6 Conclusões e sugestões

6.1. Conclusões

Um dos aspectos mais importantes do projeto de uma pilha para lixiviação de minérios é a avaliação da posição da linha freática a partir da base de revestimento. A zona de saturação não deve ser maior do que a espessura da(s) camada(s) de proteção do revestimento, sendo geralmente inferior pois devem ser levadas em consideração a ocorrências de chuvas e, em instalações mais modernas, com a introdução de processos bio-lixiviação, a presença de tubulação de aeração, próxima à base da pilha e que aceleram o processo de lixiviação em presença de oxigênio. É evidente que neste caso estas tubulações devem estar resguardadas da possibilidade de serem atingidas pela zona de saturação da solução ácida.

Nos casos do fluxo examinado neste trabalho, verificou-se, como esperado, que a posição da linha freática calculada por formulação analítica 1D é conservadora em relação à obtida pela análise 2D de fluxo não-confinado considerando a condição seco/saturado (tabela 5.4). Igualmente, constatou-se que considerando fluxo não saturado a posição da linha freática teve a tendência de elevar-se em relação aos resultados numéricos do material sem efeitos de sucção (tabelas 5.3 e 5.6). A solução 1D analítica, quando comparada com este último caso, subestimou a altura de saturação quando o coeficiente de permeabilidade saturado da camada 1 de proteção do revestimento foi admitido como $k = 2,53 \times 10^{-4}$ cm/s.

Das análises efetuadas variando-se os coeficientes de permeabilidade das camadas de proteção, bem como a vazão de aplicação da solução de lixiviação no topo da camada, constatou-se que a função de condutividade hidráulica da camada 1 de proteção do revestimento é o parâmetro que mais afeta a posição da linha freática.

Deve-se também observar que a altura de saturação na região dos taludes da pilha tende a valores muito baixos, como pode ser observado de várias figuras do capítulo 5.

Outro aspecto fundamental do projeto de pilhas de lixiviação diz respeito à estabilidade dos taludes, visto que a altura destas estruturas tem atingido valores consideráveis e, na América do Sul, são principalmente construídas nas províncias ricas em minério de cobre do sul do Peru e norte do Chile mas também zonas de alta atividade sísmica.

Das análises executadas neste trabalho constata-se que para a condição estática os valores dos fatores de segurança obtidos através de análises simples e rápidas por equilíbrio limite podem ter a mesma precisão do que os computados por uma metodologia mais complexa e demorada como a simulação da ruptura pelo método dos elementos finitos. A vantagem da aplicação do MEF é a possibilidade de simular totalmente o mecanismo de ruptura não necessitando de potenciais superfícies de ruptura pré-definidas como os métodos de equilíbrio limite, distinguindo, por exemplo, taludes formados por processos de escavação ou aterro. Nos casos analisados, constata-se que o valor do fator de segurança determinado pelo método dos elementos finitos ($FS = 1,60$) é bastante próxima dos calculados por equilíbrio limite para as superfícies de ruptura composta e plana, e que a potencial superfície de ruptura em ambos os tipos de análise concordam satisfatoriamente.

Análises pseudo-estáticas considerando valores típicos do coeficiente sísmico horizontal $k_h = 0,10$ e $k_h = 0,20$ (tabelas 5.15 e 5.16) concluem que os fatores de segurança são ligeiramente superiores a 1, ainda estáveis, enquanto que as análises de estabilidade sísmica com base em aplicação indireta do método dos elementos finitos (equilíbrio limite aperfeiçoado) apresentam valores mínimos inferiores a 1. Este fato não significa, entretanto, a ruptura do talude porque, de modo diferente do que ocorre no método pseudo-estático, o sentido da aceleração é revertido no instante seguinte e o fator de segurança volta a incrementar.

A ocorrência de eventuais fatores de segurança menores do que 1, durante a análise de estabilidade sísmica, são indicações da ocorrência de deslocamentos permanentes (método de Newmark, 1965) que se não chegam a comprometer a estabilidade do talude podem comprometer sua servicibilidade por deformações excessivas.

6.2. Sugestões

Como sugestões para trabalhos futuros na área de investigação do comportamento de pilhas de lixiviação de cobre sugere-se:

- a) análise do desenvolvimento de poropressões gerados por sismos, em materiais parcialmente saturados, e a possibilidade do desenvolvimento do fenômeno de liquefação dinâmica;
- b) análise de fluxo considerando injeção de ar comprimido (biolixiviação) em pilhas para acelerar o processo de lixiviação.