# Modelagem da Propagação de Fraturas, a Coalescência e o Mecanismo de Ruptura tipo Step-Path Usando o Programa PFC

A propagação e a *coalescência* de fraturas, são os principais fenômenos que acontecem dentro do mecanismo de ruptura tipo *Step-Path*. Para compreender todos estes mecanismos, foram modelados diferentes cenários a nível de amostras, fazendo uma primeira avaliação do Método dos Elementos Discretos nesta fase. Após esta avaliação, a modelagem do mecanismo de ruptura tipo *Step-Path* em um talude rochoso sera comparado com o modelo matemático proposto por Jennings (Jennings, 1970). Para estas modelagens, foram utilizados os programas *PFC2D* para análises bidimensionais e o *PFC3D* para o caso tridimensional.

## 5.1 Geração da Amostra e Obtenção de Macro Propriedades

Uma amostra pode ser definida como um arranjo de partículas, que interagem entre elas através dos seus contatos. Como foi mencionado anteriormente, o comportamento global deste arranjo, depende das micro-propriedades das partículas e, dos contatos formados entre elas. Os micro-parâmetros utilizados nesta primeira parte, para reproduzir os diferentes fenômenos em estudo, são mostrados na tabela 5.1 (considerando o caso  $2D \ e \ 3D$ ). De forma análoga à obtenção das propriedades de resistência e deformabilidade de uma rocha, mediante ensaios de laboratório, a obtenção dos macro-parâmetros de um arranjo de partículas (que são estas propriedades de resistência e deformabilidade), são determinadas mediante simulações de estes ensaios.

O programa PFC, tem aplicações na sua linguagem de programação FISH de ensaios triaxiais e brasileiros, facilitando a obtenção dos macroparâmetros do arranjo. Três ensaios triaxiais foram simulados (figura 5.1), com micro-propriedades mostradas na tabela 5.1 e, utilizando diferentes valores de confinamento (0.1 MPa, 10.0 MPa e 50.0 MPa). Para poder observar a ruptura do material, são visualizadas as ligações existentes nos contatos

entre as partículas do arranjo. A ruptura do material pode ser correlacionado com a ruptura destas ligações, formadas quando é aplicada uma força. Quando um contato rompe, as partículas que o formaram ficam livre de se deslizar uma a outra, dependendo somente da força gerada pelo atrito entre elas. Desta forma, a facilidade de deslizamento destas partículas sem ligação no contato, faz que a deformação dos contatos próximos sejam maiores, podendo romper progressivamente, gerando-se uma zona de ruptura. Estas zonas de ruptura de ligação nos contatos, são visualizadas na figura 5.2. Os ensaios modelados, foram reproduzidos até que o valor máximo de resistência, seja diminuído em 10% do valor total (90% post pico). Nesta condição de tensões, o patrão de ruptura observado para o caso  $2D \in 3D$  são diferentes. O efeito tridimensional, faz que as zonas de ruptura sejam espacialmente mais complexas e de difícil visualização, porque os contatos não acontecem somente em um plano, como no caso 2D. O número de contatos por partícula é maior para o caso 3D, o que leva à conseqüência de um número maior de opões ou caminhos, para se propagar a ruptura de um contato.

Cada ensaio triaxial tem a sua curva tensão-deformação, fornecendo o valor do módulo de deformação e, o valor de resistência de pico. Con estas informações, é possível determinar, mediante o Circulo de Mohr, a coesão (c) e o atrito ( $\phi$ ) do material. As figuras 5.3 e 5.4 mostram as envoltórias de resistência obtidos para os casos 2D e 3D, considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, que descreve uma envoltória linear. Os macro-parâmetros obtidos, correspondentes ao arranjo inicial de partículas, são mostradas na tabela 5.2, onde c é a coesão,  $\phi$  é o ângulo de atrito e  $T_o$  é, a resistência à tração do arranjo de partículas, sendo estes, propriedades do material a ser modelado. Se estes macro-parâmetros não são representativos deste material, os micro-parâmetros tem que ser modificados até obter um modelo numérico mais proximo do material real.

	PFC2D	PFC3D
Raio (mm)	0.3 - 0.5	0.6 - 1.0
Dimensões da amostra $(mm)$	31.7x63.4	31.7x31.7x63.4
Densidade $(kg/m^3)$	2630	2630
$E_c(Pa)$	62.0e9	72e9
$k_n/k_s$	3.5	3.5
$ar{\lambda}$	1	1
$\bar{E}_c(Pa)$	62e9	72e9
$k^{-n}/k^{-s}$	3.5	3.5
$\bar{\sigma}_c(Pa)$	120e6	120e6
$\bar{\tau}_c(Pa)$	175e6	175e6

Tabela 5.1: Micro-parâmetros utilizados na simulação



Figura 5.1: Detalhe do arranjo de partículas para o caso 2D e 3D



Figura 5.2: Ruptura do material em ensaio triaxial (90% post pico)



Figura 5.3: Envoltória de valores de resistência de pico (Dados obtidos de ensaios triaxiais simulados em PFC2D)



Figura 5.4: Envoltória de valores de resistência de pico (Dados obtidos de ensaios triaxiais simulados em PFC3D)

	PFC2D		PFC3D	
$\sigma_3$	$\sigma_1$ $E$ $\sigma_1$		$\sigma_1$	E
0.1 MPa	170.7 MPa	$60.67 \ GPa$	$152.6 \ MPa$	$56.6 \ GPa$
10.0 MPa	216.3 MPa 64.36 GPa		183.3 MPa	$60.23 \ GPa$
50.0 MPa	320.7 MPa 69.44 GPa		293.6 MPa	$71,19\ GPa$
$T_o$	40.0 MPa		38.85 MPa	
С	51.69 MPa		45.82 MPa	
$\phi$	29.06°		28.34°	

Tabela 5.2: Macro-parâmetros obtidos de simulações de ensaios triaxiais e brasileiros

# 5.2 Critério de Geração de uma Descontinuidade

Como foi mencionado no caso anterior, a ruptura do material, é representado como zonas de perdas de ligação de contato entre partículas. Utilizando o mesmo critério, uma descontinuidade pode ser representada como zonas sem ligação de contato, sendo estes contatos posicionados, logicamente, seguindo as características espaciais de atitude e mergulho próprias de uma estrutura geológica. O programa PFC 3.0 tem uma aplicação para a geração de fraturas, mas, este comando não permite controlar a posição exata e o tamanho de uma fratura descontínua. Para conseguir o controle total da posição e do tamanho, foi implementado em FISH um gerador de descontinuidades. Esta aplicação consiste em identificar todos os contatos próximos a uma reta (caso 2D) ou plano (caso 3D) definido como descontinuidade. A ligação destes contatos são anuladas, deixando as partículas livre de se deslizar, gerando uma superfície cuja forma é definida pelas partículas. A figura 5.5a mostra o critério de geração descrito. Estes contatos próximos à uma reta (que poderia ser um plano no caso 3D) são identificados mediante uma faixa com espessura definida pelo usuário. A superfície gerada mostrada na figura 5.5b tem uma rugosidade que incrementa a resistência ao cisalhamento da descontinuidade, como conseqüência da geometria das partículas e do fato de ser geradas somente pelos contatos. Superficies de descontinuidades planas e lisas são difíceis de ser geradas nesta versão do programa. A representação de uma descontinuidade na modelagem discreta é somente possível mediante os contatos, o que gera uma rugosidade que pode ser reduzida com a diminuição do tamanho da partícula ou quando o tamanho destas seja mais homogêneo. Outra forma de reduzir a resistência ao cisalhamento da descontinuidade, é aumentar a faixa de identificação de contatos, envolvendo um número maior de contatos associados ao deslizamento.

Este critério de geração, também pode ser utilizado para representar uma descontinuidade aberta. Neste caso, a faixa de identificação definida pelo usuário, identifica a posição dos centros de gravidade das partículas posicionadas no lugar geométrico da descontinuidade, sendo estas apagadas, gerando-se desta forma uma abertura na amostra.



Figura 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.

A figura 5.6 mostra a aplicação do critério de geração de descontinuidades para o caso tridimensional (PFC3D).



Figura 5.6: Geração de uma descontinuidade no PFC3D

#### 5.3

## Analises da Propagação de uma Fissura e a Coalescência em Amostras de Rocha

A propagação de uma fissura submetida à compressão, pode ser de vários tipos segundo o modo ruptura associado. As rupturas por tração de *Modo* I são as primeiras a ser identificadas e, as fraturas oblíquas e coplanares secundárias, de Modo II, são desenvolvidas posteriormente. Para a reprodução destas propagações, foram manipuladas as micro-propriedades do modelo numérico proposto por Potyondy e Cundall (Potyondy & Cundall, 2003), com o objetivo de poder visualizar melhor estes fenômenos. Para facilitar a ruptura da ligação do contato, foi utilizado o critério seguinte: se aumentar a rigidez, esta pode gerar uma força muito alta para um deslocamento pequeno das partículas, podendo a ligação do contato romper se, a sua resistência é baixa. Considerando que a ruptura por tração do material implica, a ruptura por tração da ligação dos contatos entre as partículas, esta pode ser modelada aumentando o valor de  $k_n/k_s$  e, reduzindo o valor da resistência normal  $\bar{\sigma}_c$ da ligação paralela do contato. O resultado da manipulação destas micropropriedades estão apresentadas na tabela 5.1. Com estes resultados foi gerado uma amostra com uma fratura aberta no centro dela, submetida a tensões de compressão axial, cujas propagações são mostradas na figura 5.7. Comparando estes resultados com o modelo de propagação proposto por Park e Bobet (Park & Bobet, 2009), a propagação da fratura por tração e cisalhamento, foram reproduzidas de forma satisfatória. As fraturas coplanar secundarias não foram observadas no modelo.



Figura 5.7: Reprodução dos tipos de propagação mencionados por Bobet (Park & Bobet, 2009) no PFC2D (85% post pico)

Nas fraturas secundárias oblíquas, é também possível apreciar que o número de ligações de contatos quebrados é maior, comparado com a superfície de tração. O cisalhamento envolve em geral, um número maior de ligações de contatos quebrados próximos à zona de ruptura. Isto acontece porque, após a ruptura da ligação, as partículas podem continuar se transmitindo forças, podendo levar à ruptura a outros contatos.

O ângulo inicial de propagação  $\theta_m$  como foi referido anteriormente, tem uma curva típica para diferentes inclinações da fratura. A tendência do ângulo  $\theta_m$  é aumentar levemente quando o ângulo de inclinação de fissura  $\beta$  varia entre 30° e 60°, sendo este aumento abrupto para valores maiores de  $\beta$  (figura 3.6). Para reproduzir este efeito, foram modelados diferentes cenários de fissuras com ângulos de inclinação  $\beta$  variando entre 10° e 80°. Foi considerado uma fratura aberta neste primeiro caso, sendo os seus resultados mostrados nas figuras 5.8 e 5.9. Em todas as modelagens, o ensaio foi parado quando a tensão aplicada diminuiu em um 5% da tensão pico (95% post pico) e, foram ativados os vetores de deslocamento, para visualizar o movimento das partículas nesse instante.

A propagação da fissura corresponde às zonas onde estes vetores estão em sentido oposto um do outro. Teoricamente, o valor do ângulo de inicio da propagação  $\theta_m$  deveria ser igual nas duas pontas da fissura, mas aquilo não foi observado em alguns exemplos. Isto acontece devido principalmente ao tamanho das partículas. Quanto menor é a partícula, a fissura tem mais opções ou "caminhos" para se propagar dentro do meio discreto, sendo a modelagem mais exata. Além disso, não existe simetria na configuração das partículas em ambas pontas da fissura.





Figura 5.8: Propagação de uma fissura aberta em análise bidimensional. Faixa do ângulo $\beta$ entre 80° e 50°.



Figura 5.9: Propagação de uma fissura aberta em análise bidimensional. Faixa do ângulo  $\beta$  entre 40° e 10°.

Os ângulos de inicio da propagação foram medidos para a ponta superior da fissura e estes valores são mostrados na figura 5.10.



Figura 5.10: Variação do ângulo inicial de propagação  $\theta_m$  segundo o ângulo de inclinação da fissura aberta. Resultado da análise bidimensional.

O resultado destes ensaios mostrou que, o ângulo de inicio da propagação de uma fissura aberta, submetida à compressão, tem uma variação leve para ângulos de inclinação da fissura  $\beta$  entre 20° e 45°, e abrupta para valores de  $\beta > 45^\circ$ . Esta variação do ângulo  $\theta_m$  mostra uma tendência comparável com os resultados mostrados por Whittaker (Whittaker *et al*, 1992), referidos na figura 5.10. A propagação da fratura foi modelada de forma aceitável pelo meio discreto para o caso bidimensional, sendo comparado satisfatoriamente com os modelos propostos pela mecânica da fratura.

No caso tridimensional, também foi observado um comportamento aceitável do meio discreto. O número de contatos por partícula é incrementado, por se tratar de esferas e não de discos, trazendo como conseqüência um número maior de combinações de contatos onde, a ligação destes pode romper, quando a amostra é submetida à compressão. Utilizando os dados da tabela 5.1 foi gerada uma amostra com a geometria mostrada na figura 5.11.



Figura 5.11: Arranjo de partículas para o análise tridimensional da propagação de uma fissura fechada com ângulo de inclinação 45°.

Utilizando o critério de geração de fraturas descrito anteriormente, foi inserido no centro da amostra uma fissura. A diferencia do modelo bidimensional, a fissura inserida é fechada, existindo contato entre as suas superficies e, com uma rugosidade controlada pelo tamanho de partículas. Estas condições sugerem uma representação mais real para a modelagem, porque no caso do steppath, a propagação e coalescência de fraturas acontece em estruturas geológicas fechadas que se propagam pelo movimento relativo das suas superficies, as quais apresentam sempre um grau de aspereza entre elas. A fratura gerada na amostra tem forma retangular e, ultrapassa ela completamente. O resultado deste ensaio é mostrado na figura 5.12. Pode-se observar que a fissura se propaga por tração (Modo I) até a tensão aplicada diminuir em um 10% do valor pico (90% post pico). A fratura coplanar secundaria (Modo II) é desenvolvida a partir desse instante. Devido à proximidade das duas propagações e ao tamanho das partículas, a ligação dos contatos contidas nesta região são quebradas, como conseqüência da alta concentração de forças de contato, produto do alto grau de mobilidade das partículas. Não foram observados neste ensaio, o desenvolvimento das fraturas oblíquas secundarias.



Figura 5.12: Processo da propagação de uma fissura fechada para diferentes níveis de deformação em ensaio triaxial. Análise tridimensional.

A ativação dos vetores de deslizamento para o instante final (85% post pico), mostraram que o controle do movimento das partículas não é simétrico. No extremo superior da fissura, o movimento das partículas esta em grande parte, controlado pela fratura coplanar secundária e, na parte inferior, pela fratura por tração primaria. Foi observado que a propagação nem sempre tem um comportamento simétrico e não necessariamente são desenvolvidos todos os tipos propostos por Park e Bobet (Park & Bobet, 2009).

Se existir uma outra fissura, a propagação de uma delas pode interceptar a outra ou a sua propagação. Este fenômeno é chamado de *coalescência*, existindo vários tipos, dependentes principalmente da distribuição espacial das fissuras. As figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 mostram os diferentes tipos de *coalescência* modelados no método discreto.



Figura 5.13: Coalescência tipo  $I \in II$  em ensaio triaxial. Análise tridimensional



Figura 5.14: Coalescência tipoIII <br/>eIVem ensaio triaxial. Análise tridimensional



Figura 5.15: Coalescência tipo  $V \in VI$  em ensaio triaxial. Análises tridimensional



Figura 5.16: Coalescência tipo VIIb em ensaio triaxial. Análises tridimensional

Com exceção da *coalescência* tipo VIIa e VIII, os outros tipos mostrados na figura 3.7 foram modelados de forma satisfatória, mas, em alguns casos, não foi possível diferenciar os diferentes tipos de propagação combinados na *coalescência*. Os tipos de *coalescência* modelados, apresentaram as seguintes observações:

– No tipo I a *coalescência* é formada pela união de fraturas coplanares secundárias. A união destas fraturas é por cisalhamento (*Modo II*),

sendo possível apreciar o movimento cisalhante das partículas, quando são ativados os vetores de deslizamento. As fraturas de tração primaria foi observado somente nos pontas das fissuras que não estão associadas à *coalescência*.

- No tipo II, a coalescência é formada pela combinação de fraturas secundárias coplanares e uma fratura de tração que une a elas, mas, estas não foram diferenciadas na modelagem. Os vetores de deslizamento somente mostram tração e não as fraturas coplanares secundárias associadas. É muito possível que o desenvolvimento destes dois tipos de fratura ficasse confundidas somente como uma zona de tração devido ao tamanho da partícula, comparado com a distancia entre as duas fissuras.
- Nas coalescências de tipo III e IV, a união das fissuras acontece pela combinação de fraturas de tração primaria e, no caso do tipo III, elas estão associadas a fraturas coplanares secundárias. Estas duas coalescências foram reproduzidas, no entanto, a fratura coplanar secundária no tipo III não foi observada no modelo.
- Na coalescência do tipo V e VI apresentam um formato similar com uma modelagem aceitável. A diferença é que a coalescência tipo V é formada por fraturas por cisalhamento e, a coalescência tipo VI por fraturas de tração primária. Pelo observado em várias modelagens, as rupturas por cisalhamento, envolvem geralmente um número maior de contatos, que rompem nas proximidades da superfície de ruptura. Isto pode ser observado na modelagem do tipo V, onde estas superfícies de ruptura (zonas com ruptura de ligação nos contatos) são difusas, atingindo um número maior de contatos nas proximidades dela. A fratura de tração primária nos extremos não associados com a coalescência nas fissuras, foi observado no modelo.
- A coalescência tipo VIIb e VIII são muito parecidas, a diferença é, a associação de uma fratura coplanar secundária somente a uma fissura no tipo VII. Diferentes modelagens só mostraram o desenvolvimento da coalescência tipo VIIb, sem se observar a fratura coplanar secundaria, provavelmente também, pela influência do tamanho de partícula.

De forma geral, o método dos elementos discretos permitiu uma modelagem aceitável dos fenômenos de propagação e *coalescência* de fissuras, sendo os seus resultados comparáveis com os modelos propostos por Park e Bobet (Park & Bobet, 2009), podendo ser melhorados provavelmente, com a diminuição do tamanho das partículas.

#### 5.4

#### Influência da Anisotropia do Material na Resistência da Rocha

A presença de descontinuidade em uma amostra rochosa e, a sua orientação em relação à direção da tensão de carga, tem uma influência direta na resistência do material. Dependendo da inclinação da descontinuidade, a ruptura pode acontecer por cisalhamento nela ou, ser controlada pela rocha intacta. Para observar este efeito, foram feitas simulações de ensaios triaxiais com tensões de confinamento de 0.1 MPa, 10.0 MPa e 50 MPa, nas quais foi inserida uma fratura. A amostra foi gerada utilizando os micro-parâmetros mostrados na tabela 5.1 para o caso tridimensional, sendo o ângulo de inclinação da fratura variável para cada ensaio, com intervalos de  $10^{\circ}$ , em relação à direção de carga. Os resultados dos diferentes ensaios são mostrados na tabela 5.3.

	ângulo	$\sigma_3=0.1 MPa$	$\sigma_3=10.0 MPa$	$\sigma_3=50.0 MPa$
$\sigma_1$	intacto	157.4	183.3	293.6
$\sigma_1$	0°	132.7	156.2	244.0
$\sigma_1$	10°	123.2	148.5	236.6
$\sigma_1$	20°	117.1	138.7	226.7
$\sigma_1$	$30^{\circ}$	96.6	117.6	196.4
$\sigma_1$	40°	65.9	91.7	174.3
$\sigma_1$	50°	48.5	75.8	165.8
$\sigma_1$	60°	40.3	68.9	169.7
$\sigma_1$	70°	47.7	86.1	197.6
$\sigma_1$	80°	94.9	141.3	260.3
$\sigma_1$	90°	143.2	171.7	274.5

Tabela 5.3: Resultados de ensaios triaxiais em amostras com fratura inserida, para diferentes ângulos de inclinação.

A ruptura do material controlada pela rocha intacta, corresponde aos valores mais altos de resistência e, os valores mínimos, correspondem ao controle fratura. A figura 5.17 mostra a variação da tensão principal maior em relação ao ângulo de inclinação da fratura. O resultado mostrou uma boa correspondência com o modelo proposto por Jaeger (Jaeger & Cook, 1968), mostrada na figura 2.7.



Figura 5.17: Influencia da anisotropia do material na resistência. Análise tridimensional

# 5.5 Modelagem Bidimensional do Mecanismo de Ruptura Tipo Step-Path

Como foi mencionado anteriormente, o mecanismo de ruptura tipo *Step-Path*, acontece em taludes de grande altura, onde a relação entre a persistência das fraturas, comparado com a altura dele, é menor, podendo formar uma superfície de ruptura, quando estas descontinuidades são unidas por *coalescência* entre elas. Como foi observado na modelagem da propagação e *coalescência* de fissuras em amostras, a aplicação de uma carga, pode levar ao deslizamento relativo das superfícies que a conformam, propagando-la e unindo-la com outras fissuras por *coalescência*. Estes fenômenos são também observados no mecanismo de ruptura tipo *Step-Path*, onde as descontinuidades de um maciço rochoso são unidas por *coalescências* em uma escala maior, formando a superfície de ruptura.

#### 5.5.1

#### Geração do Arranjo de Partículas, Aplicação das Tensões in-situ e Procedimento de Escavação

Para poder modelar o tipo de ruptura *step-path*, foi gerado um arranjo de partículas com micro-parâmetros mostrados na tabela 5.4. Estes foram propostas por Wang (Wang *et al*, 2003), modificando-se somente o tamanho das partículas. Para determinar as macro-propriedades, utilizou-se o procedimento mencionado anteriormente. Os macro-parâmetros obtidos são mostrados na tabela 5.5. O arranjo tem uma forma retangular com comprimento de 110.0 me 80.0 m de altura, composto por 58336 partículas, que são adensadas somente pelo proprio peso. A ligação paralela no contato é ativado após o adensamento. Para determinar a tensão vertical, é necessário saber a densidade do material. Dados de densidade mostrados por Goodman (Goodman, 1989), observa-se que, de forma geral, a densidade da rocha varia entre 2100 - 2990  $kg/m^3$  (salgema e o anfibolito respectivamente). Considerando um valor intermediário de densidade de rocha, de 2500  $kg/m^3$ , a tensão vertical correspondente para 75 m de profundidade, seria de 1.838 MPa. Em um arranjo de partículas, a porosidade do meio, diminui a carga aplicada em qualquer ponto. Para evitar este problema, a densidade da partícula tem que ser aumentada, com o objetivo de atingir o valor de tensão vertical desejada. O programa PFC permite medir as tensões em um ponto determinado pelo usuário. Assim, para uma densidade de partícula de 3100  $kg/m^3$ , a tensão vertical a 75 m de profundidade, medida no programa PFC, foi de 1.839 MPa.

Raio da partícula $(m)$	0.15-0.25
Densidade da partícula $(kg/m^3)$	3100
$E_c \ (GPa)$	25.0
$k_n/k_s$	0.25
atrito $(\phi)$	0.7
$\lambda$	1.0
$\bar{E}_c \ (GPa)$	10.0
$\bar{k_n}/\bar{k_s}$	0.25
$\bar{\sigma_c} (MPa)$	40
$\bar{\tau}_c (MPa)$	40

Tabela 5.4: Micro-propriedades utilizadas no arranjo de partículas, para a modelagem do Step-Path (Wang et al, 2003)

UCS $(MPa)$	$T_o (MPa)$	E(GPa)	Atrito	Coesão $(MPa)$
57.0	13.1	33.67	$23.5^{\circ}$	18.1

Tabela 5.5: Macro-propriedades obtidas para o arranjo de partículas referido na tabela 5.4

Após a geração do arranjo, a escavação do talude é executado em partes, sendo estas de 15.0 m de altura por etapa. A altura final do talude é de 60.0 m e o ângulo final de inclinação é de 75°. A escavação por partes, além de simular uma escavação convencional no terreno, diminui o impacto dinâmico das partículas próximas à zona escavada na modelagem discreta. Este procedimento de escavação, assim como a geometria do talude, é mostrado na tabela 5.6 e na figura 5.18.

Comprimento (m)	110
Altura (m)	80
Ângulo de corte	$75^{\circ}$
Número de etapas	4
Altura de corte por etapa (m)	15

Tabela 5.6: Valores da geometria do arranjo de partículas e procedimento de escavação do talude



Figura 5.18: Geometria do talude e procedimento de escavação.

#### 5.5.2 Geração de Fraturas e Modelagem de Coalescência de Fraturas

As fraturas são geradas utilizando o critério descrito anteriormente. Estas são introduzidas após a geração do arranjo e antes de ser executada a escavação. Em todos os casos, as fraturas têm um ângulo de inclinação de  $45^{\circ}$  e , o seu comprimento e a posição de cada uma de elas, foi modificado para cada exemplo modelado. No caso do exemplo N° 1 (figura 5.19), é introduzida somente uma descontinuidade, sem que ela aflore no topo. O movimento do bloco formado leva à propagação da fratura, sendo esta de *Modo I*. Conforme a propagação aumenta, a fratura formada mostra uma tendência a ser vertical, quando se aproxima à superfície. Foi observado em outros testes que a verticalidade da trinca de tração gerada, depende da resistência ao cisalhamento da fratura.

Quando a resistência é menor, a trinca tende a ser vertical. Isto pode ser relacionado com o ângulo inicial da propagação, dependente do atrito da fissura, mostrado na figura 3.6. Para valores de coeficiente de atrito baixo (o que leva a uma menor resistência), o ângulo de inicio da propagação é menor em relação à direção de carga, que é vertical. Este exemplo somente mostra a propagação de uma fratura.

98



Figura 5.19: Criação de uma trinca de tração associado a uma ruptura planar em talude.

No caso do exemplo N° 2 (figura 5.20), são introduzidas três fraturas com comprimentos de 22.0, 22.0 e 27.0 m em ordem ascendente. O objetivo desta modelagem, é obter a união das fraturas por *coalescência* tipo II, III e IV. Observou-se que a coalescência da fratura superior com a fratura central, corresponde ao tipo IV. Sendo estas fraturas posicionadas para reproduzir este tipo de *coalescência*, esta somente foi observada para grandes deslocamentos. A união das fraturas, acontece inicialmente pela propagação da fratura central com a superior por uma fratura por tração primaria. As fraturas central e inferior foram posicionadas para reproduzir a coalescência tipo II ou III, mas a diferenciação entre elas na modelagem foi de difícil observação. Não foram encontradas evidencias das fraturas coplanares secundárias, sendo somente observada, uma zona de tração entre as duas fraturas. As duas descontinuidades foram unidas pela propagação de fraturas de tração primária, mas, não foi possível definir se a conexão foi direta (tipo II), ou em paralelo (tipo III). Isto é devido ao tamanho da partícula, que não permite diferenciálas, apreciando-se somente uma zona de tração.



Figura 5.20: Reprodução bidimensional de um Step-Path. Fraturas unidas por coalescência entre elas.

A figura 5.21 apresenta três fraturas de 22.0 m de comprimento posicionadas para reproduzir a coalescência tipo II, mas, também neste caso, não foi diferenciado a fratura coplanar secundária. A *coalescência* acontece, pela formação de fraturas de tração primarias, nas pontas das fraturas preexistentes. Na parte superior, é observa a formação de uma fratura por tração. A irregularidade da superfície de fratura (dependente da geometria da partícula) pode favorecer o deslocamento de algumas partículas e impedilos a outras. Este movimento diferencial das partículas da superfície da fratura, faz que sejam gerados em alguns pontos forças de contato maiores que em outros setores, levando à ruptura da ligação paralela no contato e, uma posterior propagação de fratura. Quanto mais irregular é a superfície de deslizamento, a possibilidade de formação de fraturas de tração, dentro do bloco em deslizamento, é maior que, para o caso de superfícies planas e lisas.



Figura 5.21: Reprodução bidimensional de um Step-Path e uma trinca de tração no topo. Fraturas unidas por coalescência entre elas.

# 5.5.3 Análise do Fator de Segurança e Validação da Modelagem

O fator de segurança em uma análises de estabilidade de um talude, usando o método dos elementos discretos, é de difícil determinação. Sendo os macro-parâmetros de um material dependentes dos micro-parâmetros das partículas, a aplicação da técnica de redução de resistência é muito difícil de implementar. Esta técnica, que é muito comum de utilizar no método dos elementos finitos, estabelece o seguinte:

$$c^{trial} = \frac{c}{F^{trial}}$$

$$\phi^{trial} = \arctan\left(\frac{\tan\phi}{F^{trial}}\right)$$
(5-1)

De esta forma, para cada valor de  $F^{trial}$ , é feita uma simulação até atingir a ruptura, sendo nesse instante, o valor de  $F^{trial}$ , o fator de segurança. A aplicação deste critério nos elementos discretos, não foi possível de implementar, porque para diminuir os macro-parâmetros  $c \in \phi$ , é necessário manipular os micro-parâmetros das partículas, sem poder garantir que estes sejam reduzidos na mesma proporção. Um outro método que pode ser aplicado, está baseado no incremento da aceleração da gravidade. Este valor  $(m/s^2)$  é incrementado sucessivamente até obter a ruptura do talude. Definindo como  $g_0$  o valor da aceleração da gravidade, no estado de equilíbrio, e  $g_0^{trial}$ , o valor da aceleração da gravidade, no momento da ruptura, o fator de segurança  $F^{trial}$  pode ser determinado segundo Li (Li, 2009) da forma seguinte:

$$F^{trial} = \frac{g_0^{trial}}{g_0} \tag{5-2}$$

Para validar a sua utilização, foram feitos testes no programa PFC2D. Um arranjo de partículas com macro-parâmetros de coesão de 1.26 MPa e atrito de 23.7° foi testado para diferentes valores de ângulo de inclinação do talude. O resultado do fator de segurança, obtido da utilização da equação 5-2, foi comparado com testes feitos em outros programas, como o FlacSlope5.0, que utiliza a técnica de redução de resistência e, o programa Slide5.0, que utiliza o Método de Bishop, na obtenção do fator de segurança. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 5.7.

ângulo	FlacSlope	Slide	PFC2D	
90°	3.62	4.85	4.5	
75°	4.9	5.2	5.1	
60°	5.99	6.2	6.1	

Tabela 5.7: Valores de fator de segurança obtidos por diferentes programas e métodos, para o caso avaliado



Figura 5.22: Comparação do fator de segurança obtido no PFC2D com o resultado de outros programas

Na figura 5.22, pode-se observar, que os valores de fator de segurança são muito próximos, sendo pouco mais divergente para o caso de um talude vertical. As superficies de ruptura também são bastante coincidentes para o caso do *PFC2D* e *FlacSlope5.0*. O fato de utilizar, no programa Slide, o Método de Bishop para a obtenção do fator de segurança, implica que a superfície de ruptura seja circular, sendo neste caso, diferente às superficies geradas pelos outros programas referidos. Baseado nestas comparações, é possível implementar e utilizar o método do incremento da gravidade, para determinar o valor do fator de segurança na modelagem discreta de um talude rochoso fraturado.

No caso do mecanismo de ruptura tipo *Step-Path*, a validação do modelo pode ser feita, comparando o valor do fator de segurança, obtido diretamente do *PFC2D* (onde sera implementado o método de incremento da gravidade), com o fator de segurança, obtido pelo modelo matemático proposto por Jennings.

#### *Capítulo 5. Modelagem da Propagação de Fraturas, a Coalescência e o Mecanismo de Ruptura tipo Step-Path Usando o Programa PFC* 102

Um outro problema encontrado, é a impossibilidade de controlar os parâmetros resistentes da fratura. No caso dos macro-parâmetros, eles têm que ser determinados através de simulações de ensaios de cisalhamento direto e, dependem em grande parte, dos micro-parâmetros das partículas que a conformam. Pelo critério de geração de fratura utilizado, a superfície da descontinuidade, apresenta uma aspereza que pode elevar os parâmetros de resistência como a coesão e o atrito. Para poder diminuir estes a valores, podem-se aplicar duas metodologias. A primeira, é aumentar a faixa de contatos envolvidos na fratura, de forma que um número maior de partículas sem ligação no contato, facilitem o deslizamento. O problema deste método é a espessura da fratura, o que pode gerar problemas, na geração de sistemas de fraturas, afetando a resistência do bloco unitário. Este método poderia ser aplicado a falhas ou zonas de cisalhamento. A diminuição do tamanho da partícula poderia ajudar também a diminuir o efeito da rugosidade, mas, esta diminuição implica um número maior de partículas para o arranjo, levando a um maior gasto computacional. A metodologia mais apropriada é, a diminuição da rigidez das partículas associadas à descontinuidade. Isto permite uma maior sobreposição de partículas sem gerar uma força normal muito alta, permitindo as partículas passar por entre outras, sem a necessidade de montá-las. Para o caso da presente pesquisa, foi utilizada esta metodologia, sendo os valores de rigidez diminuídos em duas ordens de grandeza, em relação à rigidez das partículas. Os valores dos parâmetros de resistência das fraturas são mostradas na tabela 5.8 para cada exemplo modelado.

A figura 5.23, mostra três exemplos iniciais a serem discutidos. O Exemplo N° 1 mostra a típica ruptura planar. O valor do fator de segurança pode ser obtido da equação de Jennings (equação 3-9), sendo neste caso o valor do coeficiente de continuidade k igual a 1 e de descontinuidade (o que corresponde à parcela de rocha intacta) igual a zero. Neste caso específico, os valores do fator de segurança apresentam valores bastante próximos. A primeira condição estabelecida por Jennings mostrada na figura 3.10 é representada no Exemplo N°2. Neste caso, o valor do fator de segurança obtido com o PFC2D e, com o método de Jennings, são diferentes. Jennings considera que a ruptura nestas parcelas de rocha intacta, são por cisalhamento, sendo esta uma consideração importante na sua formulação (equação 3-9). Isto não foi observado na modelagem. A presencia de fraturas de tração estaria influenciando no valor do fator de segurança, obtido com o PFC2D. O modelo matemático, considera que o bloco a se deslizar é rígido, e não contempla as forças que se poderiam apresentam dentro dele. O Exemplo N° 3 mostra uma outra configuração estrutural, mas, matematicamente, o fator de segurança segundo Jennings tem o mesmo valor que no caso do Exemplo N°2. Isto é porque a parcela de rocha intacta em ambos os casos é a mesma (no exemplo N° 2 tem duas parcelas de 2.0 m e no exemplo N° 3 uma parcela de 4.0 m). Neste exemplo, também foi observado o desenvolvimento de fraturas de tração e o desenvolvimento de fraturas coplanares secundárias, que são finalmente, as que ajudam à formação da superfície de ruptura. Os fatores de segurança obtidos com o *PFC2D* para estes últimos dois exemplos, são aproximados, sendo diferentes, com os valores obtidos pela formulação de Jennings.

A figura 5.24 mostra outros três exemplos. O Exemplo N° 4, mostra um último caso da condição discutida anteriormente. Neste, o modelo apresenta duas parcelas de rocha intacta de 5.8m. Aqui, também foi observado fraturas de tração, com a *coalescência* formada pela união de fraturas coplanares secundárias. O fator de segurança obtido com o modelo matemático de Jennings e, com o PFC2D, são diferente também neste caso. Observa-se que o fator de segurança (para o caso do PFC2D) é maior que nos casos anteriores. O fato das parcelas de rocha intacta ser maior para este exemplo, implica a aplicação de uma maior força, para uma propagação mais extensa das fraturas coplanares secundárias. A segunda condição considerada por Jennings mostrada na figura 3.11, é representada no Exemplo N° 5. Neste caso, a formulação de Jennings mostrada na equação 3-12, considera a influencia da resistência a tração da rocha intacta. Para este exemplo, o valor do fator de segurança, comparado com o valor obtido pelo PFC2D, são próximos. O mesmo acontece com o Exemplo N° 6, que é praticamente uma variação do caso anterior, que considera também a influencia do valor da resistência a tração da rocha. A configuração estrutural mostrada na figura 3.12 é representada neste exemplo.

A tabela 5.8 mostra os valores do fator de segurança obtidos na modelagem. Para os casos em que a formulação de Jennings considera a influência da resistência à tração da rocha intacta, os valores do fator de segurança, comparados com o fator de segurança obtido com o PFC2D, podem ser considerados como próximos. Mas, isto não acontece nos exemplos N° 2, 3 e 4, onde o modelo matemático não considera a resistência à tração da rocha intacta. Esta primeira condição estabelecida por Jennings, não foi observada na modelagem.



Figura 5.23: Avaliação do fator de segurança. Exemplos 1, 2 e 3



Figura 5.24: Avaliação do fator de segurança. Exemplos 4, 5 e 6

105

Exemplo	tipo	$c_{frat}$	$\phi_{frat}$	$F_{(PFC2D)}$	$F_{(Jennings)}$
1	Planar	1.100e+6	33°	$0.55e{+1}$	$0.50e{+1}$
2	step-path	$0.526e{+1}$	$35^{\circ}$	1.12e+1	$0.61e{+1}$
3	step-path	$0.526e{+1}$	$35^{\circ}$	$1.32e{+1}$	$0.61e{+1}$
4	step-path	$0.526e{+1}$	$35^{\circ}$	$1.99e{+1}$	$1.26e{+1}$
5	step-path	$0.526e{+1}$	$35^{\circ}$	2.09e+1	2.48e+1
6	step-path	$0.526e{+1}$	$35^{\circ}$	$1.38e{+1}$	1.48e+1

Tabela 5.8: Tabela comparativa dos fatores de segurança obtidos para cada exemplo

Einstein (Einstein, 1993) observou este problema na primeira condição de Jennings. Para valores baixos de tensão normal, a aplicação de uma tensão de cisalhamento no sentido do deslizamento, gera primeiro fraturas de tração que desenvolvem altos ângulos, em relação à direção de deslizamento. Simultaneamente ao desenvolvimento destas fraturas, a resistência ao cisalhamento é atingida na direção do deslizamento. A *coalescência* acontece pela união de fraturas coplanares secundárias. Quando a tensão normal é alta, não são observadas fraturas de tração e, a ruptura acontece pelo cisalhamento na rocha intacta. Para testar esta afirmação, utilizando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, foi comparada a tensão cisalhante e a resistência cisalhante para diferentes valores de tensão normal. Considerando uma fratura com mergulho de 45°, a tensão normal, gerada pelo peso de um bloco sobre a superfície dela, é igual que a tensão aplicada para o cisalhamento. Utilizando os valores de coesão (c) e atrito ( $\phi$ ) da rocha intacta considerados nos exemplos apresentados, os valores da tensão e resistência cisalhante, para diferentes valores de tensão normal, são mostrados na tabela 5.9. A figura 5.25 mostra a variação destes resultados, observando-se que a tensão cisalhante somente é superior à resistência ao cisalhamento, para valores de tensão normal maiores a 30MPaaproximadamente.

*Capítulo 5. Modelagem da Propagação de Fraturas, a Coalescência e o Mecanismo de Ruptura tipo Step-Path Usando o Programa PFC* 

c (MPa)	18.1			
$\phi$	$23.5^{\circ}$			
		$\sigma_n (MPa)$	$\tau$ (MPa)	Tensão cisalh. $(MPa)$
		1.0	18.53	1.0
		2.0	18.96	2.0
		3.0	19.40	3.0
		4.0	19.83	4.0
		5.0	20.26	5.0
		10.0	22.42	10.0
		15.0	24.58	15.0
		20.0	26.73	20.0
		25.0	28.89	25.0
		30.0	31.05	30.0
		35.0	33.21	35.0
		40.0	35.37	40.0
		45.0	37.53	45.0
		50.0	39.69	50.0

Tabela 5.9: Comparação entre o valor da resistência ao cisalhamento e a tensão cisalhante da rocha intacta.



Figura 5.25: Gráfico comparativo entre o valor da resistência ao cisalhamento e a tensão cisalhante da rocha intacta.

Os resultados obtidos na modelagem, avaliam a afirmação feita por Einstein. O mecanismo de ruptura proposto por Jennings representado na figura 3.10 e, modelada nos exemplos N° 2, 3 e 4, são raros de acontecer na natureza. Geralmente, a ruptura acontece pela *coalescência* entre fraturas coplanares secundárias, desenvolvidas após a aparição de fraturas de tração primaria. A primeira condição do modelo matemático de Jennings, se apresentaria somente, em casos de uma alta tensão normal, podendo ser um exemplo no caso de túneis profundos. Esta razão, poderia ser a justificação da pouca aproximação, entre os valores de fator de segurança obtidos com o *PFC2D*, comparados com os resultados da formulação de Jennings.

#### 5.6

# O Efeito na Modelagem Tridimensional do Mecanismo de Ruptura Tipo Step-Path

Na análise bidimensional do mecanismo de ruptura tipo *step-path*, a superfície de ruptura gerada é única e não envolve o efeito geométrico e espacial da fratura, que é representada somente como uma linha, com a persistência, a posição e o mergulho constante. Na realidade, a fratura é uma estrutura geológica finita, que pode ser representada como um plano e, que a sua persistência, posição e mergulho é dependente da seção bidimensional avaliada. Assim, se em uma análise tridimensional, a superfície de ruptura é visualizada em seções transversais, esta poderá conter diferentes combinações de fraturas formando-la em cada seção. Esta é uma premissa importante, no momento de avaliar a modelagem tridimensional da ruptura tipo *Step-Path*, em um talude rochoso fraturado.

## 5.6.1 Geração do Arranjo de Partículas

Para poder visualizar o efeito tridimensional, na modelagem do mecanismo de ruptura tipo step-path, foi gerado um arranjo de partículas de dimensões 30mx40mx40m. Para agilizar computacionalmente o processo, foi aumentado o tamanho das partículas, cujos raios variam de 0.3m a 0.5m. O arranjo esta composto de 106524 partículas, cujos macro-parâmetros são aproximadamente iguais aos referidos nos modelos bidimensionais. Para poder melhorar a visualização do movimento das partículas, foram colocadas listras de cores no modelo, as quais são ativadas antes de escavar o talude é levá-lo à ruptura.

# 5.6.2 Geração de Tridimensional de Descontinuidades

As descontinuidades em um maciço rochoso, tem uma influencia importante na modelagem da ruptura de um talude. A geração delas depende do bom conhecimento da geologia estrutural da zona. Como foi referido con anterioridade, uma descontinuidade pode ser qualquer feição geológica que denote uma separação na rocha contínua, com uma resistência à tração efetiva igual a zero, uma resistência cisalhante baixa e uma alta condutividade hidráulica, em comparação com a rocha intacta. Segundo o tamanho do espaçamento e da persistência da descontinuidade, esta pode ser separado em grupos, variando do 1° ordem (vários km) até o 7° ordem (Griffith Cracks) (Pusch, 1995). Espacialmente, as descontinuidades não são estritamente planos. Dependendo do tamanho e do tipo, a descontinuidade pode apresentar formas curvas e interceptar-se com outras, formando formas complexas e de difícil representação geométrica. A utilização de geometrias planas com orientação e mergulho constante poderia ser adotada segundo a escala do trabalho ou, para descontinuidades (utilizando a classificação de Pusch) de 4° e 5° ordem (de cm a 10 m), podendo atingir em alguns casos os de 3° ordem (30 - 150 m). O programa FracGen (Telles, 2005), é uma ferramenta computacional gráfica que permite a geração de sistemas de fraturas tridimensionais, as quais podem ser geradas de forma determinística ou estocástica. Em um sistema de fraturas, a orientação, o mergulho e a persistência são possíveis de se determinar em afloramentos no campo, mas, a sua distribuição dentro de um maciço rochoso, obedece a certas distribuições probabilísticas. Neste caso, a geração do sistema é feita estocáticamente, sendo chamadas de fraturas estatísticas. Um sistema de fraturas é gerado utilizando o programa FracGen com propriedades mostradas na tabela 5.10, sendo adotada a forma circular para facilitar o processo. O espacamento destas, obedece ao tamanho das partículas do modelo discreto.

Dir. mergulho	Mergulho	Espaçamento médio	Geometria	Raio
$270^{\circ}$	$45^{\circ}$	4.6  m	Circular	10.0 m

Tabela 5.10: Características geométricas do sistema de fraturas utilizado

Na figura 5.26, observa-se o modelo tridimensional de fraturas e a distribuição do espaçamento. No gráfico de freqüências do espaçamento se observa uma tendência de tipo exponencial inversa, correspondendo desta forma, as afirmações feitas por Priest e Hudson (Priest & Hudson, 1976), que foram mostradas na figura 2.1.

110



Figura 5.26: Sistema de fraturas gerado no programa FracGen

O modelo esta composto por 49 fraturas de forma circular dentro de uma região de  $30m \times 40m \times 40m$ , correspondente ao arranjo de partículas gerado. Observa-se a presença de alguns discos com parte da sua superfície fora da região pré-estabelecida. Isto acontece porque o gerador de fraturas utiliza a freqüência destas, que é uma medida do número de descontinuidades por volume unitário, presente no macico rochoso. As fraturas são representadas pelo ponto centróide da sua superfície. A freqüência volumétrica seria o número destes pontos centróides contidos dentro de um volume unitário. Isto traz como conseqüência que, no momento da geração aleatória destes pontos, alguns deles fiquem nas periferias e, eventualmente, a fratura tenha uma parte da sua superfície fora dos limites da região pré-estabelecida. O programa fornece a posição destes centróides, assim como as informações do raio da fratura, a orientação e o mergulho. Uma aplicação em C++ foi desenvolvida para permitir usar estas informações no programa *PFC3D*. Assim, usando o critério de geração de fraturas anteriormente descrito, é possível fazer uma acoplamento entre as informações fornecidas pelo programa FracGen e, o PFC3D. A figura 5.27 mostra a inserção destas fraturas dentro do arranjo de partículas no programa PFC3D. A influencia tridimensional no fraturamento, pode ser apreciada nesta figura. Observa-se duas seções (frente e posterior) que mostram que, para o mesmo sistema de fraturas, diferentes configurações estruturais são formadas em cada uma delas. Eventualmente uma fratura que aparece na primeira seção, pode ou não aparecer em outra seção, ou se mostrar com um tamanho menor. Isto depende da posição, do tamanho, da orientação, da forma e do mergulho dela, dentro da região estudada e, da posição da seção avaliada.



Figura 5.27: Inserção do sistema de fraturas gerados pelo programa FracGen no programa PFC3D

#### 5.6.3

## Superfícies de Ruptura tipo Step-Path encontradas na Modelagem Tridimensional

Após a geração do arranjo e, a inserção das fraturas, o talude é levado à ruptura utilizando o mesmo método de incremento da gravidade, usado no caso bidimensional. A ruptura do talude acontece quando o valor da gravidade é de  $17.8g_0$ . A figura 5.28, mostra a ruptura do talude. Observa-se que, a forma da superfície de ruptura, é bastante irregular, podendo implicar varias combinações de fraturas envolvidos na sua geração. No topo do modelo, a superfície de ruptura aflora em forma de curva, sendo facilmente apreciável a extensão variável dela. Para pode apreciar a forma da superfície de ruptura, o modelo foi dividido em 5 fatias de 6.0m considerados como seções (figura 5.28).



Figura 5.28: Modelamento tridimensional da ruptura tipo step-path de um talude rochoso fraturado (PFC3D)

A figura 5.29, mostra as seções do modelo tridimensional. Aqui, são mostradas as seções no inicio e no após a ruptura. Na seção N° 1, pode ser apreciada a superfície de ruptura tipo Step-Path. O fato da fratura superior não aflorar em superfície, condiciona a propagação dela, formando uma fratura de tração. Esta mesma tendência é mostrada na seção N° 2. A diferencia da primeira seção, a fratura superior mostra um desenvolvimento de fratura coplanar secundária, combinada com a propagação por tração, provavelmente desenvolvida pelo fato da fratura apresentar um comprimento menor nesta seção. Observa-se também a aparição de uma fratura nova associada à ruptura na parte central. A aparição de uma outra fratura, na parte superior da seção N° 3, muda a configuração das estruturas envolvidas na ruptura. A coalescência acontece principalmente na parte central do modelo e, a fratura por tração superior não é observada com muita claridade. Isto acontece porque nesta seção, encontra-se a transição entre a superfície associada à fratura por tração das duas seções anteriores, com a superfície desta nova fratura na parte superior, onde a ruptura é por cisalhamento. A seção N° 4, não apresenta a fratura por tração no topo, mas continua apresentando uma superfície de ruptura tipo Step-Path. A coalescência de fraturas acontece principalmente na parte central do modelo. A seção Nº 5 mostra a mesma tendência da

seção anterior, sendo somente apreciável a diminuição da influencia da fratura superior, onde aparentemente, a superfície de ruptura afloraria no topo do modelo somente pela propagação desta, em forma de fratura de tração primária e, fratura coplanar secundária.



Figura 5.29: Diferentes superficies 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).