

3

Fundamentos Teóricos

3.1. **Introdução**

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos utilizados para a análise dos resultados apresentados no capítulo 6.

Em Mecânica das Rochas, o procedimento mais comum para a determinação da resistência à compressão envolve o uso de um corpo de prova de cilíndrico, carregado axialmente em uma máquina de ensaios. O valor da tensão de ruptura é definido como a resistência à compressão da amostra.

Na teoria, a determinação da resistência à compressão é simples. Na prática, existem fatores internos e externos afetam os resultados dos ensaios de forma significativa.

Dentre os fatores internos podemos destacar a mineralogia, o tamanho dos grãos e a porosidade da rocha. Entre os fatores externos, estão: atrito entre os atuadores e a face do corpo de prova; geometria da amostra (forma e tamanho); taxa de carregamento; temperatura; taxa de deformação; trajetória de carregamento e pressão confinante.

De forma a obter os resultados mais próximos da realidade, foram investigadas formas de minimizar as interferências externas.

3.2. **Caracterização de Materiais Através de Ensaio de Laboratório**

As propriedades da rocha intacta podem ser determinadas através de ensaios de resistência das rochas em laboratório. Entre eles estão os ensaios uniaxial, triaxial e poliaxial (fig. 3.1).

O ensaio uniaxial é de execução simples, consistindo na aplicação de uma carga axial em corpos de prova de relação altura/diâmetro aproximadamente 2,5. Nenhuma carga é aplicada perpendicularmente. A partir deste ensaio é possível obter a carga de ruptura da amostra.

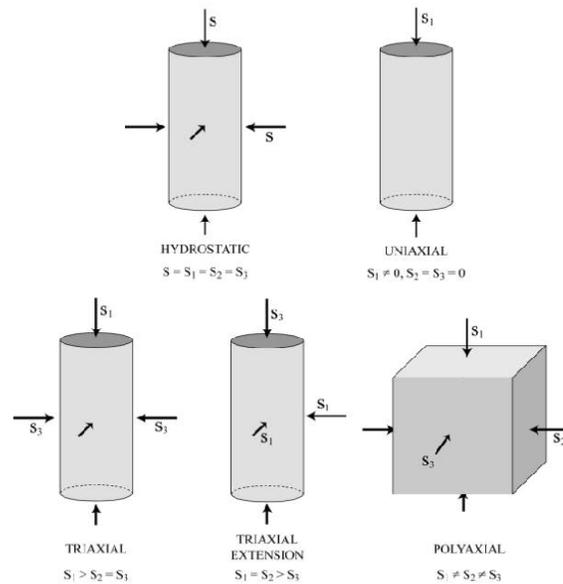


Figura 3.1 – Tipos de ensaio (GMI, 2006).

O ensaio triaxial convencional consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões (amostra confinada por fluido) e de um carregamento axial sobre um corpo de prova. Entre os ensaios triaxiais também estão o ensaio triaxial verdadeiro, com aplicação de carga através de pistões nas três direções; o ensaio de cilindro vazado, com aplicação de um estado hidrostático e carregamento axial e; compressão triaxial por quatro pistões e fluido de compressão, conforme mostrado na figura (Vutukuri, 1974).

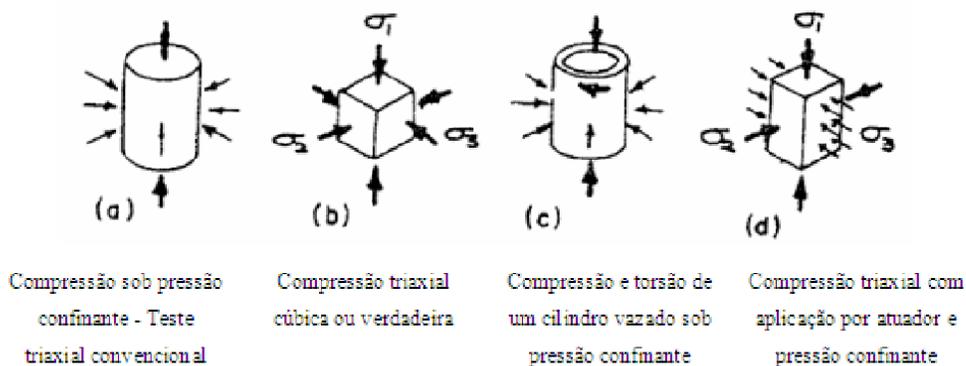


Figura 3.2 – As setas finas indicam compressão por fluido confinante e as setas espessas indicam compressão ou torção aplicada por atuadores (Mogi, 1971).

O princípio do ensaio poliaxial ou triaxial verdadeiro consiste na aplicação de três tensões principais diferentes a partir de 6 pistões em um corpo de prova cúbico.

3.3. Modos de Ruptura

A deformação das rochas pode levar a dois modos de ruptura. São denominadas frágeis aquelas que rompem sem significativa deformação, sem alteração permanente na estrutura do material, e dúcteis aquelas que se deformam plasticamente antes da ruptura, processo no qual os grãos deslizam ou rotacionam uns sobre os outros.

Em geral, as rochas apresentam comportamento frágil, mas podem apresentar comportamento dúctil devido às mudanças físicas no ambiente. A deformação das rochas depende da sua estrutura e magnitude das tensões confinantes, temperatura e taxa de carregamento (Vutukuri *et al*, 1974).

Ryabinin *et al* (1971) estudaram o efeito da pressão sobre a plasticidade e a resistência de diversos tipos de materiais. Segundo eles, a ruptura frágil ocorre sob um determinado nível de pressão, que eles chamaram de limiar de pressão. Submetidos à pressão acima deste nível, os materiais passam do estado frágil para o estado plástico (o material é capaz de se deformar sem perder a resistência), donde se conclui que a pressão aumenta a plasticidade. Uma das causas desse aumento da plasticidade é que o aumento da pressão tende a variar o estado de tensões. A formação e o desenvolvimento de microfraturas no corpo de prova são interrompidos e passam a ocorrer deformações plásticas. Uma outra causa é que as deformações sob altas pressões tendem a fechar as microfissuras preexistentes.

A ruptura macroscópica de rochas submetidas a ensaios de compressão triaxial estará de acordo com a tensão confinante a que estas foram sujeitas (Santarelli e Brown, 1989). Griggs e Handin (1960) descrevem a deformação macroscópica de rochas submetidas a ensaios de laboratório em cinco estágios. Estes estágios de rupturas estão representados na figura 3.3 e consideram desde a ruptura frágil até a dúctil.

Caso	1	2	3	4	5
Deformação típica antes da fratura	< 1	1-5	2-8	5-10	> 10
Compressão $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$					
Tração $\sigma_3 < \sigma_1 = \sigma_2$					
Curva tensão-deformação ($\sigma_1 - \sigma_3$)					

* Onde σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões máxima, intermediária e mínima, respectivamente.

Figura 3.3 – Representação esquemática das rupturas frágeis a dúcteis com as respectivas deformações típicas e curvas de tensão-deformação para compressão uniaxial e tração (adaptado Griggs e Handin, 1960).

Entretanto, Jaeger e Cook (1979) mostraram que os três estágios podem ser resumidos como:

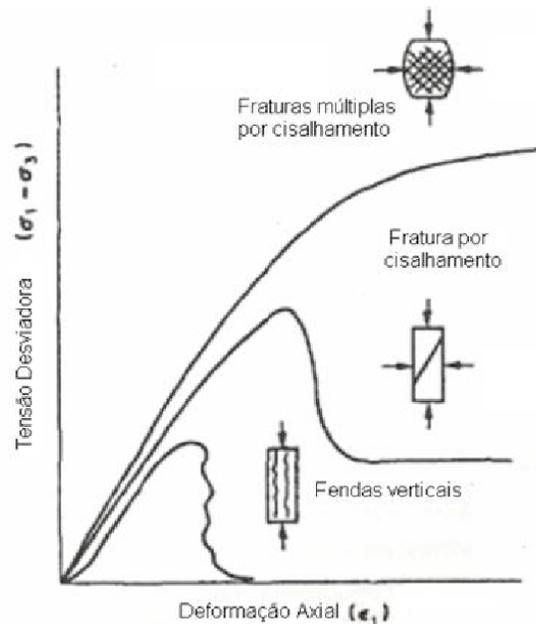


Figura 3.4 – Classificação das Rupturas de Amostras Submetidas a Ensaios Triaxiais, (Jaeger e Cook, 1979).

3.4. Modos de Ruptura induzidos

Uma concentração de tensões surge ao redor do poço quando a rocha, que antes suportava as tensões de campo, é removida. Esse novo estado de tensões conduz à formação de vários tipos de ruptura, sendo mais comuns as rupturas por compressão (*breakouts*) e as rupturas por tração (fig. 3.5).

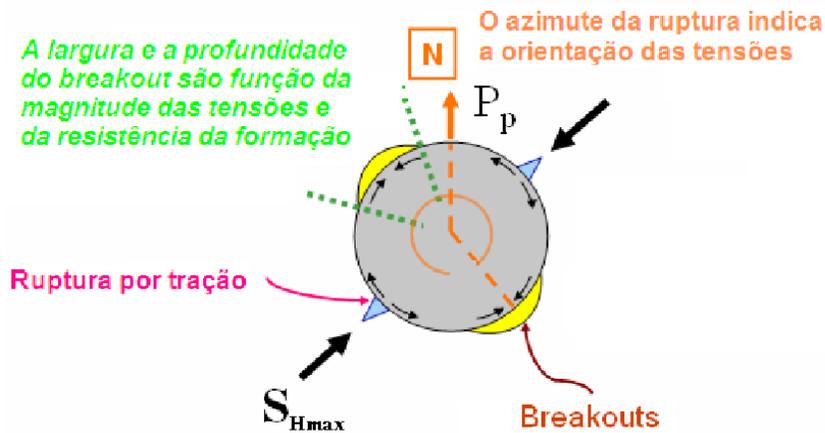


Figura 3.5 – Modos de ruptura mais comuns em um furo circular (apresentação comercial da GMI, 2006).

Os *breakouts* são definidos como regiões aonde a seção transversal do poço deixa de ser circular, passando a elíptica, devido a um contraste de tensões atuando perpendicularmente a ele. Ocorrem por tensões de compressão que atuam exatamente no ponto de tensão tangencial máxima da parede do poço, o que de acordo com a solução de Kirsch para furos circular (Goodman, 1989), é perpendicular à tensão máxima (S_{max}) e alinhada à tensão mínima (S_{min}).

Em regiões onde as tensões são uniformes, ou seja, não há um contraste de tensões, este fenômeno não é observado, ainda que se trate de um campo de arenito friável, como é o caso, por exemplo, de Marlim, localizado na Bacia de Campos

De acordo com Papamichos *et al* (2008), o mecanismo de ruptura em arenitos se apresenta em duas formas mais comuns:

- ruptura frágil, com *breakout* profundo e muito estreito, como uma fenda, (fig. 3.6a);

- ruptura dúctil, com *breakout* largo e superficial, formado por fraturas de cisalhamento(fig. 3.6b).

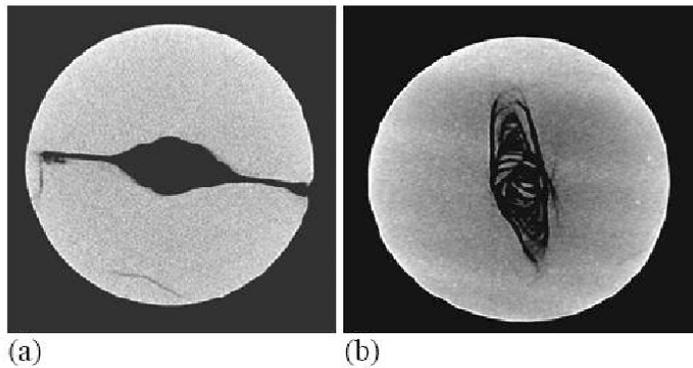


Figura 3.6 – Tipos de *breakouts*, (a) ruptura frágil (a) e (b) dúctil (Papamichos, 2008).

3.5. Efeitos de Escala

Formações rochosas são meios heterogêneos descontínuos, tanto do ponto de vista macroscópico quanto microscópico. A heterogeneidade surge como consequência de processos naturais tais como condições genéticas, ações tectônicas e químicas e mudanças térmicas e hidrológicas. Assim sendo, a determinação das propriedades da rocha, ou da fratura, sempre envolve incertezas (Cunha, 1990)

Os resultados de ensaios de campo e de laboratório são afetados pelos locais escolhidos para análise, pela dimensão dos volumes envolvidos nos ensaios e por eventuais danos à amostra, que podem modificar propriedades (Barton, 1990). Com isso, a análise de um determinado parâmetro estudado pode ser impactada se os efeitos de escala são negligenciados ou esquecidos.

Materiais rochosos testados em diferentes escalas freqüentemente revelam tendências de diminuição de resistência com o aumento do tamanho da amostra, mas estudos conduzidos por Barton (1976) e Paterson (1978) mostraram que tensões de confinamento maiores podem reduzir esses efeitos.

3.6. Modelagem Numérica – Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos consiste na divisão do domínio de integração de uma determinada geometria contínua em um número finito de elementos, sendo essa divisão do domínio chamada de rede de elementos finitos.

A discretização dos materiais permite resolver uma série de problemas através de sistemas de equações. O tamanho dos elementos finitos pode ser variado, o que aumenta ou diminui a malha que se utilizará para resolução dos problemas. Em geral, o uso do método dos elementos finitos é um procedimento aproximado, entretanto, essa aproximação melhora à medida que mais elementos são usados. A escolha destes é feita de acordo com o tipo de análise e a geometria do modelo.

A definição das propriedades dos materiais para modelagem por elementos finitos é feita segundo o tipo de análise pretendida. Na maioria dos modelos desenvolvidos se utiliza a curva de engenharia do material e parâmetros de ensaio. As propriedades dos materiais deste estudo estão apresentadas no capítulo 5.