

3

Métodos numéricos na propagação dinâmica de fraturas em rocha

3.1

Introdução

Os rápidos avanços nos métodos de modelagem numérica e da atual disponibilidade de recursos computacionais poderosos a um custo acessível fizeram da simulação computacional a ferramenta mais promissora para estudar os processos dinâmicos de fraturamento em rocha.

Os métodos numéricos utilizados na mecânica das rochas são basicamente classificados de acordo com a representação do domínio em métodos contínuos, descontínuos e acoplados (contínuo/descontínuo). No caso específico do fraturamento em rocha, a descontinuidade (fratura) pode ser simulada por meio de duas abordagens: discreta e contínua. Na modelagem discreta a descontinuidade é representada geometricamente na malha de elementos finitos, considerando um modelo constitutivo para a região contínua e outro modelo mecânico de comportamento para a descontinuidade (Figura 3.1a), como na tradicional utilização de elementos finitos de interface. Na abordagem contínua, por outro lado, não há representação geométrica explícita da descontinuidade na malha de elementos finitos e um único modelo constitutivo é adotado tanto para a região contínua quanto para a interface (Figura 3.1b). Entre os métodos que incorporam esta abordagem estão o método dos elementos finitos estendido (XFEM) e o método da fratura distribuída (*smeared crack*). Uma descrição geral dos métodos computacionais para modelagem de fraturas em materiais frágeis e quase-frágeis pode ser encontrada no trabalho de Rabczuk (2013).

3.2

Elementos finitos com singularidade

Na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE), o cálculo dos fatores de intensidade de tensão é um dos principais objetivos da análise. Estes fatores

definem a magnitude dos campos de tensões na ponta da fratura e auxiliam na previsão da direção e do crescimento da fratura. O campo de tensões apresenta nesse caso uma singularidade na ponta da fratura.

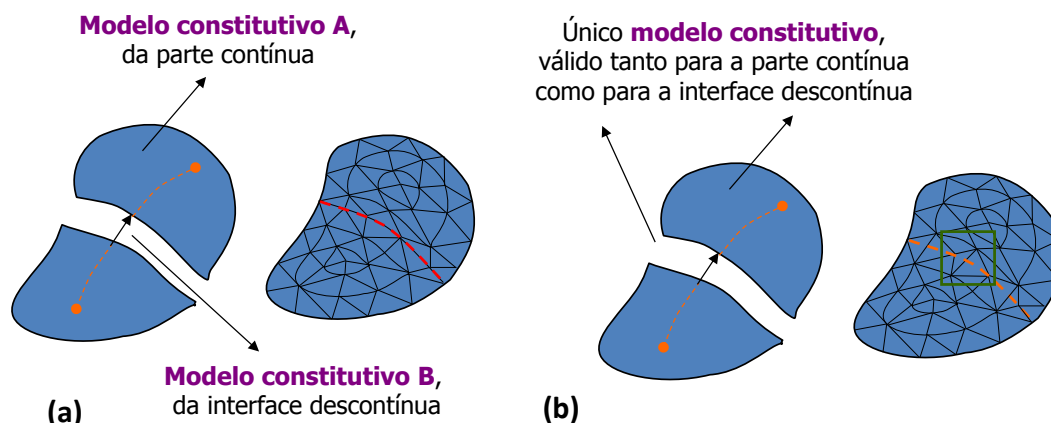


Figura 3.1 - Modelagem de descontinuidade via MEF: (a) abordagem discreta e (b) abordagem contínua.

Elementos finitos singulares foram desenvolvidos por Henshell e Shaw (1975) e Barsoum (1976) para capturar a singularidade $1/\sqrt{r}$ na ponta da fratura, onde r é a distância radial a partir da ponta. Estes elementos de ordem quadrática, conhecidos na literatura como *quarter-points elements*, oferecem vantagem na construção da malha, pois os nós localizados no meio dos lados do elemento, junto à ponta da fratura, são deslocados para uma posição correspondente a um quarto do comprimento do lado, conforme mostra a Figura 3.2. Os elementos singulares são dispostos ao redor da ponta da fratura formando uma roseta, como na Figura 3.2, onde oito elementos triangulares com ângulo interno de 45° são agrupados em torno do mesmo ponto nodal que representa a ponta da fratura.

Após o cálculo numérico dos campos de deslocamentos e de tensões nas vizinhanças da ponta, uma maneira para se avaliar o correspondente fator de intensidade de tensão deve ser considerada. As técnicas mais utilizadas na literatura são descritas no Apêndice B.

Estes elementos tornaram-se populares por serem de simples implementação e por proporcionarem resultados bastante precisos em malhas relativamente grosseiras, pois alto grau de refinamento só é necessário ao redor da ponta da fratura. No entanto, a simulação numérica requer várias atualizações da malha de elementos finitos à medida que a fratura se propaga, exigindo grande esforço computacional.

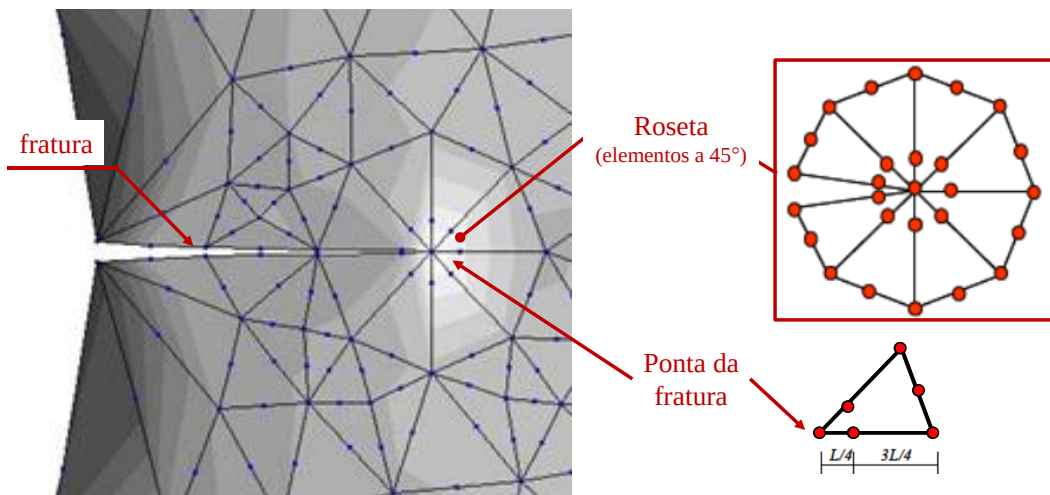


Figura 3.2 - Posição da roseta com elementos singulares *quarter-points* na ponta da fratura.

3.3 Elementos de interface

Fenômenos envolvendo a propagação de fraturas e fragmentação de materiais podem ser modelados por meio de Modelos de Zona Coesiva (MZC) (Xu e Needleman, 1994; Camacho e Ortiz, 1996; Zhang e Paulino, 2005; Park et al., 2009), incorporando no MEF elementos específicos para representação das fraturas (elementos coesivos) inseridos nas interfaces entre pares de elementos contínuos adjacentes na malha de elementos finitos.

Os modelos baseados em elementos coesivos podem ser classificados em intrínsecos e extrínsecos. Na abordagem intrínseca (Xu e Needleman, 1994), os elementos coesivos possuem uma resposta inicial elástica, como ilustrado na Figura 3.3a pela curva de tensão de tração vs. separação. A partir da origem, a tensão de tração (T) aumenta em relação à separação (δ), até alcançar um valor crítico (T_{max}), que corresponde ao ponto limite para o início de fratura. Após esse ponto, a tensão de tração diminui até o estágio em que a separação alcança o valor δ_c , no qual se considera ter ocorrido a completa separação entre as faces da fratura (situação última onde não se verifica mais a presença de forças coesivas) do material. De modo geral, modelos intrínsecos requerem que, desde o início da simulação, elementos coesivos estejam presentes nas interfaces entre todos os elementos contínuos da malha ou, ao menos, em toda a região onde haja a possibilidade de ocorrência de fraturas, se a trajetória da fratura não for conhecida a priori.

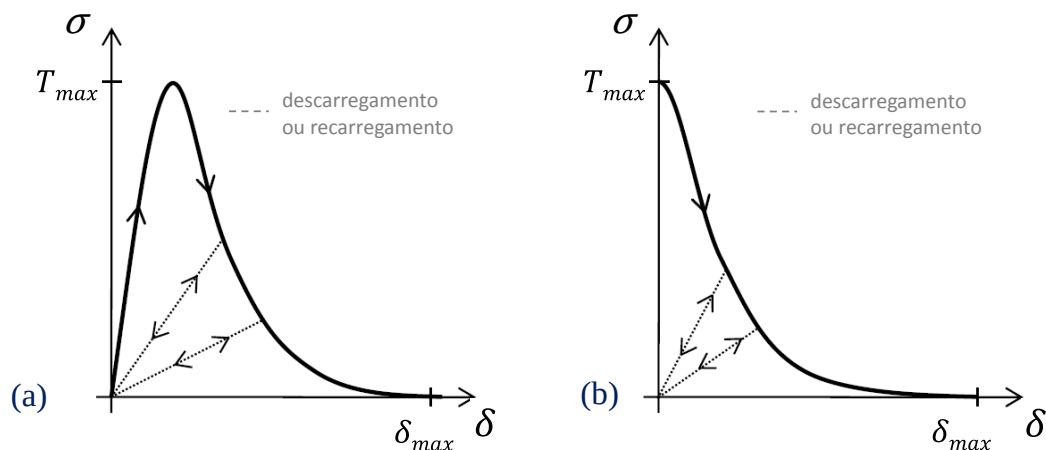


Figura 3.3 - Curvas da tração em função da separação para modelos coesivos: (a) intrínsecos e (b) extrínsecos. As linhas pontilhadas indicam trajetórias de descarregamento / recarregamento.

Duas aplicações utilizando o modelo coesivo intrínseco são apresentadas na Figura 3.4: a) a propagação de fratura em um ensaio de tração direta circular ou ensaio DC(T) (Song et al., 2006); b) fraturamento hidráulico em meio poroso (Bendezu et al., 2013), simulado com auxílio do programa computacional Abaqus v.6.14. Os dois exemplos estão sujeitos ao modo I de faturamento, com trajetória da fratura conhecida antecipadamente, ao longo da qual os elementos coesivos são dispostos no início da análise.

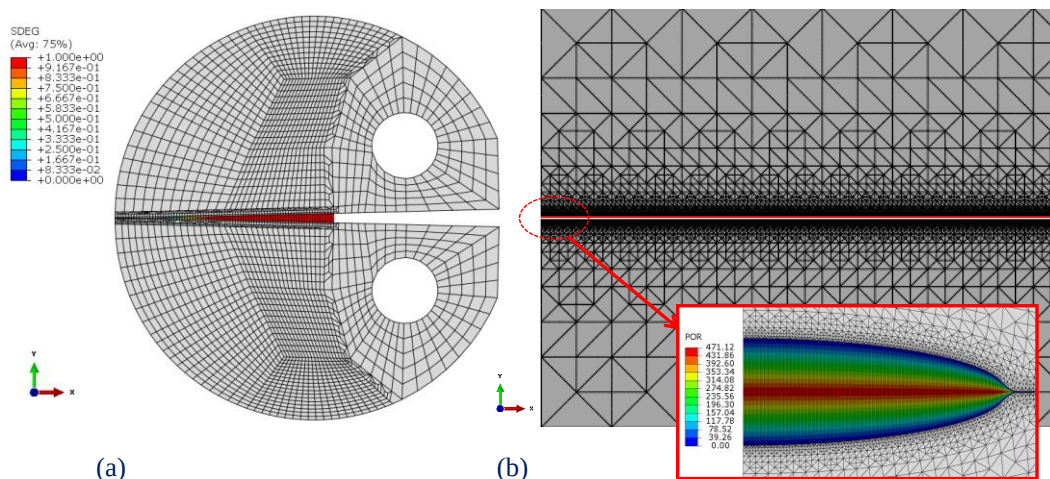


Figura 3.4 - Exemplos de fraturamento com o modelo coesivo intrínseco: a) Ensaio DC(T) (Song et al., 2006); b) fraturamento hidráulico (Bendezu et al., 2013).

Por outro lado, modelos extrínsecos (Camacho e Ortiz, 1996; Ortiz e Pandolfi, 1999; Park et al., 2009, Park et al., 2012) requerem que elementos coesivos sejam inseridos de forma adaptativa nas interfaces entre elementos contínuos, apenas onde e quando necessários, ou seja, quando um critério de fratura é atendido. Dessa forma, somente a parte da curva de tensão de tração-separação relativa à fratura é

representada, como mostra a Figura 3.3b, evitando-se assim a simulação de um comportamento artificial antes da ocorrência da fratura. Dessa forma, os modelos extrínsecos necessitam da definição de um critério extra que expresse o início do processo de falha (KUBAIR; GEUBELLE, 2003). Durante a simulação numérica, verifica-se se o critério de fraturamento é atendido nas interfaces entre cada par de elementos contínuos do modelo de elementos finitos. Em caso positivo, elementos coesivos são então introduzidos. Com isso, fraturas podem se iniciar ou propagar, dependendo das condições mecânicas do problema.

Nesse modelo extrínseco, fenômenos como propagação de fraturas, ramificação, fragmentação, fechamento de fraturas e considerações de contato e atrito são incorporadas. Para efeito de ilustração, a Figura 3.5 apresenta a evolução de uma fratura (nucleação de fraturas), que se ramifica e fragmenta. Tal abordagem apresenta como atrativo o fato desses fenômenos serem tratados como um resultado da solução do problema de valor de contorno inicial.

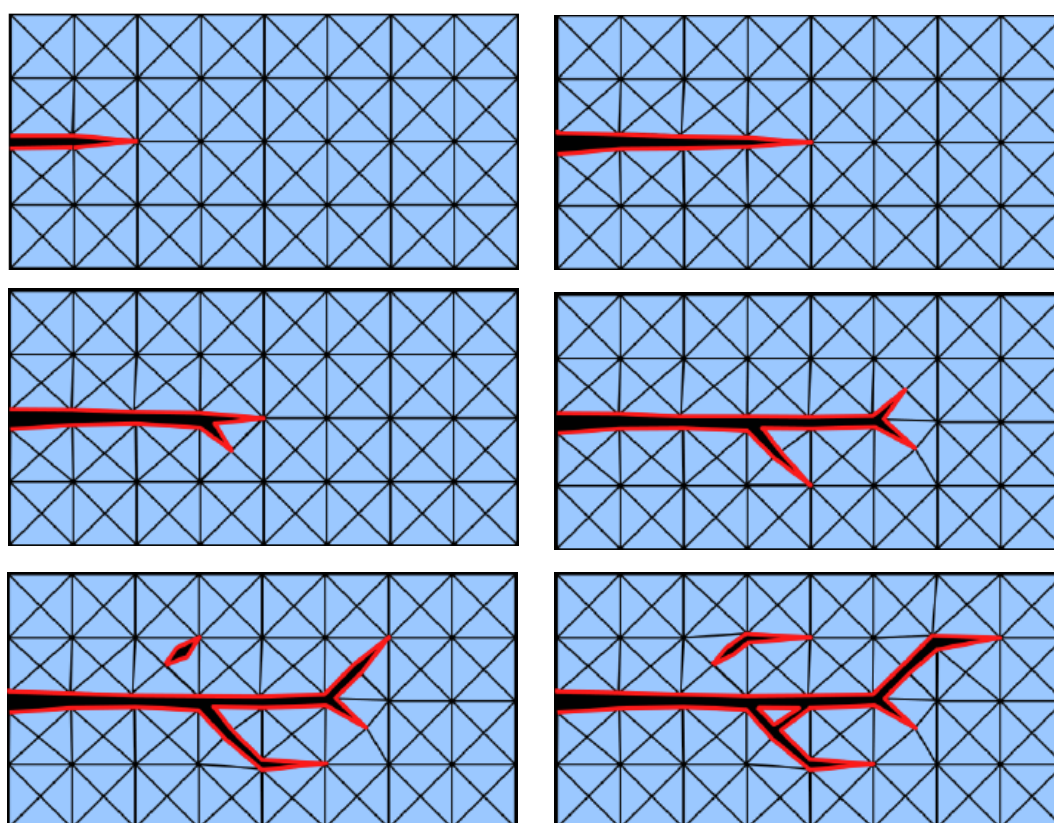


Figura 3.5 - Propagação e ocorrência de novas fraturas em uma malha de elementos finitos triangulares (Espinha, 2011).

Modelos de Zona Coesiva do tipo extrínseco, a estrutura de dados topológica se altera durante toda a análise. Devido a essa modificação contínua, em tempo de

execução, os modelos extrínsecos apresentam um custo computacional extra e requerem que as faces dos elementos onde ocorrem as fraturas sejam eficientemente identificadas (Pandolfi e Ortiz, 1998; Celes et al., 2005). Em contrapartida, esse tipo de inserção faz com que os elementos coesivos apenas influenciem a resposta do sistema quando o processamento da fratura realmente está ocorrendo, diferentemente dos modelos intrínsecos que de início já alteram o comportamento do sistema.

Em geral, elementos coesivos requerem um alto nível de refinamento da malha na região ao redor da ponta da fratura, de forma que o comportamento não linear do problema possa ser corretamente capturado. Adicionalmente, a direção de propagação da fratura tende a ser altamente dependente do nível de refinamento (Zhang et al., 2007; Papoulia et al., 2006).

A comparação de um problema de propagação dinâmica em modo misto de fratura utilizando os dois tipos de modelos de zona coesiva foi feita por Park et al. (2012). Ambas as análises produziram as mesmas respostas, simulando a trajetória da fratura. A Figura 3.6a apresenta os resultados do problema considerando uma malha uniforme, refinada com 25.600 elementos, analisada com o MZC intrínseco, enquanto que a Figura 3.6b mostra os resultados com o MZC extrínseco, empregando uma malha com menor discretização (dez vezes menos elementos, menores custos computacionais), construída com o algoritmo proposto por Park et al. (2012).

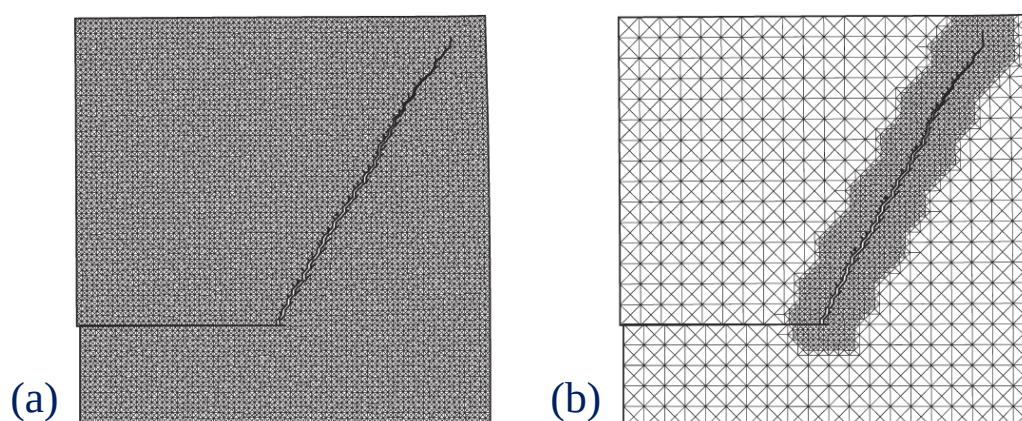


Figura 3.6 - Propagação de fratura considerando: (a) malha refinada de elementos finitos; e (b) malha grosseira e adaptativa (Park et al., 2012).

3.4

Eliminação de elementos

A técnica de eliminação de elementos é uma estratégia simples para simular fraturamento no contexto do método convencional dos elementos finitos (Beissel et al., 1998). Não há necessidade de representar explicitamente as descontinuidades, sendo a fratura fisicamente modelada pela eliminação progressiva de elementos da malha, conforme ilustra a Figura 3.7, após a fratura atingir uma determinada abertura crítica além da qual não pode mais sustentar tensões. Elementos não são removidos fisicamente da malha, mas suas contribuições são desconsideradas prescrevendo-se que nos elementos eliminados o estado de tensão é próximo a zero. Para evitar problemas numéricos relacionados com o desequilíbrio de forças imposto pela eliminação, o estado de tensão é reduzido gradualmente em vários passos de relaxação. O módulo de elasticidade nos elementos eliminados é fixado próximo a zero no último passo deste processo.

Para levar em conta a dissipação de energia no domínio pós fraturamento, o conceito de fissuração distribuída (*smeared crack*) é empregado. Os modelos de fissuração distribuída baseiam-se na idealização de um meio contínuo durante todo o processo de análise. Partindo deste meio contínuo, relações entre tensões e deformações são adotadas para acompanhar o processo de fissuração, sendo os limites de resistência do material e parâmetros da mecânica da fratura as bases da formulação, implementada por meio de equações constitutivas em que a tensão tende a zero para deformações suficientemente grandes. Exemplos de tais comportamento de tensão vs. deformação são mostrados na Figura 3.8.

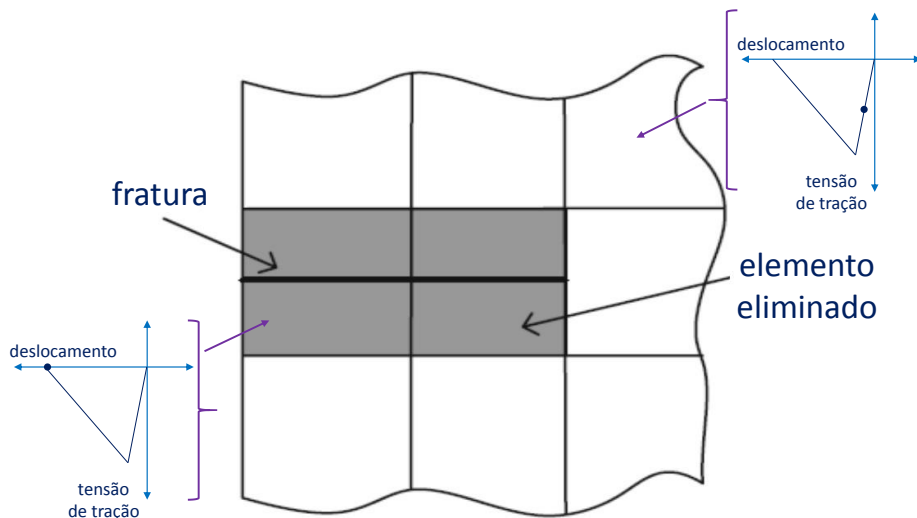


Figura 3.7 - Representação de uma fratura por elementos removidos (adaptado de Song et al., 2008).

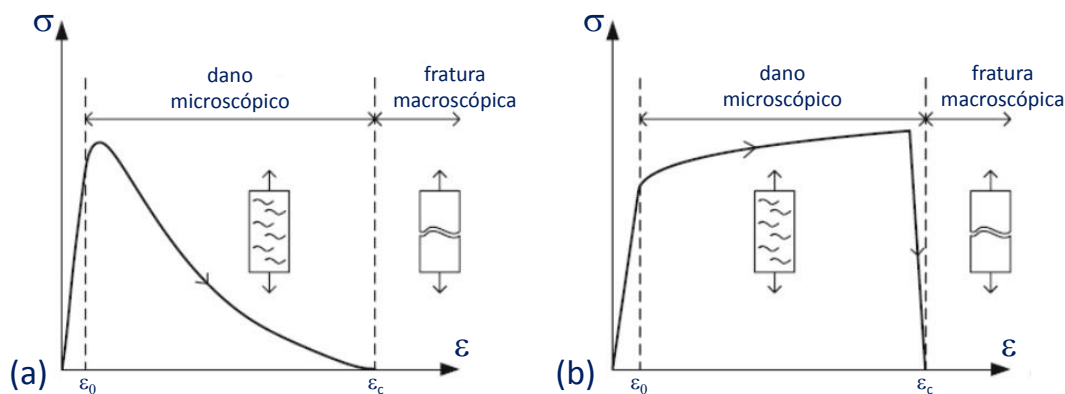


Figura 3.8 - Curvas de tensão vs. deformação para um material com dano exibindo: (a) amolecimento elástico e (b) endurecimento plástico (Song et al., 2008).

O modelo de fissuração distribuída adotado por Saharan e Mitri (2008), e utilizado em simulações de propagação de fraturas induzidas por explosão, é brevemente discutido. O critério de ruptura de Rankine detecta a iniciação da fratura, quando a tensão principal máxima excede a resistência à tração do material. Embora a iniciação da fratura seja baseada no modo I, subsequentemente o comportamento da fratura inclui análises em ambos os modos I e II, como descrito posteriormente.

A principal vantagem deste modelo de fissuração distribuída é a decomposição da deformação em uma parcela elástica e em outra correspondente à fissuração, chamada de deformação de fraturamento, conforme Equação (3.1). Esta representação de deformação contrasta com os modelos tradicionais de fissuração distribuída, onde uma única componente de deformação é utilizada. É também

possível a inclusão de outras componentes, como deformações plásticas e de fluência, expressa por:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^{el} + d\varepsilon^{ck} \quad (3.1)$$

onde $d\varepsilon$ é a deformação total, $d\varepsilon^{el}$ é a deformação elástica representando o comportamento da rocha não fraturada e $d\varepsilon^{ck}$ é a deformação de fraturamento. O contínuo intacto entre as fraturas é assumido com um material isotrópico, homogêneo e linearmente elástico.

As componentes de deformação da Equação (3.1) são referidas no sistema global de coordenadas cartesianas, na situação 2D, como:

$$\varepsilon = [\varepsilon_{11} \quad \varepsilon_{22} \quad \gamma_{12}]^T \quad (3.2)$$

e em um sistema local de coordenadas (Figura 3.9) como:

$$e = [e_{nn} \quad e_{tt} \quad g_{nt}]^T \quad (3.3)$$

onde n denota a direção normal à fratura e t a direção tangencial.

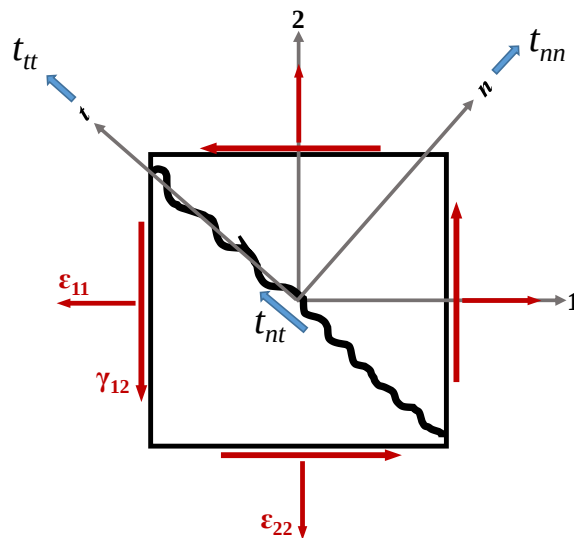


Figura 3.9 - Sistema local de coordenadas n, t .

O conceito de fratura frágil de Hilleborg (1976) baseia-se no comportamento pós-fissuração na direção normal à superfície da fratura, comumente referida como modelo de amolecimento. Nesta abordagem, assume-se que certa quantidade de energia (G_f^I) é absorvida pela formação da superfície da fratura, a qual pode ser

calculada com base nas tensões de tração σ_t e deslocamentos na direção normal u_n (Figura 3.10).

$$G_f^I = \int \sigma_t du_n \quad (3.4)$$

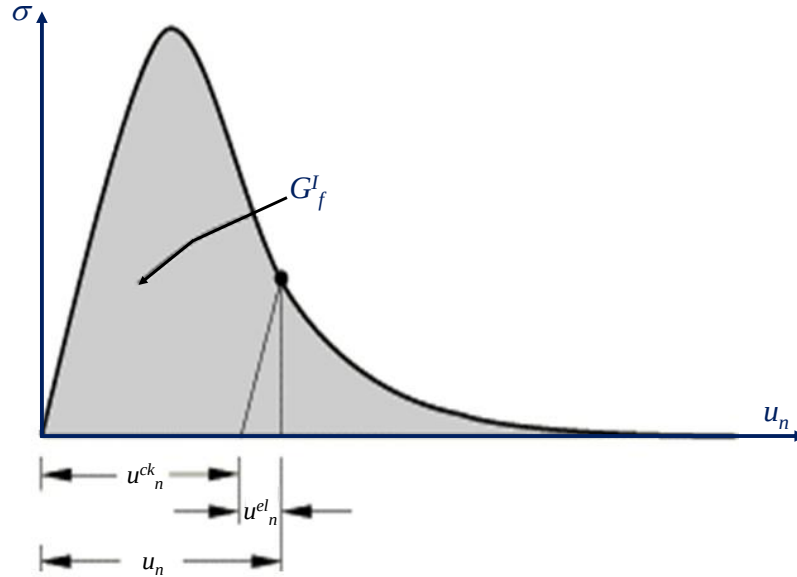


Figura 3.10 - Representação da energia de fraturamento no modo I.

Assumir que G_f^I é uma propriedade do material implica que, quando a parte elástica do deslocamento (u_n^{el}) é eliminada, a relação tensão vs. deslocamento na direção normal da fratura ($u_n^{ck} = u_n - u_n^{el}$) é fixa, independentemente do tamanho da amostra considerada.

Na implementação no método dos elementos finitos determina-se o deslocamento relativo u_n^{ck} pela multiplicação da deformação da fratura na direção local n por um comprimento característico h :

$$u_n^{ck} = e_{nn}^{ck} \cdot h \quad (3.5)$$

O valor deste comprimento característico é geralmente considerado o comprimento de um segmento que cruza um elemento finito de primeira ordem ou metade deste comprimento para um elemento finito de segunda ordem. Esta (vaga) definição do comprimento característico é usada porque não se conhece em qual direção o material vai fraturar e, portanto, não se pode escolher a priori a medida de um comprimento em qualquer direção particular. Estimativas de comprimento característico são apropriadas somente para elementos finitos com lados de dimensões próximas, tendo em vista a dificuldade de sua definição.

Um modelo de amolecimento pode ser descrito por uma função de deformação da fratura (Figura 3.11a) ou de deslocamento da fratura (Figura 3.11b).

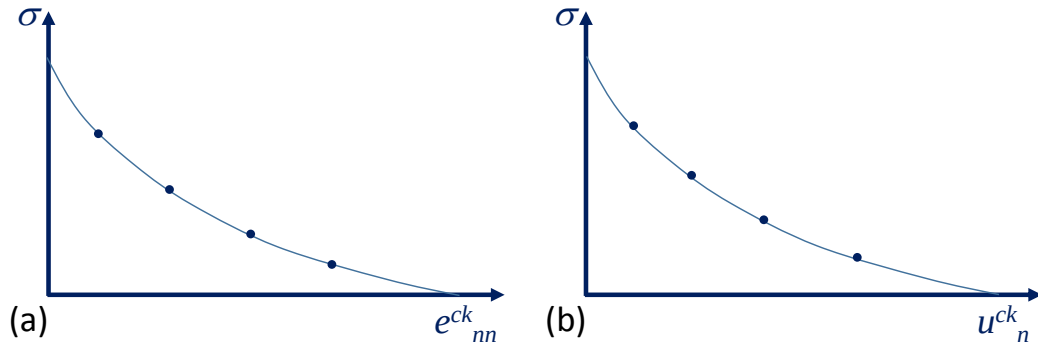


Figura 3.11 - Curvas de pós-fissuração: a) tensão-deformação e b) tensão-deslocamento.

Para incluir o comportamento da fratura no modo II, um modelo de retenção ao cisalhamento é considerado, com base na observação que o comportamento de cisalhamento é dependente da abertura da fratura. Este modelo define a tensão total de cisalhamento t_{nt} como:

$$t_{nt} = D_{nt}^{II} (e_{nn}^{ck}, e_{tt}^{ck}) g_{nt}^{ck} \quad (3.6)$$

onde g_{nt}^{ck} representa a abertura da fratura, e_{nn}^{ck} e e_{tt}^{ck} são as deformações de fraturamento nas direções normal e tangencial, respectivamente, e D_{nt}^{II} uma rigidez que depende da abertura da fratura e pode ser expressa por:

$$D_{nt}^{II} = \alpha(e_{nn}^{ck}, e_{tt}^{ck}) G \quad (3.7)$$

onde G é o módulo de cisalhamento do material não fraturado e $\alpha(e_{nn}^{ck}, e_{tt}^{ck})$ é o fator de retenção de cisalhamento (Figura 3.12), que no modelo de lei de potência para apenas uma fratura (Rots e Blaauwendraad, 1989) é definido por:

$$\alpha(e_{nn}^{ck}) = \frac{\left(1 - \frac{e_{nn}^{ck}}{e_{\max}^{ck}}\right)^p}{1 - \left(1 - \frac{e_{nn}^{ck}}{e_{\max}^{ck}}\right)^p} \quad (3.8)$$

onde p e $e_{\max}^{ck}$ são parâmetros do material. A Equação (3.8) satisfaz os requisitos de $\alpha \rightarrow \infty$ quando $e_{\max}^{ck} \rightarrow 0$ (correspondente ao estado antes da iniciação da fratura) e $\alpha \rightarrow 0$ quando $e_{nn}^{ck} \rightarrow e_{\max}^{ck}$ (correspondente à completa separação ou não coesão).

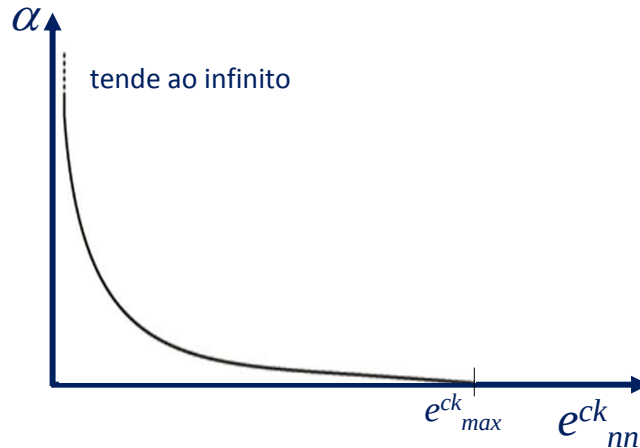


Figura 3.12 - Fator de retenção cisalhante α dependente da abertura da fratura.

No modelo de lei de potência as deformações podem ser descompostas em elástica e de fraturamento, quando os limites do parâmetro α são zero e infinito, respectivamente. Em outros modelos tradicionais de retenção ao cisalhamento, onde as deformações do material intacto e da fratura não são separadas, um fator de retenção β é definido entre os valores zero e um, por meio da Equação (3.9):

$$\beta = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \quad (3.9)$$

O modelo da lei de potência de retenção ao cisalhamento da Equação (3.8) também pode ser escrito em termos do parâmetro β (Figura 3.13) como:

$$\beta(e_{nn}^{ck}) = \left(1 - \frac{e_{nn}^{ck}}{e_{\max}^{ck}}\right)^p \quad (3.10)$$

onde $e_{\max}^{ck}$ é a deformação última do material correspondente a uma tensão igual a zero.

Quando a componente de tensão de cisalhamento está associada a uma única direção de abertura de fratura (n ou t), a dependência em relação à abertura de fratura é obtida diretamente da Equação (3.6). No entanto, se estiver associada a duas direções de abertura de fratura $g_{nt}^{ck,n}$ e $g_{nt}^{ck,t}$, então:

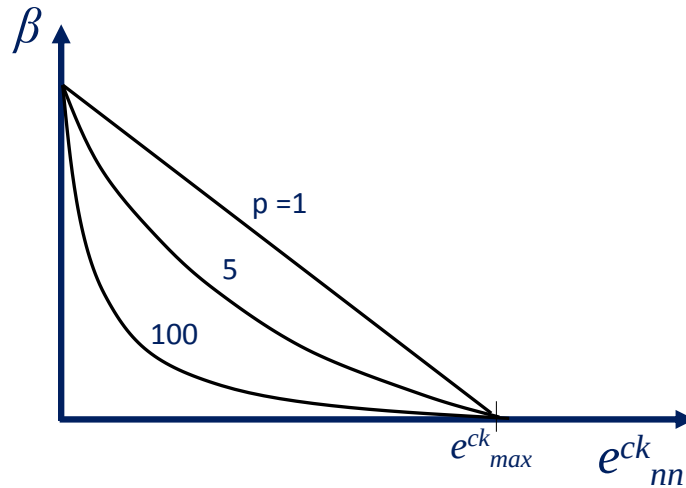


Figura 3.13 - Modelo de retenção ao cisalhamento no modelo da lei de potência.

$$g_{nt}^{ck} = g_{nt}^{ck,n} + g_{nt}^{ck,t} = \frac{t_{nt}}{D_{nt}^{II,n}} + \frac{t_{nt}}{D_{nt}^{II,t}} \quad (3.11)$$

onde $D_{nt}^{II,n} = \alpha(e_{nn}^{ck})G$ e $D_{nt}^{II,t} = \alpha(e_{tt}^{ck})G$ e

$$D_{nt}^{II} = \frac{t_{nt}}{g_{nt}^{ck}} = \frac{D_{nt}^{II,n} \cdot D_{nt}^{II,t}}{D_{nt}^{II,n} + D_{nt}^{II,t}} \quad (3.12)$$

Song et al. (2008) relatam que resultados obtidos pela Técnica de Eliminação de Elementos (TEE) são extremamente sensíveis à malha de elementos finitos, concluindo que a TEE não é uma ferramenta adequada para análises do acompanhamento da propagação de fraturas, podendo ser eventualmente empregados em estudos de fragmentação. Devido à simplicidade de implementação, esta técnica encontra-se incorporada em vários programas comerciais de elementos finitos como o LS DYNA e ABAQUS.

3.5 Elementos enriquecidos EFEM

Ortiz et al. (1987) modificaram a aproximação do campo de deformações em elementos finitos para capturar descontinuidade fraca (Figura 3.14a) e melhorar a representação da ocorrência de bandas de cisalhamento. Com base nessa ideia, Belytschko et al. (1988) implementaram duas linhas paralelas de descontinuidades fracas (Figura 3.14b) de modo que o elemento foi capaz de conter uma banda localizada de deformações cisalhantes. Dvorkin et al. (1990) foram os primeiros

que desenvolveram uma metodologia para o caso de descontinuidades fortes¹ em elementos finitos (Figura 3.14c), possibilitando que a propagação da fratura possa ser modelada sem necessidade da inclusão física da mesma na malha de elementos finitos.

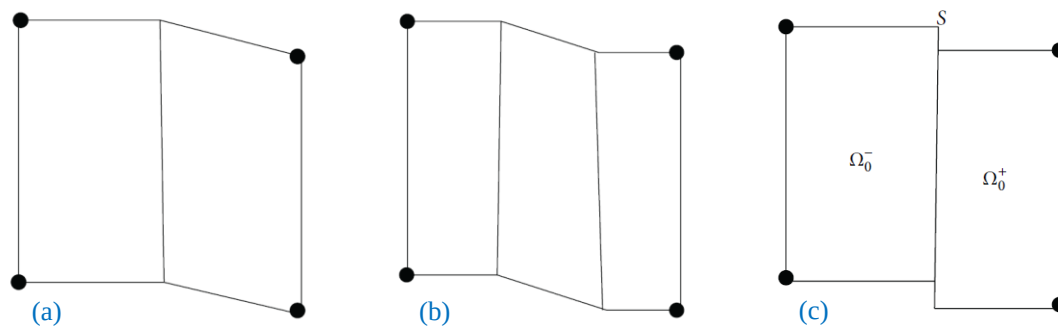


Figura 3.14 - Elemento com (a) uma descontinuidade fraca; (b) duas descontinuidades fracas; (c) uma descontinuidade forte (Rabczuk, 2013).

Neste tipo de elemento finito enriquecido (EFEM na terminologia de língua inglesa) uma descontinuidade nos deslocamentos é imposta por meio de graus de liberdade extras localizado no interior do elemento finito. A Figura 3.15a mostra a posição dos mesmos, indicada por um círculo preto no interior dos elementos. Esta abordagem requer que a fratura propague em um elemento de cada vez. Se os graus de liberdade extras forem localizados nos nós do elemento cortado pela fratura então a formulação enriquecida é conhecida como XFEM – método dos elementos finitos estendidos (Figura 3.15b).

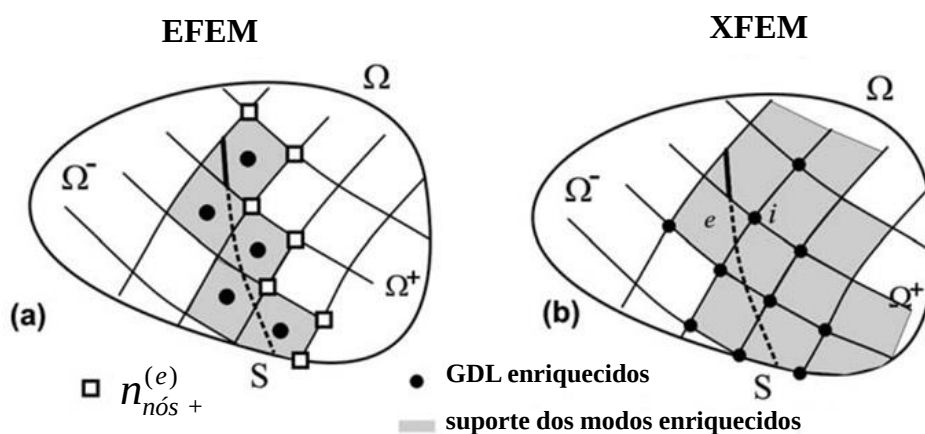


Figura 3.15 - Enriquecimento do: a) elemento e b) nó (Oliver et al., 2006).

¹ Se a descontinuidade refere-se ao campo de deslocamentos é classificada como forte, caso ocorra no campo de deformações é denominada descontinuidade fraca.

Duas equações são estabelecidas na formulação de elementos EFEM. Uma é a equação de equilíbrio das forças nodais, outra a equação de continuidade das tensões no interior do elemento, garantindo que as tensões à direita e à esquerda da descontinuidade sejam iguais para assegurar o equilíbrio mecânico na descontinuidade.

Computacionalmente, os elementos EFEM têm como vantagem a possibilidade de eliminar a contribuição dos graus de liberdades no interior do elemento por meio de algoritmo de condensação estática. Várias versões de elementos EFEM foram propostas na literatura. Todas têm em comum o fato que a aproximação do campo de deslocamentos é enriquecida por meio de parâmetros adicionais para capturar a descontinuidade de deslocamentos no interior do elemento. Adotam a hipótese de que o deslocamento resulta da composição de duas parcelas, uma contínua e outra descontínua, associadas a graus de liberdade da parte contínua e da parte descontínua do elemento. A expressão (3.13) descreve a forma geral da aproximação dos deslocamentos em um elemento enriquecido:

$$u \cong \sum_{i=1}^I N_i d_i + \sum_{j=1}^J \Phi_j c_j \quad (3.13)$$

onde:

u : vetor de deslocamentos;

d : vetor de deslocamentos nodais;

c : vetor de graus de liberdade associados à descontinuidade dos deslocamentos;

N : funções de interpolação;

Φ : função que interpola graus de liberdade associados à descontinuidade de deslocamentos;

I : número de nós do elemento associados aos deslocamentos nodais d ;

J : número de graus de liberdade do elemento associados à descontinuidade de deslocamento c .

As funções Φ podem assumir diferentes formas para uma mesma formulação de elemento enriquecido, cujo papel é distribuir os efeitos das descontinuidades dos deslocamentos no interior do elemento finito.

Fries e Belytschko (2006) e Mohammadi (2008) distinguem os elementos enriquecidos em extrínsecos e intrínsecos. As formulações que fazem uso de graus de liberdade adicionais, como na expressão (3.13), são por eles classificadas como extrínsecas; as formulações que dispensam o uso de graus de liberdade adicionais são ditas intrínsecas.

Elementos EFEM foram aplicados em muitos tipos de problema, conforme revisão apresentada por Jirasek (2000). Oliver et al. (2006) compararam elementos EFEM e XFEM em várias situações, mostrando que ambas as formulações exibem geralmente a mesma precisão nos resultados. Elementos EFEM não são aplicáveis para modelagem de pontas de fratura e não representam bem padrões complexos de fraturamento, como em simulações 3D ou ramificações e descontinuidades de trajetórias de fratura.

3.6

Outras técnicas alternativas

O método dos elementos finitos tem sido amplamente utilizado na análise de fraturas em estruturas por muitos anos. Suas desvantagens foram superadas pelo desenvolvimento de novas formulações (EFEM, XFEM) e a abordagem é considerada madura e poderosa para análise de muitos problemas de engenharia. Dificuldades envolvendo a geração temporal de malhas levaram os pesquisadores ao desenvolvimento de técnicas alternativas na solução de problemas de fraturamento dinâmico como o emprego de métodos sem malha. Outros exemplos de métodos numéricos são os seguintes: *Numerical Manifold Method* NMM (Chen et al., 2006); *Smoothing Particle Hydrodynamics* SPH (Randles e Libersky, 1996; Rabcauk e Eibl, 2003; Fakhimi e Lanari, 2014); Método MEF-MED (Munjiza et al., 1995; Mitelman e Elmo, 2014); *Discontinuous Galerkin Method* DGM (Chevaugnon et al., 2005; Qiang e Gao, 2008); *Multi-scale distinct lattice spring model* M-DLSM (Zhao et al., 2011 e 2012).

3.7

Revisão de algumas simulações de fraturamento de rocha por explosão

Melhorias recentes nos modelos computacionais e o aumento da capacidade de processamento forneceram os recursos necessários para a simulação de todo o processo de fraturamento e fragmentação de rochas por explosão de uma forma mais realista.

Lima (2001) estudou o fraturamento dinâmico de um maciço rochoso isotrópico, homogêneo e de comportamento frágil usando elementos finitos singulares. Ao longo do perímetro do furo de detonação foram admitidas fissuras de iniciação. Durante o processo de fraturamento, o modelo numérico considerou a geração automática de malhas de elementos finitos e o emprego de critério baseado em fatores de intensidade de tensão (cálculo da integral J na mecânica da fratura linear elástica). A modelagem desenvolvida por Lima (2001) desconsiderou a influência da pressão dos gases no interior das fraturas.

Cho e Kaneko (2004a, 2004b) e Cho et al. (2008) desenvolveram um código computacional para investigar as características da mecânica da fratura associada ao fraturamento de rochas por explosão. Um algoritmo de malha adaptativa para modelo de zona coesiva (MZC) foi utilizado para simular a propagação de fraturas, assumindo que a iniciação, propagação e a combinação das mesmas ocorrem ao longo dos contornos dos elementos. Cho e Kaneko (2004a) analisaram diferentes formas de pulsos de pressão nas paredes do furo e investigaram os efeitos da taxa de deformação dependente da resistência à tração de rochas heterogêneas. Cho et al. (2008) simularam a influência da pressão dos gases no fraturamento.

Saharan e Mitri (2008, 2010) utilizaram a técnica de eliminação de elementos com o modelo de fissuração distribuída para simular a fragmentação de rochas por explosão com o programa computacional Abaqus/Explicit. Um modelo do pulso de pressão foi desenvolvido para aproximar a carga de detonação. Saharan e Mitri (2010) investigaram numericamente a iniciação e propagação de fraturas em uma rocha granítica sob vários níveis de tensão de confinamento.

O software comercial LS-DYNA emprega o método dos elementos finitos com um esquema explícito de integração no tempo, muito utilizado para estudar a

propagação dinâmica de fraturas em rochas. Dispõe de equações de estado que avaliam a variação da pressão no espaço e no tempo durante a simulação. Ma e An (2008) implementaram o modelo de dano de Johnson-Holmquist (J-H) e estudaram os diversos parâmetros que influenciam as fraturas induzidas como a velocidade de carregamento, a distância à face livre, tensões geostáticas e técnicas de controle de fraturas. Yu et al. (2009), com base no critério de escoamento de Von Mises, simularam o fraturamento de um maciço rochoso sob carregamento de uma carga explosiva. Jiang e Chen (2012) investigaram como estruturas periféricas podem ser afetadas por cargas de detonação ocorridas em solo ou rocha. Sazid et al. (2012) analisaram planos de fogo com dois furos de detonação em diferentes tipos de rochas, enquanto que Sjöberg et al. (2012) estudaram o efeito do tempo de retardo em modelo 3D considerando uma bancada com dois furos de detonação.

ANSYS AUTODYN é outro programa computacional para análises explícitas especificamente voltadas para problemas de dinâmica não linear, incluindo a propagação de ondas. Ma et al. (1998) consideraram um modelo desacoplado de dano elástico e fluxo plástico em material rochoso, implementando um modelo de dano contínuo com critério de resistência baseado no modelo plástico de Drucker e Prager. Hao et al. (2002) utilizaram um modelo 3D de dano contínuo anisotrópico, considerando os efeitos de fraturas e juntas preexistentes no maciço rochoso. Outros estudos numéricos com o programa ANSYS AUTODYN foram realizados por Zhu et al. (2007a, 2007b), Zhu (2010), Zhou et al. (2010), dentre outros.

O método dos elementos discretos também foi empregado em simulações envolvendo explosões em rocha. O programa *Distinct Motion Code* (DMC) simula o movimento de rocha em operações de detonação com capacidade de acoplar o movimento da rocha com o fluxo de gás (Taylor e Preece, 1992; Donze et al., 1997). A propagação transiente de ondas de tensão não pode ser modelada com este código, utilizando-se de programa pelo método dos elementos finitos ou de diferenças finitas para a obtenção da solução que, em seguida, é transferida para um número finito de partículas que modelam o maciço rochoso como um material descontínuo. As partículas de rocha são tratadas como esferas e a mecânica da colisão controla sua interação. Com o programa computacional UDEC (*Universal Distinct Element Code*), Firth e Taylor (2001) e Zeinab et al. (2013) investigaram

mecanismos de fraturamento dinâmico por explosão, enquanto Wang e Konietzky (2009) acoplaram os métodos de elementos finitos (LS_DYNA) e de blocos discretos (UDEC) para representação do maciço rochoso como blocos e as descontinuidades internas tratadas como condições de contorno entre blocos. A combinação dos métodos dos elementos finitos e dos elementos discretos (MEF-MED) está presente em vários códigos computacionais para simular o desmonte de rocha por explosão (Munjiza et al., 1995; Mitelman e Elmo, 2014). Fakhimi e Lanari (2014) desenvolveram o código CA2, que é um modelo híbrido do método dos elementos discretos MED e SPH (*Smoothing Particle Hidrodynamics*) para estudar os efeitos da onda de choque e da expansão dos gases em danos na rocha.

O código DMC_BLAST é uma versão modificada do programa computacional DMC onde a resistência dinâmica à tração da rocha é modelada por meio de ligações entre as partículas. (Preece e Chung, 1998; Mortazavi e Katsabanis, 2001; Ning et al., 2010). O DMC_BLAST considera principalmente o efeito da pressurização dos gases de explosão e não simula a propagação de ondas de tensão, assumindo que a rocha já está fragmentada devido à ocorrência de descontinuidades pré-existentes.

Ruest et al. (2006) apresentaram uma aplicação com o programa computacional *Particle Flow Code* 3D (PFC3D) na simulação do desmonte de rocha por explosão. No estudo, um código de detonações explosivas não ideais (*Vixen-N*), desenvolvido pela African Explosives Limited (AEL), foi usado em processamento paralelo com o programa PFC3D. O modelo foi chamado *Hybrid Stress Blasting Model* (HSBM), com as forças sobre a parede do furo calculadas a partir de pressões locais de gás, obtidas com o código *Vixen-N*. Falhas de compressão e de tração nas ligações entre as partículas resultam em fraturas. Os gases de detonação podem penetrar nas fraturas, estendendo-as e movimentando as partículas, simulando ocorrência de fragmentação do material (Sellers et al., 2012).