

# 1 Introdução

## 1.1 Definição do Problema

Devido ao tamanho das jazidas de minério existentes nas minas a céu aberto, grandes alturas nos taludes finais destas escavações podem ser atingidas (Chuquicamata em Chile com 850.0 m (Wikipédia, 2009), Cerro de Pasco em Perú com 380.0 m (El Comercio, 2009)). A pesquisa contínua de minérios faz com que as escavações aumentem a sua profundidade em consequência de um aumento de reservas. Isto pode trazer problemas de estabilidade nos taludes finais da escavação. A inclinação final de um talude é estimada para prevenir falhas no maciço rochoso, sendo dependente das propriedades geomecânicas do maciço rochoso. O ângulo de inclinação tem um impacto econômico direto no lucro de uma empresa. Altos ângulos de inclinação permitem a recuperação do minério com menor remoção de material estéril, mas, envolvem também problemas de estabilidade. Este ângulo, por sua vez, depende de: presença de estradas ou rampas necessárias para o transporte do mineiro, danos no maciço rochoso pelas explosões, qualidade do minério e as condições econômicas. A figura 1.1 mostra a seção típica da geometria de um talude de mineração a céu aberto. O talude final da escavação é composto de vários taludes de menor tamanho chamados de bancadas. Estas bancadas geralmente têm o seu ângulo de inclinação maior que o ângulo de inclinação do talude final. As estruturas geológicas, chamadas descontinuidades, condicionam o comportamento resistente e de deformação do maciço rochoso, além de influir em grande medida na condutividade hidráulica. Estas descontinuidades podem ser de tamanho pequeno (micro-descontinuidades menor a 10 mm) ou de grande tamanho (vários km). A figura 1.2 mostra três cenários diferentes para um maciço rochoso com o mesmo grau de fraturamento. Conforme aumenta o tamanho da escala, o número de fraturas contidas dentro da região aumenta. O número de fraturas pode ser tão grande quando aumenta a escala, que o meio poderia ser considerado contínuo (figura 1.2c). A ruptura de um talude, controlada pelas estruturas geológicas contidas nele, é diferente para cada

condição. Assim, em taludes com descontinuidades de grande persistência ou taludes de pequena altura, a ruptura planar, em cunhas e, eventualmente o tombamento podem acontecer. Quando a persistência é pequena com relação ao tamanho do talude, os mecanismos de ruptura são mais complexos e envolvem ruptura nas fraturas e pela rocha intacta. Das figuras 1.2a e 1.2b pode-se deduzir que para a ruptura daqueles taludes acontecer, a superfície tem que ser formada pela combinação de descontinuidades pré-existentes e por fraturas através da rocha intacta. A propagação de uma fratura através da rocha intacta se produz como conseqüência do movimento relativo das suas superfícies. Quando uma fratura se propaga, esta nova fratura gerada pode se conectar com uma outra descontinuidade pré-existente ou com a propagação de uma outra descontinuidade próxima a ela. Este mecanismo de conexão de descontinuidades pela propagação destas é chamada de *coalescência*. O *step-path* é um mecanismo de ruptura de taludes em que a superfície de ruptura é formada por descontinuidades pré-existentes unidas por *coalescências* entre elas.

(Sjöberg, 1996).

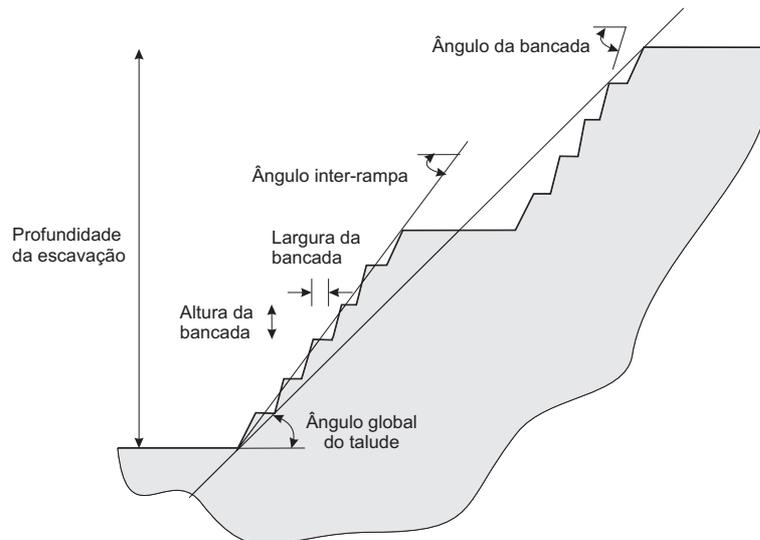


Figura 1.1: Geometria típica de um talude de mineração (Wyllie & Mah, 2005).

O Step-Path é um mecanismo de difícil avaliação. A incerteza da forma e posição da superfície de ruptura, assim como das estruturas geológicas contidas dentro dela faz que a sua avaliação e a determinação de um fator de segurança seja pouco confiável. Nos métodos de determinação do fator de segurança para este tipo de ruptura, como o equilíbrio limite (Jennings, 1970), ou os probabilísticos (Baczynski, 2000) e (Miller *et al*, 2004), utilizam de uma superfície equivalente de ruptura (utilizado somente para avaliações bidimension-

ais). Esta superfície de ruptura equivalente, no caso de retro-análises, poderia ser identificada, mas, no caso da avaliação da estabilidade de taludes, a identificação desta superfície é incerta, podendo levar a erros nas análises.

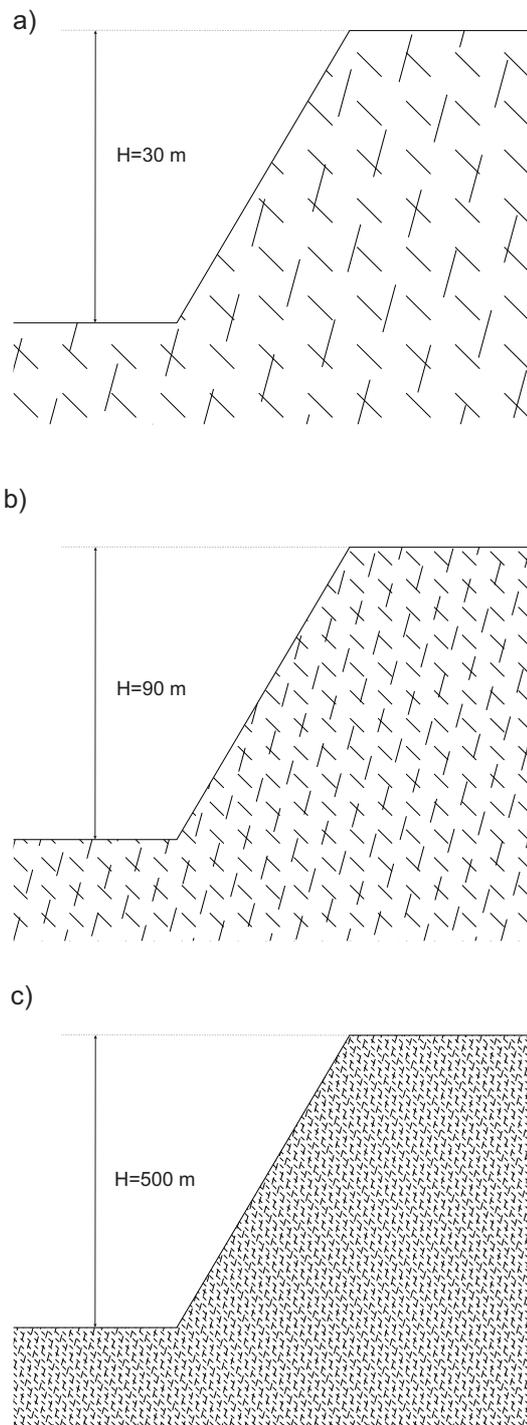


Figura 1.2: Taludes de diferentes alturas com dois sistemas de descontinuidades. As fraturas tem o mesmo tamanho e espaçamento em todos os casos (Sjöberg, 1996).

Estudos numéricos de estabilidade deste mecanismo de ruptura ainda

estão em andamento, existindo pouca informação. A dificuldade de criar um modelo constitutivo que represente um maciço rochoso, dificulta o desenvolvimento do estudo deste problema pelo método dos elementos finitos. A vantagem do Método dos Elementos Discretos é a possibilidade de modelar um maciço rochoso fraturado, permitindo estudar os diferentes mecanismos de ruptura que podem se apresentar. Os trabalhos de Wang (Wang *et al*, 2003) e Vyazmensky (Vyazmensky *et al*, 2005) mostram a aplicação do método para representar a influência da persistência das descontinuidades na formação da superfície de ruptura.

O Método dos Elementos Discretos é uma ferramenta computacional na qual um meio ou material é representado por partículas que interagem entre si através dos seus contatos. Estas partículas podem estar ligadas entre elas para representar uma rocha. Se a rocha pode ser representada como a união de várias partículas com uma ligação nos seus contatos e uma fratura definida geometricamente como uma zona sem ligação, a modelagem dos fenômenos de propagação e *coalescência* de fraturas deveria ser passível de reproduzir. Sendo estes fenômenos importantes que acontecem no mecanismo de ruptura tipo Step-Path, o Método dos Elementos Discretos poderia modelar de forma confiável este tipo de ruptura, avaliando a estabilidade do talude. A presente pesquisa avalia a utilização deste método para a solução do problema descrito, considerando que o *step-path* é o tipo de mecanismo de ruptura mais provável, no caso de um talude de grande altura ou com descontinuidades de baixa persistência.

## 1.2

### Objetivo do Trabalho

O objetivo da presente pesquisa é a modelagem do mecanismo de ruptura tipo *step-path* usando o método dos elementos discretos, sendo os seus resultados comparados e discutidos com o equilíbrio limite proposto por Jennings (Jennings, 1970), passando pela modelagem dos fenômenos que acontecem neste tipo de ruptura, como a propagação de descontinuidades e a coalescência destas. Estes últimos fenômenos são modelados inicialmente, visando compreender a resposta do modelo na sua representação, podendo-se compará-los com algumas observações feitas pela mecânica da fratura. A idéia principal é mostrar que o método dos elementos discretos pode ser uma alternativa importante a ser considerada, no momento de avaliar este tipo de ruptura, que é um problema latente em taludes de mineração de grande altura.

### 1.3

#### Estrutura da Pesquisa

Para atingir os objetivos propostos, a pesquisa foi estruturada da forma seguinte:

- O capítulo *I*: Definição do problema e condições para a formação do mecanismo de ruptura tipo *step-path*.
- O capítulo *II*; Apresenta a revisão bibliográfica da influência das descontinuidades na estabilidade de um talude rochoso fraturado. Neste capítulo será abordada a definição dos tipos de descontinuidades que podem se apresentar em um maciço rochoso, a definição das suas propriedades, a influência das descontinuidades na resistência do maciço rochoso e a definição dos tipos de ruptura que podem acontecer em um talude rochoso fraturado.
- O Capítulo *III*: Apresenta a revisão bibliográfica relacionada à mecânica da fratura e ao mecanismo de ruptura tipo *step-path* em taludes rochosos fraturados. Neste capítulo são definidos os conceitos de propagação de fraturas em amostras de rocha submetidas à compressão, a *coalescência* de fraturas e, finalmente é abordada a análise do mecanismo de ruptura tipo *Step-Path*.
- O Capítulo *IV*: Apresenta a definição do Método dos Elementos Discretos.
- O Capítulo *V*: Apresenta o resultado da modelagem bidimensional e tridimensional da propagação e *coalescência* de fissuras em amostras submetidas à compressão, mediante o uso do Método dos Elementos Discretos, e da modelagem bidimensional do mecanismo de ruptura tipo *Step-Path*. É apresentada uma discussão comparando o fator de segurança obtido mediante o método dos elementos discretos, com o método de equilíbrio limite. Finalmente, é apresentada uma modelagem tridimensional da ruptura de um maciço rochoso fraturado.
- O Capítulo *VI*: Apresenta as Conclusões da utilização do método e algumas sugestões para trabalhos futuros.