

### 3

## Modelagem de corte através do método dos elementos finitos

As diversas potencialidades do programa de elementos finitos ABAQUS permitem modelar numericamente problemas de engenharia complexos, envolvendo geometrias complicadas, relações constitutivas não lineares, ocorrência de grandes deformações, carregamentos transientes e interações entre materiais. Este capítulo aborda aspectos relevantes para a modelagem do processo de corte: o método de integração, a formulação da malha e o tipo de interação entre a rocha e o cortador.

### 3.1. Método de integração

O *software* ABAQUS usado para desenvolver as simulações deste trabalho oferece a possibilidade de usar dois métodos de integração no tempo: implícito (ABAQUS/*Standard*) e explícito (ABAQUS/*Explicit*).

O ABAQUS/*Standard* é o módulo de solução mais geral do software capaz de resolver problemas lineares e não lineares de forma implícita, ou seja, resolvendo os sistemas de equações em cada incremento do processo de solução. A técnica de solução é baseada na matriz de rigidez do modelo e é incondicionalmente estável. Entretanto, por ser um método mais exato, demanda mais tempo computacional para a resolução do problema. Este módulo é indicado para análises estáticas e dinâmicas lineares ou com níveis discretos de não-linearidade.

O ABAQUS/*Explicit* é um módulo de solução especial desenvolvido para a resolução mais rápida de problemas dinâmicos com grandes deformações e deslocamentos, como o caso de corte em rocha, por exemplo. Enquanto o *Standard* faz iterações para determinar a solução, o *Explicit* determina a solução sem iterações, através da previsão com um método de integração explícita. Este módulo requer um menor esforço computacional, porém ele é um método condicionalmente estável, apresentando maiores dificuldades de convergência que o *Standard*. (ABAQUS, 2010).

Os modelos deste trabalho foram analisados usando o *software* ABAQUS/Explicit, com base em experiências de diversos trabalhos sobre a modelagem de processos de corte em materiais metálicos (Ng & Aspinwall, 2002; Mabrouki & Rigal, 2006; Duan *et al*, 2009; Arrazola & Ozel, 2010) que sugerem o uso do método *Explicit* para a modelagem de problemas dinâmicos e altamente não lineares.

### 3.2. Formulação da malha

Existem duas formas para abordar problemas que envolvem o deslocamento de materiais deformáveis: a descrição Lagrangeana Modificada e a forma Euleriana.

A Figura 3.1 mostra uma malha com formulação Lagrangeana Modificada a qual considera que a posição de um ponto do material está relacionada com a posição original do mesmo ponto, isto é,  $x = X(x, t)$  onde  $x$  é a posição atual e  $X$  é a posição de referência para um instante  $t = 0$ . Assim, na formulação Lagrangeana Modificada, o sistema de coordenadas é fixado para um dado corpo, e o deslocamento deste corpo é uma função das coordenadas do material em qualquer instante. Uma vez que o sistema de coordenadas está ligado ao material, a formulação Lagrangeana Modificada é mais apropriada para a descrição dos processos não estacionários, como o corte de rocha.

A desvantagem deste método é que os elementos facilmente degeneram quando grandes deformações ou repentinas mudanças de forma ocorrem durante o processo. Neste caso, a fim de poder continuar a análise, a malha de elementos degenerados deve ser substituída por uma nova. Este processo é conhecido como reconstrução de malha (*remeshing*) e é necessário realizá-lo durante a simulação do processo de corte.

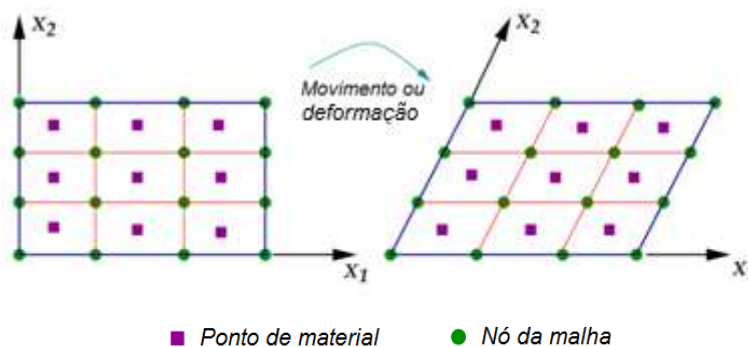


Figura 3.1 – Malha com formulação Lagrangeana Modificada.

A Figura 3.2 ilustra uma malha com formulação Euleriana que considera a posição de referência como uma função da posição atual, ou seja,  $X = X(x, t)$ , em que a posição atual instantânea e a inicial instantânea são variáveis independentes. Na formulação Euleriana o sistema de coordenadas é fixado no espaço e o material flui através da malha. Isso evita a distorção da malha de elementos, porém é preciso que o domínio seja modelado com maiores dimensões para evitar que o material flua fora do domínio. A formulação Euleriana não será usada na modelagem do processo de corte porque apresenta dificuldades na aplicação das condições de contorno da interface dos materiais do cortador e da amostra de rocha.

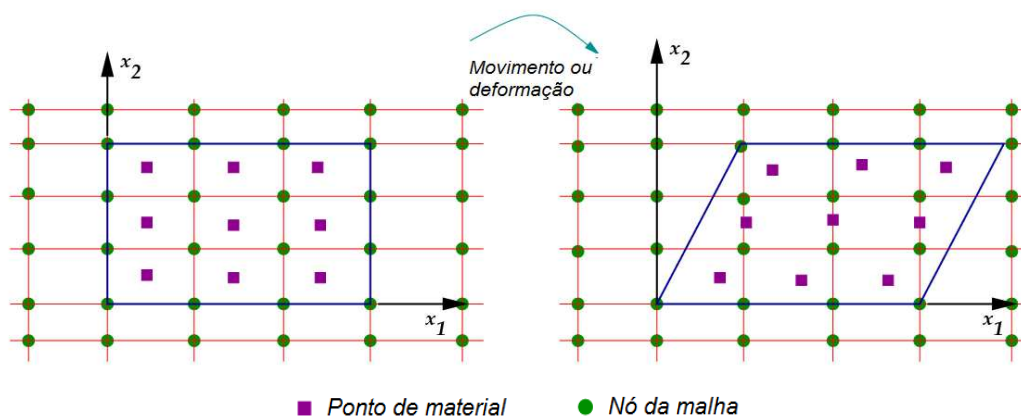


Figura 3.2 – Malha com formulação Euleriana

### 3.3. Interação rocha-cortador

A interação rocha-cortador pode ser modelada através de um algoritmo de contato. O *software* ABAQUS precisa da identificação das superfícies dos corpos (neste caso a superfície da rocha e as superfícies do cortador) que estão ou estarão em contato em um determinado momento da simulação.

O contato é definido por propriedades que definem a interação entre duas superfícies compostas por elementos finitos. Uma vez definidas estas propriedades, o *software* é capaz de reconhecer quando dois corpos estão ou não em contato e, de acordo com as propriedades de interação pré-estabelecidas, o sistema irá reagir de forma conjunta aos estímulos externos.

Nos itens a seguir, será apresentado de forma resumida um dos mecanismos de aplicação de contato utilizado pelo *software* ABAQUS.

### 3.3.1. Discretização das superfícies de contato

No ABAQUS há duas técnicas de discretização de superfícies de contato: Nó-Superfície (N-S) e Superfície-Superfície (S-S). Em ambos os casos, uma superfície Mestre e outra superfície Escrava devem ser adotadas conforme ilustra a Figura 3.3. De forma geral, pode-se dizer que a superfície Mestre é aquela que irá governar a aplicação do contato, pois irá ditar o comportamento da superfície Escrava durante a interação rocha-cortador. Neste trabalho, a superfície Mestre escolhida foi o cortador enquanto que a superfície Escrava escolhida foi a amostra de rocha.

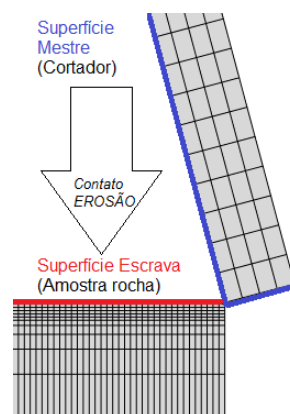


Figura 3.3 – Interação entre superfícies de contato.

Neste trabalho foi utilizada a técnica de discretização N-S que consiste na interação entre os nós dos elementos da superfície Escrava e a superfície propriamente dita Mestre. Esta superfície Mestre é composta pelas faces dos elementos que compõem a malha da região que entrará em contato. Com esta técnica, a aplicação do contato é considerada uma operação discretizada que ocorre de forma individual e isolada em cada nó da superfície Escrava.

Um dos problemas da técnica N-S é a possibilidade de penetração da superfície Mestre na superfície Escrava. Em regiões de refinamento crítico da superfície escrava, a penetração da superfície mestre pode causar uma transmissão de pressão de contato não realística, pois nem toda área de contato está sendo contemplada. Para evitar este problema, deve-se refinar satisfatoriamente a malha da região de contato nodal, de forma que não haja regiões muito “abertas” na superfície Escrava, o que permitiria tais penetrações. Esta técnica requer, portanto, uma superfície Escrava mais refinada que a superfície Mestre. Contudo, é recomendado que o corpo mais rígido (neste

trabalho, o cortador) contenha a superfície Mestre, pois os elementos da superfície Escrava, que são menos rígidos (neste trabalho, a amostra de rocha), irão se deformar segundo a superfície mais rígida.

A técnica de discretização S-S considera ambas as superfícies de contato de forma contínua. A probabilidade de penetração da superfície Mestre na superfície Escrava é menor, pois ambas as regiões estão bem definidas. Por isso, nesta técnica, o refinamento da malha não é tão relevante para a convergência da pressão de contato, como foi o caso da técnica N-S. Contudo, o maior refinamento ainda deve permanecer na malha da superfície Escrava.

### 3.3.2. Propriedade do contato – Modelo de Erosão

Os modelos de corte de rocha desenvolvidos neste trabalho usam o modelo de Erosão para definir o contato entre rocha e cortador. Este modelo permite redefinir continuamente a superfície de contato através da remoção dos elementos do material que atinge um critério de dano. O critério de dano define o mecanismo da perda da resistência do material e a degradação da sua rigidez. No Capítulo 5 o modelo de dano será descrito mais detalhadamente. A Figura 3.4 ilustra a topologia de uma superfície após a ocorrência do contato tipo erosão.

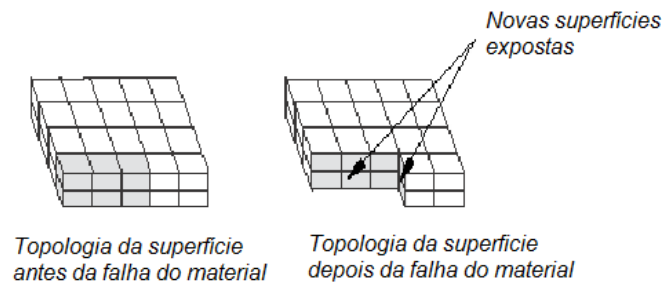


Figura 3.4 – Topologia de superfície de contato com contato tipo Erosão (Modificado de ABAQUS, 2010).