

1 Introdução

O desmorte de rocha por explosão é uma atividade essencial em operações de mineração e de construção civil, em obras como túneis e galerias subterrâneas, cortes em estradas, construção de barragens e de edificações. É um processo complexo que envolve a nucleação de uma grande quantidade de microfissuras que se combinam e propagam, quebrando a rocha em fragmentos, sendo afetado por fatores que dependem das propriedades dos materiais, da geometria do maciço rochoso e condições de contorno, bem como do tipo de carregamento dinâmico.

Ao longo do tempo, o projeto de desmorte de rocha por explosão evoluiu de técnicas manuais simples para uma ampla variedade de métodos que utilizam diferentes tecnologias. A maioria dos modelos para previsão de desmorte é ainda baseada em formulações empíricas ou semi-empíricas, apesar dos enormes esforços de pesquisas experimentais, teóricas e numéricas realizadas nas últimas décadas para melhor entender o fenômeno.

A técnica de desmorte de rocha por explosão (*rock blasting*) consiste em utilizar a energia de explosivos para fragmentar a rocha cujos fragmentos podem em seguida, ser extraídas por meios mecânicos e transportados para o processamento final. O desmorte de rocha a fogo, outra denominação comum para o desmorte de rocha por explosão, varia de pequena escala, para a fragmentação de pequenos blocos usando apenas dezenas de gramas de explosivos, até operações de grande porte, como em instalações industriais de minas a céu aberto, onde toneladas de explosivos podem ser consumidas em um único tiro ou explosão.

A energia liberada das reações químicas dos explosivos, na forma de gases sob alta temperatura e alta pressão, é parcialmente utilizada para criar fraturas, gerar fragmentação e deslocar blocos de rocha. Os explosivos podem ser de vários tipos, sendo os mais comuns o TNT (trinitrotolueno), ANFO (*Ammonium Nitrate / Fuel Oil*), emulsões e aquagel; uma descrição mais detalhada dos mesmos encontra-se no apêndice A deste trabalho. Um projeto de desmorte de rocha envolve

planejamento e decisões sobre a geometria dos furos de detonação (diâmetro, comprimento, inclinação, sub-perfuração), padrão de perfuração (quadrada, retangular, alongadas, em estágios), distribuição espacial dos furos (espaçamento entre furos de uma linha, afastamento em relação a superfícies livres), explosivos (tipo, energia, embalagem, comprimento de carga, acoplamento, método de carregamento), características do tampão ou *stemming* (material, altura, tamanho de partícula), sequência de fogo, altura da bancada para desmonte a céu aberto, etc. Também devem ser levadas em conta as características da geologia local, as propriedades de resistência dos materiais, a existência de descontinuidades estruturais, a presença de água no local e outros fatores.

A Figura 1.1 ilustra uma seção transversal típica de uma bancada para desmonte a céu aberto enquanto a Figura 1.2 ilustra uma seção para escavação de túnel em minas subterrâneas.

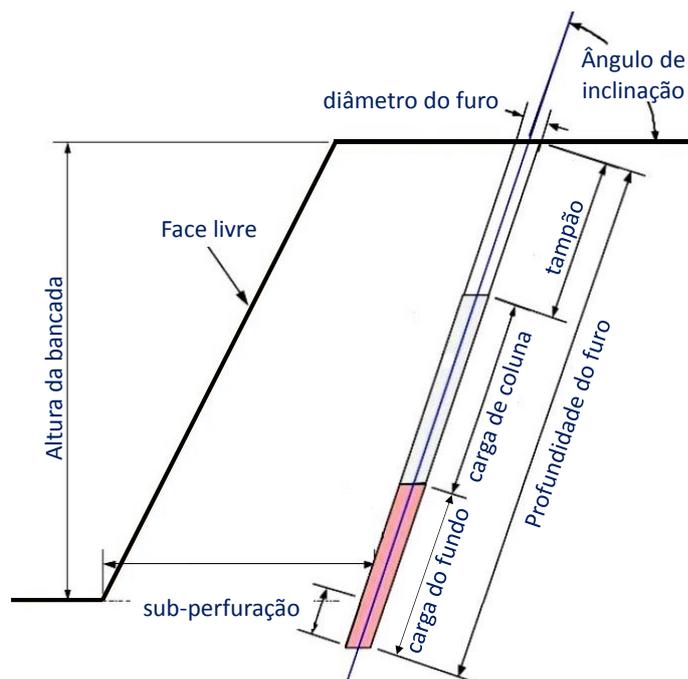


Figura 1.1 - Geometria de uma bancada e elementos típicos de um plano de fogo (adaptado de Silva, 2013).

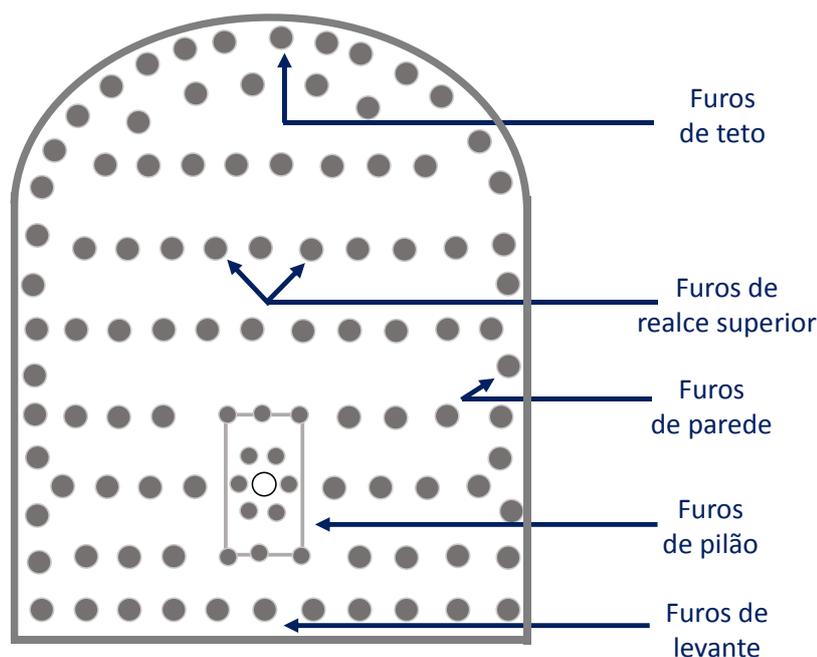


Figura 1.2 - Seção típica de uma escavação de túnel (adaptado de Silva, 2013).

A maioria dos países tem normas locais do processo de desmonte de rochas com explosivos. No Brasil é legislado por Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), autarquia federal criada em 1994 e vinculada ao Ministério de Minas e Energia. Entre as normas que devem ser consultadas têm-se:

- Da Portaria 3.214 de 8/7/78:
 - NR-15 Atividades e Operações Insalubres
 - NR-16 Atividades e Operações Perigosas
 - NR-19 Explosivos
 - NR-21 Trabalhos a Céu Aberto
 - NR-22 Trabalhos Subterrâneos
- Da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas:
 - NB 942 Segurança de Escavações a Céu Aberto
 - NB 617 Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos
 - NB 756 Projeto Geotécnico

A Figura 1.3 apresenta uma visão geral dos aspectos que devem ser observados na elaboração de um plano de fogo. Os três principais sistemas envolvidos na elaboração de um plano de fogo são o maciço rochoso, o explosivo e as condições de contorno. O estudo é influenciado por inúmeros fatores e sua interação mutua. Vários autores têm estudado modelos analíticos de fragmentação

do desmonte de rocha a explosivos. O trabalho de Moraes (2004) fez um resumo dos principais modelos:

- Modelo Kuz-Ram (Kuznetsov, 1973; Cunningham, 1987; Lilly, 1986). As propriedades das rochas, as propriedades dos explosivos e as variáveis geométricas do plano de fogo são combinadas usando cinco equações que compõem o modelo.
- Modelo JKMRC (*Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre*). Análogo o método Kuz-Ram, mas com o objetivo de estudar a distribuição de finos da detonação (Stagg et al., 1992).
- Modelo de duas componentes - TCM Djordjevic (1999). Desenvolvido para garantir uma maior precisão da fragmentação obtida no desmonte, principalmente para os finos. Nesse modelo, a pilha resultante do desmonte pode ser considerada uma mistura de dois conjuntos de fragmentos de rocha: ruptura por compressão (finos) e ruptura por tração (fragmentos grossos).

Basicamente, os modelos de fragmentação do maciço por explosivos são aproximações que fornecem em forma grosseira uma resposta do problema. Assim, o grande desafio é simular este processo de uma forma mais realística como está sendo tratado com vários métodos de modelagem numérica.

1.1 Motivação da pesquisa

Técnicas experimentais não permitem um controle total sobre o processo de acompanhamento do desmonte de rocha por explosão. É difícil compreender os mecanismos de fraturamento em rocha por meio de ensaios de campo ou laboratório devido à duração extremamente curta da onda de choque (da ordem de microssegundos), velocidade de propagação da fratura, condições de anisotropia e heterogeneidade do maciço rochoso, bem como à ocorrência de geração de gases, lançamento de detritos, etc.

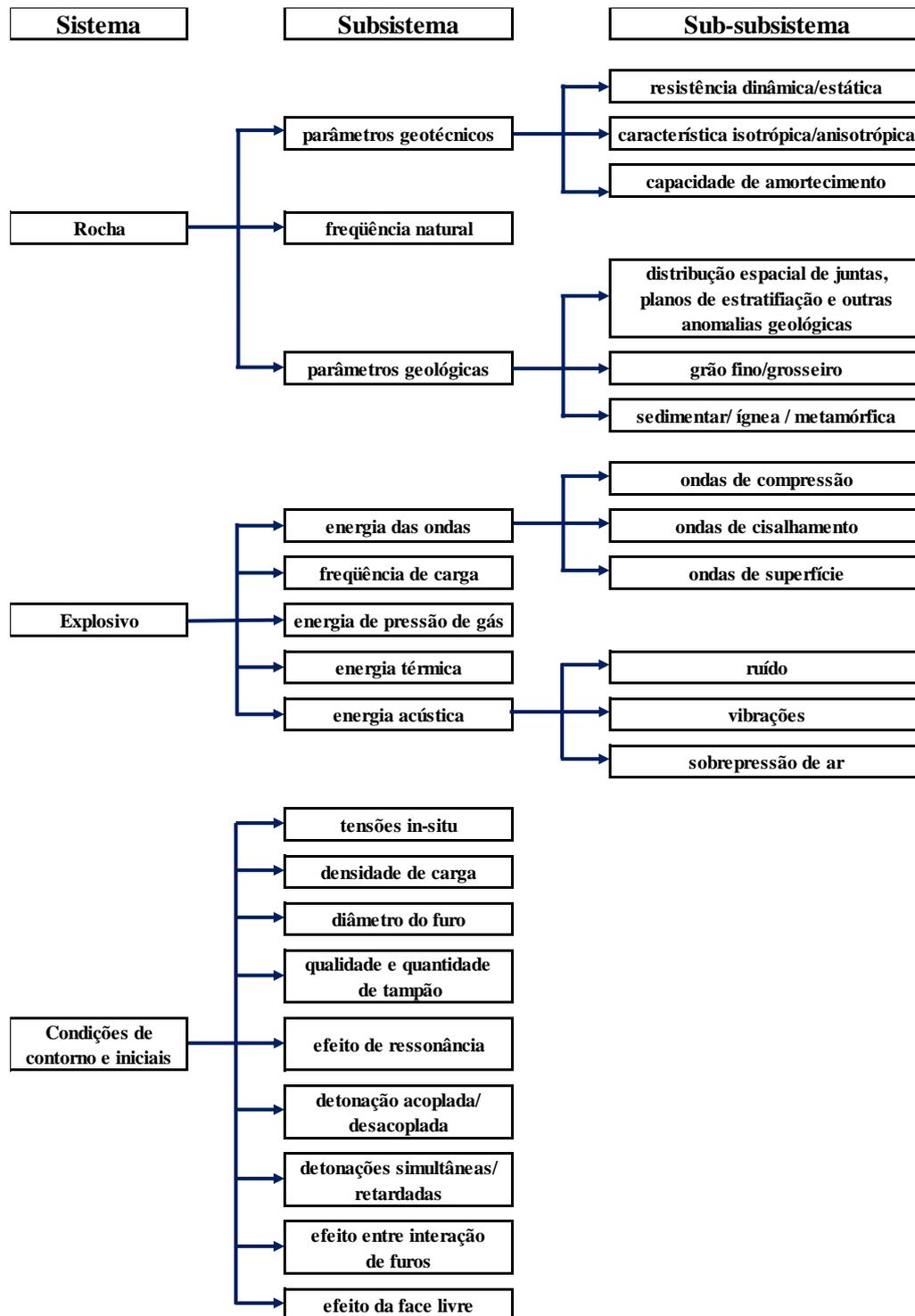


Figura 1.3 - Fatores a serem considerados no planejamento de desmonte de rocha por explosão (adaptado de Saharan e Mitri, 2008).

Os rápidos avanços nos métodos de modelagem numérica fizeram da simulação computacional uma ferramenta promissora para estudar eventos de natureza dinâmica. Especificamente, na propagação dinâmicas de fraturas que é objeto de estudo neste trabalho.

Um dos métodos mais frequentemente utilizados é o método dos elementos finitos (MEF), que permite acompanhar no tempo e no espaço a evolução das fraturas no maciço rochoso. Na formulação convencional a aplicação deste método requer atualizações frequentes da malha para representar a nova geometria do material recém fraturado, o que, além de ser computacionalmente demorado pela necessidade da contínua reconstrução de malhas, também resulta na perda de precisão numérica quando as variáveis de interesse (tensões e deslocamentos) são mapeadas e interpoladas da antiga para a nova malha de elementos finitos. Como na tradicional utilização de elementos finitos de interface e dos elementos finitos com singularidade.

O método estendido dos elementos finitos (*XFEM - eXtended Finite Element Method*) constitui uma alternativa mais eficiente e adequada para a modelagem deste tipo de problema, com a incorporação de enriquecimentos locais das funções de interpolação, resultando em valores das variáveis de interesse mais precisamente determinadas, além de reduzir o esforço computacional pois a presença da fratura, e sua propagação através do maciço rochoso, não é geometricamente modelada, dispensando a necessidade das atualizações da malha de elementos da metodologia convencional.

A técnica de eliminação de elementos (TEE) é maneira simples de simular a propagação de fratura. Não há necessidade de representar a descontinuidades sendo a fratura fisicamente modelada pela eliminação progressiva de elementos. Para levar em conta a dissipação de energia no domínio pós fraturamento, o conceito de fissuração distribuída (*smeared crack*) é empregado.

Exemplos numéricos são apresentados a fim de discutir as vantagens e limitações de cada um dos métodos antes referidos.

1.2 Objetivos da pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é estudar numericamente o processo de propagação de fraturas induzidas por explosão em um maciço rochoso. Para esta finalidade, foi utilizado o método estendido dos elementos finitos (XFEM) e o modelo constitutivo de zona coesiva (MZC) para simular a iniciação e propagação

das fraturas em rocha, admitida isotrópica e comportando-se elasticamente até o instante do fraturamento (material quase-frágil).

Exemplos de aferição são considerados para a comparação dos resultados numéricos com diferentes métodos empregados com data experimental da literatura para revelar a sensibilidade da discretização de elementos finitos e do modelo de amolecimento de dano.

Embora o problema seja de natureza 3D, as simulações numéricas foram realizadas com o programa computacional ABAQUS v.6.14 considerando uma modelagem 2D no estado plano de deformação, justificado pelas ainda consideráveis dificuldades, em termos de tempo de processamento e recursos computacionais exigidos em um tratamento tridimensional deste problema.

Nesta pesquisa, investigou-se apenas o fraturamento dinâmico do maciço rochoso causado pelos altos níveis de tensão induzidos pelas ondas de choque, desconsiderando-se efeitos de temperatura e da pressurização nas paredes internas das fraturas e do próprio furo de detonação, causados pela expansão dos gases de combustão. Além disso, não foram consideradas as tensões iniciais.

Com o objetivo de verificar e melhor compreender o processo de fraturamento dinâmico em rocha, discutem-se importantes aspectos que influenciam o problema, como as características do carregamento transiente, o número e distribuição de fissuras pré-existentes ao redor do furo, os efeitos da existência de faces livres nas proximidades, dos valores do módulo de elasticidade e da resistência à tração máxima da rocha em meio heterogêneo, da detonação em múltiplos furos e dos atrasos na sequência de explosão.

Os resultados numéricos obtidos nas análises do presente trabalho foram comparados com aqueles determinados pelo método convencional dos elementos finitos (Lima, 2001) e pela técnica de eliminação de elementos (Saharan e Mitri, 2008).

1.3 Organização da tese

A presente tese está estruturada em sete capítulos, o primeiro dos quais apresenta o problema investigado, a motivação da pesquisa e os objetivos a serem nela alcançados.

No Capítulo 2, discutem-se aspectos relacionados com os principais mecanismos envolvidos no esmagamento e fraturamento da rocha ao redor do furo de detonação, a interação da energia de explosão na rocha e são apresentadas diferentes formas de variação da pressão na parede do furo ao longo do tempo propostas na literatura.

O Capítulo 3 contém uma revisão dos métodos numéricos que possibilitam a investigação da propagação de fraturas em maciços rochosos, com ênfase no método dos elementos finitos.

O Capítulo 4, descreve o método estendido dos elementos finitos (XFEM), no qual as descontinuidades do campo de deslocamentos, provocadas pelas fraturas, podem ser modeladas através da técnica dos nós fantasmas, que consiste numa sobreposição de dois elementos finitos seccionados pela fratura.

No Capítulo 5 são apresentadas e discutidas várias simulações numéricas discutindo aspectos de convergência, influência da rigidez da rocha, heterogeneidade do maciço rochoso, proximidade do furo de detonação a faces livres, dificuldades relacionadas com a aplicação do método convencional dos elementos finitos, comparação de soluções obtidas com diferentes métodos numéricos, etc.

O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões desta tese e lista algumas sugestões para trabalhos futuros nesta área.

Finalmente, as referências bibliográficas relativas aos trabalhos constam no texto final do trabalho, assim como dois apêndices que complementam informações para melhor compreender os conceitos básicos do fraturamento em rocha.