

3. Metodologia utilizada na modelagem numérica dos conglomerados

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada para a determinação das propriedades mecânicas dos conglomerados, utilizando a interpretação de testes numéricos realizados em amostras virtuais. Para fazer a modelagem numérica dos conglomerados devem ser empregados modelos conceituais, assim como dados de entrada das propriedades dos blocos, a matriz e/ou a interface, gerados mediante trabalho de campo e/ou laboratório. A metodologia utilizada compreende os passos seguintes:

- 1.1 Construção da amostra virtual.
- 1.2 Execução dos ensaios numéricos na amostra virtual.
- 3.3. Interpretação dos ensaios numéricos.

Em seguida, é apresentado o detalhe de cada um dos passos utilizados na modelagem numérica dos conglomerados.

3.1. Construção da amostra virtual do conglomerado

3.1.1. Definição do tipo de conglomerado

A resistência dos conglomerados (em geral, das rochas compostas por blocos imersos em uma matriz fina) é governada principalmente pelas características da matriz (ver capítulo 2). Para classificar a matriz é utilizado o critério proposto por Altinsoy (2006), onde esta pode ser: (a) Soldada, ou (b) Não soldada.

A modelagem entre os dois tipos de conglomerados apresenta apenas uma diferença: a presença de um material adicional na fronteira entre os blocos e a matriz no caso dos conglomerados com matriz não soldada. Este material adicional utilizado na modelagem dos conglomerados não soldados recebe o nome de *interface*.

Assim, a modelagem numérica do conglomerado deve iniciar com a escolha do modelo conceitual que o descreve. Um conglomerado soldado é constituído por apenas dois materiais: blocos e matriz (Figura 3.1a); porém um conglomerado não soldado é formado por três tipos de materiais: blocos, interface e matriz (Figura 3.1b).

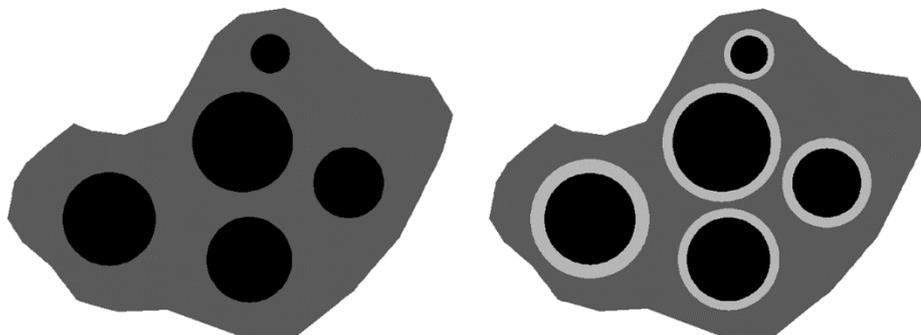


Figura 3.1 – Modelo conceitual utilizado na análise numérica dos conglomerados a) com matriz soldada, b) com matriz não soldada. Preto: blocos, Cinza escuro: matriz, Cinza claro: interface.

A espessura da interface não tem de ser constante para todos os blocos que formam o modelo, geralmente, dependem do tamanho do bloco. A decisão de qual deve ser a espessura da interface deve ser tomada com base em observações de campo (quando estiverem à disposição). Alternativamente, em caso de não contar com ditas observações, podem ser utilizadas recomendações obtidas na literatura técnica (ver por exemplo: Coli *et al.*, 2012).

3.1.2. Definição da geometria externa da amostra

A geometria externa da amostra deve ser selecionada com base no tipo de ensaio numérico a ser realizado. Assim, por exemplo, um ensaio de corte direto na escala de campo necessita como domínio de um quadrado de 700 mm de largura, e na execução de um ensaio de compressão na escala de laboratório é necessário utilizar uma geometria externa de $50 \times 150 \text{ mm}^2$ como mínimo.

3.1.3. Construção do modelo mesoestrutural

O modelo mesoestrutural do conglomerado representa a estrutura interna das amostras utilizadas nos ensaios numéricos. Esta estrutura é constituída no mínimo pelos blocos e pela matriz. Em função do tipo de conglomerado (soldado ou não soldado), a interface também deve ser incluída na estrutura interna deste. Na construção do modelo mesoestrutural são utilizados os seguintes passos:

3.1.3.1. Definição do intervalo do tamanho dos blocos

O tamanho de bloco, máximo (d_{max}) e mínimo (d_{min}), que deve ser utilizado no modelo mesoestrutural depende geralmente de duas variáveis: (a) a dimensão mínima do corpo de prova analisado, (b) a capacidade de processamento do computador e/ou do *software* que vai ser utilizado na modelagem numérica.

Pode ser adotada, nesta definição, a metodologia sugerida por Medley (1994a), que propõe um limite inferior $d_{min}=0,05 \cdot L_c$ e um limite superior $d_{max}=0,75 \cdot L_c$, onde L_c é a dimensão característica (ver item 2.4.3). No caso analisado, L_c corresponde à dimensão mínima da geometria externa da amostra utilizada no ensaio numérico. Porém, a escolha dos limites pode variar com base nas necessidades do estudo a ser realizado, incluindo blocos de menor ou maior porte do que os sugeridos por Medley.

3.1.3.2. Definição da geometria do modelo mesoestrutural

Na definição da mesoestrutura é preciso usar imagens de uma escala representativa do caso analisado (Figura 3.2). O processamento das imagens para obter a geometria dos blocos pode ser: (a) automatizado (Keaton, 2010; Xu *et al.* 2008) utilizando software para o processamento de imagens (por exemplo: *ImagemJ*); (b) manual usando a digitalização das imagens por meio de um *software* de desenho assistido por computador (por exemplo: *AutoCAD*) ou; (c) uma combinação de ambas as técnicas (Zhang *et al.*, 2015).

3.1.4.

Determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade

Os parâmetros de resistência e deformabilidade devem ser selecionados com base nas informações disponíveis do problema analisado. Precisam ser utilizados como dados de entrada do modelo os resultados de ensaios de resistência e deformabilidade, realizados em campo ou laboratório, em cada um dos materiais que constituem o conglomerado. No caso de não ter à disposição ensaios de resistência e deformabilidade, podem ser utilizados parâmetros mecânicos obtidos na literatura técnica. A escolha dos parâmetros mecânicos através de correlações deve ser justificada, no mínimo, pela execução de ensaios índice no laboratório (mineralogia, peso específico, absorção, porosidade, entre outros).

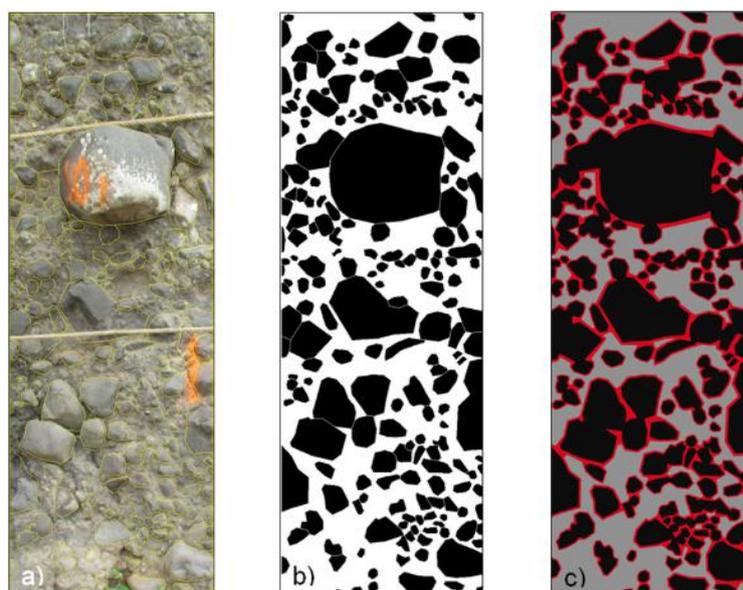


Figura 3.2 – Definição da geometria do modelo mesoestrutural: (a) Passo 1: Digitalização da amostra. (b) Passo 2: Modelo mesoestrutural formado pelos blocos e a matriz. (c) Passo 3: Em amostras como matriz não soldada, inclusão da zona de interface entre os blocos e a matriz.

3.2.

Execução dos ensaios numéricos na amostra virtual

Logo após obter a amostra virtual, segundo a metodologia descrita no item 3.1, realiza-se a modelagem numérica utilizando um método numérico apropriado para tal fim (*MEF*, *MDF*, *MED*, etc). O primeiro passo na execução do ensaio

numérico é a discretização da amostra virtual, que depende do modelo numérico e do *software* empregados na modelagem.

Depois de realizar a discretização, o segundo passo consiste em impor as condições de contorno (deslocamentos e carregamentos) representativas do tipo de ensaio numérico que vai ser executado (compressão, cisalhamento direto, placa, etc). Na execução de ensaios de compressão recomenda-se a utilização das condições de contorno propostas por Coli *et al.* (2012): (a) deslocamento vertical crescente no lado superior da amostra virtual, (b) simular a tensão de confinamento (σ_3) por meio de uma pressão normal à superfície aplicada ao redor do corpo de prova (no caso 2D, nas paredes da amostra), (c) deslocamento vertical nulo na base da amostra.

Nos ensaios de cisalhamento direto podem ser utilizadas as condições de contorno propostas por Xu *et al.* (2008): (a) deslocamentos horizontais nulos nos dois lados inferiores da amostra, (b) deslocamentos horizontais e verticais nulos na base, (c) espaço de 5 cm entre a parte inferior e superior da amostra para diminuir a influência da caixa de cisalhamento, (d) carregamento vertical constante no topo da amostra, (e) carregamento horizontal crescente no lado superior esquerdo da amostra.

3.3. Interpretação dos ensaios numéricos

3.3.1. Ensaio de compressão uniaxial

Dos ensaios de compressão uniaxial é estimada a resistência à compressão uniaxial (*UCS*) e o módulo de deformabilidade (*E*) do conglomerado. As recomendações do método sugerido pela ISRM (1979a) são utilizadas na interpretação dos ensaios numéricos de compressão uniaxial.

No cálculo do módulo de deformabilidade do conglomerado é utilizado especificamente o método do módulo de deformabilidade médio do trecho linear da curva tensão-deformação do ensaio de compressão (Figura 3.3). O valor da resistência à compressão uniaxial é obtido diretamente da leitura da tensão ao pico da curva tensão-deformação. Nos casos onde a amostra não apresenta um pico bem definido (exemplo: comportamento elástico linear com endurecimento),

recomenda-se definir uma deformação máxima para realizar o cálculo da *UCS*. Por exemplo, em todos os casos analisados neste trabalho foi definida uma deformação axial máxima $\varepsilon_a=0,05$ no cálculo da *UCS*.

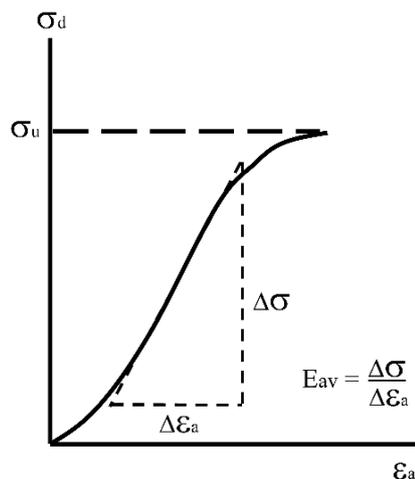


Figura 3.3 – Método do módulo de deformabilidade médio do trecho linear da curva tensão-deformação, utilizado no cálculo do módulo de deformabilidade nos ensaios de compressão uniaxial (Modificado de ISRM, 1979a).

3.3.2. Ensaio de compressão biaxial

Dos ensaios de compressão biaxial podem ser estimados os parâmetros de resistência do conglomerado, que são dependentes do critério de ruptura utilizado para realizar a interpretação. Assim, utilizando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb na interpretação dos dados pode ser empregada a metodologia proposta pela ISRM (1978) para obter os parâmetros de resistência (c , ϕ). Os passos para obter os parâmetros de resistência (ao pico) dos ensaios numéricos de compressão biaxial são os seguintes:

1. A tensão principal menor (ou tensão de confinamento, σ_3) e a tensão principal maior (ou tensão axial, σ_1) obtidas de cada ensaio de compressão são desenhadas no espaço das tensões principais σ_1 - σ_3 (Figura 3.4);
2. A envoltória de resistência é obtida desenhando uma linha de melhor ajuste entre os pontos do gráfico. Devido à não linearidade da envoltória de resistência, pode ser necessário desenhar várias linhas retas para assim obter um adequado ajuste da envolvente. Cada linha reta deve ser

caracterizada calculando seu gradiente (m) e sua intercepção com o eixo da tensão principal maior (b);

- Utilizando os parâmetros m e b , o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão (c) devem ser calculados utilizando as equações seguintes:

$$\phi = \arcsen\left(\frac{m-1}{m+1}\right) \quad 3.1$$

$$c = b \frac{1-\sin\phi}{2\cos\phi} \quad 3.2$$

- Finalmente, deve ser preparada uma tabela onde são apresentados os parâmetros c e ϕ , incluindo o intervalo das tensões de confinamento onde estes são válidos.

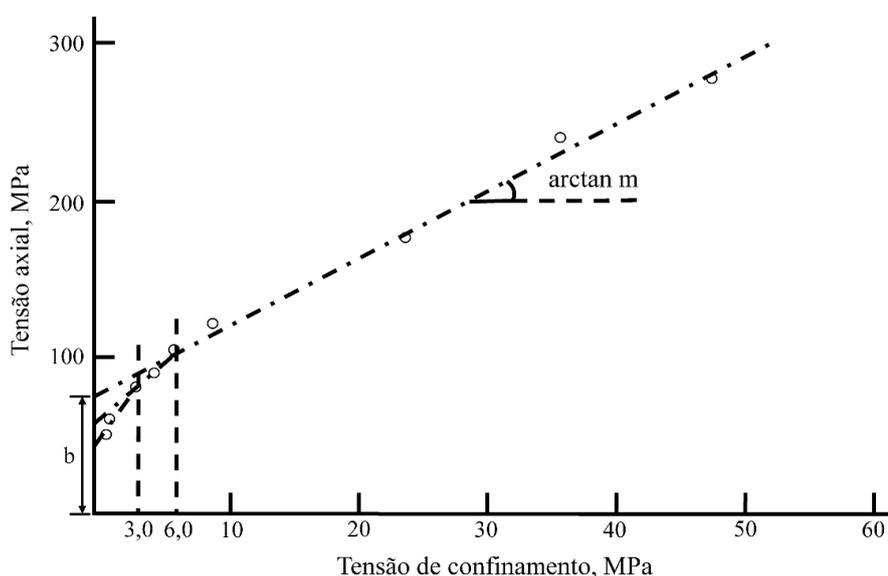


Figura 3.4 – Envoltória de resistência no espaço das tensões principais, obtida dos ensaios de compressão (Modificado de ISRM, 1978).

3.3.3. Ensaio de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram utilizados para obter os parâmetros de resistência (c , ϕ) do critério de ruptura do modelo de Mohr-Coulomb, utilizando a metodologia proposta pela ISRM (1974). Os passos para obter os parâmetros de resistência (ao pico) dos ensaios numéricos de cisalhamento direto são os seguintes:

1. A tensão cisalhante (τ) e a tensão normal (ou tensão axial, σ_n) obtidas de cada ensaio de compressão são desenhadas no espaço das tensões τ - σ_n (Figura 3.5);
2. A envoltória de resistência é obtida desenhando uma linha de melhor ajuste entre os pontos do gráfico. Devido à não linearidade da envoltória de resistência pode ser necessário desenhar várias linhas retas para assim obter um adequado ajuste da envolvente;
3. Cada linha reta deve ser caracterizada calculando seu gradiente ($\tan \phi$) e sua intercepção com o eixo da tensão principal maior (c);
4. Finalmente, deve ser preparada uma tabela onde são apresentados os parâmetros c e ϕ , incluindo o intervalo das tensões de confinamento onde estes são válidos.

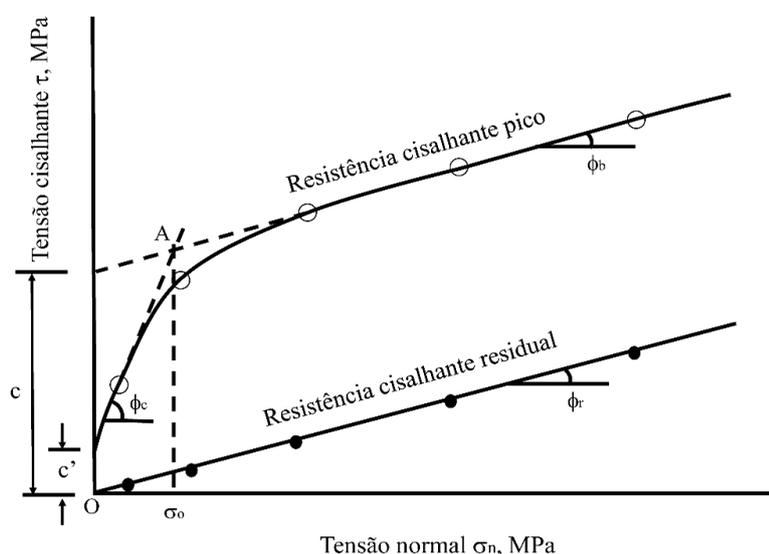


Figura 3.5 – Envoltória de resistência no espaço das tensões cisalhantes-tensões normais, obtida dos ensaios de cisalhamento direto (Modificado de ISRM, 1974).

3.3.4. Ensaio de placa

A teoria da elasticidade linear é adotada na interpretação dos ensaios numéricos de placa no conglomerado, ficando implícita a premissa de que o conglomerado pode ser considerado um contínuo homogêneo, isotrópico e linear elástico. No caso dos ensaios numéricos de placa realizados no estado de

deformação plana, o módulo de deformabilidade (E) pode ser calculado utilizando a solução desenvolvida por Harr (1966) para estimar o deslocamento elástico no meio de uma cimentação superficial perfeitamente flexível em um semiespaço homogêneo:

$$E = 2,5 \cdot \frac{B \cdot q}{S_e} \cdot (1 - \nu^2) \quad 3.3$$

Onde B é a largura da placa, q é o carregamento, S_e é o deslocamento no meio da placa, e ν é o coeficiente de Poisson.

No caso dos ensaios numéricos de placa realizados no estado de deformação axissimétrica, o módulo de deformabilidade (E) pode ser calculado utilizando a solução para estimar o deslocamento no meio de uma área circular carregada de forma uniforme sugerida pela ISRM (1979b):

$$E = \frac{B \cdot q}{S_e} \cdot (1 - \nu^2) \quad 3.4$$

Onde B é a largura da placa, q é o carregamento, S_e é o deslocamento no meio da placa, e ν é o coeficiente de Poisson.