



Luis Arnaldo Mejía Camones

**Modelagem do Mecanismo de Ruptura Tipo
Step-Path em Taludes Rochosos Fraturados
Através do Método dos Elementos Discretos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Geotécnica do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio

Orientador : Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Co-Orientador: Prof. Rodrigo Pelucci de Figueiredo

Rio de Janeiro
Março de 2010



Luis Arnaldo Mejía Camones

**Modelagem do Mecanismo de Ruptura Tipo
Step-Path em Taludes Rochosos Fraturados
Através do Método dos Elementos Discretos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Geotécnica do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Orientador

Departamento de Engenharia Civil — PUC-Rio

Prof. Rodrigo Pelucci de Figueiredo

Co-Orientador

Universidade Federal de Ouro Preto — UFOP

Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura

PUC-Rio

Prof. Emilio Velloso Barroso

UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 5 de Março de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Luis Arnaldo Mejía Camones

Graduou-se em Engenharia Geológica na Universidade Nacional de Engenharia (Lima, Perú - 2003). Realizou Especializações em Administração, em Mecânica das Rochas e Geomecânica, aplicadas à escavações subterrâneas. Trabalhou na mineração subterrânea nas áreas de Planejamento Mina, Geologia e Geomecânica. No ano 2008 ingressou ao curso de Mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa da Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Mejía Camones, Luis Arnaldo

Modelagem do Mecanismo de Ruptura Tipo Step-Path em Taludes Rochosos Fraturados Através do Método dos Elementos Discretos / Luis Arnaldo Mejía Camones; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr.; co-orientador: Rodrigo Pelucci de Figueiredo. — 2010.

123 f: il. (color); 30,0 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Step-Path;. 3. Estabilidade de Taludes;. 4. Método dos Elementos Discretos;. 5. Particle Flow Code (PFC);. 6. Coalescência;. 7. Propagação de Fraturas em Rocha.. I. Vargas Jr., Eurípedes do Amaral. II. Figueiredo, Rodrigo Pelucci de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Ao meu filho João Marcelo,

Agradecimentos

A os meus pais e os meus irmãos, pelo imenso apoio e carinho.

A Carla, quem me proporcionou amor e carinho, entregando-me o melhor presente que já recebi: um filho.

A Fernando, Rita e Sencita, por me acolher com muito carinho na sua família.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Ao Professor Eurípedes do A. Vargas Jr, pela sua orientação e ajuda no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Professor Rodrigo Pelucci de Figueiredo, pela sua orientação no desenvolvimento desta pesquisa.

A Raquel Velloso, pela sua valiosa ajuda ao longo deste ano de trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC - Rio pela infra-estrutura e suporte.

Ao Eng. Carlos Vallejo, quem desde o início sempre motivou a minha profissão com a transmissão dos seus conhecimentos.

Ao Eng. Oscar Febres, por estar sempre pendente do meus estudos no Brasil.

Resumo

Mejía Camones, Luis Arnaldo; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral; Figueiredo, Rodrigo Pelucci de. **Modelagem do Mecanismo de Ruptura Tipo Step-Path em Taludes Rochosos Fraturados Através do Método dos Elementos Discretos**. Rio de Janeiro, 2010. 123p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Diferentes mecanismos de ruptura são considerados no momento de avaliar a estabilidade de um maciço rochoso fraturado. Entre estes, os mecanismos de ruptura tipo planar, em cunha e tombamentos têm sido estudados intensivamente, existindo atualmente modelos matemáticos que permitem avaliá-los. Estes mecanismos de ruptura são restritos a taludes pequenos e com fraturas contínuas, nas quais o deslizamento ocorre ao longo destas descontinuidades. Em casos de taludes de grande altura ou quando a persistência das fraturas é pequena em relação à escala do talude, o fraturamento torna-se descontínuo. Neste caso, o mecanismo de ruptura mais provável é o tipo Step-Path, o qual, a superfície de ruptura é formada por fraturas que se propagam através da rocha intacta juntando-se entre elas. Este fenômeno de união de fraturas é chamado de *coalescência*. Análises de estabilidade, como os probabilísticos ou por equilíbrio limite, são usados atualmente para avaliar estes tipos de rupturas, não se tendo ainda o desenvolvimento de um modelo numérico que possa representá-lo e reforçar estas teorias. O presente trabalho avalia o uso do Método dos Elementos Discretos na modelagem do mecanismo de ruptura tipo step-path, realizando uma análise de estabilidade que permita comparar os seus resultados com o método de equilíbrio limite. Foi utilizado o programa *PFC* nas versões *2D* e *3D*, assim como o programa *FracGen* para a geração de fraturas tridimensionais. A análise tridimensional foi feita mediante um acoplamento *PFC3D-FracGen*. A pesquisa inclui a análise e modelagem dos fenômenos de *coalescência* em amostras, assim como a influencia da anisotropia na resistência das rochas em ensaios triaxiais.

Palavras-chave

Step-Path; Estabilidade de Taludes; Método dos Elementos Discretos; Particle Flow Code (PFC); Coalescência; Propagação de Fraturas em Rocha.

Abstract

Mejía Camones, Luis Arnaldo; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral (advisor); Figueiredo, Rodrigo Pelucci de (co-advisor). **Modelling of Step-Path Type Failure Mechanisms in Fractured Rock Slope Using Discrete Elements**. Rio de Janeiro, 2010. 123p. MCs. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Different failure mechanisms are considered when a fractured rock mass is valued. Some of them are being subject of accurate study, like planar failure mechanism, wedges and toppling, which are currently valued by mathematical models. These failure mechanisms are restricted to small slopes and with continue fractures, where the sliding occurs along these discontinuities. To height slopes or when the fracture persistence is smaller than the slope scale, the fracturing becomes discontinuous. In this case, the most probable failure mechanism to happen is the *step-path* type, in which the failure surface is composed by fractures that propagate through the intact rock and that are joined together. This phenomenon of fracture union is known as *coalescence*. Stability analysis, like probability analysis or limit equilibrium analysis are currently utilized to evaluate this kind of failures, but its important to develop a numerical model to represent and reinforce these theories. This work aims to evaluate the use of Discrete Element Method to model *step-path* failure mechanism on a stability analysis and to compare the results with limit equilibrium method. The program used to simulate the slope is *PFC (2D and 3D)* and the program *FracGen* was used to generate three-dimensional fractures. Three-dimensional analysis was done by a coupling between *PFC3D* and *FracGen*. The research includes the analysis and modeling of *coalescence* phenomenon on rock samples, as well as the analysis of the anisotropy influence on rock strength obtained from triaxial tests.

Keywords

Step-Path; Slope Stability; Discrete Elements Method; Particle Flow Code (PFC); Coalescence; Fracture Rock Propagation.

Sumário

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introdução | 15 |
| 1.1 | Definição do Problema | 15 |
| 1.2 | Objetivo do Trabalho | 18 |
| 1.3 | Estrutura da Pesquisa | 19 |
| 2 | As Descontinuidades e a sua Influencia na Estabilidade de um Talude Rochoso | 20 |
| 2.1 | Tipos de Descontinuidades e a suas Propriedades | 20 |
| 2.1.1 | Propriedades das Descontinuidades | 21 |
| 2.1.2 | Grau de Fraturamento de um Maciço Rochoso | 24 |
| 2.2 | Resistência do Maciço Rochoso | 26 |
| 2.2.1 | A Resistência da Rocha Intacta e a Influência da Anisotropia do Material | 27 |
| 2.2.2 | Resistência ao Cisalhamento em Descontinuidades | 29 |
| 2.2.3 | Efeito de Escala | 32 |
| 2.2.4 | Resistência do Maciço Rochoso Fraturado | 33 |
| 2.3 | Tipos e Mecanismos de Ruptura em Taludes Rochosos Fraturados | 35 |
| 2.3.1 | Ruptura por Cisalhamento Planar | 35 |
| 2.3.2 | Ruptura por Cisalhamento Rotacional | 37 |
| 2.3.3 | Deslizamento de Blocos e Tombamento | 38 |
| 3 | Propagação de Fraturas, Coalescência e o Mecanismo de Ruptura tipo Step-Path | 41 |
| 3.1 | Modos de Ruptura | 42 |
| 3.2 | Critério do Início da Propagação de uma Fissura | 43 |
| 3.3 | Propagação e Coalescência | 44 |
| 3.4 | Análise do Mecanismo de Ruptura Tipo Step-Path | 51 |
| 4 | Método dos Elementos Discretos | 58 |
| 4.1 | Introdução | 58 |
| 4.2 | O Programa PFC | 59 |
| 4.3 | Formulação do Método dos Elementos Discretos | 61 |
| 4.3.1 | Lei Força-Deslocamento | 62 |
| 4.3.2 | Modelos Constitutivos de Contato | 66 |
| 4.3.3 | Modelo de Rigidez do Contato | 67 |
| 4.3.4 | Modelo do Deslizamento | 69 |
| 4.3.5 | Modelo de Ligação de Contato | 69 |
| 4.3.6 | Lei de Movimento | 73 |
| 4.4 | Micro e Macro-parâmetros na Modelagem de Ensaios Triaxiais | 74 |
| 5 | Modelagem da Propagação de Fraturas, a Coalescência e o Mecanismo de Ruptura tipo Step-Path Usando o Programa PFC | 77 |
| 5.1 | Geração da Amostra e Obtenção de Macro Propriedades | 77 |
| 5.2 | Critério de Geração de uma Descontinuidade | 82 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 5.3 | Análises da Propagação de uma Fissura e a Coalescência em Amostras de Rocha | 84 |
| 5.4 | Influência da Anisotropia do Material na Resistência da Rocha | 94 |
| 5.5 | Modelagem Bidimensional do Mecanismo de Ruptura Tipo Step-Path | 95 |
| 5.5.1 | Geração do Arranjo de Partículas, Aplicação das Tensões in-situ e Procedimento de Escavação | 95 |
| 5.5.2 | Geração de Fraturas e Modelagem de Coalescência de Fraturas | 97 |
| 5.5.3 | Análise do Fator de Segurança e Validação da Modelagem | 100 |
| 5.6 | O Efeito na Modelagem Tridimensional do Mecanismo de Ruptura Tipo Step-Path | 108 |
| 5.6.1 | Geração do Arranjo de Partículas | 108 |
| 5.6.2 | Geração de Tridimensional de Descontinuidades | 109 |
| 5.6.3 | Superfícies de Ruptura tipo Step-Path encontradas na Modelagem Tridimensional | 111 |
| 6 | Conclusões e Sugestões | 114 |
| 6.1 | Conclusões | 114 |
| 6.2 | Sugestões | 117 |
| | Referências Bibliográficas | 119 |

Lista de figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Geometria típica de um talude de mineração (Wyllie & Mah, 2005). | 16 |
| 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). | 17 |
| 2.1 | Distribuição exponencial negativa de valores de espaçamento de descontinuidades (Hudson & Harrison, 1997) | 22 |
| 2.2 | Descrição das principais propriedades geométricas de um maciço rochoso (Hudson & Harrison, 1997) | 23 |
| 2.3 | Efeito das propriedades das fraturas na estabilidade de um talude rochoso fraturado: (a) J1 com persistência suficiente para formar um bloco com J2, mergulhando no sentido do talude, o deslizamento deste bloco esta condicionado à rugosidade do plano J1; (b) descontinuidades de persistência pequena em relação à altura do talude; formação de blocos pequenos isolados que podem gerar uma ruptura tipo <i>Step-path</i> ; (c) J2 mergulhando no sentido contrario do talude; potencial formação de ruptura por tombamento. Adaptado (Wyllie & Mah, 2005) | 24 |
| 2.4 | Procedimento para a determinação do <i>RQD</i> (Palmstrom, 2005) | 25 |
| 2.5 | a) valores mínimos e máximos de <i>RQD</i> em sondagens com diferentes espaçamentos, b) Três sondagens penetrando uma amostra de rocha em diferentes direções; o <i>RQD</i> varia de 0 a 100 (Palmstrom, 2005) | 26 |
| 2.6 | Critério de ruptura geral em duas dimensões (De Vallejo <i>et al</i> , 2004) | 27 |
| 2.7 | a) Amostra transversalmente isotrópica em compressão triaxial, b) variação da resistência de pico com a direção da tensão principal máxima, segundo o ângulo que a normal faz com o plano de cisalhamento | 29 |
| 2.8 | Critério de ruptura de Patton (Hoek, 2007) | 30 |
| 2.9 | Perfis de rugosidade e o correspondente valor de <i>JRC</i> . Os perfis tem comprimento de <i>100mm</i> . (Hoek, 2007) | 31 |
| 2.10 | Transição da rocha intacta para um maciço rochoso fraturado (Wyllie & Mah, 2005) | 32 |
| 2.11 | Índice Geomecânico GSI (tradução própria) (Hoek & Marinos, 2002) | 34 |
| 2.12 | Combinação de descontinuidades formando uma superfície de falha | 36 |
| 2.13 | Ruptura por cisalhamento rotacional e rupturas por combinação de cisalhamento rotacional e planos de cisalhamento | 38 |
| 2.14 | Deslizamento de blocos e Ruptura tipo Tombamento (Sjöberg, 1996) | 39 |
| 3.1 | a) Furo Elíptico com semi-eixos <i>a</i> e <i>b</i> submetido a um estado de tensões uniforme; b) Representação esquemática da concentração de tensões em um furo elíptico (Whittaker <i>et al</i> , 1992) | 42 |
| 3.2 | Três modos básicos de ruptura associado ao deslizamento das superfícies da fissura (Whittaker <i>et al</i> , 1992) | 43 |
| 3.3 | Fissura em um plano infinito (Whittaker <i>et al</i> , 1992) | 44 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.4 | Tipos de propagação observados em uma amostra rochosa em condições de compressão (Park & Bobet, 2009) | 45 |
| 3.5 | Comparação de propagação da fratura em condições de compressão (a) e tração (b) (Whittaker <i>et al</i> , 1992) | 46 |
| 3.6 | Ângulo inicial de propagação VS o ângulo da fissura em condições de compressão (Whittaker <i>et al</i> , 1992) | 47 |
| 3.7 | Tipos de <i>Coalescência</i> (Park & Bobet, 2009) | 49 |
| 3.8 | Tipos de coalescências obtidas no programa FROCK para fissuras abertas (Vásárhelyi & Bobet, 2000) | 50 |
| 3.9 | Tensões principais máximas e tensões cisalhantes máximas ao redor de fissuras (Mughieda & Omar, 2008) | 51 |
| 3.10 | Cisalhamento em um maciço rochoso ao longo do plano β (Jennings, 1970) | 52 |
| 3.11 | Ruptura potencial ao longo da superfície AB que inclui descontinuidades pre-existentes (Jennings, 1970) | 53 |
| 3.12 | a) Ruptura potencial ao longo da superfície AB que intercepta uma quantidade de descontinuidades com mergulho α , b) Modos de união de descontinuidades por propagação (Jennings, 1970) | 54 |
| 3.13 | Ruptura tipo <i>Step-path</i> (Miller <i>et al</i> , 2004) | 56 |
| 3.14 | Simulação do mecanismo de ruptura <i>step-path</i> no programa <i>ELFEN</i> para um talude rochoso de 100.0 m de altura (Eberhardt <i>et al</i> , 2004) | 56 |
| 3.15 | a) Ruptura do Talude com descontinuidades com 90% de persistência; b) Ruptura do Talude com descontinuidades com 70% de persistência (Wang <i>et al</i> , 2003) | 57 |
| 4.1 | Procedimento Geral de Solução (Itasca, 1999a) | 60 |
| 4.2 | Ciclo de Cálculo do Método dos Elementos Discretos (Itasca, 1999a) | 61 |
| 4.3 | Nomenclatura partícula-partícula, partícula-parede (Itasca, 1999a). | 63 |
| 4.4 | Modelos Constitutivos de Contato | 67 |
| 4.5 | Componente normal da força de contato (Itasca, 1999a) | 70 |
| 4.6 | Componente cisalhante da força de contato (Itasca, 1999a) | 70 |
| 4.7 | Ligação Paralela (Itasca, 1999a). | 71 |
| 5.1 | Detalhe do arranjo de partículas para o caso <i>2D</i> e <i>3D</i> | 79 |
| 5.2 | Ruptura do material em ensaio triaxial (90% post pico) | 80 |
| 5.3 | Envoltória de valores de resistência de pico (Dados obtidos de ensaios triaxiais simulados em PFC2D) | 81 |
| 5.4 | Envoltória de valores de resistência de pico (Dados obtidos de ensaios triaxiais simulados em PFC3D) | 81 |
| 5.5 | a) Critério de geração de uma descontinuidade com a definição de uma faixa de identificação de contatos próximos a uma reta, que define a estrutura geológica; b) contatos apagados após a identificação dos contatos, gerando a descontinuidade. A linha vermelha representa a descontinuidade, podendo-se observar a rugosidade formada nela pela forma das partículas. | 83 |
| 5.6 | Geração de uma descontinuidade no <i>PFC3D</i> | 83 |
| 5.7 | Reprodução dos tipos de propagação mencionados por Bobet (Park & Bobet, 2009) no PFC2D (85% post pico) | 84 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.8 | Propagação de uma fissura aberta em análise bidimensional. Faixa do ângulo β entre 80° e 50° . | 86 |
| 5.9 | Propagação de uma fissura aberta em análise bidimensional. Faixa do ângulo β entre 40° e 10° . | 87 |
| 5.10 | Variação do ângulo inicial de propagação θ_m segundo o ângulo de inclinação da fissura aberta. Resultado da análise bidimensional. | 88 |
| 5.11 | Arranjo de partículas para o análise tridimensional da propagação de uma fissura fechada com ângulo de inclinação 45° . | 89 |
| 5.12 | Processo da propagação de uma fissura fechada para diferentes níveis de deformação em ensaio triaxial. Análise tridimensional. | 90 |
| 5.13 | Coalescência tipo <i>I</i> e <i>II</i> em ensaio triaxial. Análise tridimensional | 91 |
| 5.14 | Coalescência tipo <i>III</i> e <i>IV</i> em ensaio triaxial. Análise tridimensional | 91 |
| 5.15 | Coalescência tipo <i>V</i> e <i>VI</i> em ensaio triaxial. Análises tridimensional | 92 |
| 5.16 | Coalescência tipo <i>VIIb</i> em ensaio triaxial. Análises tridimensional | 92 |
| 5.17 | Influencia da anisotropia do material na resistência. Análise tridimensional | 95 |
| 5.18 | Geometria do talude e procedimento de escavação. | 97 |
| 5.19 | Criação de uma trinca de tração associado a uma ruptura planar em talude. | 98 |
| 5.20 | Reprodução bidimensional de um Step-Path. Fraturas unidas por coalescência entre elas. | 99 |
| 5.21 | Reprodução bidimensional de um Step-Path e uma trinca de tração no topo. Fraturas unidas por coalescência entre elas. | 99 |
| 5.22 | Comparação do fator de segurança obtido no <i>PFC2D</i> com o resultado de outros programas | 101 |
| 5.23 | Avaliação do fator de segurança. Exemplos 1, 2 e 3 | 104 |
| 5.24 | Avaliação do fator de segurança. Exemplos 4, 5 e 6 | 105 |
| 5.25 | Gráfico comparativo entre o valor da resistência ao cisalhamento e a tensão cisalhante da rocha intacta. | 107 |
| 5.26 | Sistema de fraturas gerado no programa FracGen | 110 |
| 5.27 | Inserção do sistema de fraturas gerados pelo programa FracGen no programa PFC3D | 111 |
| 5.28 | Modelamento tridimensional da ruptura tipo step-path de um talude rochoso fraturado (PFC3D) | 112 |
| 5.29 | Diferentes superfícies de ruptura tipo step-path, associados a um mesmo sistema de fraturas em um talude rochoso. Visualização em seções transversais espaçadas cada $6.0\ m$ (PFC3D). | 113 |

Lista de tabelas

| | | |
|------|--|-----|
| 4.1 | Número máximo de partículas segundo RAM (<i>PFC3D</i>) | 59 |
| 5.1 | Micro-parâmetros utilizados na simulação | 79 |
| 5.2 | Macro-parâmetros obtidos de simulações de ensaios triaxiais e brasileiros | 81 |
| 5.3 | Resultados de ensaios triaxiais em amostras com fratura inserida, para diferentes ângulos de inclinação. | 94 |
| 5.4 | Micro-propriedades utilizadas no arranjo de partículas, para a modelagem do Step-Path (Wang <i>et al</i> , 2003) | 96 |
| 5.5 | Macro-propriedades obtidas para o arranjo de partículas referido na tabela 5.4 | 96 |
| 5.6 | Valores da geometria do arranjo de partículas e procedimento de escavação do talude | 97 |
| 5.7 | Valores de fator de segurança obtidos por diferentes programas e métodos, para o caso avaliado | 101 |
| 5.8 | Tabela comparativa dos fatores de segurança obtidos para cada exemplo | 106 |
| 5.9 | Comparação entre o valor da resistência ao cisalhamento e a tensão cisalhante da rocha intacta. | 107 |
| 5.10 | Características geométricas do sistema de fraturas utilizado | 109 |

Because the rock mass behind each slope is unique, there are no standard recipes or routine solutions which are guaranteed to produce the right answer each time they are applied.

E. Hoek & J. Bray, 1974 , *Rock Slope Engineering*.