

2 Revisão da Literatura

O maciço rochoso é constituído pela rocha intacta e pelas discontinuidades. O comportamento mecânico do maciço depende desses dois componentes. O termo discontinuidades inclui fraturas, fissuras, juntas, planos de estratificação, planos de clivagem e falhas. No presente trabalho usaremos o termo junta para designar discontinuidades pré-existentes e o termo fratura para novas discontinuidades formadas.

As juntas típicas encontradas no maciço rochoso têm uma resistência menor que a rocha intacta, como consequência, sua presença dá menor resistência ao maciço rochoso (Figura 2.1). Em geral, as juntas naturais têm uma orientação preferencial originando uma resposta anisotrópica. As juntas também induzem o efeito de escala, na qual a resistência de uma região diminui com o incremento do tamanho até o ponto de atingir o Volume Elementar Representativo, definido no capítulo anterior.

Estimar o comportamento mecânico de um maciço rochoso é um dos maiores desafios no projeto de estruturas de engenharia em rochas moderada ou fortemente fraturadas.

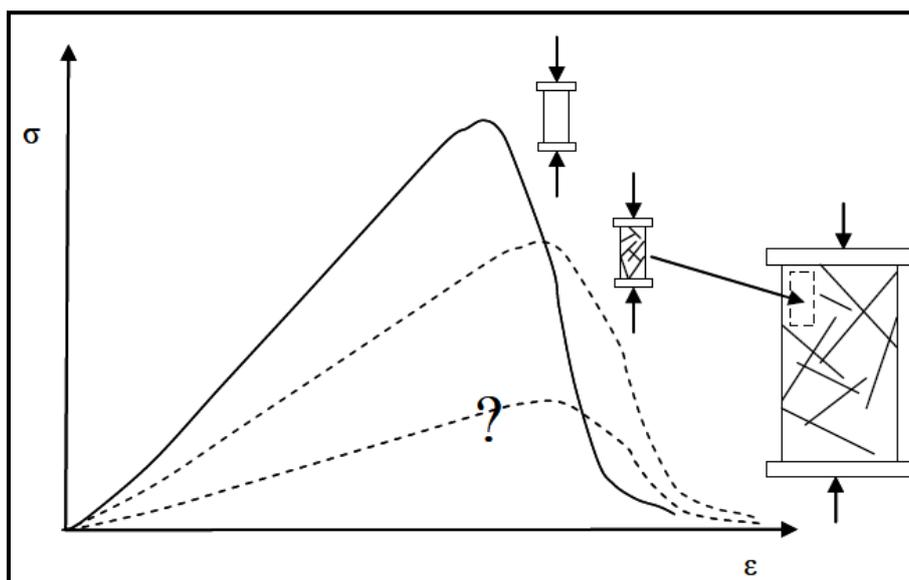


Figura 2.1 – Curva tensão – deformação de rocha intacta e do maciço rochoso

Para avaliar o comportamento do maciço rochoso, o ideal seria fazer diversos ensaios no laboratório de grandes volumes de rocha com diferentes tamanhos e configurações de juntas, submetidos a diversos níveis de tensões e seguindo diferentes trajetórias de tensões. Um programa experimental de esse tipo seria inviável devido ao tamanho requerido para o equipamento do ensaio de laboratório e os custos envolvidos. Realizando ensaios *in situ* sobre grandes volumes de rocha, embora tecnicamente possível, têm elevados custos e não são suficientemente grandes, e freqüentemente tem incertezas relacionadas ao controle das condições de contorno e interpretação de resultados (Bieniawski, 1978).

Devido à grande dificuldade de avaliar o comportamento do maciço rochoso em ensaios de laboratório como em ensaios *in situ*, foram desenvolvidos sistemas de classificações empíricas do maciço rochoso, baseadas em observações de campo (Bieniawski, 1978; Barton et. al., 1974; Barton, 2002; Hoek & Brown, 1997; Palmstrom, 1996a; Palmstrom, 1996b).

Os sistemas de classificação do maciço rochoso foram desenvolvidos para seu uso na engenharia civil e de minas, baseadas na compilação de casos históricos. Há um grande número de sistemas de classificações desenvolvidos para propósitos gerais, mas também para aplicações específicas e se deve ter cuidado de seu correto uso. Os sistemas de classificação consideram diversos fatores, relacionados freqüentemente às descontinuidades como o número de famílias de juntas, distância de junta, rugosidade, alteração, preenchimento das juntas, condições de água subterrânea e algumas vezes também a resistência da rocha intacta e magnitude de tensões. A classificação do maciço rochoso é um método indireto e não mede as propriedades mecânicas como o módulo de deformação diretamente. O resultado é uma estimativa da estabilidade quantificada e referido em termos subjetivos como: Muito pobre, pobre, regular, bom, muito bom. O valor obtido por algum sistema de classificação é usado para estimar e calcular a resistência do maciço rochoso usando um critério de falha, também é usado para estimar o suporte necessário na rocha.

Os sistemas de classificação do maciço continuam evoluindo e recentemente Cai et al. (2004; 2007) apresento um novo sistema, baseado no *Geological Strength Index* (Hoek, 1994; Hoek et al. 1995) que toma em consideração as estruturas das juntas e a condição de superfície das juntas em uma maneira quantitativa e permite a determinação dos parâmetros de resistência residual de um maciço rochoso fraturado.

Apesar do fato que os sistemas de classificação do maciço rochoso são muito usados na engenharia, a sua capacidade para representar a anisotropia (devido às orientações preferenciais das estruturas) e o efeito de escala (devido ao efeito misturado de persistência e densidade) é limitada.

Para estimar as propriedades macroscópicas do maciço rochoso também se têm desenvolvido soluções analíticas, considerando a rocha como uma combinação de dois componentes: a rocha intacta e as juntas. Portanto, o comportamento global do maciço fraturado depende da resposta de cada componente (rocha intacta e juntas). A maioria das soluções analíticas foi desenvolvida para sistemas de juntas de forma simples, persistentes e ortogonais. Alguns dos casos mais citados são: maciço rochoso com um sistema de fraturas simples como rocha estratificada (Salamon, 1968), maciços rochosos com descontinuidades ortogonais (Amadei & Goodman, 1981) e maciços rochosos com descontinuidades aleatórias (Fossum, 1985).

As soluções analíticas não permitem considerar a redistribuição de tensões devido à existência de descontinuidades, já que se o maciço rochoso não tivesse descontinuidades (só estivesse formado por rocha intacta) a distribuição de tensões seria uniforme, em quanto a presença de descontinuidades gera áreas de concentração de tensões que pode ter uma importância significativa no comportamento mecânico do maciço rochoso. Assim as interseções das descontinuidades ou as zonas mais fraturadas são em geral regiões com os maiores gradientes de tensão, deformação e, porém as zonas onde começam as falhas.

Tem-se realizado também modelos no laboratório mostrando os complexos modos de falha em maciços rochosos fraturados assim como também a complexa distribuição de tensões internas inclusive para sistemas simples de descontinuidades. Alguns destes ensaios são os de Brown, 1970a; Brown, 1970b; Kulatilake et al. 1997; Singh et al. 2002; Twaria e Rao, 2006.

Embora os métodos de equilíbrio limite sejam simples de usar e tenham sido bem adaptados para a análise de estabilidade de taludes em maciços rochosos fraturados, não podem representar a deformação e deslocamentos em um maciço rochoso, este problema tem sido bem solucionado pelos métodos numéricos que podem modelar muitas condições complexas encontradas nos taludes rochosos como comportamento não linear, anisotropia e mudanças na geometria.

Os modelos numéricos dividem a rocha em elementos, para cada elemento é atribuída uma relação tensão-deformação idealizada e propriedades que descrevem o comportamento do material. Os elementos podem ser conectados em um modelo contínuo ou podem ser separados por descontinuidades em um modelo descontínuo.

Os métodos contínuos consideram que o material é contínuo através de todo o corpo. Para taludes rochosos fraturados, o maciço deve ser representado por um material contínuo equivalente no qual vai ser afetado pelas descontinuidades, que em geral a sua presença no maciço diminui a sua resistência e as propriedades elásticas do maciço. O modelo numérico divide o maciço rochoso em elementos e para cada elemento se atribui um modelo de material e as propriedades do material. Os modelos do material são as relações constitutivas idealizadas de tensão-deformação que descrevem o comportamento do maciço. O modelo mais simples é o modelo linear elástico que usa só as propriedades elásticas do material (Módulo de Young e coeficiente de Poisson). Este modelo usa geralmente os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb para limitar a resistência cisalhante que cada elemento pode suportar. O outro critério de falha para maciço rochoso bem usado é o de Hoek-Brown. Este critério tem sido usado indiretamente encontrando os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb equivalentes que fornece uma superfície de falha tangente ao critério de falha de Hoek-Brown para um intervalo de tensões de confinamento.

Devido a que o maciço rochoso é em essência um meio descontínuo, os modelos descontínuos permitem obter uma boa compreensão do comportamento já que estão concebidos especificamente para modelar falhas e juntas (descontínuos), assim como simular os complexos modos de fraturamento e falha. É relativamente recente o desenvolvimento de modelos numéricos baseado na mecânica da partícula e com os notáveis avanços computacionais, estes modelos têm ganhado confiabilidade e grande uso na mecânica das rochas devido à análise detalhada do comportamento complexo.

Nós últimos anos, os métodos descontínuos baseados nos métodos dos elementos discretos (DEM) usando os programas UDEC (Itasca, 2009) e 3DEC (Itasca, 2008c) têm sido usados para caracterizar o comportamento do maciço rochoso (Kulatilake et al. 1993; Min e Jing, 2003; Min 2004; Baghbanan 2008). A modelagem explícita das descontinuidades não persistentes em UDEC e 3DEC pode ser um processo difícil e demorado se o número de descontinuidades for grande.

Uma das características dos programas de modelos numéricos, como UDEC, é que os resultados estão influenciados segundo o modelo constitutivo especificado pelo usuário para a rocha intacta e para as discontinuidades.

Recentemente, se têm desenvolvido códigos numéricos avançados que permitem melhorar a modelagem de taludes rochosos fraturados. Os códigos são ELFEN (Rockfield, 2001) e PFC^{2D} (Itasca, 2008), e seu equivalente PFC^{3D} (Itasca, 2008).

ELFEN é um modelo numérico híbrido que incorpora a análise de elementos finitos-discretos (FEM-DEM). No início o programa foi desenvolvido para a modelagem dinâmica de carga de impacto em materiais frágeis como cerâmicas, pero que tem aumentado seu uso em mecânica das rochas, como a aplicação para análise 2D de superfície de subsidência associado à caverna de mineração (Vyazmensky et al. 2007; Vyazmensky et al. 2008). ELFEN tem a capacidade de simular o comportamento do meio fraturado com a representação explícita das juntas. Também permite a propagação de fraturas segundo o critério de falha especificado através de modelos constitutivos macro mecânicos como os critérios de falha de Mohr-Coulomb, Drucker Prager ou Rankine. Em algum ponto da análise o modelo constitutivo adotado predisse a formação de uma banda de falha dentro de um elemento simples ou entre elementos. A capacidade de carga da banda de falha diminui até zero quando o dano aumenta até que a energia necessária para formar uma fratura discreta é liberada. Neste ponto a topologia da grelha é atualizada e iniciando a propagação da fratura dentro de um contínuo e eventualmente resultando na formação de um elemento discreto como um fragmento de rocha (Ver Figura 2.2).

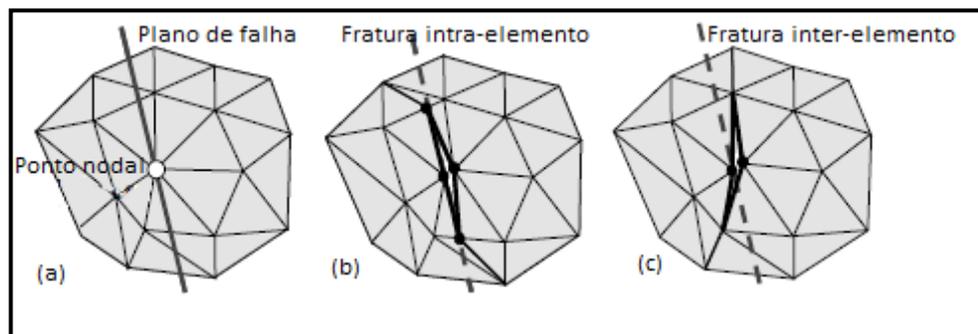


Figura 2.2 – Formação de fratura no ELFEN (a) Estado inicial; e desenvolvimento da fratura (b) através do elemento ou (c) ao longo do contorno do elemento (Modificado de Yu, 1999).

Usando uma combinação da função de escoamento de Mohr-Coulomb com a tensão de corte, (Crook, Willson, Yu, & Owen, 2003) pode se modelar fraturas frágeis e fraturas dúcteis.

PFC^{2D} (Itasca, 2008) e PFC^{3D} (Itasca, 2008) são códigos de elementos distintos que representam a rocha como um conjunto de partículas rígidas ligadas com contatos deformáveis que podem se quebrar. Este conjunto de partículas pode ser usado para simular o comportamento de um maciço rochoso na qual a superfície de falha pode passar por uma falha, junta ou pela rocha intacta. Neste modelo não se requer de um critério de falha baseado na macro-mecânica devido a que o comportamento mecânico do maciço rochoso está governado pelo crescimento e eventual coalescência de micro trincas em fraturas macroscópicas quando o carregamento é aplicado. O PFC tem mostrado capacidade para reproduzir a essência e mais sutis características da iniciação e propagação de fraturamento em rochas e maciços rochosos (Potyondy & Cundall, 2004).

Kulatilake et al. (2001) demonstraram o uso do PFC^{3D} para modelar o comportamento de maciços de rocha fraturados baixo carregamento uniaxial. A geometria do modelo foi relativamente simples, com poucas juntas persistentes em uma amostra de escala de laboratório. (Park et al., 2004) criou um modelo em 2D de um maciço rochoso altamente fraturado em PFC^{2D} incorporando mais de 100 juntas não persistentes de uma rede discreta de fraturas (DFN) em um bloco de 30 x 30 m. Os resultados obtidos mostraram uma boa representação, permitindo medidas diretas da resistência e fragilidade do maciço, assim também demonstraram a influência do número de juntas no amolecimento por deformação (*strain-softening*) do maciço, cambiando de frágil a dúctil com o aumento no número de juntas.

O presente trabalho apresenta o método do Maciço Rochoso Sintético (SRM). Este método está baseado no método dos elementos distintos, desenvolvido no PFC^{2D} (Itasca, 2008b) e pode ser usado para caracterizar maciços rochosos fraturados e avaliar o seu comportamento.

Este método recente está conformado por duas técnicas bem estabelecidas: *Bonded Particle Model* (BPM) para a simulação do comportamento da rocha intacta (Potyondy & Cundall, 2004) e o *Discrete Fracture Network* (DFN) para a modelagem das descontinuidades de menor escala.

Está técnica será usada para a análise de estabilidade do talude rochoso de uma mina a céu aberto no Peru, na qual se tem informação geomecânica de nove sondagens geomecânicas e 50 estações de mapeamento em afloramentos.