreno, sem admitir que possa haver armazenamento na pilha. Considerando as condutividades hidráulicas dos materiais que compõem a maioria das pilhas de estéril, em que predominam solos finos, dificilmente não haverá armazenamento na pilha.

Mesmo em sistemas de drenagem interna de barragens, que são estruturas muito mais críticas quanto a falhas nesses sistemas, admite-se que o gradiente hidráulico do dreno pode chegar a 10%. Essa premissa poderia ser adotada no dimensionamento de drenos de fundo de pilhas de estéril, principalmente nas seções mais próximas à saída do dreno, em que as declividades do terreno se aproximam de valores da ordem de 1%, e exigindo seções drenantes significativas.

Em relação às vazões de contribuição, Saliba et al (2010) propõe a utilização de um balanço hídrico, em que se calculam as recargas nas áreas a montante e nas áreas de pilha, que são totalmente direcionadas ao dreno. A essas vazões aplicam-se fatores de segurança, cujos valores máximos sugeridos são iguais a 2,5.

No entanto, Saliba et al (2010) sugerem utilizar a recarga mensal máxima, o que novamente desconsidera fatores como o percurso até o dreno, a possibilidade de armazenamento no depósito, dentre outros. Propõe-se aqui aplicar esse balanço hídrico no projeto dos drenos de fundo, mas que as recargas utilizadas para estimativa das vazões de projeto sejam as recargas anuais médias, mantendo-se os fatores de segurança na ordem de 2,5.

4 ESTUDO DE CASO

Para avaliar a adequação das alterações, propostas, foram avaliados dados de uma pilha de disposição de estéril existente em Minas Gerais, na região do Quadrilátero Ferrífero. Esse depósito vem sendo monitorado desde 2006, mas o período de dados comum aos medidores de nível de água instalados abrangem o período 2009-2014. Neste período, a pluviometria local variou entre 1331,6 mm anuais a 2127,1 mm anuais, sendo o valor médio igual a 1520,9 mm anuais para o período de 1997 a 2015.

Embora o período de dados analisado tenha apresentado variações significativas no regime pluviométrico, as vazões monitoradas em vertedor triangular, instalado logo a jusante da saída do dreno de fundo da estrutura manteve-se praticamente constante (Figura 1). Vale lembrar

que parte desse comportamento decorre da régua de leitura utilizada, graduada a cada centímetro.

Todavia, apresentam-se também na figura as margens de erro da medição (linhas pontilhadas finas), iguais a cerca de 3 m³/h para erro de leitura igual a 5 mm (metade da menor divisão da régua ou 10 mm), na faixa de leitura das vazões observadas (14 cm). Apresentam-se ainda, no eixo horizontal superior, os valores das precipitações totais anuais.

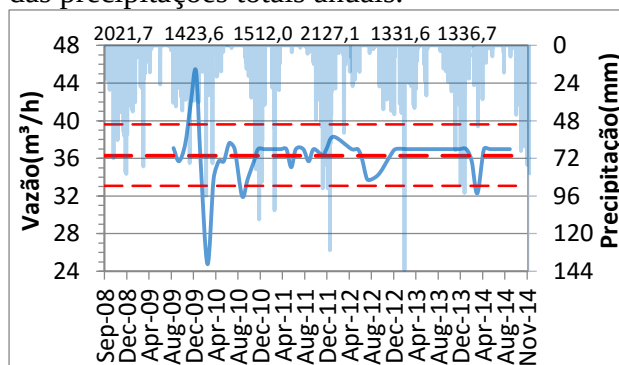


Figura 1 – Evolução das vazões monitoradas na saída do dreno de fundo e precipitações anuais observadas.

Na Figura 1 as vazões apresentaram-se praticamente constantes, iguais ao valor médio de 36,2 m³/h, o que corresponderia a uma recarga anual média igual a 239,3 mm para a área de drenagem em questão (129,1 ha), ou 15,9% da precipitação anual média observada no período (1546,2 mm). Este comportamento reforça a tese de que é a recarga anual e não a máxima mensal que deve ser utilizada no dimensionamento dos drenos de fundo.

Exceto no primeiro ano, em que houve oscilações apreciáveis das leituras (valores mínimos de 24,7 m³/h e 45,4 m³/h), de origem desconhecida, as vazões variaram dentro da margem de erro do medidor. É interessante notar que a vazão máxima apresentou-se 25% superior à média.

Nesse mesmo período, os níveis de água armazenados nas porções mais altas da pilha sofreram acréscimo (INA01 e INA02), conforme apresetado na Figura 2, enquanto os níveis nas porções mais baixas, que já se encontravam perto do seu limite de extravasamento, apresentaram variação sazonal nos níveis freáticos (INA03).

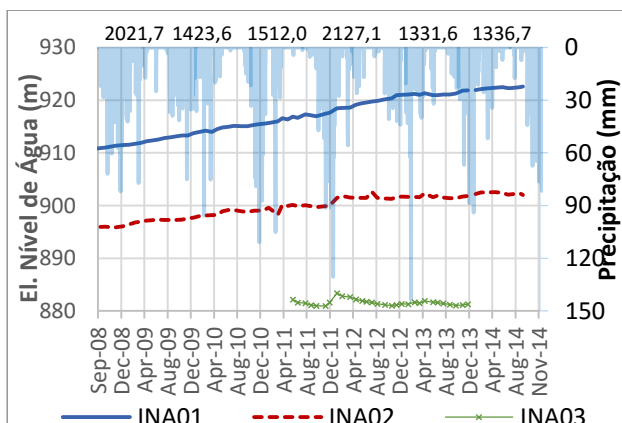


Figura 2 – Evolução dos níveis de água monitorados na seção crítica do depósito (eixo do dreno) e precipitações anuais observadas.

Na Figura 2 percebe-se que o armazenamento hídrico no depósito nunca foi nulo. A partir das distâncias horizontais entre esses instrumentos (104 m e 54 m), obtêm-se valores de gradiente hidráulico que variam entre 16% e 38% (Figura 3).

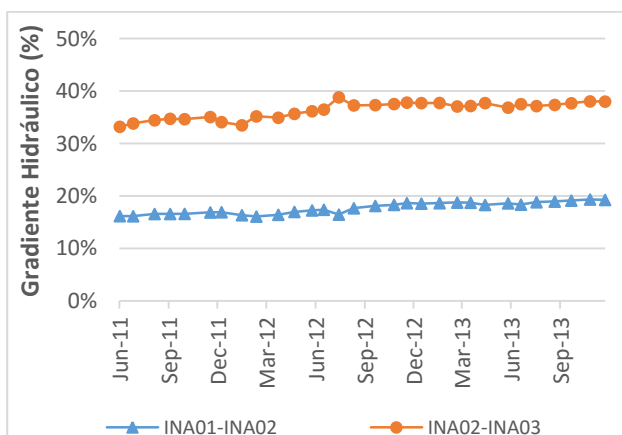


Figura 3 – Evolução dos gradientes hidráulicos (%) entre os instrumentos avaliados para o período comum de observação (2011-2013).

Ainda assim o depósito tem se mostrado estável, com fator de segurança dentro dos valores prescritos para condições de operação ($FS \geq 1,3$). Este aspecto reforça a possibilidade de adotar gradientes na saída dos drenos superiores àqueles decorrentes da topografia como, por exemplo, o valor de 10%.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho propõe um aperfeiçoamento na metodologia proposta por Saliba *et al* (2010) para dimensionamento de drenos de fundo de pilhas de estéril.

As melhorias propostas residem basicamente na utilização da recarga anual média em detrimento da máxima mensal e da proposta de consideração do armazenamento na pilha pela adoção de um gradiente hidráulico mínimo de 10% na saída do dreno.

Dados de monitoramento de pilhas existentes, que se encontram estáveis e com comportamento adequado, indicam que essas considerações são aceitáveis e podem resultar no dimensionamento econômico e ainda seguro dos drenos de fundo dessas estruturas.

REFERÊNCIAS

- Cruz, P.T., Materon, B., Freitas, M. (2009). Barragens de Enrocamento com Face de Concreto. Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil. 448 p.
- Leps, T. M. (1973). Flow through rockfill. In: Hirschfeld, R. C. Poulos, S. J. (ed.), *Embankment Dam Engineering. Casagrande Volume*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1973. p. 87-105.
- Li, B., Garga, V. K., Davies, M. H. (1998). Relationships for non-Darcy flow in Rockfill. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 124, n. 2. p. 206-212.
- Lighthall, P.C., C.D. Sellars and W.D Burton (1985). Design of Waste Dumps with Flow-Through Rock Drains. Proceedings of the 9th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium, Kamloops, BC, 1985.
- Piteau Associates Engineering. (1991). Investigation and Design of Mine Dumps Interim Guidelines. Prepared for the British Columbia Mine Dump Committee, May 1991.
- Saliba, A.P.M., Gimenez, E. A., Mafra, J. Q. M., Resende, M.F. (2010). Metodologia para dimensionamento de drenos de fundo de pilhas de estéril. *COBRAMSEG 2010*. Associação Brasileira de Engenharia Geotécnica e Mecânica dos Solos – ABMS, Gramado, 2010.
- Smith, L., López, D. L., Beckie, R., Morin, K., Dawson, R. & Price, W. (1995). Hydrogeology of Waste Rock Dumps. Final Report to Department of Natural Resources. Canada, July 1995.