

6

Conclusões e Sugestões

6.1

Conclusões

O presente trabalho permitiu avaliar o método dos elementos discretos, na modelagem do mecanismo de ruptura tipo *step-path* em maciços rochosos fraturados, propondo uma ferramenta numérica eficaz, para a compreensão deste tipo de problema. Para atingir este objetivo, foram modelados os diferentes fenômenos que acontecem em um material fraturado, como a propagação de descontinuidades e a *coalescência*, em amostras rochosas submetidas a compressão axial. O modelo discreto teve uma boa resposta na representação destes fenômenos para diferentes cenários, com resultados comparáveis com os propostos pela mecânica da fratura. O fato do meio discreto ser representado por partículas rígidas que interagem entre elas, permitiu observar os diferentes tipos de propagação de uma fissura para diferentes níveis de deformação axial. Estes fenômenos foram reproduzidos em uma amostra, mas, também tiveram uma boa representação, quando foi modelado um maciço rochoso. O mecanismo de ruptura tipo *Step-Path*, depende da propagação das descontinuidades do maciço rochoso e da interconexão destas através de *coalescências*, sendo a sua diferença com as modelagens em amostras, somente a escala de trabalho. Com resultados comparáveis com o modelo matemático, proposto por Jennigns (Jennings, 1970) e, a discussão da modelagem tridimensional deste tipo de mecanismo, podem ser propostas as seguintes conclusões para o procedimento de análise descrito:

- a. O Método dos Elementos Discretos permite modelar de forma aceitável uma amostra rochosa, cujos parâmetros de resistência podem ser determinadas mediante simulações de ensaios triaxiais. Duas observações importantes na modelagem de amostras rochosas foram determinadas: uma alta resistência à tração do material e, um baixo ângulo da envoltória de resistência (atrito). Potyondy e Cundall (Potyondy & Cundall, 2003), sugerem entre outras observações que, a diminuição do tamanho das partículas até, tamanhos correspondentes aos grãos dos minerais com-

ponentes das rochas, poderiam melhorar a modelagem. Vários testes feitos durante o desenvolvimento da presente pesquisa, confirmaram em parte esta observação. A diminuição do tamanho da partícula fornece uma melhor informação da curva tensão-deformação e, em consequência, do ângulo de inclinação da curva envoltória. No entanto, o valor da resistência à tração continua sendo alta. Este problema acontece, muito provavelmente, pelo tipo de contato utilizado na modelagem. O contato de ligação paralela (*parallel bond*), tem uma resistência constante tanto na direção normal como na cisalhante, sendo esta última na realidade, dependente da tensão normal aplicada. A criação de um modelo de contato, que considere a variabilidade da resistência cisalhante em função da tensão normal aplicada e, que considere a quebra de grãos quando estes são submetidos a compressão, poderia melhorar a modelagem. Apesar destas limitações, a ruptura da ligação dos contatos e, a propagação destas, é uma vantagem importante, porque permite observar a evolução do dano de um material a diferentes níveis de deformação, podendo ser comparadas com amostras reais.

- b. O ângulo do início da propagação de uma fissura, mostra uma variabilidade que depende da inclinação desta, com referência à direção da carga aplicada. Esta variabilidade, mostrada na figura 3.6, foi comparada com os resultados obtidos pelo método dos elementos discretos para o caso bidimensional (figura 5.10). A comparação mostrou uma tendência similar, no entanto, foi observado uma falta de simetria nas propagações nas pontas da fissura em alguns exemplos. Os tipos de propagação de uma fissura e, a *coalescência* destas, mostrados por Park e Bobet (Park & Bobet, 2009) é o resultado de observações em análises experimentais, onde a análise bidimensional poderia não ser representativa. A modelagem numérica tridimensional seria indicada para resolver este tipo de problema. O resultado obtido das modelagens tridimensionais feitas com o Método dos Elementos Discretos, permitiu representar satisfatoriamente estes fenômenos, permitindo reconhecer (em vários casos), os tipos de fraturas de propagação envolvidas na *coalescência*. A vantagem do modelo, mencionado anteriormente, é permitir observar a evolução da propagação, através da ruptura da ligação paralela dos contatos.
- c. No caso da modelagem da estabilidade de um talude, que pode ser um solo, ou um maciço rochoso, o Método do Incremento da Aceleração da Gravidade, representa uma boa alternativa, para a obtenção de um fator de segurança que possa definir a estabilidade da mesma. Este método deve ser somente aplicável, em condições de tensões totais, onde

a influencia das poro-pressões não é levado em conta e, em ausência de cargas aplicadas. No entanto, esta metodologia tem sido comparada com outros métodos numéricos somente, para o caso bidimensional e, para um meio contínuo. A melhor forma de garantir uma análise de estabilidade em um meio descontínuo e/ou tridimensional utilizando o Método dos Elementos Discretos, é uma boa calibração dos macroparâmetros, representativos do material rochoso e das descontinuidades.

- d. Para o caso da modelagem do mecanismo de ruptura tipo *step-path*, o Método dos Elementos Discretos resulta ser uma ferramenta numérica alternativa, para o análise deste tipo de problema. Na modelagem bidimensional, apresentou uma certa correlação com o análise de estabilidade mediante o equilíbrio limite (Jennings, 1970). A falta de aproximação dos valores do fator de segurança, nos exemplos N° 2, 3 e 4, é devido à formação de fraturas de tração primária nos extremos das descontinuidades. A *coalescência* é produzida pela união de fraturas coplanares secundárias, em contrapondo ao estabelecido por Jennings, que considera na sua primeira formulação (equação 3-9) que, a união das descontinuidades coplanares, acontece somente por ruptura por cisalhamento na rocha intacta. A modelagem confirmou a observação feita por Einstein (Einstein, 1993), que sugere que a ruptura por cisalhamento nas parcelas de rocha intacta, somente acontece em condições de alta tensão normal e, que é muito comum observar na natureza, os tipos de fraturas de propagação e *coalescência* observados na modelagem discreta. A boa aproximação dos resultados do fator de segurança, obtidos para os exemplos N° 5 e 6, é devido a introdução da resistência à tração da rocha intacta dentro da segunda formulação de Jennings (equação 3-12). A *coalescência* neste exemplos foi principalmente de *tipo II*, sendo esta gerada pela união de fraturas por tração primárias. O parâmetro $(1 - k_{\Phi\beta t})$, definido como coeficiente de descontinuidade, introduz o efeito da resistência à tração da rocha intacta dentro da formulação, correspondente às parcelas de rocha entre as descontinuidade, onde acontece a *coalescência*.
- e. Conforme ao mencionado anteriormente, os fenômenos de propagação e *coalescência* de descontinuidades, foram reproduzidos de forma aceitável pelo método dos elementos discretos, de forma bidimensional e tridimensional. No caso do mecanismo de ruptura tipo *step-path*, a falta de pesquisa em análises tridimensionais, não permitiu comparar o valor do fator de segurança obtido com o programa *PFC*. Esta modelagem é importante, porque permite observar uma análise mais real do mecanismo

de ruptura avaliado. Uma descontinuidade, dependendo do seu tamanho e a sua posição dentro do maciço rochoso, pode pertencer a uma parte da superfície de ruptura. Quer dizer que esta superfície pode ser composta de diferentes combinações de descontinuidades segundo a sua posição dentro dela. A geração de uma superfície de ruptura tridimensional feita a partir de análises bidimensionais não necessariamente vai reproduzir a mesma superfície que a gerada no caso do análises tridimensional, porque não é levado em conta a influencia das partículas que atuam fora da seção avaliada.

- f. Finalmente, a potencialidade do método dos elementos discretos, para modelar e avaliar um talude rochoso fraturado, depende da boa calibração das macro-propriedades de resistência para o maciço rochoso e para as descontinuidades e, do tamanho de partícula que permita reproduzir todos os fenômenos de propagação e *coalescência* de descontinuidades, em um tempo computacional ótimo.

6.2 Sugestões

Durante o desenvolvimento da presente pesquisa foram observadas algumas limitações no Método dos Elementos Discretos, o que leva a sugerir o seguinte:

- a. Realizar pesquisas para a obtenção de um tipo de contato que permita melhorar a calibração das macro-propriedades, que leve em conta as propriedades resistentes do material, assim como os valores dos coeficientes de intensidade crítico K_{IC} e K_{IIC} . O tipo de contato mencionado anteriormente, que considere a variabilidade da resistência cisalhante em relação à tensão normal aplicada no contato, poderia ajudar a solucionar este problema.
- b. Implementar um tipo de contato para representar as descontinuidades, fixando os vetores normal e cisalhante dos planos dos contatos associados à descontinuidade, segundo a orientação e mergulho desta. Desta forma, a influencia das partículas na rugosidade da superfície da descontinuidade, seria anulada, podendo-se controlar desta forma a coesão e o atrito dela.
- c. Observou-se também que o tempo computacional de análise no Método dos Elementos Discretos é incrementado altamente para o caso tridimensional. Considerando que para melhorar os resultados, a diminuição do tamanho da partícula garante resultados mais exatos, o tempo computacional seria uma dificuldade para a obtenção destes. Uma alternativa

poderia ser o uso de tamanhos de partículas variáveis, onde as partículas menores estejam posicionadas nas zonas onde é avaliada a ruptura ou é mais provável de acontecer, aumentando de forma gradual quando se afastar desta região, da mesma forma que uma malha de elementos finitos.