

### 3

## Propagação de Fraturas, Coalescência e o Mecanismo de Ruptura tipo Step-Path

O *step-path* é um mecanismo de ruptura complexo que envolve diferentes combinações de descontinuidades que são unidas uma a outra por rupturas dentro do material intacto. O movimento relativo das superfícies da descontinuidade leva a um aumento de tensões nas bordas desta, onde, dependendo das propriedades do material, a propagação da descontinuidade pode ser iniciada. Esta nova superfície de ruptura pode se juntar com outra descontinuidade ou com a propagação desta, interligando-se uma a outra. Este fenômeno de interligação entre descontinuidades é chamado de *coalescência*. O mecanismo de ruptura tipo *step-path* envolve a propagação e *coalescência* de descontinuidades na geração da superfície de deslizamento.

A propagação de uma fratura é um fenômeno que tem sido estudado pela Mecânica da Fratura. Proposto inicialmente para materiais metálicos, esta área da engenharia tem como objetivo fornecer respostas quantitativas para um determinado tipo de problema relacionado com a presença de fissuras, procurando saber como vai ser a sua propagação. Inglis (Inglis, 1913) propôs uma primeira solução ao problema. Considerando uma placa metálica contendo um furo elíptico com semi-raios  $a$  e  $b$  submetido a um campo de tensões uniforme (figura 3.1), o valor da tensão máxima onde a curvatura da elipse ( $\rho = b^2/a$ ) é mínimo é dado por:

$$\sigma_{x(0,a)} = \sigma_L \left(1 + \frac{2a}{b}\right) = \sigma_L \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right) \quad (3-1)$$

ou

$$\frac{\sigma_{x(0,a)}}{\sigma_L} = \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right) \quad (3-2)$$

sendo o ponto  $C$  da figura 3.1a onde a curvatura da elipse é mínima.

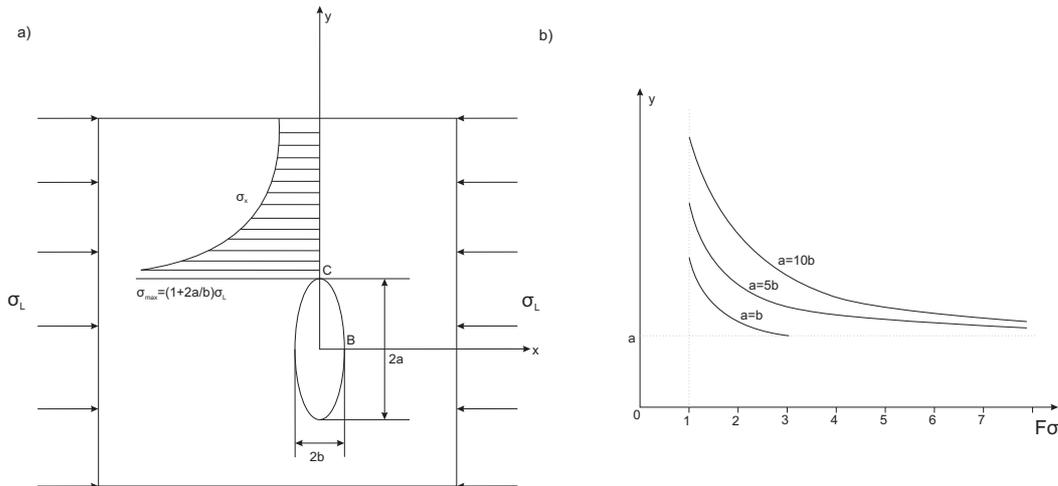


Figura 3.1: a) Furo Elíptico com semi-eixos  $a$  e  $b$  submetido a um estado de tensões uniforme; b) Representação esquemática da concentração de tensões em um furo elíptico (Whittaker *et al*, 1992)

A relação entre  $\sigma_{x(0,a)}/\sigma_L$  é referido como o fator de concentração de tensões ou concentrador de tensões, sendo denotado como  $F_\sigma$  (Whittaker *et al*, 1992). Para o caso  $b \ll a$ , o valor do  $F_{\sigma_x}$  pode ser expresso como:

$$F_{\sigma_x} \approx \frac{2a}{b} = 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (3-3)$$

Nesta equação, é possível apreciar que o valor do fator de concentração de tensões  $F_{\sigma_x}$  pode tomar valores muito grandes quando se diminuir o valor do semi-eixo menor da elipse. Isto é mostrado na figura 3.1b para diferentes relações com os semi-eixos. Quando o valor do semi-eixo  $b$  aproxima-se de zero, o valor do fator de concentração de tensões vai para infinito  $F_{\sigma_x} = \infty$ . Assim, este critério não pode ser aplicado em fissuras onde o valor do semi-eixo  $b$  tende a ser zero, porque a tensão máxima tenderia ao infinito independentemente do valor de carga aplicado.

### 3.1 Modos de Ruptura

A propagação da fratura é consequência do deslocamento relativo das duas superfícies que compõem a fissura. Desta forma, três tipos básicos de modos de ruptura são associados a estes deslizamentos (figura 3.2).

- Modo I, também chamado modo abertura, acontece quando as superfícies da fissura são separados simetricamente em um deslizamento perpendicular a ela;

- Modo II, chamado também modo deslizamento, acontece quando uma superfície desliza sobre a outra em sentidos opostos em uma mesma direção;
- Modo III, chamado também modo de desgarre ou modo anti-plano, acontece quando as superfícies são submetidas a forças de cisalhamento fora do plano, movendo-se relativamente uma sobre a outra em sentido contrario, mas, sempre paralelo à fissura.

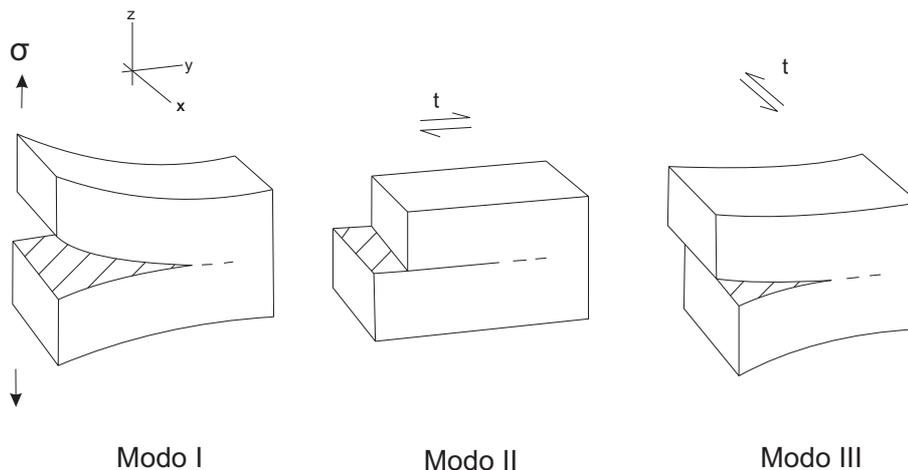


Figura 3.2: Três modos básicos de ruptura associado ao deslizamento das superfícies da fissura (Whittaker *et al*, 1992)

Pode ocorrer combinação de modos de ruptura.

### 3.2 Critério do Início da Propagação de uma Fissura

Como foi referido anteriormente, o fator de concentração de tensões  $F_{\sigma_x}$  estabelecido por Inglis não permite definir um critério para a iniciação da propagação de uma fratura. Para superar este problema, Griffith (1921) (apud Whittaker *et al*, 1992) define, baseado na teoria do balanço de energia, que a propagação é iniciada quando:

$$G_I = G_{IC} \quad (3-4)$$

sendo  $G_I$  a energia liberada da deformação elástica para a ruptura *Modo I* e o valor de  $G_{IC}$  é a energia crítica de deformação para o mesmo tipo de ruptura. É importante mencionar que o valor de  $G_{IC}$  é constante para cada determinado material. Este conceito pode ser estendido para a ruptura *Modo II*, sendo neste caso, a propagação iniciada quando  $G_{II} = G_{IIC}$ .

O critério mais usado na prática é definido em termos do Fator de Intensidade de Tensão  $K$ , na qual, utilizando o mesmo critério de Griffith, a propagação de uma fissura é iniciada quando:

$$K_I = K_{IC} \quad (3-5)$$

onde  $K_I$  é o fator de intensidade de tensão para a ruptura Modo I e  $K_{IC}$  é o fator de intensidade de tensão crítico. Analogamente à energia crítica de deformação mencionada anteriormente, o valor de  $K_{IC}$  é uma propriedade intrínseca do material e pode ser determinada através de ensaios de laboratório (Ulusay & Hudson, 2007).

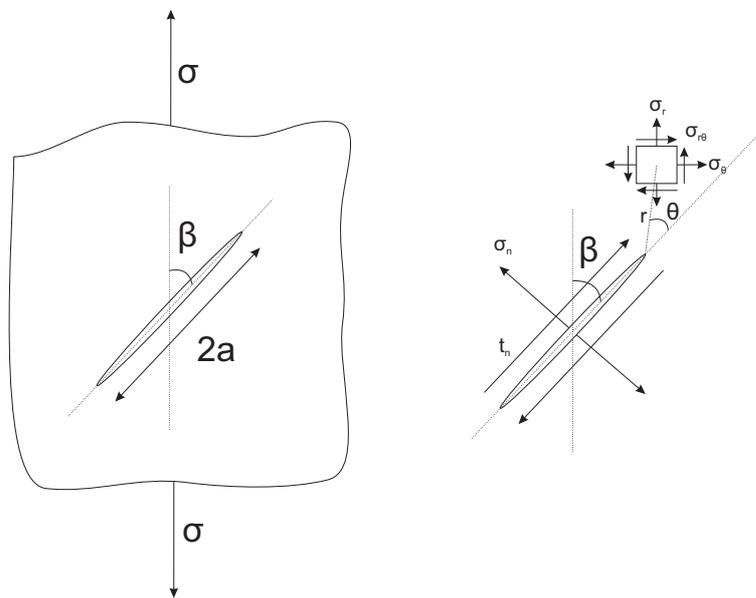


Figura 3.3: Fissura em um plano infinito (Whittaker *et al*, 1992)

A figura 3.3 mostra uma fissura em um plano infinito, com ângulo de inclinação e o tamanho definido. Neste caso, considerando que o valor de  $r$  é muito menor que o valor de  $a$  ( $r \ll a$ ), os valores do fator de intensidade de tensão, para a ruptura *Modo I* e o *Modo II*, pode ser determinada como (Whittaker *et al*, 1992):

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma_n \sqrt{\pi a} = \sigma \sqrt{\pi a} \sin^2 \beta \\ K_{II} &= \tau_n \sqrt{\pi a} = \sigma \sqrt{\pi a} \sin \beta \cos \beta \end{aligned} \quad (3-6)$$

### 3.3 Propagação e Coalescência

Griffith (1924) (apud Whittaker *et al*, 1992) estabelece que a propagação de uma fissura em condições de compressão é iniciada por tensões de tração, concentradas nas pontas da fissura pré-existente. Nestas condições, é inici-

ada a propagação, formando as fraturas de tração primárias que se propagam no sentido da direção da carga aplicada. Além deste tipo de propagação, as fraturas coplanares e oblíquas secundárias são geradas, consistindo de fraturas de propagação por cisalhamento. Observações feitas por Park e Bobet (Park & Bobet, 2009), em amostras de gipsito submetidos à compressão uniaxial, observou-se até três tipos de fraturas por propagação, geradas como consequência da carga: a fratura primária, gerada por tração, iniciada nas pontas da fissura e com ausência de material pulverizado e as fraturas secundárias (coplanar e oblíqua) que são fraturas por cisalhamento e que apresentam material triturado como indicativo da alta compressão e cisalhamento (figura 3.4).

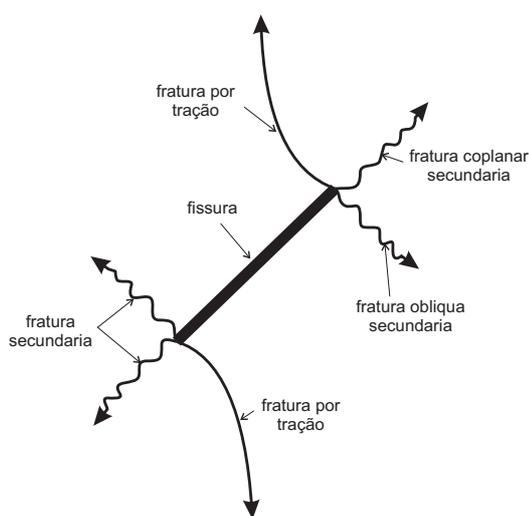


Figura 3.4: Tipos de propagação observados em uma amostra rochosa em condições de compressão (Park & Bobet, 2009)

As características destes tipos de fratura por propagação, são as seguintes:

- Fraturas de Tração Primária (*Wing Cracks*). Estas são fraturas por tração (*Modo I*) inicializadas nas pontas ou nas proximidades das pontas da fissura pre-existente, podendo ser esta, uma fissura aberta o fechada. A forma de esta fratura é geralmente curvilínea, propagando-se no sentido da direção da carga aplicada (figura 3.5) e não apresenta material triturado na sua superfície. O ângulo inicial da propagação é alto em referência à fissura quando a propagação é iniciada na ponta e baixo quando a propagação é iniciada nas proximidades dela. O seu ponto de início da propagação tende a se deslizar para o centro da fissura quando esta faz um alto ângulo com a direção da carga aplicada. Este tipo de propagação é o primeiro em aparecer (Park & Bobet, 2009).

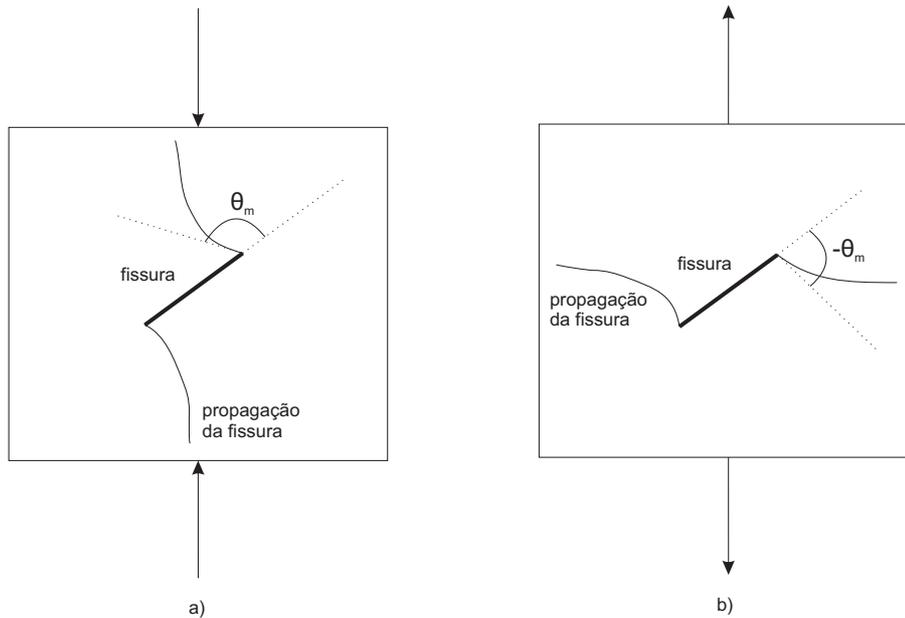


Figura 3.5: Comparação de propagação da fratura em condições de compressão (a) e tração (b) (Whittaker *et al*, 1992)

- Fraturas Secundárias por Cisalhamento (*Secondary Cracks*). São fraturas por cisalhamento (*Modo II*) que aparecem logo depois das fraturas de tração primária e sempre são iniciadas nas pontas da fissura pre-existente. Existem dois tipos delas, que podem ser coplanares ou quasi-coplanar à fissura e oblíqua a ela. Estes tipos de propagação apresenta material pulverizado na sua superfície, produto do cisalhamento (Park & Bobet, 2009).

A o ângulo que faz a fratura coplanar secundária com a fissura  $\theta_m$  e que esta definida na figura 3.5, apresenta uma curva típica para diferentes valores do ângulo de inclinação da fissura. Como foi mencionado anteriormente, Park e Bobet (Park & Bobet, 2009) sugerem que o ângulo inicial da propagação ( $180^\circ - \theta_m$ ) é alto em referência à fissura quando a propagação é iniciada na ponta e baixo quando a propagação é iniciada nas proximidades dela. Esta afirmação pode-se observar na figura 3.6 proposta por Whittaker (Whittaker *et al*, 1992). Observa-se que para ângulos de inclinação da fissura ( $\beta$ ) entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$ , o valor do ângulo  $\theta_m$  não tem muita variação. O ângulo  $\theta_m$  incrementa o seu valor abruptamente para valores de inclinação da fissura  $\beta$  maiores a  $60^\circ$ . Este ângulo de inicio da propagação  $\theta_m$  é influenciado pelo atrito das superfícies da fissura, o que traz como conseqüência, um aumento em o seu valor. A figura 3.6 mostra também este efeito, observando-se que, os ângulos de inicio da propagação são maiores quando aumentar o atrito, mas, a tendência da curva é sempre similar.

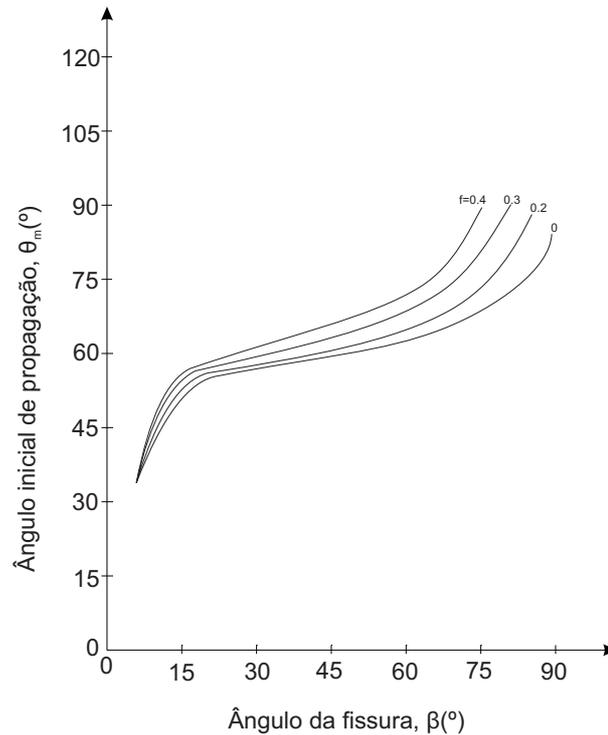


Figura 3.6: Ângulo inicial de propagação VS o ângulo da fissura em condições de compressão (Whittaker *et al.*, 1992)

Quando o movimento relativo das superfícies de uma fissura inicia a propagação, a nova fissura gerada no material intacto pode-se conectar com outra fissura (se existir) ou com a fissura gerada pela propagação desta. A *coalescência* é definida como a conexão de fissuras ou fraturas devido através da propagação das mesmas e que pode acontecer pela união de fraturas de tração primária ou fraturas por cisalhamento secundárias ou pela combinação destas. Diferentes autores tem estudado este tipo de mecanismos para diferentes materiais, tais como Park e Bobet (Park & Bobet, 2009); Wong e Einstein (Wong & Einstein, 2009); Mughieda e Karasneh (Mughieda & Karasneh, 2006); Vásárhelyi e Bobet (Vásárhelyi & Bobet, 2000) e Bobet e Einstein (Bobet & Einstein, 1998) entre outros.

Park e Bobet (Park & Bobet, 2009) estabelecem até oito tipos de *coalescência*, que dependem da posição das fissuras e do tipo de fratura associada à ligação. Assim, temos os seguintes tipos de *coalescência*:

- Tipo I: Fissuras pre-existentes coplanares. A união das fissuras acontece pela interligação de fraturas coplanares secundárias. É observado

- também o desenvolvimento das fraturas de tração primária tanto nas pontas de fissuras associadas à *coalescência* como nos outros extremos.
- Tipo II: fissuras não coplanares. A união acontece pela interligação de fraturas coplanares secundárias com uma fratura por tração. É possível de ser observado o desenvolvimento dos outros tipos de fraturas de propagação.
  - Tipo III: fissuras não coplanares. A união acontece pela interligação de fraturas coplanares secundárias com uma fratura por tração. A fratura primária é formada na ponta de uma fissura e se propaga até a fratura coplanar secundária da outra fissura. Na configuração final, são observadas duas fraturas de tração em paralelo.
  - Tipo IV: fissuras não coplanares. A união acontece pela interligação de fraturas de tração primárias com a fissura. É possível de se desenvolver os outros tipos de fraturas por propagação.
  - Tipo V: fissuras não coplanares. Transição entre a *coalescência* tipo IV e o tipo VI. A interligação é por fraturas coplanares secundárias e fraturas por cisalhamento. É observada as fraturas de tração primária nas pontas extremas das fissuras.
  - Tipo VI: fissuras não coplanares. A união acontece pela interligação de fraturas oblíquas secundárias com a fratura por tração primária em ambas pontas das duas fissuras. É possível de ser observado o desenvolvimento das fraturas secundárias por cisalhamento.
  - Tipo VIIa, VIIb: fissuras não coplanares. Combinação entre fraturas oblíquas secundárias com plano de tração associado (a) ou a união direta delas (b).
  - Tipo VIII: fissuras não coplanares. *Coalescência* formada pela interligação de uma fratura oblíqua secundária e uma fratura coplanar secundária.

A figura 3.7 esquematiza os diferentes tipos de *coalescência* escritos.

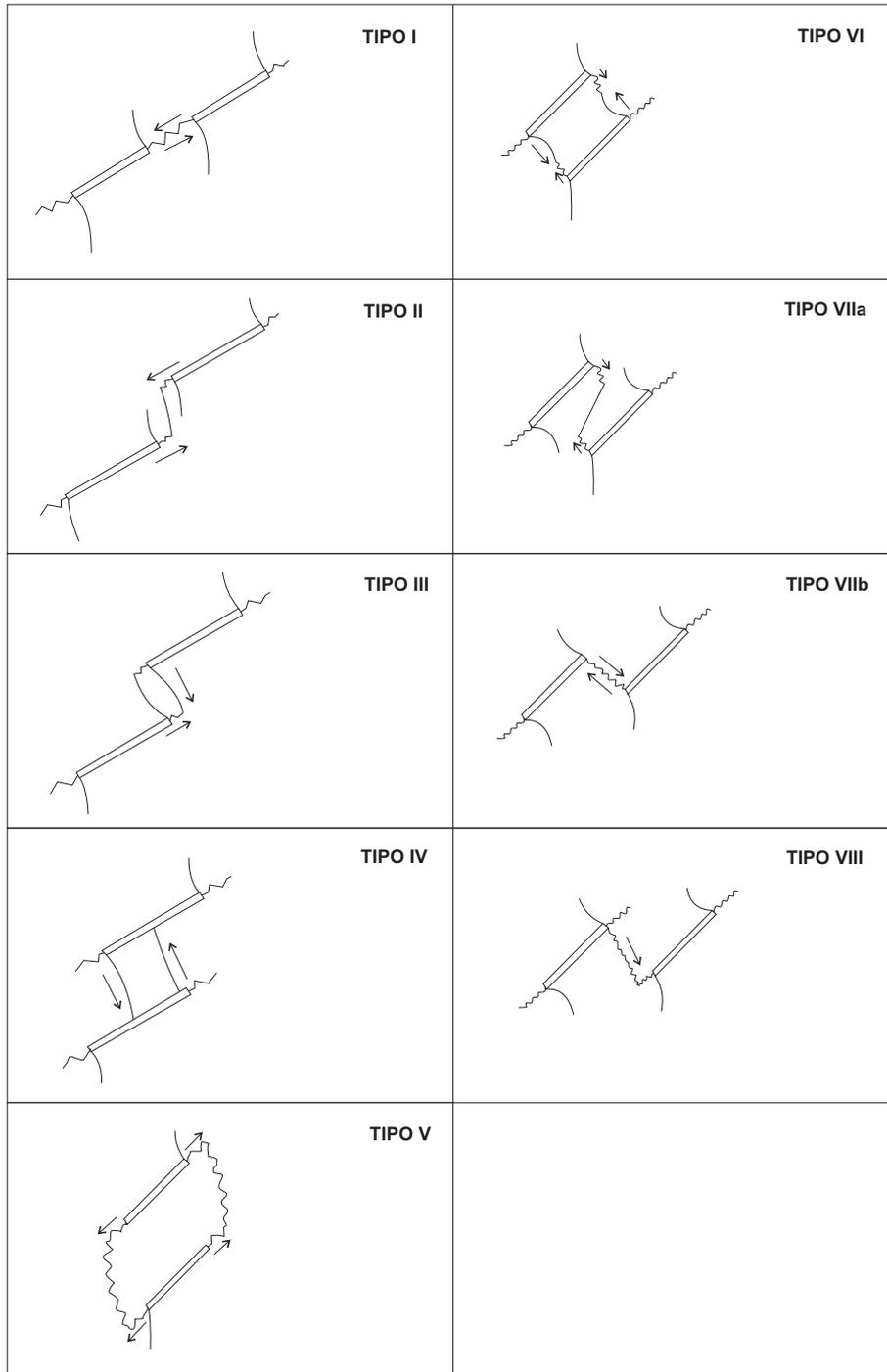


Figura 3.7: Tipos de *Coalescência* (Park & Bobet, 2009)

Vásárhelyi e Bobet (Vásárhelyi & Bobet, 2000) fizeram implementações no programa *FROCK* (*Fracture Rock*) para representar *coalescências* em materiais frágeis com fissuras, considerando um meio homogêneo, isotrópico e linear elástico. No entanto, a fissura pode mostrar um comportamento não linear quando é fechada, devido ao atrito das suas superfícies. O *FROCK* foi usado em simulações em amostras, sendo os resultados mostrados na figura 3.8:

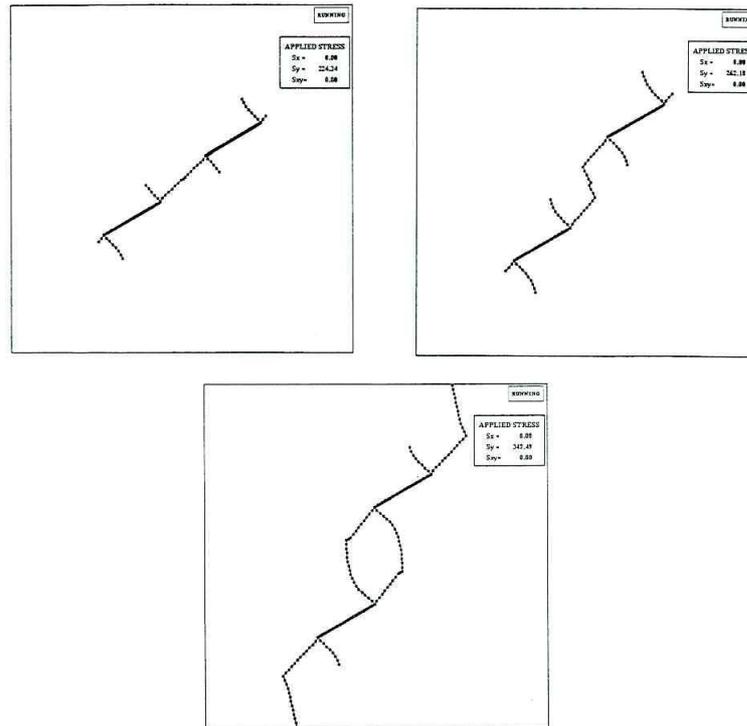


Figura 3.8: Tipos de coalescências obtidas no programa FROCK para fissuras abertas (Vásárhelyi & Bobet, 2000)

Mughieda e Omar (Mughieda & Omar, 2008) usaram o método dos elementos finitos para representar também os fenômenos de *coalescência* em amostras. Eles mostraram que, no caso da figura 3.9, a alta concentração da tensão cisalhante nas fissuras assim como das tensões de tração nas pontas dela, faz com que a propagação seja iniciada. As fraturas por propagação primária (*wings cracks*) são consequência das tensões de tração e as fraturas de propagação secundárias (*secondary cracks*) são consequência do cisalhamento da fissura.

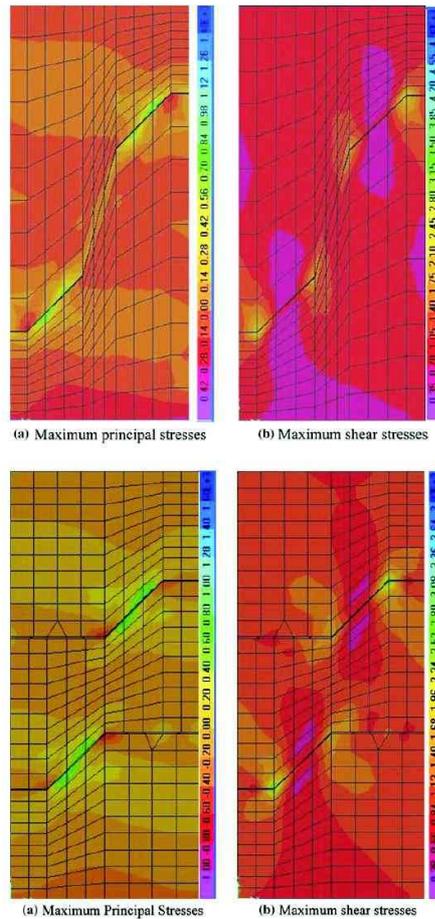


Figura 3.9: Tensões principais máximas e tensões cisalhantes máximas ao redor de fissuras (Mughieda & Omar, 2008)

### 3.4 Análise do Mecanismo de Ruptura Tipo Step-Path

O estudo da propagação e a *coalescência* de discontinuidades é importante, porque a resistência ao cisalhamento de um maciço rochoso está altamente afetado pelo comportamento mecânico e configuração geométrica de fraturas não persistentes. A propagação de fraturas e os processos de *coalescência* podem contribuir a falhas do maciço rochoso em taludes, fundações e túneis (Mughieda & Karasneh, 2006).

Estes mecanismos de propagação e *coalescência* em fraturas são também observados em maciços rochosos. No caso da escavação de um talude, quando a sua altura é grande ou as discontinuidades do maciço rochoso são pouco persistentes, o tipo de ruptura geralmente a acontecer é o *step-path*. Este é um mecanismo de ruptura complexo que envolve as discontinuidades e a rocha intacta. As discontinuidades se propagam pelo movimento relativo das suas

superfícies, criando uma união de descontinuidades por *coalescências* através da rocha intacta. Jennings (Jennings, 1970) foi o primeiro a estabelecer uma metodologia de avaliação baseada no equilíbrio limite. Em um primeiro cenário, a ruptura acontece através de um plano equivalente de ruptura, onde é avaliada a estabilidade. Neste caso, as descontinuidades são coplanares como é mostrado na figura 3.10. A ruptura vai acontecer por cisalhamento no plano  $AB$ . Neste caso, a resistência ao cisalhamento equivalente nesta superfície é dependente da resistência ao cisalhamento da rocha intacta e das descontinuidades.

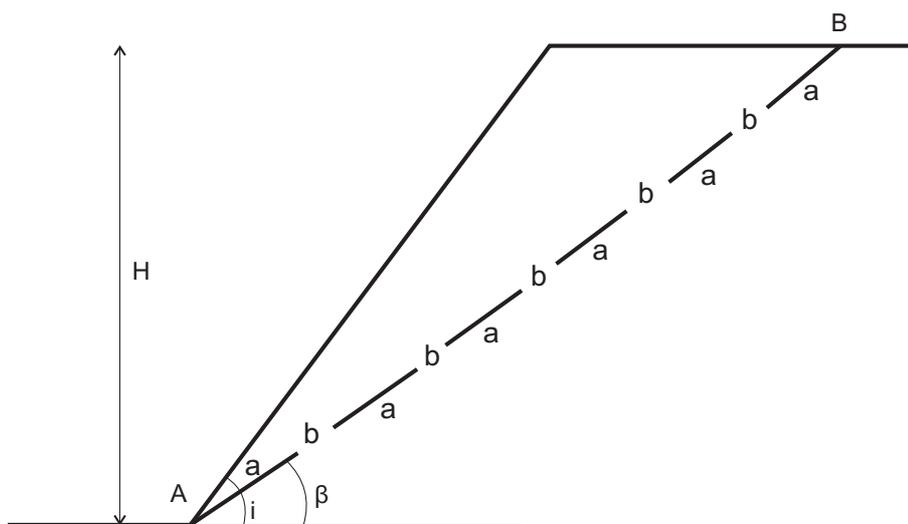


Figura 3.10: Cisalhamento em um maciço rochoso ao longo do plano  $\beta$  (Jennings, 1970)

O coeficiente de continuidade é definido como:  $k = \Sigma a / (\Sigma a + \Sigma b)$ , e o coeficiente de descontinuidade como:  $(1 - k) = \Sigma b / (\Sigma a + \Sigma b)$ . A força resistente ao deslizamento na superfície equivalente é dada pela expressão:

$$RF = AB(c_a + \sigma_n \tan \phi_a) \quad (3-7)$$

sendo  $c_a$  e  $\phi_a$  a coesão e o atrito equivalente na superfície de ruptura. Esta equação 3-7 pode ser expressa também como:

$$RF = \Sigma b(c_m + \sigma_n \tan \phi_m) + \Sigma a(c_j + \sigma_n \tan \phi_j) \quad (3-8)$$

onde  $c_m, \phi_m, c_j$  e  $\phi_j$  são a coesão e o atrito da rocha intacta e da descontinuidade respectivamente. Considerando que  $\Sigma a$  e  $\Sigma b$  podem ser colocadas em função do coeficiente de continuidade  $k$ , combinando as equações 3-7 e 3-8 temos:

$$c_a + \sigma_n \tan \phi_a = (1 - k)(c_m + \sigma_n \tan \phi_m) + k(c_j + \sigma_n \tan \phi_j) \quad (3-9)$$

Este tipo de conceito, chamado de continuidade tem aplicações restritas. Em

geral, a superfície equivalente pode conter mais de um sistema de descontinuidades e não ser necessariamente coplanar. No caso de dois sistemas de descontinuidades (figura 3.11), o sistema *junta* –  $\alpha$  e o sistema *junta* –  $\psi$  não são paralelos à linha *AB*. Neste caso, a ruptura acontece por cisalhamento na descontinuidade *junta* –  $\alpha$ , propagando-se por cisalhamento na rocha intacta até um ponto onde começa a ruptura por tração, o que finalmente junta ambas descontinuidades. Jennings (Jennings, 1970) propõe para o propósito do modelo, que a descontinuidade *junta* –  $\psi$  é só aberta, dando continuação ao mecanismo descrito.

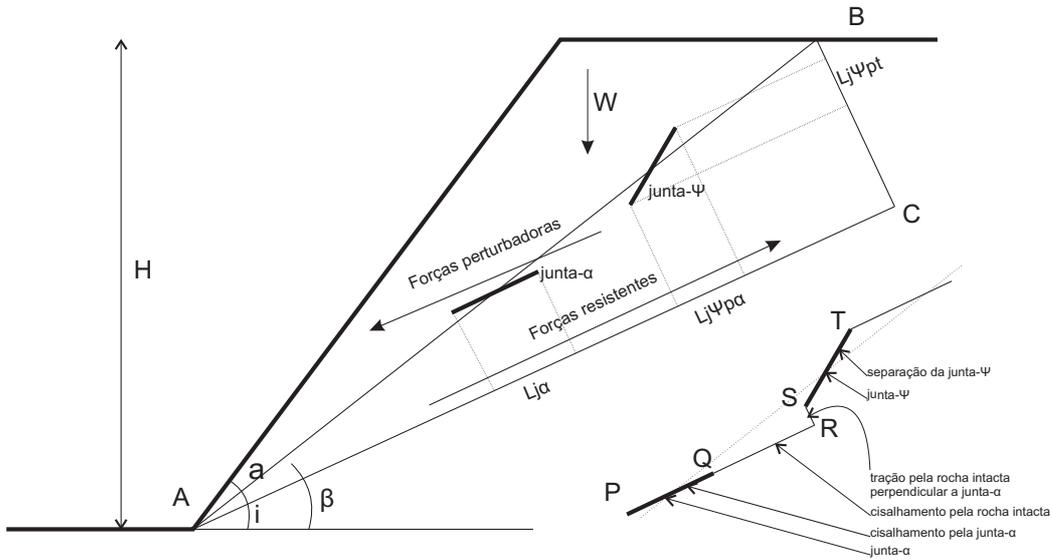


Figura 3.11: Ruptura potencial ao longo da superfície *AB* que inclui descontinuidades pre-existentes (Jennings, 1970)

Para este caso, o coeficiente de continuidade para o cisalhamento ao longo da linha *AB* é:

$$k_{\alpha\psi\beta} = \frac{\Sigma L_{j\alpha} + \Sigma L_{j\psi p\alpha}}{AC} \quad (3-10)$$

e o coeficiente de continuidade no caso da tração é dado pela expressão:

$$k_{\psi\beta t} = \frac{\Sigma L_{j\psi pt}}{BC} \quad (3-11)$$

O valor da força resistente para este caso é determinado da forma seguinte:

$$RF = AC(1 - k_{\alpha\psi\beta})(c_m + \sigma_n \tan \phi_m) + ACk_{\alpha\psi\beta}(c_j + \sigma_n \tan \phi_j) + BC(1 - k_{\psi\beta t})t_m \quad (3-12)$$

onde  $t_m$  é a resistência a tração da rocha intacta. A força perturbadora vem a ser definida pela componente do peso  $W$  da massa a se movimentar na direção do deslizamento. Assim, a força perturbadora definida como  $DF$  é igual a  $W \sin \alpha$ . O fator de segurança é representado como:

$$F = \frac{RF}{DF} \quad (3-13)$$

A observação principal deste método é que o parâmetro mais importante e que introduz o mecanismo de ruptura *step-path* dentro do cálculo é o coeficiente de continuidade. Este parâmetro resulta muito sensível à forma de união das descontinuidades. Estas uniões que se refere Jennings são *coalescências* e modificam este coeficiente segundo seu tipo, podendo ser de ponta a ponta (caso I), de ponta ao ponto médio da descontinuidade (caso II) e de ponta até a quarta parte da outra descontinuidade (caso III). Estes tipos de união são apreciados na figura 3.12b. Assim, considerando um sistema de descontinuidades (figura 3.12a) e sendo  $d_{m\alpha}$  o espaçamento médio das descontinuidades de comprimento  $L_{j\alpha}$  e  $AB = L_{\beta}$  temos o seguinte:

O número de descontinuidades interceptadas na linha  $L_{\beta}$

$$n = \frac{BC}{d_{m\alpha}} = \frac{L_{\beta} \sin(\beta - \alpha)}{d_{m\alpha}} \quad (3-14)$$

e a continuidade das descontinuidades no plano  $\beta$

$$k_{\alpha\beta} = \frac{\Sigma a}{AC} = \frac{nL_{j\alpha}}{L_{\beta} \cos(\beta - \alpha)} \quad (3-15)$$

$$k_{\alpha\beta} = \frac{L_{j\alpha}}{d_{m\alpha}} \tan(\beta - \alpha) \quad (3-16)$$

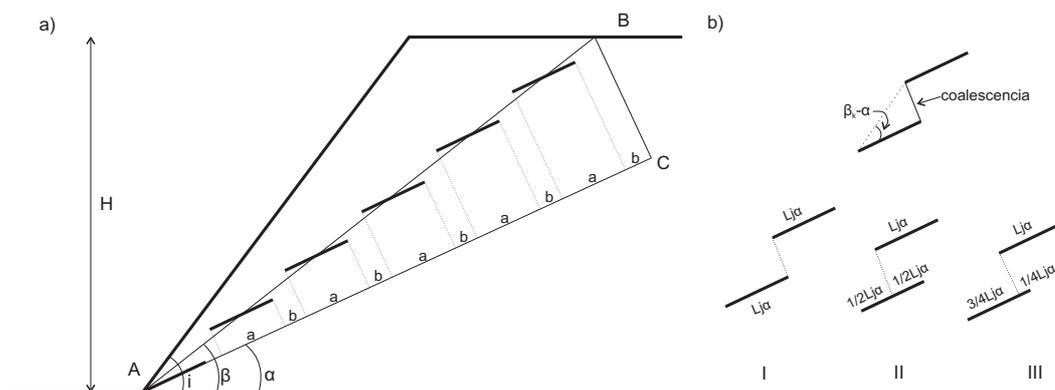


Figura 3.12: a) Ruptura potencial ao longo da superfície AB que intercepta uma quantidade de descontinuidades com mergulho  $\alpha$ , b) Modos de união de descontinuidades por propagação (Jennings, 1970)

Esta equação 3-16 só é válida quando a união entre as descontinuidades corresponde ao caso I. A parcela  $L_{j\alpha}/d_{m\alpha}$  está relacionada com o ângulo  $\beta_k - \alpha$  (figura 3.12b) e varia segundo tipo de *coalescência*. Este ângulo pode ser

definido como:

$$\begin{aligned} \tan(\beta_k - \alpha) &= \frac{d_{m\alpha}}{L_{j\alpha}}, & (\text{caso I}) \\ \tan(\beta_k - \alpha) &= \frac{2d_{m\alpha}}{L_{j\alpha}}, & (\text{caso II}) \\ \tan(\beta_k - \alpha) &= \frac{4d_{m\alpha}}{3L_{j\alpha}}, & (\text{caso III}) \end{aligned} \quad (3-17)$$

Assim, levando em conta estas considerações, o fator de continuidade para cada caso será:

$$\begin{aligned} k_{\alpha\beta} &= \frac{\tan(\beta - \alpha)}{\tan(\beta_k - \alpha)}, & (\text{caso I}) \\ k_{\alpha\beta} &= \frac{2 \tan(\beta - \alpha)}{\tan(\beta_k - \alpha)}, & (\text{caso II}) \\ k_{\alpha\beta} &= \frac{4 \tan(\beta - \alpha)}{3 \tan(\beta_k - \alpha)}, & (\text{caso III}) \end{aligned} \quad (3-18)$$

Modificando o valor do coeficiente de continuidade, pode-se determinar o valor da força resistente ao movimento, segundo caso estudado.

Os métodos probabilísticos como os propostos por Baczynski (Baczynski, 2000) e Miller, Whyatt e McHugh (Miller *et al*, 2004) representam uma melhoria nas metodologias de avaliação deste mecanismo de ruptura. O primeiro desenvolveu o programa SPEPSIM4 que simula uma potencial superfície de falha ao longo de um sistema de celas associadas onde podem acontecer vários modos de ruptura (deslizamento pelas descontinuidades ou propagação da fratura pela rocha intacta). O programa revisa em cada cela procurando alguma estrutura, se nenhuma acontecer, é definida para aquela cela a resistência da massa rochosa. Se acontecer alguma estrutura, mediante o processo de Monte-Carlo é gerada uma descontinuidade. Esta pode terminar em outra descontinuidade ou não, sendo neste último caso gerado pelo próprio programa uma união entre elas. O usuário é quem define a linha equivalente de ruptura segundo características geológicas. O método de Miller, chamado também Método do Ponto de Estimativa, avalia a probabilidade de deslizamento e fornece um valor do fator de segurança, trabalhando também com o conceito da estrutura equivalente (figura 3.13)

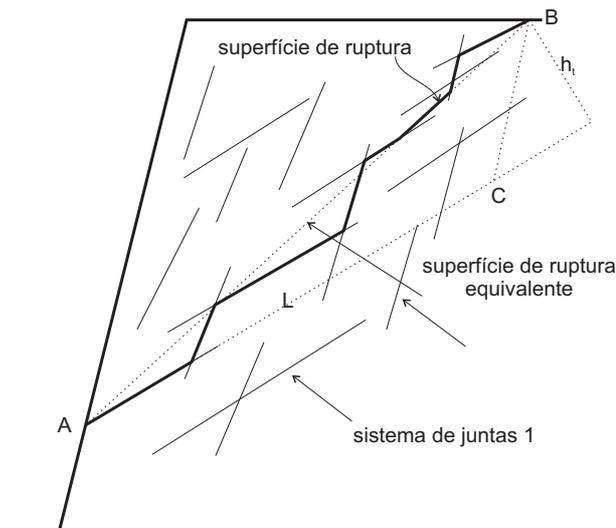


Figura 3.13: Ruptura tipo *Step-path* (Miller *et al*, 2004)

a probabilidade de deslizamento para este método é definida como:

$$P_S = \frac{1}{(z^u \Gamma(u))} \int_0^1 e^{-\left(\frac{x}{z}\right)} x^{u-1} dx \quad (3-19)$$

sendo  $z$  e  $u$  parâmetros de forma da função probabilidade de densidade.

Os métodos numéricos ainda não têm um uso estendido na avaliação do mecanismo de ruptura *step-path*. Eberhardt, Stead, Karami e Coggan (Eberhardt *et al*, 2004); Stead, Eberhardt e Coggan (Stead *et al*, 2003) utilizam o programa *ELFEN* (baseado em elementos finitos e elementos discretos) para representar um *step-path*. O modelo inicia com uma representação contínua da geometria do problema usando elementos finitos. As discontinuidades são incluídas dentro deste modelo contínuo usando elementos discretos.

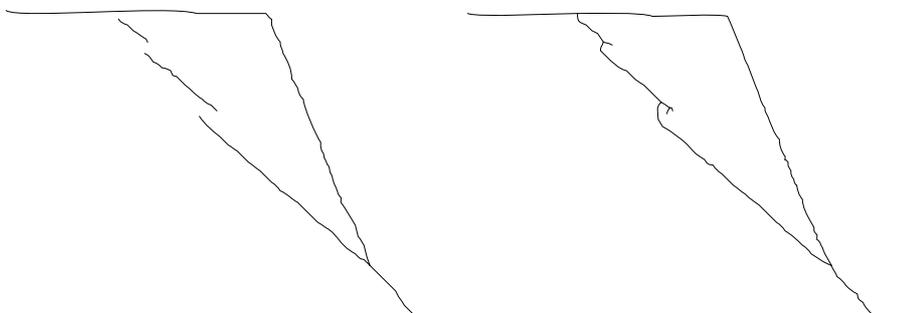


Figura 3.14: Simulação do mecanismo de ruptura *step-path* no programa *ELFEN* para um talude rochoso de 100.0 m de altura (Eberhardt *et al*, 2004)

Wang (Wang *et al*, 2003) utiliza o método dos elementos discretos para

analisar a estabilidade de um talude altamente fraturado. Especificamente, usa o programa *PFC2D* para representar o maciço rochoso. Definindo a persistência como  $(l_1 + l_2 + l_3)/3$ , sendo  $l_1$ ,  $l_2$  e  $l_3$  o comprimento das descontinuidades contidas em um mesmo plano, realiza várias simulações para diferentes valores de persistência, sendo alguns dos seus resultados mostrados na figura 3.15.

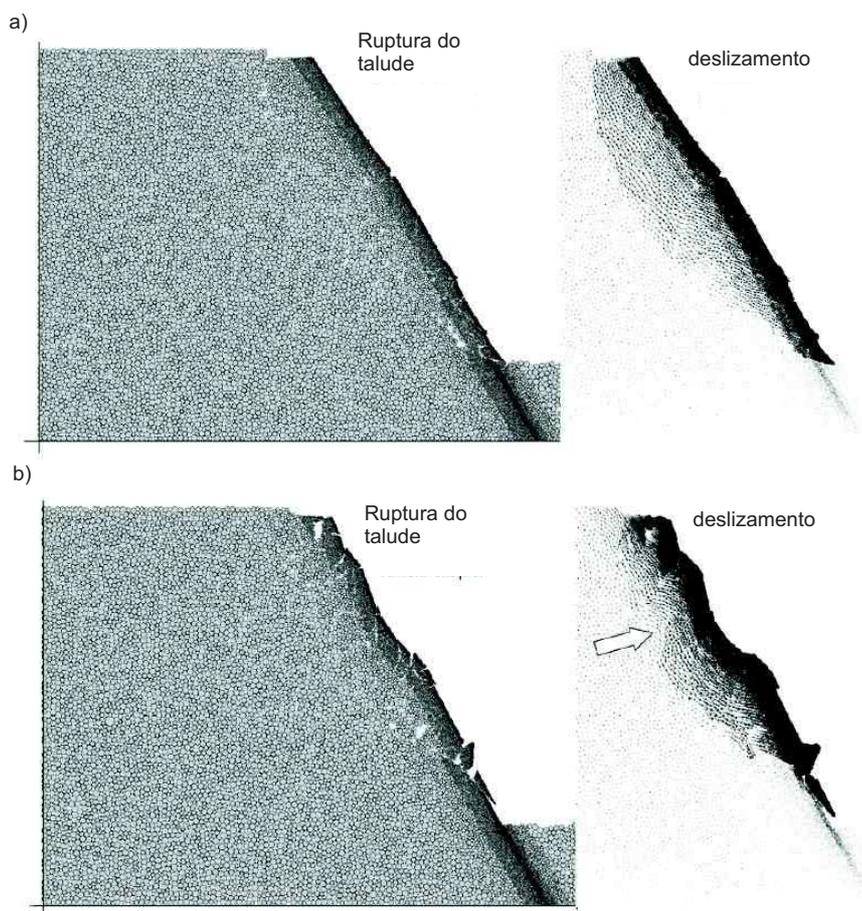


Figura 3.15: a) Ruptura do Talude com descontinuidades com 90% de persistência; b) Ruptura do Talude com descontinuidades com 70% de persistência (Wang *et al*, 2003)

É possível apreciar através da figura 3.15 que quando maior a persistência, no caso de um talude altamente fraturado, a tendência da superfície de ruptura é de ser circular. Quando a persistência for menor, superfícies irregulares de ruptura são formadas, como consequência da *coalescência* e do maior número de possibilidades para a combinação de descontinuidades no momento de formar a superfície de ruptura. O trabalho de Wang não mostra os tipos de *coalescência* gerados, mas, mostra a influência dela e da persistência de descontinuidades na geração da superfície de deslizamento e em consequência, do tipo de ruptura em acontecer.