

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE ANFO
FABRICADO *IN SITU* EM PEDREIRA DE CALCÁRIO

ENRIQUE MUNARETTI

Engenheiro de Minas

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa / Tecnologia Mineral

PORTO ALEGRE

1997

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE ANFO
FABRICADO *IN SITU* EM PEDREIRA DE CALCÁRIO

ENRIQUE MUNARETTI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa / Tecnologia Mineral

PORTO ALEGRE

1997

Essa dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

**Prof. Dr. Jair Carlos Koppe
DEMIN / UFRGS**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Slawomir Piatnicki - DEMIN

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa - DEMIN

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter - DEMIN

**Prof. Dr. Luís Frederico P. Dick
Coordenador do PPGEM**

**Dedico este trabalho à minha família, especialmente aos meus pais
Mário e Noemea, e aos meus irmãos Luciana e Adriano.**

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que colaboraram direta e indiretamente na realização desse trabalho, o meu reconhecimento.

Ao Professor Dr. Jair C. Koppe pela oportunidade, confiança, apoio e dedicação dispensado na realização dessa dissertação.

Ao Professor MSc. Andrew Scott pelos preciosos comentários e sugestões.

Ao Professor Dr. João Felipe C. L. Costa pelo constante estímulo e apoio.

Ao diretor da empresa de mineração Calcário Andrezza Ltda., Sr. Paulo R. Andrezza pela disponibilidade do local dos testes, atenção e amizade, Marcelo e Alexandre Andrezza e Sr. Valdomiro B. da Silva pelo auxílio constante, bem como todos os demais funcionários que tanta dedicação e paciência empenharam na realização desse trabalho.

Ao engenheiro de minas MSc. Jorge B. Segui pela ajuda e companheirismo.

A todos os integrantes da equipe do LPM, a secretária do Departamento de Engenharia de Minas da UFRGS, Loraci Idecina da Silva e ao pessoal do PPGEM, principalmente Beatriz Ferraz e Ana Lúcia Dias.

Ao geólogo Paulo F.C. Lisboa pelas sugestões, oportunidades e conselhos.

Ao geólogo Marco A. Medeiros pela caracterização do maciço rochoso.

A Claudia Giacobbe.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| RESUMO..... | VIII |
| ABSTRACT..... | X |
| LISTA DE FIGURAS..... | XI |
| LISTA DE TABELAS..... | XV |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS..... | XVI |
| | |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivos..... | 2 |
| 1.2 Metodologia de trabalho..... | 2 |
| 1.3 Relevância do estudo..... | 3 |
| | |
| 2 GENERALIDADES SOBRE EXPLOSIVOS E MÉTODOS DE INICIAÇÃO..... | 4 |
| 2.1 Explosivos..... | 4 |
| 2.2 Métodos de iniciação..... | 8 |
| | |
| 3 CONCEITOS BÁSICOS..... | 9 |
| 3.1 Combustão..... | 9 |
| 3.2 Deflagração..... | 10 |
| 3.3 Detonação..... | 11 |
| 3.4 Energia de ativação..... | 11 |
| | |
| 4 TIPOS DE EXPLOSIVOS COMERCIAIS..... | 13 |
| 4.1 ANFO..... | 13 |
| 4.1.1 Principais parâmetros que afetam a performance do ANFO..... | 14 |
| 4.2 Aquagel..... | 22 |
| 4.3 Emulsão..... | 22 |
| 4.4 Dinamite..... | 23 |
| | |
| 5 PROPRIEDADES DOS EXPLOSIVOS..... | 24 |
| 5.1 Velocidade de detonação (VoD)..... | 24 |
| 5.2 Força e energia..... | 25 |

| | |
|--|----|
| 5.3 Densidade..... | 27 |
| 5.4 Resistência à água..... | 27 |
| 5.5 Sensibilidade..... | 28 |
| 5.6 Geração de gases tóxicos..... | 28 |
| 5.7 Vida útil..... | 29 |
| 5.8 Resistência à temperaturas extremas..... | 29 |
| 5.9 Propriedades ambientais..... | 30 |
| 5.10 Segurança ao manuseio..... | 30 |
| | |
| 6 INICIAÇÃO..... | 31 |
| 6.1 Iniciação não elétrica..... | 32 |
| 6.1.1 Estopim e espoleta comum..... | 32 |
| 6.1.2 Cordel detonante..... | 33 |
| 6.1.3 Sistema Nonel..... | 36 |
| 6.2 Iniciação elétrica | 37 |
| 6.2.1 Espoleta elétrica..... | 37 |
| 6.2.2 Sistema Magnadet..... | 39 |
| 6.3 Cargas iniciadoras e reforçadores..... | 40 |
| | |
| 7 TEORIA DE DESMONTE..... | 43 |
| 7.1 Mecanismo de fragmentação das rochas..... | 43 |
| | |
| 8 TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE DETONAÇÕES..... | 50 |
| 8.1 Fotografia e vídeo de alta definição..... | 51 |
| 8.1.1 Estimativa de energia cinética..... | 54 |
| 8.1.2 Escolha de retardos..... | 56 |
| 8.2 Monitoramento das vibrações..... | 56 |
| 8.2.1 Parâmetros de onda..... | 57 |
| 8.2.2 Parâmetros de vibração..... | 59 |
| 8.2.3 Tipos de ondas sísmicas..... | 60 |
| 8.2.4 Instrumentação e medida para vibração..... | 63 |
| 8.2.5 Energia relativa de vibração..... | 67 |
| 8.3 Medida de velocidade de detonação - VoD..... | 69 |
| 8.4 Fragmentação..... | 71 |

| | |
|---|-----|
| 8.5 Pressão de gás..... | 72 |
| 8.6 Variabilidade no tempo dos retardos..... | 73 |
| 9 DESCRIÇÃO GERAL E METODOLOGIA EXPERIMENTAL..... | 75 |
| 9.1 Localização da área..... | 75 |
| 9.2 Caracterização geológica do maciço..... | 76 |
| 9.3 Desmonte..... | 77 |
| 9.4 Equipamento de monitoramento..... | 78 |
| 9.5 Metodologia experimental..... | 80 |
| 9.5.1 Preparação da bancada e furação..... | 80 |
| 9.5.2 Carregamento dos furos..... | 82 |
| 9.5.3 Características dos explosivos..... | 83 |
| 9.5.4 Estação de coleta de dados..... | 85 |
| 10 ANÁLISE DOS DADOS..... | 87 |
| 10.1 Teste 1..... | 88 |
| 10.2 Teste 2..... | 90 |
| 10.3 Teste 3..... | 92 |
| 10.4 Teste 4..... | 93 |
| 11 ANÁLISE ECONÔMICA DO ANFO..... | 95 |
| 12 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 100 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 102 |
| ANEXOS..... | 107 |

RESUMO

A performance dos explosivos é fator determinante no custo final de todas as operações mineiras. O desmonte com utilização de explosivos tem grande importância na fragmentação do minério e no perfil da pilha de desmontado. Por sua vez, esses dois fatores irão determinar a eficiência das operações subsequentes de remoção de material, carregamento, transporte, e nos processos de beneficiamento. Na maioria dos casos, o desmonte tem sido tratado de uma forma empírica, mas deveria receber uma abordagem científica, buscando conciliar maior eficiência com menor custo operacional.

Devido ao incremento na utilização e conseqüente demanda maior de explosivos nas operações mineiras, as empresas necessitam avaliar e monitorar a performance dos produtos disponíveis no mercado. Esse trabalho procura ampliar o conhecimento e investigar a viabilidade técnica e econômica do ANFO (*Ammonium Nitrate-Fuel Oil*) para utilização em pedreiras de calcário do Rio Grande do Sul. O ANFO é um explosivo largamente utilizado em países de tradição mineira como os EUA, que consome anualmente 75% desse insumo em um mercado de 2,4 milhões de toneladas de explosivos, mas apesar de aprovado mundialmente, a sua utilização no Brasil ainda é incipiente.

No presente trabalho, uma revisão dos explosivos industriais e das técnicas de medida de performance desse insumo é apresentada, bem como os principais parâmetros que afetam o resultado final do desmonte com ANFO.

Selecionou-se como área de trabalho uma pedreira de calcário que apresentava problemas no desmonte de rochas com uso de explosivos, tais como ultralaçamento, custos elevados e baixa produtividade. A partir disso, estabeleceu-se um novo plano de fogo e a troca do antigo explosivo pelo ANFO. Posteriormente, selecionou-se uma técnica simples para avaliar qualitativamente e quantitativamente a performance dos explosivos. O monitoramento consistiu em um estudo comparativo das vibrações de um maciço rochoso causadas por detonações segundo dois critérios: PPV-L (velocidade máxima de partícula no plano longitudinal) e, PVS-R (soma vetorial de velocidade máxima de partícula real). A técnica foi adotada devido à objetividade e facilidade de obtenção dos dados para embasar o estudo. Várias detonações foram medidas por um sismógrafo de modo a se eliminar ao máximo a subjetividade da avaliação dos desmontes. Buscou-se com medidas *in situ*, quantificar a performance do ANFO produzido na pedreira comparativamente a ANFOs industrializados (nitro-carbo-nitratos) que possuem formulação similar.

Posteriormente, foi feita uma análise de custos envolvendo a situação pretérita e a utilização de ANFO fabricado tanto *in situ* como industrializado. Os resultados obtidos indicam a possibilidade de utilização do ANFO. Esse explosivo obteve um custo por metro cúbico 45% menor quando comparado com ANFOs industrializados. O ANFO, além de econômico, se mostrou estável, de fácil preparo e, performance semelhante aos ANFOs industriais.

ABSTRACT

Explosives performance is a determinant factor in mining costs. Blasting has a large impact in ore fragmentation and muckpile profile. These two factors will determine the efficiency of downstream operations such as digging, loading, hauling and milling. Traditionally, rock blasting has been treated with empirical approaches, lacking of a more scientific basis.

As the worldwide explosive consumption increases, the industry is forced to evaluate and measure the performance of the available commercial products. This study investigates ANFOs technical and economical viability for limestone quarries in Rio Grande do Sul. This explosive has been widely used in traditional mining countries such as USA, where ANFO responds for 75% of its 2.8 million ton/year consumption. Although ANFO is worldwide used, its use in Brasil is inexpressive.

This study presents a review on explosives techniques used to measure its performance and the main parameters which affects the blasting results.

Prior to this research, blasting at this quarry was affected by various problems such as flyrock, high unit costs and low productivity. A new blast design was proposed and after seismic measurements, cost analysis and visual inspection were carried out in order to evaluate explosive's performance.

The monitoring program measure the induced rock vibration by blasting using two parameters : PPV-L (peak particle velocity along longitudinal plane) and PVS-R (real peak vector sum). This technique was used due to its objectivity and simplicity in obtaining seismograph information to reduce subjective evaluations of blastings. A comparison of in mine prepared ANFO with similar commercial products were carried out.

Previously used blast design and the new pattern using ANFOs (agriculture prills and commercial ANFO) were compared based on their economical performance. The proposed design reduced 45% of the unit cost if compared with commercial ANFOs. In mine prepared ANFO reduced mining costs and proved to be easy to prepare, showing benefits of using it, if compared with commercial ANFOs.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1. | Mistura dos componentes da dinamite..... | 6 |
| Figura 2. | Comportamento de um explosivo quando deflagrado..... | 10 |
| Figura 3. | Comportamento de um explosivo quando detonado..... | 11 |
| Figura 4. | Energia liberada por um explosivo antes e depois de iniciado..... | 12 |
| Figura 5. | Árvore familiar dos explosivos..... | 14 |
| Figura 6. | Influência de água na performance de ANFO..... | 15 |
| Figura 7. | Efeito de conteúdo de óleo em ANFO..... | 16 |
| Figura 8. | Velocidade de detonação de ANFO vs. diâmetro do furo para explosivos do tipo ANFO..... | 17 |
| Figura 9. | Formas de cristalização do nitrato de amônio em diferentes temperaturas..... | 18 |
| Figura 10. | Perda de energia causada por cordel detonante..... | 19 |
| Figura 11. | Composição e performance de diversos primers..... | 20 |
| Figura 12. | Diâmetros e performance de diversos primers..... | 21 |
| Figura 13. | Efeito da adição de alumínio em pó em ANFO..... | 21 |
| Figura 14. | Iniciação de um explosivo tipo ANFO em diâmetro de 9 7/8" por um primer..... | 25 |
| Figura 15. | Velocidades mínimas que iniciam explosivos..... | 30 |
| Figura 16. | Detalhe de um perfeito amolçamento da espoleta no estopim..... | 32 |
| Figura 17. | Conjunto estopim - espoleta comum..... | 33 |
| Figura 18. | Ligação espoleta-cordel detonante..... | 35 |
| Figura 19. | Detalhe de retardo para cordel detonante..... | 35 |
| Figura 20. | Corte de um conjunto não-elétrico Nonel..... | 36 |
| Figura 21. | Ligações normalmente feitas com Nonel..... | 37 |
| Figura 22. | Espoleta elétrica simples ou instantânea..... | 38 |
| Figura 23. | Espoleta elétrica de retardo..... | 38 |
| Figura 24. | Diagrama esquemático de um sistema Magnadet..... | 39 |
| Figura 25. | Clássica disposição de primer e boosters ao longo da coluna..... | 41 |
| Figura 26. | Efeito da resultante da posição do primer na coluna..... | 42 |
| Figura 27. | Diagrama de tensões de um cilindro submetido à pressão interna... | 44 |
| Figura 28. | Paralelepípedo elementar de tensões..... | 45 |
| Figura 29. | Efeito de tensões de tração radial..... | 45 |

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 30. | Efeito de tensões de tração tangencial..... | 46 |
| Figura 31. | Visualização seqüencial das fraturas..... | 47 |
| Figura 32. | Diagrama de tensão vs. deformação..... | 47 |
| Figura 33. | Reflexão e refração da onda de choque..... | 48 |
| Figura 34. | Alguns intervalos de tempo das etapas da detonação..... | 49 |
| Figura 35. | Câmera de alta velocidade..... | 52 |
| Figura 36. | Posicionamento dos marcadores na face da bancada..... | 53 |
| Figura 37. | Vista superior para posicionamento frontal e oblíquo da câmera..... | 54 |
| Figura 38. | Movimento harmônico simples..... | 58 |
| Figura 39. | Diagrama de uma onda P e abaixo dessa uma onda S..... | 61 |
| Figura 40. | Diagrama de uma onda Rayleigh..... | 61 |
| Figura 41. | Estrutura funcional de um geofone..... | 64 |
| Figura 42. | Detalhe dos três planos medidos por um sismógrafo e a correta orientação do eixo principal deste no sentido longitudinal..... | 66 |
| Figura 43. | Sistema de medida de VoD por cabos paralelos..... | 70 |
| Figura 44. | Sistema Wipfrag..... | 72 |
| Figura 45. | Instrumentação para monitorar pressão de gás..... | 73 |
| Figura 46. | Teste de espalhamento dos tempos de retardos..... | 74 |
| Figura 47. | Planta de localização do Município de Vila Nova do Sul..... | 76 |
| Figura 48. | Perfil das bancadas utilizadas na Pedreira Cerro do Cabelo..... | 78 |
| Figura 49. | Sismógrafo Instantel DS-077..... | 79 |
| Figura 50. | Características da bancada..... | 81 |
| Figura 51. | Perfil padrão dos furos..... | 82 |
| Figura 52. | Padrão da malha utilizada nos testes..... | 83 |
| Figura 53. | Preparação do ANFO..... | 84 |
| Figura 54. | Carregamento dos furos com ANFO..... | 84 |
| Figura 55. | Grânulos do nitrato de amônio..... | 85 |
| Figura 56. | Croqui de localização do sismógrafo dentro da pedreira..... | 86 |
| Figura 57. | Sistema de fixação utilizado para o sismógrafo..... | 87 |
| Figura 58. | Detalhe da ancoragem do sismógrafo na rocha..... | 87 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabela 1. | Reação e energia produzida por diferentes misturas de ANFO..... | 15 |
| Tabela 2. | Comparação entre nitratos de amônio para agricultura e para explosivo..... | 17 |
| Tabela 3. | Densidades ideais de explosivos..... | 27 |
| Tabela 4. | Vantagens e desvantagens do uso do cordel detonante..... | 34 |
| Tabela 5. | Quadro comparativo entre equipamentos para acompanhamento de detonações..... | 53 |
| Tabela 6. | Erro na leitura de frequência de um sismógrafo Instancel DS-077.... | 65 |
| Tabela 7. | Especificações técnicas do sismógrafo Instancel DS-077..... | 79 |
| Tabela 8. | Características técnicas das emulsões..... | 80 |
| Tabela 9. | Parâmetros da furação..... | 81 |
| Tabela 10. | Características técnicas dos ANFOs industriais utilizados..... | 83 |
| Tabela 11. | Análise granulométrica do nitrato de amônio amostrado..... | 86 |
| Tabela 12. | Banco de dados do acompanhamento sismográfico..... | 89 |
| Tabela 13. | Parâmetros da detonação e resultados do teste 1..... | 90 |
| Tabela 14. | Parâmetros da detonação e resultados do teste 2..... | 92 |
| Tabela 15. | Parâmetros da detonação e resultados do teste 3..... | 93 |
| Tabela 16. | Parâmetros da detonação e resultados do teste 4..... | 94 |
| Tabela 17. | Custo de insumos..... | 96 |
| Tabela 18. | Custos dos testes..... | 97 |
| Tabela 19. | Comparação econômica ANFO vs. ANFO industrial..... | 98 |
| Tabela 20. | Valores médios da comparação econômica ANFO vs. ANFO industrial..... | 99 |
| Tabela 21. | Estimativa de custos ANFO vs. ANFO industrial..... | 100 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|---------------|--|
| A | Amplitude |
| ANFO | Explosivo a base de nitrato de amônio e óleo diesel |
| B | Afastamento entre o furo e a face da bancada (" <i>burden</i> ") |
| °C | Grau Celsius |
| cal | Calorias |
| CNTP | Condições normais de temperatura e pressão |
| D | Deslocamento de uma partícula |
| d50 | Diâmetro médio de partícula |
| E | Módulo de elasticidade |
| ε | Deformação |
| Ec | Energia cinética |
| Ev | Energia de vibração |
| f | Frequência |
| Fe | Furação específica |
| fps | Quadros por segundo (" <i>frames per second</i> ") |
| g | Aceleração da gravidade |
| G | Coefficiente de cisalhamento |
| H | Profundidade de um furo |
| Hz | Hertz |
| J | Joule |
| K | Altura de uma bancada |
| m | Massa |
| ms | Mili-segundo |
| NA | Nitrato de amônio |
| NG | Nitroglicerina |
| P | Onda longitudinal |
| PETN | Nitropenta |
| Pa | Pascal |
| pcm | Pés cúbicos por minuto |
| Pd | Pressão de detonação |
| PPV | Velocidade máxima de partícula (" <i>peak particle velocity</i> ") |
| PVS | Soma vetorial de velocidades máximas de partícula (" <i>peak vector sum</i> ") |

| | |
|---------------|---|
| Qtot | Carga total de explosivo por furo |
| QtotM | Carga total de explosivo por furo medida |
| R | Onda Rayleigh |
| Rad | Radiano |
| Rc | Razão de carga |
| s | Onda transversal |
| S | Espaçamento entre dois furos (" <i>spacing</i> ") |
| t | Tempo |
| T | Período |
| TNT | Tri-nitro-tolueno |
| Tp | Tampão |
| U | Subfuração |
| ULF | <i>Ultra low frequency</i> |
| v | Velocidade |
| V | Volume |
| Vp | Velocidade de oscilação de partícula |
| VoD | Velocidade de detonação |
| y | Deslocamento |
| w | Frequência angular |
| ρ | Densidade |
| λ | Comprimento de onda |
| ν | Coefficiente de Poisson |
| μm | Micron |
| σ_R | Tensão radial |
| σ_T | Tensão tangencial |
| ϕ | Diâmetro de um furo |

1 Introdução

Desmonte de rocha é, na grande maioria das minerações, a principal operação, refletindo diretamente em todas as atividades subsequentes como carregamento, transporte, beneficiamento do minério e, no preço final do produto.

A redução das margens de lucro da indústria mineira é resultado de mudanças estruturais tais como:

- Esgotamento de antigas e lucrativas jazidas de alto teor;
- Preços de venda de bens minerais estáticos, ou em queda devido, principalmente às novas tecnologias de menor desperdício, reciclagem e novos materiais substitutos;
- Aumento da oferta mundial de bens minerais devido à globalização e entrada de novos produtores no mercado, como a ex-URSS, leste europeu, China e "tigres asiáticos";
- Constante diminuição dos teores das jazidas, forçando a movimentação de uma quantidade maior de material. Somando-se a esses fatores, uma crescente pressão da legislação e dos organismos de proteção ambiental. Essa conjuntura foi fundamental para o aumento da competitividade, refletindo em redução de custos operacionais, maior produtividade, equipamentos maiores para operações de larga escala, melhor gerenciamento e, principalmente, explosivos mais eficientes e de custo reduzido.

Os materiais explosivos se desenvolveram desde a nitroglicerina do século XIX até as atuais emulsões, aquagéis e ANFOs. O ANFO, explosivo introduzido comercialmente na década de 50, consiste em uma mistura de nitrato de amônio e óleo diesel, podendo ser preparado imediatamente antes da sua utilização. O explosivo tem se mostrado adequado para operações mineiras em todo o mundo, sendo considerado a fonte de energia explosiva de menor custo disponível atualmente (Konya, 1995). A estabilidade, praticidade e economia proporcionadas por esse explosivo, foram fundamentais para que grandes companhias mineradoras chegassem nas posições onde hoje se encontram, viabilizando jazidas que seriam antieconômicas caso somente utilizassem explosivos à base de nitroglicerina, como a dinamite.

Em países de cultura tradicionalmente mineira como os EUA, Canadá e Austrália, o ANFO cumpre importante papel. Segundo Hobbs (1996), 98% de material explosivo consumido nos EUA em 1995 foi nitrato de amônio. Estatística do U. S. Department of Interior mostra que 83% desse nitrato de amônio não é processado pelas fábricas de explosivos, ou seja, 1,8 milhões de toneladas de ANFO são consumidas como explosivo pelos

mineradores norte-americanos anualmente. No Brasil, apesar de não se dispor de uma estatística confiável, sabe-se que o ANFO tem uma utilização muito pequena, sendo preparado somente por algumas mineradoras. No estado do Rio Grande do Sul, o consumo desse explosivo é ainda mais insignificante, limitando-se a três pequenas operações.

Sabendo-se das inúmeras vantagens que o ANFO apresenta quando utilizado corretamente e da carência de informações técnicas confiáveis sobre esse explosivo, surgiu a necessidade de um estudo que investigasse os principais parâmetros e testes para quantificar objetivamente a performance de ANFO em pequenas pedreiras, empresas que constituem a maior parte das operações mineiras do Rio Grande do Sul.

1.1 Objetivos

Os objetivos principais desse trabalho consistem em analisar a eficiência e viabilidade, tanto técnica como econômica da utilização de ANFO em pedreiras de calcário de pequeno porte e, introduzir a utilização de ANFO otimizando o desmonte dessa pedreira.

1.2 Metodologia de Trabalho

Para atingir os objetivos propostos foram estabelecidas as seguintes etapas de trabalho:

- Revisão bibliográfica abordando os principais conceitos e princípios do desmonte de rochas com explosivos, tipos de explosivos empregados, propriedades principais e técnicas de monitoramento de detonações;
- Após seleção da área de trabalho, levantou-se dados sobre o desmonte de rochas que estava sendo utilizado na Pedreira Cerro do Cabelo, envolvendo fragmentação e custos;
- Estabelecimento do plano de trabalho, elaborando-se novo plano de fogo a ser adotado e iniciando-se os preparativos para utilização do ANFO;
- Monitoramento do plano de fogo estabelecido, observando-se a performance do ANFO (industrial e fabricado *in situ*) e determinação dos custos envolvidos;
- Análise e comparação dos resultados;
- Implantação do sistema;
- Elaboração da dissertação com as conclusões obtidas.

1.3 Relevância do Estudo

A redução de custos em qualquer atividade e principalmente na mineração, é uma meta constante. A maior eficiência e a diminuição do custo de uma operação de desmonte, além de resultar em economia de explosivos, tem consequência direta na redução de desmonte secundário, diluição excessiva, transporte e carregamento e dificuldade no beneficiamento (cominuição) do minério. O custo efetivo de um desmonte feito de forma inadequada pode ser várias vezes o custo de um eficiente, levando em conta apenas a fragmentação do material e seus reflexos em todas as operações subsequentes (Scott *et al.*, 1995).

Esse trabalho tem caráter inédito no Rio Grande do Sul, na medida que investiga a possibilidade de utilização do ANFO em pedreiras de calcário, baseado em análise de vibração máxima de partículas (PPV) e não apenas nos critérios tradicionais como custo por quilograma de explosivo, densidade e resistência à água do explosivo, critérios que ignoram fatores fundamentais para o correto funcionamento de uma operação de desmonte.

Sabendo-se que existem diferenças significativas entre performance de diferentes explosivos e que diferentes resultados são obtidos por explosivos de composição química similar, pode-se quantificar e comparar as informações obtidas por meio de monitoramento sísmico das detonações. A simplicidade, confiabilidade e custo reduzido de um programa de acompanhamento de detonações por meio de sismógrafo, vem de encontro às necessidades da grande maioria das empresas de mineração que utilizam explosivos regularmente no estado.

Além disso, essa dissertação apresenta uma extensa revisão bibliográfica sobre ANFO, os parâmetros que afetam a sua performance e uma introdução às técnicas de medida de performance *in situ*.

A revisão sobre o assunto envolve uma breve história do desenvolvimento dos explosivos industriais, as principais definições necessárias ao entendimento das reações explosivas, os explosivos atualmente utilizados, suas propriedades físicas e iniciação.

Adicionalmente apresenta-se os tópicos principais da teoria de desmonte e mecanismos de fragmentação e, algumas das técnicas de monitoramento de detonações *in situ*.

Desse modo pode-se ter uma idéia do grande mercado potencial para ANFO que o Brasil representa, sobretudo para pequenas e médias operações mineiras, podendo significar grande redução de custos e conseqüente ampliação da atividade mineral do país. É importante salientar que o ANFO deve ser tratado com a técnica e atenção mínima necessárias, devido ao grande número de parâmetros que norteiam o seu perfeito funcionamento.

2. Generalidades sobre Explosivos e Métodos de Iniciação

2.1 Explosivos

Nesse capítulo apresenta-se os principais eventos que contribuíram para o desenvolvimento dos explosivos atualmente utilizados na indústria mineira.

A mais primitiva técnica de desmonte de rocha consistia além da quebra com instrumentos pesados como martelos e marretas, no aquecimento e resfriamento do material rochoso. Várias fogueiras eram dispostas em torno do maciço, de modo que assim que a temperatura estivesse bem alta, água fria era derramada sobre a rocha. O repentino resfriamento causava pequenas rachaduras que auxiliavam no dispendioso trabalho de quebra do material. Mais tarde os explosivos facilitaram substancialmente essas operações mineiras (Gustafsson, 1973).

A pólvora negra foi o primeiro “explosivo” conhecido. A sua invenção, provavelmente não foi obra de um só homem. Ao contrário, o segredo deve ter passado por muitas mãos, antes que se fizesse idéia de sua força. É geralmente admitido que ela tenha derivado do "Fogo Grego", uma mistura de petróleo, cal virgem e enxofre, sendo usado pela primeira vez em 668 AC por uma frota de embarcações de guerra bizantina contra uma frota árabe. O segredo foi cuidadosamente mantido por vários séculos pelos imperadores bizantinos, que o empregaram largamente (Sen, 1995).

Existem informações que também os chineses (desde 1218), os árabes (1250), e outros povos conheciam e utilizavam formas de pólvora negra. A pólvora negra é uma mistura de carvão, enxofre e nitrato de potássio (salitre) ou nitrato de sódio sendo esse último mais barato, porém, de pior qualidade para a mistura, pois absorve maior volume de água. A evolução dos explosivos industriais pode ser estratificada, cronologicamente, em três estágios:

- Pólvora negra;
- Explosivos nitroglicerinados;
- Explosivos não nitroglicerinados.

Somente em 1245, na Inglaterra, o monge franciscano Roger Bacon descreveu o material em termos científicos. No início do século seguinte, o frade Berthold Schwarz de Friburgo criou a primeira arma de fogo, utilizando pólvora negra como propelente e pedras como projéteis. Alguns autores indicam Schwarz como o inventor da pólvora negra, enquanto

que na Inglaterra esse mérito cabe a Roger Bacon (Imbel, 1985).

Com pequenas modificações o homem utilizou a energia da pólvora negra para produzir trabalho, quase que exclusivamente para fins bélicos. Em 1425, foi possível granular a pólvora negra e em 1525 foi iniciada, pelos franceses, o controle de grão por peneiramento. A seleção granulométrica é essencial para a aplicação bélica em termos técnicos (Imbel, 1985).

No início do século 17, a pólvora negra foi introduzida nos trabalhos de mineração substituindo o fogo como o principal método de rompimento de rochas na indústria mineira da Europa. Esse método estava condenado ao abandono, pois era extremamente lento, tornando-se cada vez mais caro a medida que as florestas próximas às zonas mineradas iam sendo devastadas e o transporte da madeira onerava o custo final do produto minerado. A aceitação da pólvora negra pela indústria mineira foi relativamente fácil, e pelo fim do século 17 a grande maioria da Europa já utilizava o produto (Olofsson, 1990).

As mais importantes descobertas no campo de explosivos industriais atualmente utilizados ocorreram na primeira metade do século 19. A preparação do fulminato de mercúrio, o primeiro ingrediente de explosivo primário, foi descrito pela primeira vez num artigo de Edward Howard em 1800. Enquanto várias pesquisas no campo da nitração eram realizadas por químicos europeus, um italiano, Ascânio Sobrero, descobria a nitroglicerina, batizando-a de “Piroglicerina”. Devido ao poder destrutivo e a sua periculosidade, Sobrero desaconselhou o uso industrial da sua descoberta. A piroglicerina foi usada apenas como “tônico” cardíaco, vendida sob o nome comercial de “Glonoina” (Imbel, 1985). Por muitos anos houve pouco interesse na nitroglicerina (NG), como um explosivo. Exceto por tentativas esporádicas, o uso da NG terminava quase sempre em tragédia.

Finalmente, em 1862, um sueco autodidata chamado Alfred Nobel (1833-1886) começou a comercializar a nitroglicerina sob o nome comercial de “Glonion Oil”. Nessa época, o método usado consistia em derramar a NG cuidadosamente em furos na rocha e detoná-la. A NG líquida era acondicionada em recipientes que eram carregados em caixas de madeira. Esse método de manuseio e transporte resultou em muitas detonações prematuras, custando muitas vidas. A morte de seu irmão mais novo, Emil, numa explosão de nitroglicerina em Heleneborg foi um fator decisivo nos rumos de sua carreira. Nobel passou então a estudar uma forma de dominar o explosivo, imaginando um método que permitisse amortecer os choques mecânicos no explosivo, através de absorção da NG por algum material. Dentro das caixas do “Glonion Oil” era colocada diatomito ou *kieselguhr* como maneira de promover um amortecimento e um acomodamento dos recipientes. Diatomito consiste em

pequenos esqueletos de criaturas marinhas unicelulares (diatomáceas) que quando acumuladas constituem um depósito sedimentar semelhante ao giz (Soares, 1990). Na época o diatomito era utilizado em embalagens e como cimento a prova de fogo no revestimento de fornos refratários. Depois de testar diversos materiais com propriedades absorvedoras, Nobel testou o *kieselguhr*. Observou que a substância absorvia até quatro vezes o seu peso em NG e, além disso, o produto final era muito mais seguro de manusear, pois a NG líquida absorvida ficava praticamente isolada de vibrações durante o manuseio. Nobel colocou esse material misturado em cartuchos de papel a serem utilizados diretamente nos furos que eram feitos na época. O material recebeu no início o nome de *Guhr Dynamite* e posteriormente apenas *Dynamite*, do grego *dynamis* (poder) sendo rapidamente aceita nos trabalhos mineiros (Dolan, 1997). A figura 1 mostra como era feita a mistura dos componentes da dinamite numa das primeiras fábricas de Nobel em 1889.

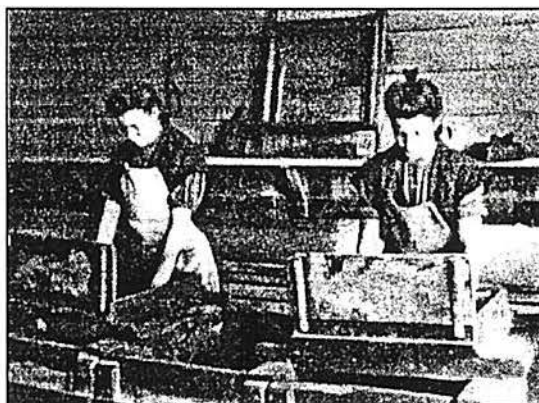


Figura 1. Mistura dos componentes da dinamite (Dolan, 1997).

Mais tarde, continuando a pesquisa, Nobel decidiu dissolver nitroglicerina em nitrocelulose no lugar do *kieselguhr*. Ao material resultante ele deu o nome de *blasting gelatine* que foi patenteada em 1875 (Olofsson, 1990).

Em 1895, Nobel já havia construído um império industrial de pelo menos 90 fábricas em 26 países. Nos últimos anos de sua vida assistiu com tristeza a utilização de suas descobertas pela indústria bélica. Então, dispôs sua fortuna, em testamento, para a criação de prêmios anuais às pessoas que mais contribuíssem para o avanço da física, química, biologia,

medicina e láureas a escritores e pacifistas. Em dezembro do ano seguinte, morreu. O “Prêmio Nobel” foi instituído em 1901 pela Real Academia de Ciência da Suécia (Dolan, 1997).

Em 1912, o tri-nitro-tolueno (TNT) passou a ser oficialmente utilizado como explosivo militar. Depois da II Guerra Mundial, novos e mais poderosos explosivos militares foram desenvolvidos, na medida da crescente sofisticação técnica demandada (Imbel, 1985).

Modernamente vários explosivos não nitroglicerinados tem sido desenvolvidos, principalmente, para fugir às desvantagens em termos de segurança que a NG apresenta, além do alto custo. A base desses explosivos é o nitrato de amônio (NA), cuja mistura com óleo combustível foi patenteada em 1879 por Alfred Nobel para ser utilizada como substituto parcial da nitroglicerina na dinamite. Apesar disso o NA foi efetivamente popularizado e utilizado como explosivo após alguns acidentes. O primeiro em Gibbstown nos EUA, em 1916, quando uma planta de evaporação e cristalização de NA explodiu. O próximo acidente ocorreu em Oppau, na Alemanha, em 1921, quando tentou-se fragmentar pilhas de NA aglutinado pela umidade, com utilização de cargas de dinamite. Grande parte da massa de NA detonou, causando a destruição de 75% da cidade e causando a morte de 560 pessoas. O terceiro acidente grave, ocorreu no porto de Texas City (USA), em 1947, quando em dois dias consecutivos dois navios carregados de NA e petróleo explodiram devido à um incêndio em um dos porões (Worsey, 1997).

Em 1955, foi desenvolvido comercialmente o ANFO (*Ammonium Nitrate - Fuel Oil*), uma mistura de óleo combustível e nitrato de amônio, pela Maumee Coal e Spencer Quemicals, tendo grande aceitação na indústria mineira norte-americana e posteriormente mundial, basicamente pelo baixo custo, facilidade de manuseio e segurança. Mais tarde surgiram vários explosivos à base de NA, como a lama explosiva (aquagel ou *slurry*), aglutinado com uma goma de amido e sensibilizado por alumínio e TNT. Esse explosivo reúne inúmeras vantagens de fabricação e manuseio, relativa insensibilidade à umidade e boa relação custo / volume desmontado. Na mina de Nob Lake, Canadá em 1956, foram feitas as primeiras experiências positivas com aquagel, desenvolvida pela Dupont, CIL e outras empresas norte-americanas. (Sen, 1996).

Em 1964 a Atlas Powder Company (ICI) lança um produto baseado no aquagel, chamado de emulsão, que vem sendo largamente empregado, inclusive misturado com ANFO, o “Heavy ANFO” (ICI, 1989).

2.2 Métodos de Iniciação

Com a difusão do uso da pólvora ocorreu o aumento do número de acidentes. Métodos mais seguros de iniciação se tornaram extremamente necessários. Nessa época, a iniciação era feita com penas de ganso, canudos de papel, palha e tubos de madeira com seu miolo preenchido com pólvora. O intervalo entre as iniciações era altamente irregular e sujeito a pouco controle. O primeiro método seguro de iniciação foi inventado em 1831 por William Bickford em Cornwall, Inglaterra. Ele criou o estopim colocando um núcleo contínuo de pólvora em um cabo de juta e cordões (Olofsson, 1990).

O problema era que só o estopim não conseguia iniciar os novos explosivos, como a dinamite. Era necessário acoplar o estopim a algum outro material explosivo, que iria surgir logo depois: a espoleta de mineração. O nome Alfred Nobel está invariavelmente ligado à invenção da dinamite, porém ele criou, além de mais de 100 invenções, a primeira espoleta para iniciar dinamite. Logo nas primeiras tentativas de utilização, Nobel percebeu que uma maneira mais eficiente de iniciar a detonação era necessária, pois sabia que a energia potencial da NG era muitas vezes desperdiçada por meios insatisfatórios de iniciação. Finalmente em 1863, Nobel patenteou a sua primeira espoleta que consistia em um pequeno tubo de vidro preenchido com pólvora negra. Mais tarde, Nobel trocou a pólvora por fulminato de mercúrio em um tubo de cobre (Dolan, 1997).

No século 20 o fulminato de mercúrio foi trocado por azida de chumbo, principalmente pelas suas características de maior resistência à umidade. Durante toda a I Guerra Mundial as espoletas contendo azida de chumbo foram usadas. O penta-eritritol-tetra-nitrato (PETN), começou a ser utilizado em bases práticas, mas somente depois da II Guerra Mundial foi utilizado em espoletas e iniciadores comerciais (Imbel, 1985).

Junto com a invenção da dinamite, novos métodos foram pesquisados para iniciar explosivos de modo eficiente e seguro. No início do século XX, a iniciação elétrica foi introduzida, e por volta de 1922 a primeira espoleta de retardo elétrica (1 s) foi utilizada comercialmente (Olofsson, 1990).

Em 1907 o cordel detonante com TNT foi apresentado pelo francês Louis L'heure. Em 1969 foi patenteado o sistema não elétrico da Nitronobel, o "Nonel", e, em 1983 a ICI lançou o "Magnadet". Nos anos 90 surgiram iniciadores eletrônicos, sistemas de iniciação por ondas de rádio de baixa frequência (ULF) e, retardos eletrônicos iniciados por meios não elétricos como o "Digidet" da Ensign Bickford Co. (Konya, 1995).

3 Conceitos Básicos

Explosivos são substâncias ou misturas de substâncias capazes de se transformar quimicamente em gases, com extraordinária rapidez e desenvolvimento de calor, produzindo elevadas pressões e considerável trabalho (Konya, 1995).

Os acessórios de detonação promovem essa transformação de uma maneira adequada, conforme as exigências impostas pelo trabalho a executar. Podemos, em consequência, definir acessórios de detonação como dispositivos empregados para:

- iniciar cargas de explosivos;
- fornecer ou transmitir chama para iniciar uma explosão;
- propagar uma onda explosiva de um ponto para outro, ou de uma carga para outra.

A condição para que um explosivo possa ser considerado explosivo industrial obriga que, além de outras exigências a substância tenha uma certa estabilidade química de modo que uma pequena energia transferida à massa, através de choques moleculares oriundos de calor, chispa, atrito e outros, seja suficiente para iniciar a sua transformação química. Essa transformação, quando iniciada numa pequena porção deve se propagar pelo restante da massa, utilizando-se da energia liberada.

A energia transferida pode não ser suficiente para gerar uma detonação, produzindo um efeito menos intenso, ou seja, deflagrando sem detonar.

3.1 Combustão

É uma reação de oxidação onde o oxigênio (comburente ou oxidante) tem origem externa em relação ao combustível (reduzidor). É uma reação lenta que compreende fenômenos que vão desde a respiração, a ferrugem, até à queima de qualquer combustível comum como carvão ou gasolina. A característica mais importante de uma explosão é a velocidade com que ocorre a reação e não a energia gerada. Por exemplo, a energia de 1 kg de explosivo é 1/10 da energia de 1 kg de gasolina. Portanto, um carro trafegando a 100 km/h (27,7 m/s) consome 10 litros de gasolina em uma hora, já 1 kg de explosivo a base de NG dentro de um furo de 100 mm por 1m de profundidade é consumido em 0,0002 s numa velocidade de 18000 km/h (5.000 m/s) (Gustafsson, 1973).

3.2 Deflagração

A deflagração é uma reação de combustão de baixa velocidade (600 a 1500 m/s) e que não gera onda de choque, apenas uma expansão de gás.

Ocorre nos explosivos conhecidos como “Baixos-Explosivos”. O oxigênio tem origem tanto externa, como pode provir da própria molécula que está sofrendo a reação, exemplo: - baixos explosivos como a pólvora. A deflagração é mantida por uma reação química e é limitada em sua velocidade pelo aporte de oxigênio do ambiente (Konya, 1995). A figura 2 mostra como ocorre a reação de deflagração de um estopim.

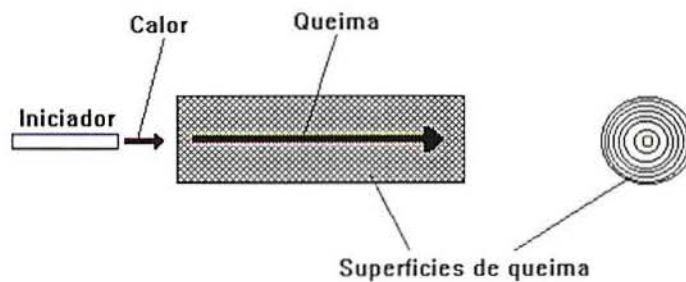


Figura 2. Comportamento de um explosivo quando deflagrado (Imbel, 1985).

3.3 Detonação

Os “altos-explosivos” além de produzir rápida expansão de gás produzem também uma onda de choque (figura 3). Durante a reação de detonação a onda de choque viaja através do explosivo antes da expansão de gás ocorrer. A reação química de um explosivo usa oxigênio como elemento oxidante e carbono como combustível ou elemento redutor, gerando uma onda de choque de alta velocidade (2.000 a 8.000 m/s), com liberação de calor (reação exotérmica em torno de 4.000°C) além de gás. Essa reação é auto-propagada quando iniciada, mesmo com a remoção da causa iniciadora, pois possui todas as substâncias necessárias na massa do explosivo (Imbel, 1985).

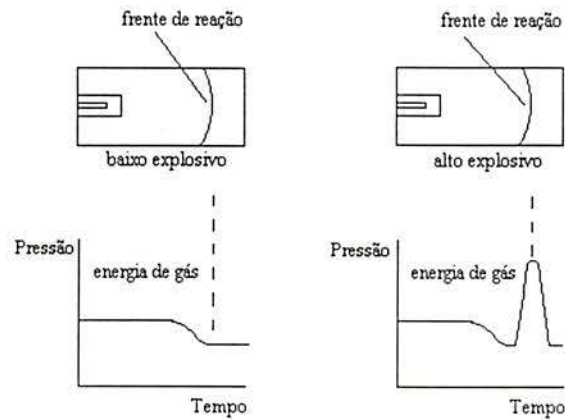


Figura 3. Comportamento de um explosivo quando detonado (Konya, 1995).

Nos altos explosivos a pressão de choque é responsável por 10 a 15% do trabalho realizado pelo explosivo na quebra do material. O restante 85 a 90% de trabalho é produzido pela expansão dos gases ou energia de gás (Konya, 1995).

3.4 Energia de ativação

Todo explosivo para detonar, precisa vencer uma pequena barreira chamada estabilidade. A energia de ativação pode ser então definida como a energia mínima necessária a partir da qual o explosivo alcança a sua velocidade estável de detonação. A estabilidade de um explosivo é a segurança contra uma detonação acidental. A figura 4 resume esquematicamente como seria a estabilidade de um explosivo.

O fenômeno da detonação ocorre naturalmente, ou seja, com o aumento líquido da entropia. Isto significa que os produtos da decomposição de um explosivo são mais estáveis que os iniciais, tendo menor disponibilidade de energia. A pequena barreira a ser vencida é chamada de estabilidade do explosivo ou energia de ativação, que depois de vencida, produz a decomposição total do explosivo até um nível final de energia onde encontra o equilíbrio (Imbel, 1985).

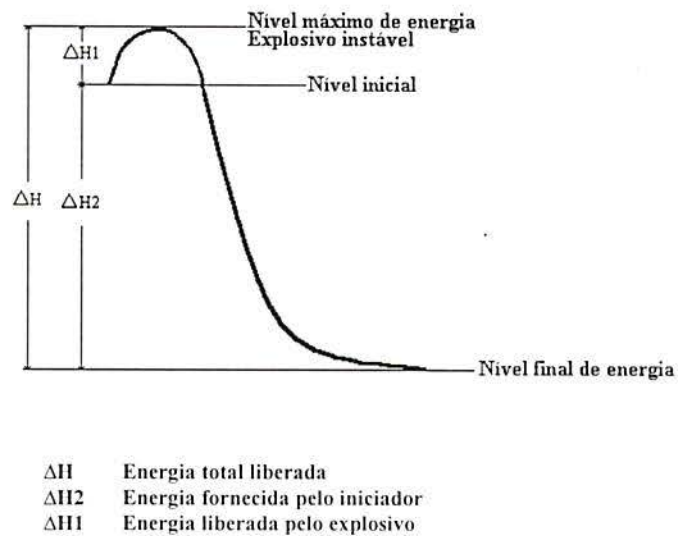


Figura 4. Ilustração da energia liberada por um explosivo antes e depois de ser iniciado (Imbel, 1985).

A condição necessária para que uma substância ou mistura seja considerada um explosivo industrial é :

- A substância ou mistura tenha uma certa estabilidade que possa ser “quebrada” por uma quantidade de energia (energia de ativação) através de onda de choque, calor, atrito, entre outras;
- A substância ou mistura quando iniciada, mantenha a reação de detonação, utilizando o restante da massa.

4 Tipos de Explosivos Comerciais

A composição básica de quase todos os explosivos químicos industriais pode ser resumida nos elementos que formam a sigla CHON (carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio), afora esses, o Cl também contribui com os radicais cloratos (ClO_3) e percloratos (ClO_4) que são altamente explosivos. Outros radicais muito utilizados nos explosivos atuais são os nitratos (NO_3) e as nitroaminas (NO_2NH_4). Os explosivos utilizados para fins industriais dividem-se segundo a figura 5 de Sen (1995):

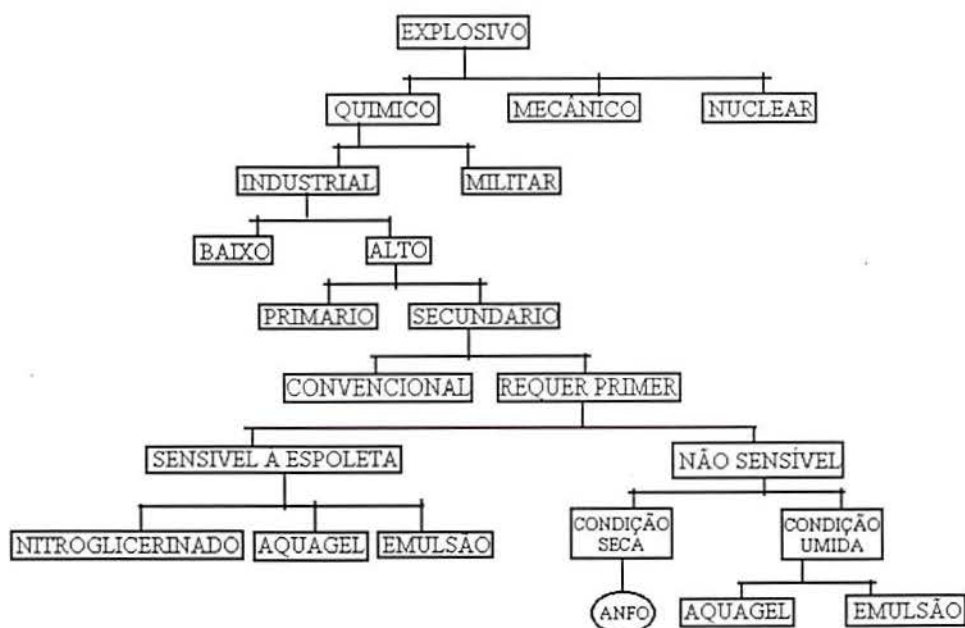


Figura 5. *Árvore familiar dos explosivos (Sen, 1995).*

4.1 ANFO

O ANFO é o explosivo civil mais usado no mundo (Olofsson, 1990). No ano de 1995, 1,8 milhões de toneladas desse explosivo (75% do mercado norte-americano) foram consumidas nos EUA (Hobbs, 1996).

O ANFO consiste de uma mistura entre dois compostos principais, nitrato de amônio e óleo diesel. O nitrato de amônio funciona como comburente ou oxidante, enquanto que óleo diesel é o combustível ou redutor. O elemento oxidante, fornecido pelo nitrato de amônio é o oxigênio e o nitrogênio participa secundariamente da reação formando apenas gás nitrogênio.

Outros elementos podem ser adicionados, como por exemplo, alumínio para aumentar a temperatura de reação, óxido de zinco e microbolhas de ar (Konya, 1995). Um dos fatores mais importantes dessa mistura é o de que nem o nitrato de amônio, nem o óleo diesel são classificados como explosivos quando considerados isoladamente. Porém quando misturados na proporção correta resultam em material explosivo. É um explosivo bastante estável, de custo baixo e fácil fabricação, entretanto, é relativamente complexo para se controlar, pois muitos parâmetros afetam a sua performance.

O ANFO é conhecido há mais de 100 anos como uma mistura explosiva de baixo custo e alta segurança. Não é um explosivo que surgiu magicamente a partir de alguns acidentes registrados na história da indústria de explosivos, mas sim um produto que foi intensamente pesquisado. Somente no início dos anos 50, o ANFO foi controlado e usado na indústria mineral, pois somente nessa época foi possível fabricar nitrato de amônio no formato de pequenas partículas esféricas ou grânulos (Brzezows, 1997).

A fórmula química do nitrato de amônio é NH_4NO_3 , sendo composto de 60% de oxigênio em peso, 33% de nitrogênio e 7% de hidrogênio, aproximadamente. Por ser um sal é facilmente dissolvido pela água de modo que se não for recoberto por uma fina camada de talco, *kieselguhr* ou zeolita, absorve facilmente a umidade do ar, se dissolvendo e, dessa forma, não tendo condições de detonar eficientemente (Konya, 1996a).

O perfil das grandes mineradoras mundiais mudou tanto com a introdução do ANFO, que esse explosivo foi e ainda é considerado “milagroso” pois viabilizou, com seu baixo custo e possibilidade de uso em grande diâmetro, diversas jazidas consideradas não econômicas no passado. O ANFO não é somente barato, se usado corretamente oferece características iguais ou superiores aos antigos explosivos à base de nitroglicerina (Pilshaw, 1994).

4.1.1 Principais Parâmetros que Afetam a Performance do ANFO

Como qualquer produto, existem diversos parâmetros e limitações que governam o funcionamento eficiente da mistura entre óleo diesel e nitrato de amônio, sendo que o principal provavelmente é a pouca resistência à água. Os principais aspectos são:

a) O grânulo de nitrato de amônio, além de não poder ter contato com água, deve ser fabricado com um teor de umidade nunca superior a 0,15% (Cameron, 1990), pois quando grânulos de nitrato são saturados com água, esses se dissolvem de modo que microporos e

pequenos vazios que agem como centros reativos (pontos quentes ou *hot-spots*) desaparecem resultando em uma mistura insensível para detonação. Esse fenômeno é chamado de sobrepressão ou *dead-pressing* (Konya, 1995). A figura 6, mostra a influência da água na velocidade de detonação do ANFO. Nota-se que a partir de 9% de água a mistura pode ter baixa eficiência, produzindo óxido nitroso (fumaça marrom-alaranjada) ou então falhar, simplesmente, não detonando.

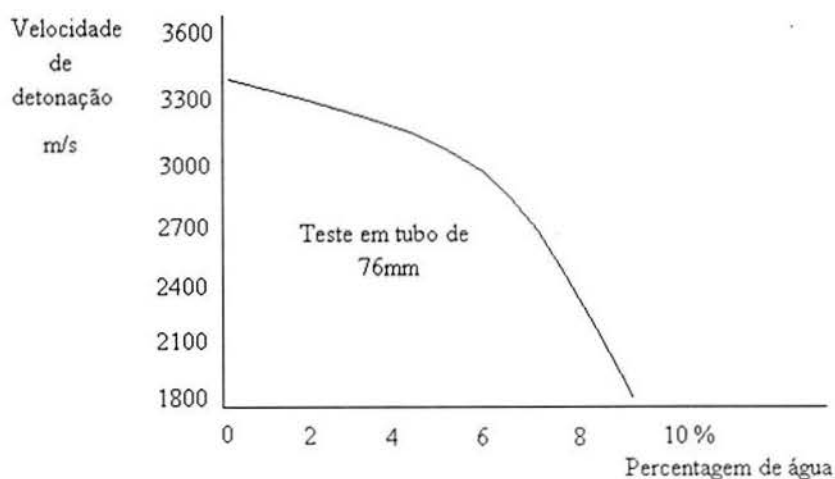


Figura 6. Influência de água na performance de ANFO (Konya, 1995).

b) Para se obter a maior liberação de energia possível, a proporção de óleo diesel deve se aproximar de 5,7%, de modo que se tenha um balanço de oxigênio correto para a reação. As estruturas moleculares e geração de energia das reações de misturas de ANFO são apresentadas na tabela 1:

Tabela 1. Reação e energia produzida por diferentes misturas de ANFO (Sen, 1995).

| REAÇÃO | ENERGIA | MISTURA |
|---|-------------|-----------------------------|
| $\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{O}_2$ | 1.420 kJ/kg | Nitrato de amônio puro |
| $5\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CH}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + \text{CO} + 11\text{H}_2\text{O} + 2\text{NO}$ | 2.500 kJ/kg | 96,5% NA : 3,5% Óleo Diesel |
| $2\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CH}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + \text{CO} + 5\text{H}_2\text{O}$ | 3.400 kJ/kg | 92% NA : 8% Óleo Diesel |
| $3\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CH}_2 \rightarrow 3\text{N}_2 + 7\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ | 3.900 kJ/kg | 94,3% NA : 5,7% Óleo Diesel |

A figura 7 ilustra a produção de energia de ANFO em diferentes proporções de óleo diesel. Nota-se que a relação com óleo diesel a 5,7% é a de melhor aproveitamento de energia. Taxas maiores de óleo na mistura tendem a diminuir o calor produzido na reação.

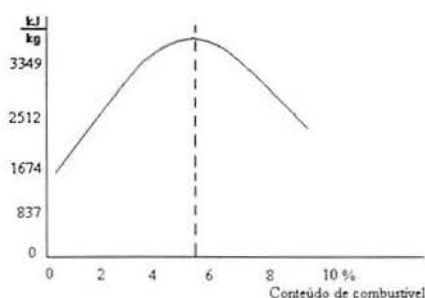


Figura 7. Efeito de conteúdo de óleo em ANFO (Konya, 1995).

Uma regra prática para se confirmar a eficiência da mistura é observar as cores da fumaça produzida nas detonações. Gases marrom-alaranjados podem ser indicativos de reação rica em oxigênio e deficitária em combustível. Gases escuros podem indicar combustão rica em carbono e pobre em oxigênio (Konya, 1995).

c) Existem algumas propriedades físicas inerentes ao grânulo de nitrato de amônio (*prill*) de grande importância. O grânulo é uma partícula esférica de nitrato de amônio preferencialmente entre 0,5 e 1,2 mm (Sen, 1995). Grânulos de nitrato de amônio são usados na agricultura, esses normalmente com diâmetros maiores.

Pode-se observar muitas diferenças entre o grânulo ideal para explosivo e o grânulo para fertilizante. O grânulo para explosivo é muito mais poroso que o normalmente encontrado na composição dos fertilizantes, tendo densidade menor e distribuição melhor de óleo. Cabe lembrar que ambos detonam, porém a eficiência do grânulo para explosivo é consideravelmente superior (Segui, Munaretti e Koppe, 1996). A tabela 2 mostra as principais diferenças encontradas entre o grânulo utilizado pela maioria das fábricas de explosivos e o grânulo disponível nos fertilizantes.

Tabela 2. Comparação entre nitratos de amônio para agricultura e para ANFO (Konya, 1995).

| Aspecto analisado | Grânulo para fertilizante | Grânulo para explosivo |
|--|---------------------------|------------------------|
| Cobertura Inerte | 3%-5% | 0.5%-1% |
| Dureza | Elevada | Baixa |
| Forma | Cristal sólido | Poroso |
| Distribuição de óleo diesel | Apenas na superfície | Totalmente |
| Velocidade em furo de 100 mm confinado | 1829 m/s | 3353 m/s |
| Diâmetro mínimo em detonação não confinada | 228 mm | 64 mm |

d) O ANFO normalmente possui uma densidade de $0,85 \text{ g/cm}^3$, podendo aumentar para até 1 g/cm^3 se carregado pneumáticamente. Geralmente o ANFO torna-se insensível quando sua densidade alcança $1,2 \text{ g/cm}^3$, ocorrendo o fenômeno de sobrepressão de modo que não detona (Sen, 1995). Várias densidades e misturas a partir do ANFO são utilizadas atualmente, como por exemplo, Heavy-ANFO e Isonol. O primeiro consiste em uma mistura de ANFO e emulsão, cuja densidade pode ser variada dependendo do carregamento. O segundo é uma mistura de ANFO e esferas de poliestireno, o que diminui muito a densidade final da mistura.

e) Outro parâmetro importante do ANFO é o seu diâmetro crítico. A velocidade de detonação (VoD) do ANFO muda de acordo com o diâmetro do furo e grau de confinamento, podendo alcançar velocidades superiores a 4500 m/s em diâmetros maiores que 356 mm (14"), como pode ser observado na figura 8. Diâmetros maiores apresentam pouco ou nenhum aumento de velocidade de detonação. A VoD diminui com o diâmetro, sendo que para diâmetros menores que 25 mm a detonação não é um processo estável, podendo ocorrer deflagração (Olofsson, 1990).

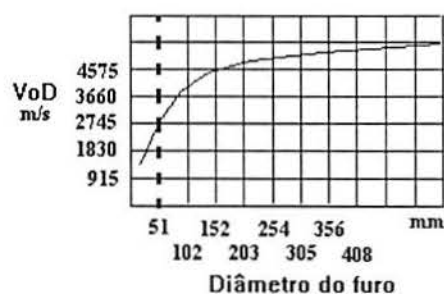


Figura 8. VoD de ANFO vs. diâmetro do furo para explosivos do tipo ANFO (Schneider, 1997).

f) O grânulo de nitrato de amônio pode sofrer um fenômeno chamado “recristalização” (*cycling*). Recristalização é a propriedade do material de mudar sua cristalização de acordo com mudanças de temperatura (Konya, 1995). A figura 9, mostra quais as formas cristalizadas que o nitrato de amônio pode apresentar de acordo com a temperatura. Esse fenômeno afeta seriamente o armazenamento e a performance do ANFO, e explosivos que contém nitrato de amônio na sua composição. O ideal é conservar o ANFO armazenado entre -18°C e $+32^{\circ}\text{C}$ na forma pseudotetragonal. O efeito de recristalização é a quebra dos grânulos em partículas menores. Essa constante quebra pode aumentar a densidade do ANFO de $0,85$ até $1,2 \text{ g/cm}^3$, de modo que esse se torne insensível, não detonando.



Figura 9. Formas de cristalização do nitrato de amônio em diferentes temperaturas.

g) O confinamento do explosivo é crucial para manter estável a VoD. Qualquer perda prematura de pressão no furo, por movimentação do maciço ou ainda presença de muitas descontinuidades vazias, pode diminuir a velocidade de detonação. O ANFO, quando usado A granel, preenche totalmente o furo, de modo que se obtém um perfeito confinamento (Schneider, 1997).

h) Por ser pouco sensível, o ANFO necessita ser inicializado por outro explosivo (carga iniciadora) que gere alta velocidade de detonação e ajude o ANFO a atingir a sua velocidade de detonação ótima no menor período de tempo possível (Schneider, 1997).

Caso se inicialize a carga iniciadora com um cordel detonante, ou seja, iniciação lateral, pode ocorrer que a massa de ANFO que circunda o cordel seja deflagrada, consumindo então

uma fração da massa de explosivo sem detoná-lo. O cordel “inicia” (com energia suficiente apenas para deflagrar) o ANFO axialmente com uma velocidade próxima de 1000 m/s, muito abaixo da velocidade linear (7000m/s), de modo que o explosivo não alcança sua faixa de velocidade estável (Olofsson, 1990).

Mesmo com a carga iniciadora detonando no furo, uma parte do ANFO é dessensibilizada, tendo seus pontos quentes em torno do cordel destruídos, ocorrendo então sobrepressão. Os pontos quentes tão necessários para a compressão adiabática do ar no processo de detonação, são pré-comprimidos pela detonação do cordel (Konya, 1995).

Esse mesmo fenômeno pode ocorrer com explosivos que utilizam pontos quentes artificiais (microbolhas de gás ou vidro) como por exemplo, emulsões. Quando o explosivo é parcialmente comprimido ou danificado por pré-compressão, esse pode detonar ou queimar apenas uma fração da energia disponível. Para se evitar esse problema, convém utilizar iniciação pontual e caso não se disponha de um iniciador do tipo Nonel, por exemplo, convém usar cordel da menor gramatura possível em furos de diâmetro grandes, de modo que se perca o mínimo possível de energia por sobrepressão. A figura 10 mostra a perda de energia para ANFO quando se utiliza cordel detonante, inclusive de pequenas gramaturas como 1 g/m (Konya, 1995).

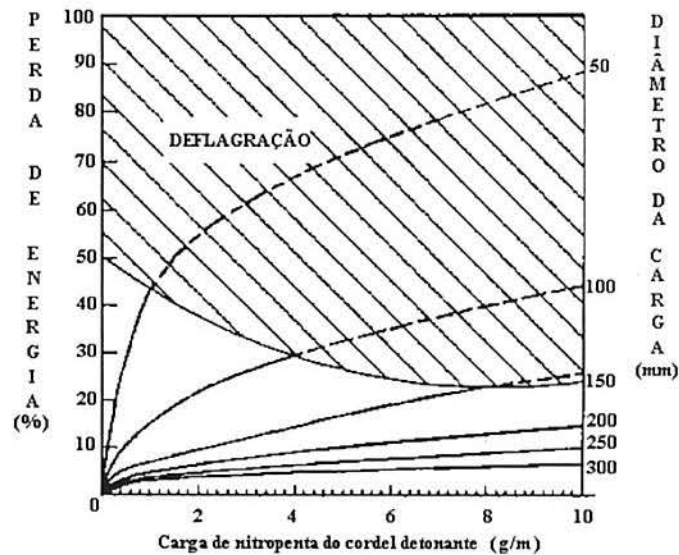


Figura 10. Perda de energia causada por cordel detonante (Konya, 1996c).

Como mencionado anteriormente, o ANFO, por ser pouco sensível, necessita uma carga iniciadora de alta velocidade de detonação. Caso o furo seja longo, convém reforçar o carregamento com outras cargas reforçadoras ao longo da coluna, pois os explosivos de baixa sensibilidade tendem a diminuir a sua VoD durante a detonação, consumindo assim parte de sua massa sem gerar toda a energia que poderia ser fornecida pelo explosivo. Utilizando-se carga iniciadoras e reforçadores é assegurada uma detonação mais estável e eficiente ao longo de toda a coluna. Segundo Konya (1995), pode-se observar que cargas iniciadoras de pouca energia de detonação causam uma reação de queima do ANFO, demorando um pouco mais para esse explosivo alcançar a sua velocidade ótima, ou “*steady-state-velocity*”. A figura 11, mostra que a carga iniciadora D não apresenta a eficiência ideal, ocorrendo uma perda por combustão de massa do explosivo logo no início da reação.

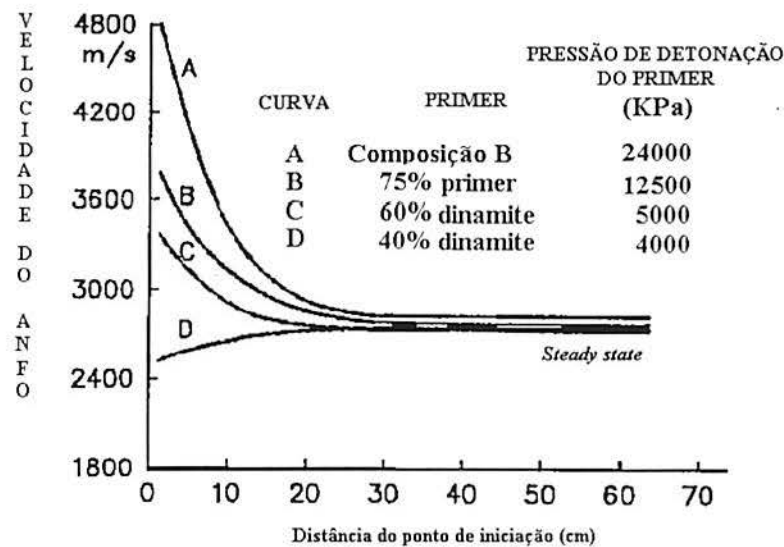


Figura 11. Composição e performance de diversas cargas iniciadoras (Konya, 1995).

i) O diâmetro da carga iniciadora, também, influencia enormemente a reação de detonação. Quanto mais próximo do diâmetro do furo(maior confinamento), melhor é a eficiência da carga iniciadora. Essa situação é mostrada na figura 12 onde se inicializou ANFO com quatro cargas iniciadoras de tamanhos diferentes e mesma pressão de detonação. A carga iniciadora de 25,4 mm apresentou uma velocidade de detonação de 1800 m/s, bem abaixo da velocidade ótima do ANFO, o que provocou uma detonação de baixa eficiência.

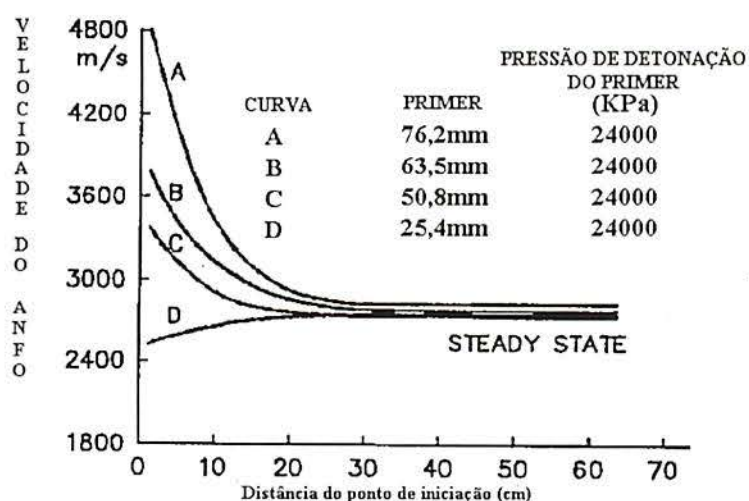


Figura 12. Diâmetros e performance de diversos carga iniciadoras (Konya, 1995).

j) Alumínio em pó ($> 150 \mu\text{m}$) pode ser adicionado ao ANFO de modo que se obtenha um explosivo mais brisante. As quantidades variam de 5 a 15%, aumentam o calor da reação de detonação do ANFO, tanto na força quanto na sensibilidade da mistura, porém o alto custo do alumínio, dependendo do caso, torna proibitiva essa operação (Sen, 1995). A figura 13 ilustra o efeito da adição de alumínio em pó no ANFO. Nota-se que o ganho de energia tende a se estabilizar em 40% comparando-se ao ANFO sem alumínio. Entretanto, a adição de 25% ou mais desse metal poderá tornar o explosivo antieconômico.

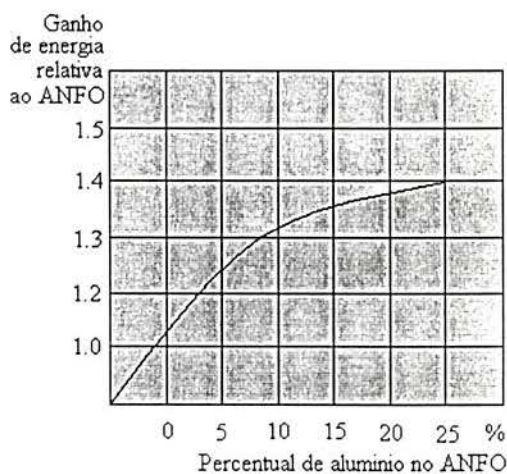


Figura 13. Efeito da adição de alumínio em pó em ANFO (Sen, 1995).

4.2 Aquagel

Esse grupo de explosivos é, algumas vezes, referido pelo nome de lama explosiva (*slurry*). Na verdade os aquagéis foram desenvolvidos para superar uma deficiência inerente dos ANFOs que é a grande sensibilidade à água. Eles são constituídos basicamente por:

- Uma base coloidal aquosa para manter coesa a mistura e não permitir que a água externa ao explosivo dissolva os sais oxidantes;
- Polissacarídios como espessantes;
- Nitrato de amônia, de cálcio e de sódio como oxidantes;
- Como matéria combustível se usa carvão, amido, açúcar, derivados de petróleo e/ou outros hidrocarbonetos.

Os aquagéis contêm de 10 a 15% de água sendo sensibilizados por PETN, TNT, RDX, alumínio, magnésio e outros componentes, dependendo do fabricante. O conteúdo de água dos aquagéis é mantido num mínimo porque ela absorve energia durante os processo de evaporação e gaseificação que ocorrem no instante da detonação (Olofsson, 1990).

Os aquagéis são fornecidos tanto sob a forma encartuchada (PVC, polietileno), como a granel bombeado. O diâmetro mínimo (diâmetro crítico) de um aquagel é de 22 mm e a densidade máxima é de $1,4 \text{ g/cm}^3$; acima disso a sua velocidade cai rapidamente. Dependendo da sua composição, alguns aquagéis necessitam de um iniciador, ou seja, uma carga iniciadora (Sen, 1995).

4.3 Emulsões

As emulsões são a última geração em explosivos comerciais. Apresentam pequeníssimas partículas de sais oxidantes tais como, nitratos de amônia, de sódio e de cálcio dispersos numa fase coloidal de óleo diesel ou outro hidrocarboneto mais alumínio em pó e água. Essa mistura é estabilizada contra a separação dos componentes através de agente emulsificante e misturadas a alta temperatura em tanques especiais. Uma emulsão tem basicamente os mesmos componentes de um aquagel, porém com proporções e características físicas diferentes, além de maior velocidade de detonação (Borg, 1995).

Gás disperso na emulsão pode ser adicionado ou então microbolhas de vidro, de modo que se ajuste a densidade ideal ($0,1$ a $1,6 \text{ g/cm}^3$), podendo-se obter variadas sensibilidades e

consistências, desde uma gelatina encartuchada em filme de polietileno até um explosivo bombeável. Como cada componente de uma emulsão é coberto por um filme de hidrocarboneto, as emulsões têm por característica, uma excelente resistência à água, além de terem diâmetro crítico baixo (1”) e alta velocidade de detonação (Borg, 1995).

4.4 Dinamites

Os explosivos à base de nitroglicerina (NG) receberam o nome “dinamite” quando inventados por Nobel e desde então o seu significado têm sido um tanto ampliado e modificado mas o nome atualmente não define um tipo específico de explosivo. A NG é um éster nítrico relativamente instável possuindo o oxigênio (oxidante) diretamente ligado ao carbono, densidade de $1,6 \text{ g/cm}^3$ em média e velocidade de detonação de aproximadamente 7600 m/s, sendo extremamente sensível ao choque, fricção e calor.

Na verdade todas as dinamites têm NG mas nem todos os explosivos que contém NG são dinamites. A nitroglicerina vem sendo usada em quase todos os explosivos de modo a aumentar a sensibilidade dos mesmos enquanto que nas dinamites cada vez mais se usa nitrato de amônio.

As dinamites usualmente são classificadas em três grandes grupos: granulada, gelatinosa e semi gelatinosa. A granulada usa NG como base explosiva enquanto que as outras usam uma mistura de NG e nitrocelulose, sendo a semi-gelatina a que tem menor quantidade de NG. A semi gelatina é a de menor custo, porém, perde em densidade e, portanto nas características energéticas, poder de arranque, resistência à água, tempo de estocagem e brisância (Imbel, 1985).

As dinamites ainda são amplamente utilizadas em trabalhos de subsolo, devido ao seu grande poder de arranque e alta sensibilidade, além de independência em relação ao diâmetro do furo. Devido ao seu alto custo, pouca segurança a choque, fricção e inflamabilidade, as dinamites com alto teor de NG tendem a deixar de serem utilizadas a longo prazo, mesmo com todas as vantagens que apresentam, como a excelente resistência à água, possibilidade de uso eficiente com qualquer diâmetro de furo e alta velocidade de detonação (Olofsson, 1990).

5. Propriedades dos Explosivos

Devido às diferentes condições de trabalho a que um explosivo será submetido, se faz necessário que ele apresente propriedades que se adaptem aos diferentes propósitos para os quais ele será utilizado. Por exemplo, em condições ideais, de furos completamente secos, um explosivo comum poderá ser utilizado sem problemas. Em caso de ocorrência de água, um explosivo bem mais sofisticado será o ideal.

As mais importantes características a serem levadas em conta quando de sua seleção são:

- velocidade de detonação ou VoD;
- força;
- densidade;
- resistência à água;
- sensibilidade;
- geração de gases tóxicos;
- vida útil - capacidade de estocagem;
- resistência a temperaturas extremas;
- propriedades ambientais;
- segurança no manuseio.

5.1 Velocidade de Detonação (VoD)

Velocidade de detonação é a velocidade pela qual a onda de choque se propaga através do explosivo ou coluna de explosivos em um dado diâmetro. É um dos parâmetros mais importantes na análise da performance de explosivos (Olofsson, 1990).

Velocidades típicas dos explosivos comerciais variam de 1500 a 7600 m/s. Essa velocidade varia de explosivo para explosivo dependendo da composição, diâmetro do explosivo, tamanho das partículas dos seus ingredientes, densidade, grau de confinamento, da carga e do tipo de rocha (Cameron, *et al.*, 1990).

A velocidade de detonação de um explosivo confinado é maior do que a de um explosivo não confinado. A VoD está diretamente ligada à um parâmetro chamado diâmetro crítico. Diâmetro crítico é o diâmetro mínimo de uma carga cilíndrica, no qual o processo de

detonação quando iniciado se mantém eficiente. Em diâmetros muito pequenos o processo de detonação não se mantém, independente da velocidade da onda de choque ser alta ou não (Tamrock, 1984). Quanto maior o diâmetro do explosivo, maior a velocidade de detonação (Borg, 1995).

Uma antiga teoria popularmente difundida sobre fragmentação prega que a velocidade de detonação do explosivo deve ser a mais próxima possível da velocidade da onda de choque sísmica da rocha. Nesse caso, para uma rocha mais "dura", maior deve ser a velocidade do explosivo utilizado. Já, para uma rocha mais "branda", utiliza-se um explosivo tipo "ANFO" de densidade menor e velocidade de detonação, também, mais baixa. Dentro desse intervalo situam-se todos os demais tipos de explosivos e também todos os tipos possíveis de materiais a serem desmontados com a utilização de explosivos. De uma maneira geral, explosivos com velocidade menor de detonação tendem a liberar a pressão de gás durante um período de tempo mais longo comparado com um explosivo de velocidade mais alta. Conseqüentemente um explosivo com baixa velocidade tem mais aplicabilidade quando necessitamos de um maior lançamento do material a ser desmontado. Os explosivos de alta velocidade apresentam os melhores resultados quando utilizados para rochas competentes, desmonte secundário, cargas de choque e desmonte submarino (Olofsson, 1990).

Outro conceito importante é o de velocidade de estado constante ou velocidade nominal (*steady-state*). Todo explosivo alcança uma velocidade de estado constante quando a detonação ocorre à uma razão (velocidade) constante (Konya, 1995). A figura 14 apresenta um explosivo tipo ANFO inicializado com velocidade acima da sua velocidade nominal (*overdrive initiation*) e abaixo de sua velocidade nominal (*low order initiation*).

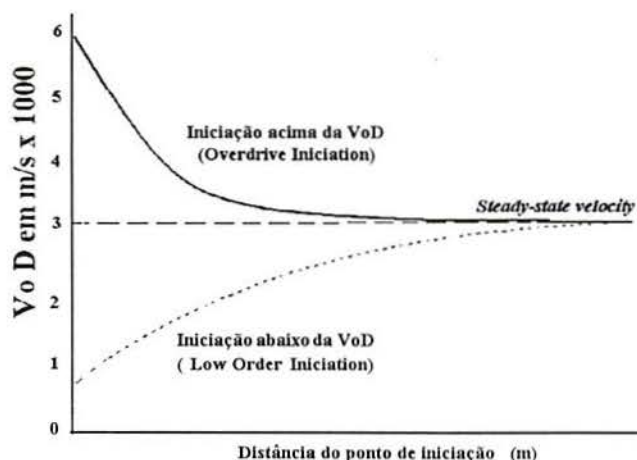


Figura 14. Iniciação de um ANFO em diâmetro de 9 7/8" por uma carga iniciadora (ICI, 1989).

5.2 Força e Energia

Força representa a medida do trabalho que um determinado tipo de explosivo pode produzir (Sen, 1995).

Infelizmente não existe norma ou padronização mundial que possa ser utilizada para comparar força entre explosivos. Cada país, ou mesmo região, adota os seus próprios critérios para comparar esse parâmetro. Atualmente, entre as várias medidas, ganha força uma tendência mundial de utilizar o ANFO padrão (94:6 a 0,8 g/cm³) como parâmetro de medida de força. Isso se deve à popularidade nas operações mineiras e ao fato de que o ANFO está se tornando o explosivo mais utilizado em todos os países do mundo.

Deve-se observar que todos os testes são feitos em condições ideais de modo a detonar toda a massa de explosivo. Isso, na prática, devido as condições dificilmente serem ideais, nem sempre ocorre. Os testes, além de serem realizados fora do ambiente onde o explosivo atua, ou seja, a rocha, são limitados pois não medem a interação do explosivo com o meio circundante que é o maciço rochoso (Scott, 1996).

Os testes tradicionalmente aceitos pela comunidade científica, usuários e fabricantes de explosivos para a determinação do parâmetro força, são:

- Bloco de Traulz (Bloco de Chumbo);
- Pressão de Detonação;
- Teste do Morteiro Balístico;
- Geração de Calor;
- Underwater Bubble Test (Energia de Bolhas);
- Nitrodyn.

Quanto à medida da energia da explosão, essa pode ser medida diretamente utilizando-se um calorímetro. Essa medida é tomada em laboratório, como o teste de força. As mesmas limitações impostas pela dificuldade de simular uma situação real de interação explosivo e rocha, são encontradas nesse tipo de teste. Algumas rochas podem apresentar composição química favorável ao aumento ou diminuição das temperaturas da reação explosiva. O teste não contempla as inúmeras possibilidades de utilização de um determinado explosivo em diferentes tipos de rochas (Scott, 1996).

A unidade de medida normalmente utilizada para quantificar energia da explosão de uma reação é MJ/kg.

5.3 Densidade

Como o nome indica, é simplesmente o peso específico de um explosivo expresso em t/m^3 , kg/L ou em g/cm^3 . A densidade determina a possível concentração de carga dentro de um furo. A densidade dos explosivos comerciais varia em torno de 0,6 a 1,6 g/cm^3 , porém cada tipo apresenta um ótimo no que se refere à densidade que afeta sobremaneira a performance final dos mesmos. A tabela 3 apresenta as faixas de densidades ótimas dos tipos mais comuns de explosivos industriais:

Tabela 3. Densidades ideais de explosivos (ICI, 1989).

| Tipo de explosivo | Densidade em g/cm^3 |
|-------------------|-----------------------|
| ANFO | 0,7 a 1,2 |
| Aquagel | 1,1 a 1,3 |
| Emulsão | 1,1 a 1,6 |
| Dinamite | 0,8 a 1,7 |

5.4 Resistência à Água / Higroscopicidade

A resistência à água de um explosivo é a sua capacidade de suportar a penetração de água dentro da sua massa sob uma determinada pressão e por um certo período de tempo mantendo boa performance na detonação. A resistência à água de um explosivo depende da forma como ele é encartuchado (resistência mecânica) e da composição química. O explosivo pode ser afetado de duas maneiras diferentes pela água. Em primeiro lugar, se os sais não estiverem de alguma maneira cobertos e protegidos contra a ação da água, eles serão dissolvidos e migrarão para fora da massa do explosivo; por outro lado, a pressão hidrostática pode diminuir o volume das micro bolhas (pontos quentes), diminuindo e por vezes eliminando completamente a sensibilidade do explosivo.

Explosivos plásticos geralmente têm alta resistência à água. Aquagel e emulsão, por terem os sais protegidos apresentam, também, ótima resistência à água. Quanto aos pontos quentes, no lugar de micro bolhas de ar, pode-se adicionar micro bolhas de vidro que resistem melhor à pressão hidrostática. Explosivos sem resistência à água como o ANFO podem ser utilizados desde que devidamente embalados em cartuchos rígidos, ou filmes de polietileno (Konya, 1995).

5.5 Sensibilidade

Sensibilidade é expressa como a mínima energia necessária para que o explosivo possa ser iniciado eficientemente e, também, a capacidade da reação se propagar por toda a coluna, assumindo que o diâmetro usado é maior que o diâmetro crítico (ICI, 1989).

Os explosivos não sensíveis à espoleta nº 8, como o ANFO, necessitam ser iniciados por cargas iniciadoras e em alguns casos é preciso reforçar a velocidade de detonação com reforçadores durante a detonação da coluna.

Vários parâmetros governam a sensibilidade de um explosivo (ICI, 1989), dentre eles os principais são:

- Presença de água;
- Diâmetro errado;
- Temperaturas extremas;
- Densidade.

5.6 Geração de Gases Tóxicos

Numa detonação são formados, além do vapor d'água, gases como dióxido de carbono e nitrogênio. Vários outros gases tóxicos, também, são produzidos, caso a quantidade de oxigênio na reação não esteja balanceada. Um excesso de oxigênio pode gerar óxidos nitrosos e dióxido de nitrogênio, enquanto que um déficit de oxigênio pode resultar em grande quantidade de monóxido de carbono. Numa reação desbalanceada ocorre perda de energia.

Outros fatores que influem na geração dos gases tóxicos segundo Sen (1995) são:

- Presença de água;
- Inicialização incorreta;
- Diâmetro abaixo do crítico;
- Confinamento.

No caso do ANFO que é uma mistura de nitrato de amônio e óleo diesel, se pouco combustível for adicionado a mistura, essa será considerada como reação de excesso de oxigênio, ou balanço positivo de oxigênio. Se houver mais combustível, a reação será considerada como deficitária em oxigênio ou de oxigênio negativo.

5.7 Vida Útil

A vida útil ou estabilidade química de um explosivo é outro fator bastante importante a ser considerado. Existem explosivos que se degradam em poucas horas e outros em questão de anos, dependendo da formulação.

Os explosivos nitroglicerinados plásticos, que normalmente têm o maior período de armazenagem tendem a amolecer com o tempo e exudarem.

Os explosivos contendo micro bolhas tendem a perdê-las ao longo do tempo, diminuindo, assim, a sua sensibilidade.

Os explosivos à base de nitrato de amônio tendem a se rearranjar fisicamente tornando-se rígidos. Quando em contato com a água são facilmente dissolvidos.

O período de estocagem dos explosivos industriais varia muito dependendo do fabricante. Os explosivos militares podem ser estocados por períodos muito mais longos e tem-se notícias de explosivos que conservam as suas características por mais de 50 anos, como por exemplo antigas minas explosivas da II Guerra Mundial em perfeito funcionamento que ainda causam acidentes quando são encontradas em campos europeus.

5.8 Resistência a Temperaturas Extremas

Todos os explosivos sofrem diminuição de sua performance quando expostos a excessos de temperaturas tanto elevadas como baixas. Em condições de armazenamento acima de 32,2°C vários componentes de explosivos se decompõem ou diminuem as características de vida útil (ICI, 1989).

No caso específico de ANFO ocorre o fenômeno chamado “recristalização”, que consiste na mudança da cristalização do nitrato de amônio. Os grânulos vão se subdividindo em partículas menores, aumentando a densidade do ANFO até o ponto de ultrapassar 1,2 g/cm³, onde esse não poderá detonar (Konya, 1995).

Temperaturas muito frias afetam a performance dos explosivos tornando-os rígidos e difíceis de manusear. Alguns perdem completamente a sensibilidade, variando de acordo com o fabricante (Olofsson, 1990).

Explosivos a granel devem ter uma viscosidade tal que possam facilmente preencher o furo, não escapando material pelas discontinuidades naturais da rocha.

5.9 Propriedades Ambientais

Alguns explosivos nitroglicerinados por serem vaso dilatadores apresentam efeitos desagradáveis, como dor de cabeça, se manuseados por longos períodos de tempo. Quando aos gases produzidos esses raramente causam problemas em lavra a céu aberto, mas no caso de operações subterrâneas é essencial que os gases liberados estejam dentro de limites aceitáveis (Sen, 1990).

5.10 Segurança ao Manuseio

Como os explosivos são transportados sob as mais variadas circunstâncias, é importante que eles possam ser manuseados sem o menor risco e sob condições adversas. Para ser vendido, um explosivo passa por alguns testes de sensibilidade (Sen, 1995):

a) *Teste do martelo*: Determina qual a altura que um determinado peso deve cair sobre uma base de aço contendo uma quantidade específica de explosivo para que esse detone;

b) *Teste de fricção*: É um teste no qual uma fricção com pressão gradativamente aumentada é aplicada em uma pequena quantidade de explosivo. Quando ocorre a explosão, a pressão é registrada;

c) *Teste do impacto de projétil*: Determina a velocidade mínima que deve possuir um projétil (figura 15) para que inicie uma detonação de um explosivo comercial;

d) *Teste de calor*: Como o nome indica, determina a quantidade de calor que um explosivo suporta antes de iniciar uma reação de explosão.

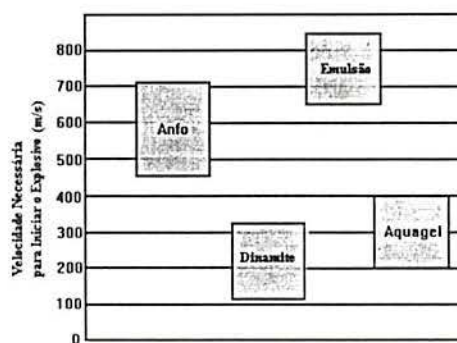


Figura 15. Velocidades mínimas que iniciam explosivos (Olofsson, 1990).

6 Iniciação

Um sistema de iniciação, deve provocar a perfeita detonação de um furo carregado e ser capaz de transferir a detonação de um furo à outro, num tempo preciso (Konya, 1995).

A seleção do método correto para o caso em questão é fundamental para o sucesso do desmonte. Um dos antigos problemas de utilização de explosivos era a iniciação. Era necessário iniciar o explosivo de uma distância segura em um tempo mínimo para o encarregado do fogo (*blaster*) se retirar do local. Esse “tempo” somente foi conseguido em 1831 quando William Bickford inventou o estopim de mineração (“*Miners Safety Fuse*”).

Mais tarde com o surgimento da NG, Alfred Nobel pesquisou um método mais confiável para iniciar a dinamite. A utilização desse explosivo, criou a necessidade de acoplar algum tipo de iniciador ao estopim, pois o mesmo sozinho não tinha capacidade de iniciar a dinamite. Nobel, em 1863, inventou a espoleta de fulminato de mercúrio que acoplada ao estopim proporcionava uma melhor iniciação. As espoletas se desenvolveram a partir da idéia básica de Nobel, tendo mais tarde a introdução da espoleta elétrica como outro importante avanço na técnica de iniciação, permitindo precisão em grandes e complexos trabalhos de desmonte. Algumas décadas depois, iniciadores baseados em um “tubo de choque” passaram a ser utilizados, principalmente por possuírem as melhores qualidades dos métodos anteriores. Essas qualidades são a segurança do cordel detonante, a precisão da espoleta elétrica, e a iniciação pelo fundo do furo (ou por onde for desejada).

Atualmente existem vários tipos de sistemas de iniciação, sendo divididos em dois grandes grupos: os elétricos e os não-elétricos. Para iniciação elétrica existem espoletas elétricas, temporizadores elétricos, retardos eletrônicos (EDD), o sistema Magnadet e o novo BlastPED, que consiste em um sistema de comunicação de ULF (*Ultra Low Frequency*). Os outros tipos que não usam eletricidade são estopim, cordel detonante, e tubos de choque ou de plasma.

Uma regra prática básica no estudo de desmontes com explosivos diz que a velocidade de iniciação de um explosivo deve ser sempre maior do que a velocidade de detonação (VoD) do próprio explosivo. Com isso se observa um melhor aproveitamento da energia disponível na totalidade da carga explosiva. Analisando de outra maneira, pode-se dizer que, se um explosivo é iniciado abaixo da sua velocidade de detonação, parte de sua massa será consumida abaixo da performance esperada, ou seja, o explosivo vai deflagrar sem detonar, desperdiçando energia (Sen, 1995).

6.1 Iniciação Não-Elétrica

6.1.1 Estopim e Espoleta Comum

O estopim é um iniciador tradicionalmente usado para cargas explosivas sensíveis à chama como pólvora negra, espoleta e dinamites. O estopim consiste em um núcleo de pólvora negra (aprox. 7 g/m) envolto em fios de algodão, juta ou *rayon*, protegidos da umidade por uma cobertura de material à prova d'água, geralmente asfáltica, ou plástica. A cobertura serve para evitar que a água, óleo e outros materiais entrem em contato com a pólvora fazendo com que a sua velocidade de queima mude, ou que perca a sensibilidade (Imbel, 1985)

Um estopim, para poder ser utilizado na mineração deve ter uma velocidade de queima constante que pode variar de acordo com o fabricante, em torno de 100 a 145 segundos por metro nas CNTP. Para iniciar o explosivo, uma espoleta deve ser amolgada (figura 16) em uma das extremidades do estopim.

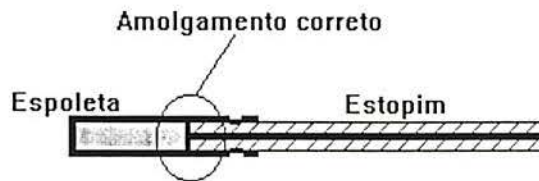


Figura 16. Detalhe de um perfeito amolgamento da espoleta no estopim.

Deve ser levado em conta que a velocidade será modificada se as condições de confinamento e pressão forem modificadas (o que sempre ocorre) e que a velocidade aumentará se a pressão aumentar. Essa é uma situação muito comum em mineração quando se tem a presença de água nas frentes de trabalho. A pior situação ocorre quando alguns furos estão com água e outros secos. Deve-se ter bastante cuidado nesse caso, pois certamente haverá alteração na seqüência de queima com os furos com água tendendo a detonarem antes dos secos. Há, portanto, algumas ocorrências referidas como “fogos prematuros”, ou “fogos atrasados” em que o fato não deve-se a fatores inerentes ao estopim mas a condições da área de trabalho, condições ruins de estocagem, ou manuseio indevido.

As espoletas são cilindros de alumínio, aço, ou cobre com 6,5 mm de diâmetro. Uma das extremidades está aberta onde se encaixa o estopim, o iniciador da espoleta. A maioria possui o fundo chato sendo que algumas têm o fundo com uma reentrância em forma de cone (carga moldada) para melhor aproveitamento da carga de trabalho.

Devido à variação de sensibilidade dos diferentes explosivos, espoletas com diferentes capacidades foram colocadas no mercado. A potência de uma espoleta é expressa em números, dos quais atualmente as de número 6 e 8 são disponíveis no mercado nacional. A espoleta número 8 contém, 0,88 g de explosivos distribuídos na proporção de 40% de explosivo primário e 60% de explosivo secundário. O explosivo primário que antigamente era fulminato de mercúrio foi substituído por azida de chumbo, ou uma mistura com trinitroresorcinol e estifinato de chumbo que tem alta sensibilidade à chama. O explosivo secundário, ou carga de trabalho consiste geralmente de nitropenta, hexitol, ou ainda tetril. A figura 17 ilustra a forma como o estopim é conectado à espoleta.

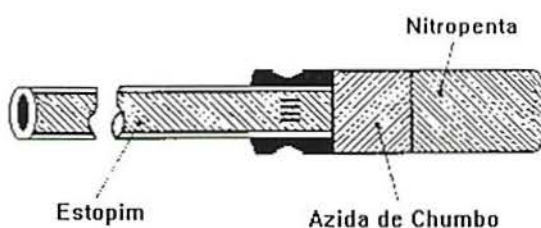


Figura 17. Conjunto estopim - espoleta comum (Imbel, 1985).

A carga primária é extremamente sensível a choque térmico ou físico e pode ser iniciada pela chama que se desprende da ponta do estopim. Ela fornece energia necessária para iniciar a carga secundária que, por sua vez tem potência suficiente para iniciar adequadamente o explosivo. Como os explosivos se tornaram mais seguros para o manuseio e, portanto, menos sensíveis, a espoleta número 8 se tornou praticamente a única utilizada nos trabalhos com explosivos comerciais.

As espoletas estão sendo gradativamente substituídas por métodos mais seguros de iniciação, porém, continuam sendo muito utilizadas em pequenas operações e em fogo secundário por sua simplicidade e custo relativamente baixo.

6.1.2 Cordel Detonante

O cordel detonante é constituído por um tubo flexível de material explosivo, iniciador para detonação simultânea de várias cargas explosivas quaisquer que sejam as dimensões da malha e profundidade dos furos. O cordel detonante inicia uma coluna de explosivos lateral ou radialmente.

É um acessório muito comum utilizado no mundo inteiro e especialmente adotado em locais onde condições climáticas adversas, como temporais tornam desaconselhável a utilização de espoletas elétricas.

Algumas das vantagens e desvantagens da utilização do cordel detonante são relacionadas na tabela 4.

Tabela 4. Vantagens e desvantagens do uso do cordel detonante.

| VANTAGENS | DESvantagens |
|--|---|
| -Não é afetado pelas correntes elétricas ou água; | -Alto ruído se estiver descoberto; |
| -Permite carregamento dos furos em regime descontínuo (espaçadores); | -Pode ser cortado por detonação de furo próximo; |
| -Vida útil longa; | -Inicializa o furo de cima para baixo; |
| -Baixo custo. | -Torna o ANFO pouco sensível (Dessensibilização). |
| | -Destroi o tampão antes do explosivo detonar. |

Devido à sua segurança e facilidade de manuseio ele é preferido na maioria dos trabalhos, podendo ser fabricado com cargas de 0,5 g/m a 85 g/m de nitropenta (PETN). A carga é envolta por fios de algodão, rayon e cobertura plástica.

Os cordéis com cargas acima de 20 g/m são utilizados principalmente em sísmica e exploração de petróleo. A figura 18 mostra como é conectada a espoleta ao cordel.

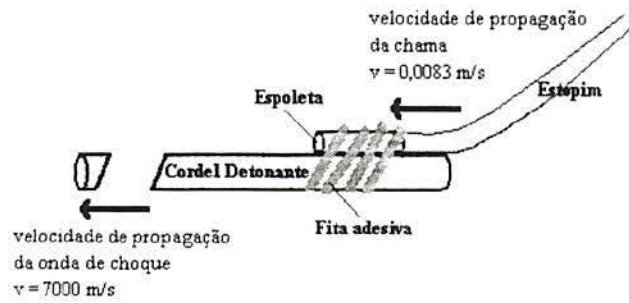


Figura 18. Ligação espoleta-cordel detonante.

O cordel de 10 g/m de nitropenta, pode ser iniciado por uma espoleta 8 e conduz a onda de choque ao longo do seu comprimento a uma velocidade de 7000 m/s linear e 1000 m/s radial aproximadamente (Konya, 1995). O trabalho com múltiplas linhas torna-se possível com o cordel detonante ao se utilizar o retardo para cordel (figura 19). A utilização desse acessório, permite que se opte pelas mais variadas formas de amarração e geometria de plano de fogo. A onda de choque no cordel se propaga até encontrar a carga explosiva do retardo a qual inicia o elemento de retardo do outro lado. O tempo de queima desse é o necessário para o retardamento na detonação. Quando o elemento de retardo acaba de queimar, provoca a detonação imediata da carga a seu lado, a qual se transmite ao cordel no outro lado e ao resto da linha. Os retardos são fabricados com tempos que variam de 5 ms até 300 ms.

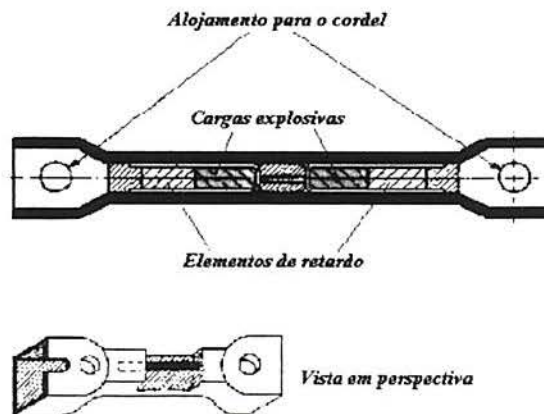


Figura 19. Detalhe de retardo para cordel detonante (Imbel, 1985).

6.1.3 O Sistema Nonel

Esse sistema de iniciação foi criado pela Nitronobel para fornecer a precisão das espoletas elétricas sem as desvantagens de segurança que elas apresentavam. É completamente imune a correntes elétricas e ondas de rádio de qualquer frequência, sendo silencioso e capaz de acionar o explosivo em qualquer ponto do mesmo.

É feito de um tubo oco de plástico com uma pequena película de material explosivo nas paredes internas. O tubo normalmente tem um diâmetro externo de 3 mm e interno de 1,5 mm, contendo de 8 a 20 mg/m de ciclo-tetra-metileno-tetranitrato (HMX) e alumínio. A detonação dessa mistura gera um gás de alta velocidade que permite a formação de uma onda de choque, fenômeno chamado de efeito canal (Sen, 1995). Numa das pontas se encontra uma espoleta de retardo variando de 0 a 2750 ms com potência de uma espoleta número 8. A figura 20 apresenta um corte ilustrativo de um tubo de choque Nonel.



Figura 20. Corte de um conjunto não-elétrico Nonel[®]

Na outra ponta se encontra um conector de plástico e espoleta com 1/3 da carga da espoleta número 8. Esse conector serve para se juntar vários tubos de não-elétrico e é acionado por cordel, espoleta-estopim ou então dispositivos de iniciação manuais ou mecânicos que fornecem a onda de choque necessária à iniciação (figura 21).

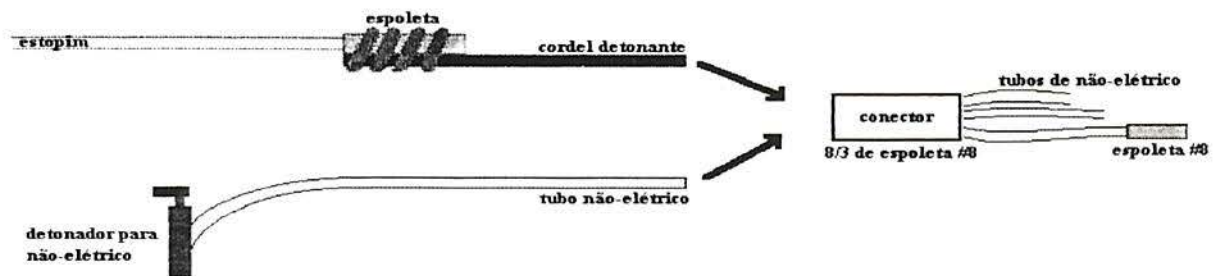


Figura 21. Ligações normalmente feitas com Nonel[®].

Assim que a espoleta do conector é acionada, uma onda de choque (2000 m/s) percorre o interior do tubo, sem danificar sua parte externa. Essa onda de choque é suficiente para iniciar a espoleta 8, que por sua vez, inicializa o explosivo.

Como o tubo não explode é perfeitamente possível iniciar uma coluna pela sua parte inferior (iniciação pontual), situação impossível com cordel detonante, além de apresentar vantagens como pouco ruído, não destruição do tampão e precisão de espoleta elétrica (Konya, 1995).

Existem fabricantes que produzem um sistema não-elétrico que não utiliza onda de choque, mas sim um plasma com velocidade de 1000 m/s. No caso o tubo é preenchido por uma mistura de dicromato e alumínio.

6.2 Iniciação Elétrica

6.2.1 Espoletas elétricas

A espoleta elétrica é praticamente igual à espoleta simples, exceto pelo fato de ter uma resistência elétrica mergulhada no material explosivo primário, sendo ativada por corrente elétrica de amperagem mínima de 0,5 Ampère. São usados três tipos :

a) Espoleta elétrica simples ou instantânea (figura 22);

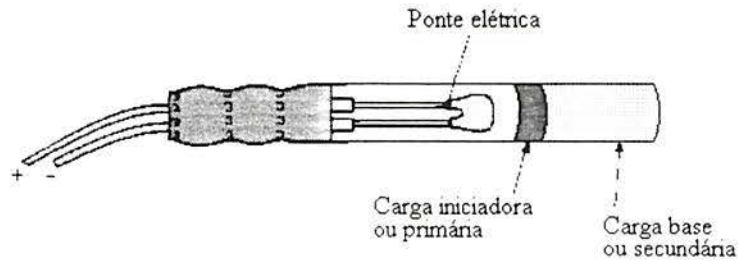


Figura 22. Espoleta elétrica simples ou instantânea (Imbel, 1985).

b) Espoletas elétricas de retardo ou tempo na qual, por ação de um elemento retardador, decorre um tempo controlado, esse tempo de espera podendo variar de 0,5 a 5 segundos (figura 23);

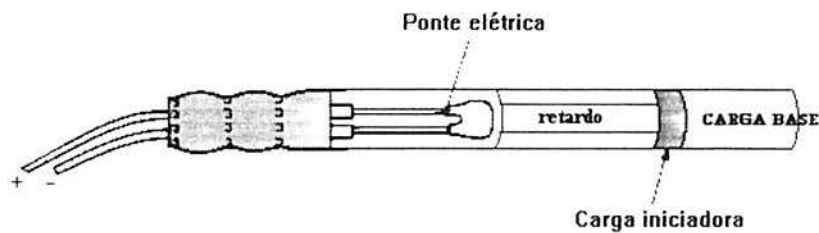


Figura 23. Espoleta elétrica de retardo (Imbel, 1985).

c) Espoletas elétricas de mili-segundo, ou seja retardos na ordem de 25 a 1000 ms.

As espoletas elétricas são insubstituíveis em trabalhos cuja iniciação deve ser controlada com rigor (prospecção geofísica, aplicações industriais) ou em condições onde não seja possível o uso de cordel detonante (cargas “destapadoras” de fornos metalúrgicos).

As espoletas elétricas são um aprimoramento das espoletas comuns. Elas consistem, basicamente de um tubo de alumínio, ou cobre onde o estopim comum foi substituído por um par de fios condutores que terminam ligados a um bulbo de alta resistência que serve como elemento iniciador ao aquecer-se quando submetido a uma corrente elétrica. O bulbo, ou ponte elétrica é envolto por coberturas que entram facilmente em combustão chamadas de

elemento pirotécnico. O elemento pirotécnico assegura a perfeita combustão que atinge a carga primária que, por sua vez, inicia a carga de trabalho exatamente igual a uma espoleta comum. O par de fios que compõem a espoleta elétrica geralmente é feito de cobre, ou de ferro com cobertura de estanho. São cobertos por polietileno e podem apresentar vários comprimentos dependendo do tipo de trabalho a que serão submetidos, por exemplo, profundidade do furo e necessidade de ligação com furos adjacentes. A resistência elétrica de cada espoleta depende do comprimento de seus fios mas basicamente se situa ao redor de 2 ohms (Imbel, 1985).

Nas espoletas instantâneas, praticamente não existe o elemento pirotécnico, resumindo-se à cobertura da resistência elétrica diretamente em contato com a carga primária. Já nas espoletas elétricas de tempo, o comprimento do elemento pirotécnico é que determinará o retardo. Assim, quanto mais comprida for uma espoleta elétrica, maior será o seu retardo (Imbel, 1985).

As espoletas elétricas podem ser ligadas em série ou paralelo, como qualquer circuito elétrico. Podem, também, ser ligadas numa combinação de ambos.

6.2.2 O Sistema Magnadet

Esse sistema de iniciação elétrica foi desenvolvido pela ICI, sendo um aperfeiçoamento da espoleta elétrica. A transferência da energia elétrica no Magnadet não se dá diretamente, mas sim por indução eletromagnética entre o primário e o secundário de um pequeno transformador (figura 24) que acionará uma espoleta de retardo idêntica a não elétrica (Konya, 1995).

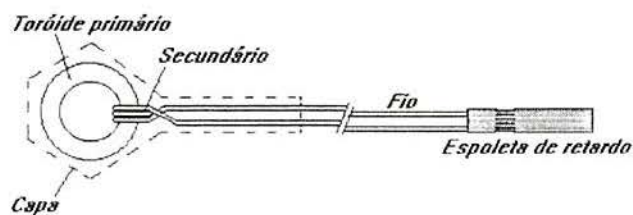


Figura 24. Diagrama esquemático de um sistema Magnadet® (Konya, 1995).

A corrente elétrica utilizada é de no mínimo 15 kHz, sendo fornecida por um aparelho especial que pode acionar até dez linhas programadas em intervalos diferentes. A combinação desses dez intervalos em conjunto com os retardos das espoletas fornecem uma grande variedade de opções de tempos.

O sistema é eficiente e preciso, além de seguro, pois frequências de 15 kHz estão muito acima das correntes de 50 e 60 Hz normalmente encontradas no campo.

A voltagem de 1 a 2 volt utilizada, também é considerada segura na grande maioria dos casos, por ser diferente das voltagens normalmente encontradas nas proximidades de uma operação mineira (Konya,1995).

6.3 Cargas Iniciadoras e Reforçadores

Alguns explosivos tem baixa eficiência quando detonados apenas com espoleta 8. Há por isso, necessidade de se usar um iniciador de maior brisância. Dá-se o nome de brisância à quantidade de energia que um explosivo libera por unidade de tempo e é expressa em geral, pelo valor da densidade multiplicada pelo quadrado da velocidade de detonação (Imbel, 1985).

Para explosivos pouco sensíveis como o ANFO por exemplo, é necessário iniciar a detonação com uma carga iniciadora, ou seja, uma carga que gere alta VoD. Caso o furo seja longo, se reforçar o carregamento com outra(s) carga(s) (reforçadores) ao longo da coluna, pois os explosivos de baixa sensibilidade tendem a diminuir a sua VoD durante a detonação, consumindo assim parte de sua massa sem gerar toda a energia que poderia ser fornecida pelo explosivo. Utilizando-se cargas iniciadoras e reforçadores assegura-se uma detonação mais estável e eficiente ao longo de toda a coluna (figura 25).

Cargas iniciadoras e reforçadores dependendo do plano de fogo, podem ter vários tamanhos e pesos, mas normalmente são cilíndricos com cobertura plástica e um furo axial para ser atravessado por cordel ou tubo de choque. Ambos podem ter a mesma composição, exceto pelo fato de na carga iniciadora haver normalmente uma espoleta e no reforçador não.

Deve-se levar em conta que o carga iniciadora não precisa ser necessariamente um explosivo fabricado apenas para esse fim, mas sim um explosivo com uma carga muito mais brisante que o explosivo da carga de coluna, como por exemplo, uma dinamite como carga iniciadora de uma coluna de ANFO.

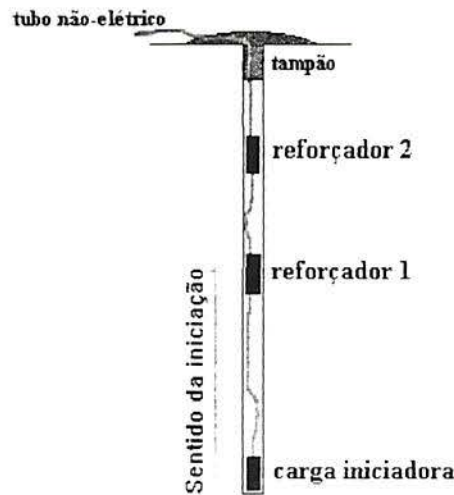


Figura 25. Clássica disposição de carga iniciadora e reforçadores ao longo da coluna.

A composição, o diâmetro e o formato são alguns dos fatores mais críticos para selecionar a melhor carga iniciadora para uma dada situação. A composição da carga iniciadora determina a pressão de detonação que é a responsável direta pela iniciação da carga principal de explosivo. Infelizmente não existe uma padronização em nível mundial de modo que se possa saber qual é a carga iniciadora mínima para ser usado em uma determinada situação. O ANFO por exemplo, é feito com grânulos de diferentes tamanhos e características físicas e químicas. Existem então vários tipos de carga iniciadoras que serão eficientes e outras nem tanto, dependendo de uma série de fatores entre eles, diâmetro do furo, composição da carga iniciadora e composição do ANFO. Então, qualquer carga iniciadora que produza uma velocidade de detonação bem acima da velocidade de estado constante da carga principal é considerada a carga iniciadora correta (Konya,1995).

O diâmetro da carga iniciadora também influencia enormemente a reação de detonação. Quanto mais próximo do diâmetro do furo (maior confinamento), melhor é a eficiência da carga iniciadora. As carga iniciadoras que aproveitam o efeito da carga moldada (*shaped* carga iniciadora) também apresentam melhor performance (Konya,1995).

Outro fator importante é a localização da carga iniciadora no furo. Segundo Sen (1995), no caso de detonação de uma bancada a carga iniciadora não deve ser colocado no fundo do furo e sim na altura da praça (figura 26), desse modo a resultante das tensões produzidas será muito maior, logo se terá um aproveitamento mais eficiente da energia disponível, para arrancar a parte mais engastada da bancada.

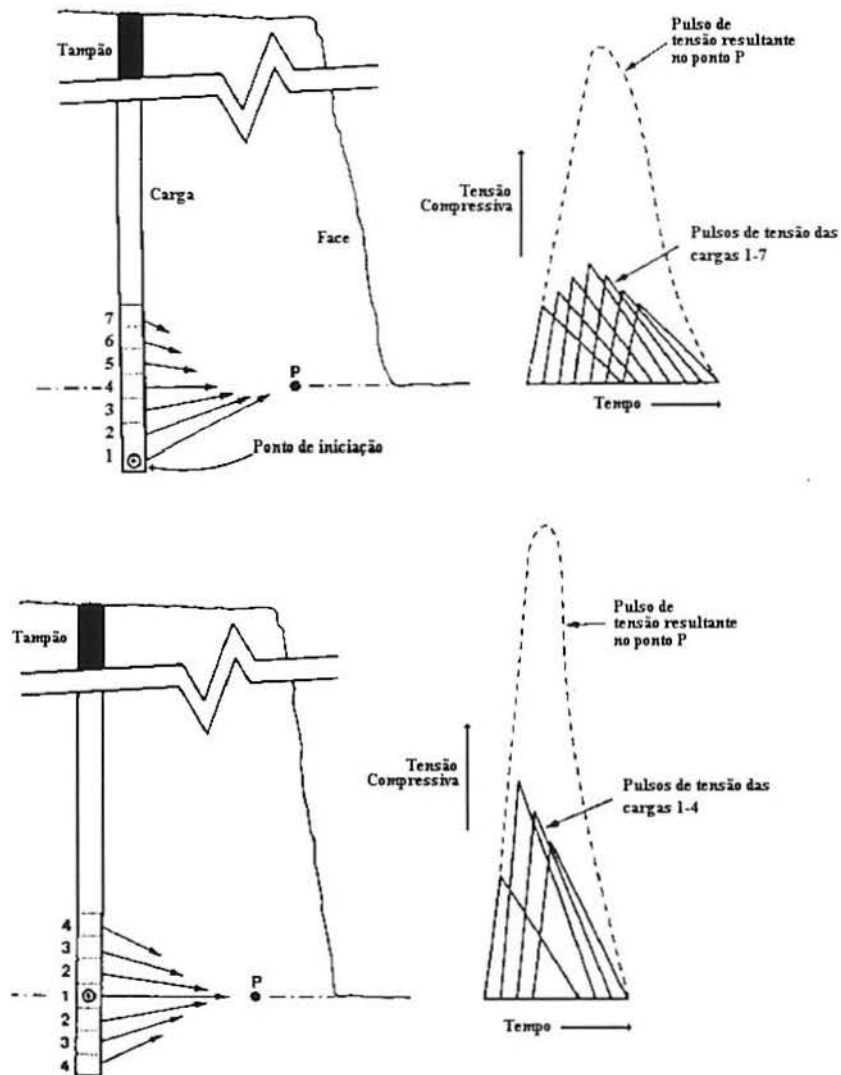


Figura 26. Efeito da resultante da posição da carga iniciadora na coluna (Sen, 1995).

7 Teoria de Desmonte

Existem diversas correntes científicas que tentam explicar as reações que ocorrem em um desmonte. Nem sempre conceitos, fórmulas ou modelos foram compreendidos ou conseguiram explicar os diversos fenômenos que ocorrem durante o processo de detonação. O estudo da mecânica do desmonte das rochas com uso de explosivos é uma ciência relativamente recente. Alguns fenômenos começaram a ser medidos e conceituados há pouco tempo. A explicação desses fenômenos como esforços dinâmicos e mecanismos de fratura, era meramente especulativa, pois não existiam instrumentos confiáveis para quantificá-los. Algumas das teorias mais conhecidas são apresentadas a seguir.

7.1 Mecanismo de Fragmentação das Rochas

O objetivo fundamental da utilização de explosivos em mineração é fragmentar rochas. A fragmentação é governada principalmente por parâmetros como VoD e expansão de gases. Vários estudos foram realizados, porém, muitos pesquisadores, como Langefors e Kihlstron (1963), consideravam medidas estáticas (estudo geomecânico) como representativas de uma situação de campo. Ocorre que ao ensaiar-se um corpo de prova, esse não irá apresentar as mesmas características do maciço que vai ser desmontado. Ao testarmos amostras intactas, essas são preservadas de descontinuidades de tal forma que o corpo de prova apresentará, por exemplo, resistência à compressão maior que o maciço rochoso do qual foi amostrado. Devido à variação espacial das suas propriedades em um maciço rochoso e, como não se pode controlar com precisão essa variabilidade, pode-se adotar certos modelos que nos aproximam da realidade. Deve-se, entretanto, acentuar que cada caso é um caso e, cada rocha reage de uma maneira diferente na sua interação explosivo/localização no maciço rochoso (Scott, 1996).

Dessa forma, salienta-se a importância de não se utilizar cegamente os modelos tradicionais de desmonte de rocha por explosivo, como tradicionalmente é feito com a obra de Langefors e Kihshom (1963). Esse é um modelo muito bom para rochas competentes como os granitos encontrados na Suécia, onde aliás foi desenvolvida, podendo não se aplicar à maioria das situações encontradas na prática. Os modelos são usados para se ter um ponto de partida, a partir do qual são realizados muitos testes *in situ* que conduzem a resultados mais próximos

da realidade.

Para melhor compreender os mecanismos primários de fratura das rochas, pode-se associar o desmonte de rochas ao estudo de um cilindro de paredes espessas submetido a pressão interna (Imbel, 1985).

A figura 27 ilustra como seria o diagrama de tensões de um cilindro submetido a pressão interna e os dois tipos de tensões que agem sobre esse cilindro. As tensões tangenciais ou de tração são positivas e as radiais ou de compressão são negativas.

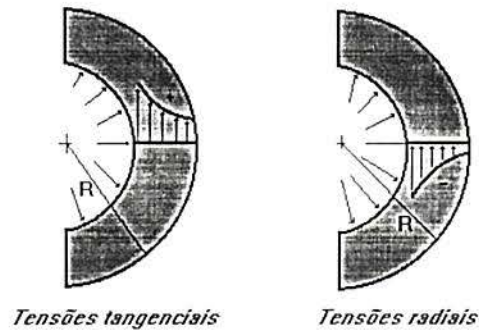


Figura 27. Diagrama de tensões de um cilindro submetido à pressão interna (Imbel, 1985).

A figura 28 mostra como as tensões se distribuem na parede do cilindro, segundo um paralelepípedo elementar de tensões.

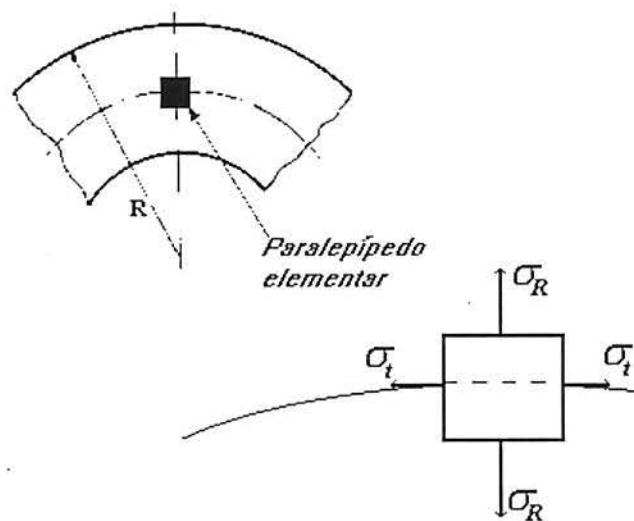


Figura 28. Paralelepípedo elementar de tensões (Imbel, 1985).

Os esforços de compressão produzem deformações elásticas, deformações plásticas e fratura por esmagamento, se o material não for dúctil e se o esforço for suficientemente grande.

Os esforços de tração radial (figura 29), produzem deformações elásticas, deformações plásticas e tendem a fissurar o material segundo linhas tangenciais.

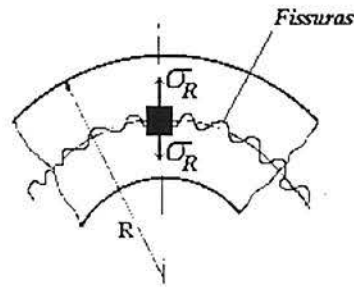


Figura 29. Efeito de tensões de tração radial (Imbel, 1985).

Os esforços de tração tangencial (figura 30), introduzem deformações elásticas, deformações plásticas e tendem a fissurar o material segundo linhas radiais.

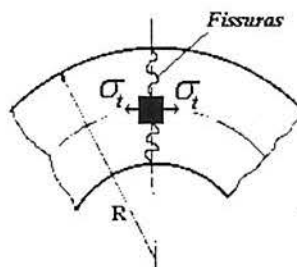


Figura 30. Efeito de tensões de tração tangencial (Imbel, 1985).

Os materiais rochosos e o concreto tem, em geral, elevada resistência à compressão e baixa resistência à tração. É por essa razão, por exemplo que o concreto é armado com vergalhões de aço. O concreto resiste à compressão e o aço resiste à tração. A combinação dos dois, promove grande relação resistência/peso. Espera-se portanto, que nos desmontes a rocha seja preferencialmente fraturada por tensões de tração.

O processo de detonação de uma rocha ocorre em vários estágios, mas resumidamente ocorre primeiro um impacto de energia de choque (ondas P e S), seguido por rápida expansão de gás. Não se deve esquecer que uma boa parte da energia liberada pelo explosivo é perdida na forma de calor e ruído. Quando uma carga explosiva confinada detona (figura 31), ocorre:

- a) Iniciação;
- b) Alta pressão durante a decomposição do explosivo que esmaga a rocha do contorno por deformação elástica, provocando alargamento e microfraturamento;

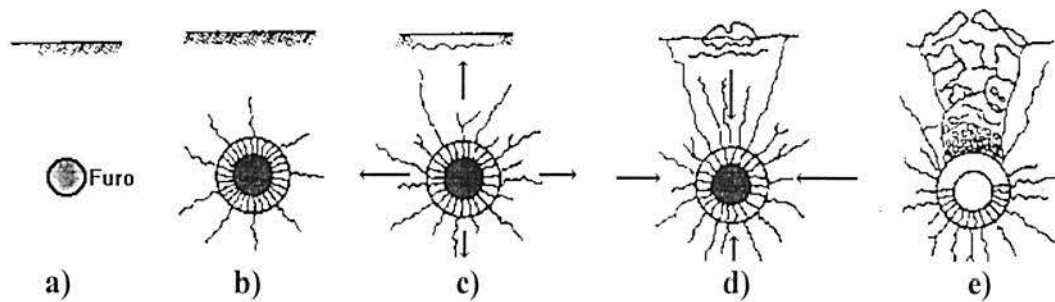


Figura 31. Visualização seqüencial das fraturas (Imbel, 1985).

c) Ondas compressivas emanam radialmente do centro do furo em todas as direções em uma velocidade igual à velocidade sônica na rocha em questão. Abertas as primeiras trincas radiais (rosa de fissuras), a pressão no furo alarga e prolonga consideravelmente as microfraturas e as descontinuidades da rocha;

d) Quando as ondas compressivas atingem a face livre, são refletidas na forma de ondas de tração. Se for ultrapassada a tensão de ruptura da rocha (figura 32), essa será fragmentada, o que é o objetivo do desmonte;

e) Depois de fraturada, a rocha sofre ação da pressão dos gases liberados na detonação, que empurram o material provocando o seu deslocamento, além de aumentar as descontinuidades. Inicia-se a aceleração do maciço fragmentado pelos gases em expansão, tal como no lançamento de um projétil por arma de fogo (Imbel, 1985).

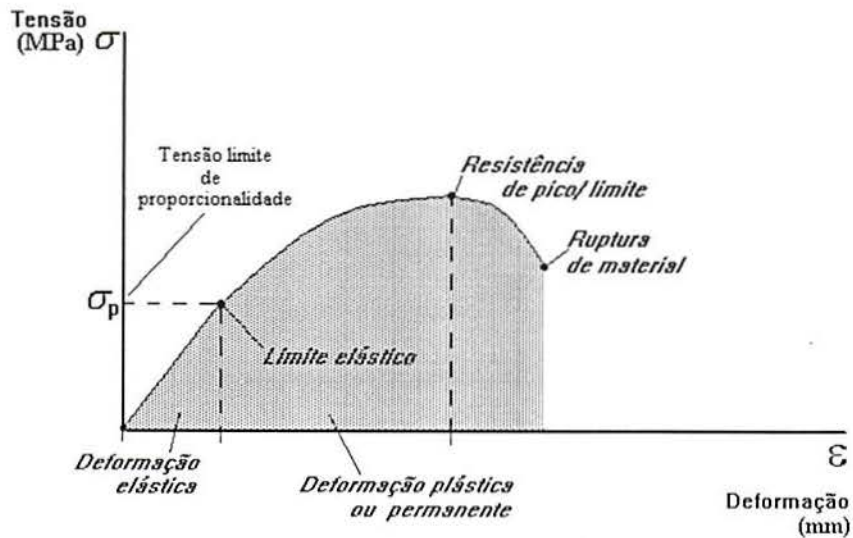
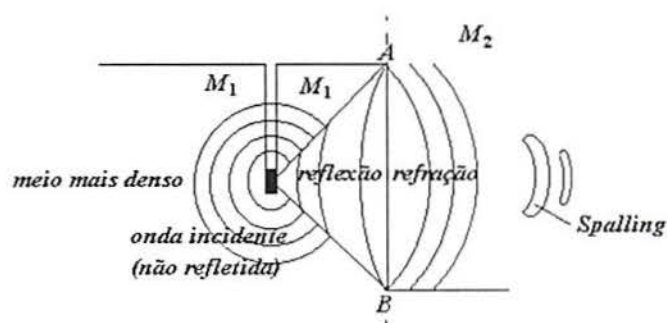


Figura 32. Diagrama tensão vs. deformação (ICI, 1989).

No caso de um desmonte em bancada os processos são praticamente os mesmos. Segundo mostrado na figura 33, a energia da onda de choque encontrando a descontinuidade de meios (rocha / ambiente) na face livre, divide-se em energia refratada e energia refletida, tal como ocorre nas leis da ótica. Dois outros fenômenos também ocorrem:

- Descascamento da face ("spalling"), fenômeno esse observado em bancadas de afastamento muito pequeno e razão de carga alta, quando essa sofre refração das primeiras ondas da detonação. Essa característica, porém, não é considerada importante no mecanismo global de quebra das rochas (Scott, 1996).



AB : Superfície de separação entre os meios M1(ondas refletidas) e M2(ondas refratadas).

Figura 33. Reflexão e refração da onda de choque (Adaptado de Scott, 1996).

- *Ruptura flexural*, fenômeno que ocorre devido ao afastamento ser empurrado pelos gases da reação de detonação, quebrando por flexão. Quando a relação afastamento/altura da bancada for de um mínimo de 1:4 essa reação é observada. Essa propriedade é chamada de esbeltez, sendo um dos fatores mais importantes em um desmonte, pois determina o confinamento ao qual o explosivo estará submetido (Konya, 1995).

O volume gasoso liberado pelo explosivo está intimamente relacionado ao arremesso do afastamento. Uma regra prática dita que para rochas duras e tenazes, o explosivo indicado é aquele de alta velocidade, ou seja, brisante, para provocar o efeito de fraturamento, enquanto que para rochas macias e fragmentárias o ideal é o de baixa velocidade, que serve para arremessar a rocha já fragmentada naturalmente (Olofsson, 1990).

Segundo Scott, 1996, a rocha pode ser fragmentada principalmente por três caminhos:

a) Fragmentação devido a novas fraturas criadas devido à onda de choque da detonação, criando blocos;

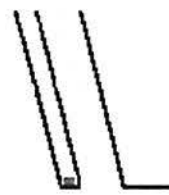
b) Liberação pura e simples dos blocos que já estavam fraturados no maciço;

c) Aumento das fraturas já existentes no maciço o que vem a liberar os blocos.

Entretanto não se deve esquecer que existem diversos parâmetros que governam o mecanismo de quebra das rochas por explosivos, sendo que nem todos são perfeitamente descritos ou conhecidos.

Os principais fatores que afetam a quebra de um material (excetuando-se os inerentes à formulação do explosivo) são: planos de fraqueza, fraturas, fissuras, juntas, planos de acamadamento, densidade do material, porosidade, fricção interna (habilidade da rocha de transformar ondas de choque em calor) e conteúdo de água (Sen, 1995).

A figura 34 ilustra o perfil de uma bancada e alguns dos processos que ocorrem ao se detonar uma linha de furos. Em alguns dos intervalos de uma detonação de bancada, os furos estão preenchidos com um carga iniciadora no fundo e um explosivo de menor brisância (ANFO) como carga de coluna. A iniciação é feita no fundo do furo por intermédio de um sistema de tubo de choque. Todo o processo de detonação e lançamento do material leva normalmente em torno de 100 ms. Segundo Scott (1996), as etapas de uma detonação de bancada com ANFO iniciado pontualmente e carga iniciadora no fundo do furo compreendem:



000ms



001ms



005ms



030ms



050ms



3seg

No instante 0 ms a carga iniciadora é detonada;

Na próxima etapa, 0,01 ms, ocorre alargamento e deformação elástica do material circundante ao furo;

No instante 0,05 ms ocorre compressão e esmagamento do material próximo ao furo;

No instante seguinte, 0,15 ms, em muitos casos se consegue observar o lançamento do tampão, já existe uma pequena liberação de gás, mas o afastamento ainda não se move;

Entre os instantes 0,15 e 0,30 ms ocorre a quebra do material devido à ondas de tração refletidas na face livre. O afastamento inicia o seu movimento, acelera rapidamente, enquanto que o gás liberado preenche as trincas recém criadas, aumentando a distância entre as paredes das discontinuidades com o efeito de uma cunha. Uma boa parte do blocos vai se chocar durante esse movimento inicial quebrando mais o material. O tempo de início do movimento é chamado de tempo de resposta, ou seja, cada material (sistema rocha-explosivo) e plano de fogo tem seu próprio tempo de resposta que ocorre entre a detonação e o início da movimentação do afastamento (Lewis, 1995);

Em 0,30 ms quase todo o material já foi fragmentado e o afastamento começa a acelerar o seu deslocamento, sendo empurrado pelos gases liberados pela detonação. Nesse instante pode ocorrer também o fenômeno de quebra do afastamento por flexão. Em um afastamento muito pequeno, se perde muita energia (ultralançamento e gás), enquanto que em afastamento grande o gás não consegue empurrar o material, de modo que se perde lançando o tampão;

No instante 0,50 ms não existe mais liberação de gás, apenas deslocamento do afastamento por inércia que irá formar a pilha;

Depois de terminado o deslocamento e dissipação dos gases (3 s), a pilha de desmontado está formada.

Figura 34. Alguns intervalos de tempo das etapas de detonação em bancada.

8 Técnicas de Monitoramento de Detonações

Explosivos são encarados de diferentes formas por fabricantes e consumidores. Para o fabricante, explosivo é um produto e para o consumidor, uma ferramenta. O objetivo do vendedor é vender explosivos, diferente do consumidor que quer fragmentar a rocha. É fato que até pouco tempo, apenas os fabricantes tinham conhecimento técnico suficiente sobre performance de explosivos, sendo eles a única fonte de informação sobre a aplicação de seus produtos (Scott, 1990).

A seleção dos explosivos utilizados na grande maioria das mineradoras brasileiras, principalmente pequenas e médias, é ainda baseado apenas no custo por quilograma do produto, densidade, sensibilidade à água, suporte técnico e nas relações comerciais como formas de pagamento. Entretanto esses critérios ignoram totalmente as diferentes características físicas e de performance entre os explosivos disponíveis no mercado. Segundo Scott e Cameron (1988), para se avançar um pouco mais na seleção técnica de um determinado tipo de explosivo ou de ANFO é fundamental que se observem os seguintes critérios:

- Diferentes explosivos tem diferentes características e performances;
- A eficiência de um determinado plano de fogo requer que se observem as características do tipo de explosivo utilizado;
- A seleção de um explosivo não depende apenas da determinação simples de qual é o melhor explosivo para uma determinada situação;
- Não se pode comparar razões de carga (R_c) entre explosivos de diferentes formulações, como normalmente ocorre.

Hoje existem vários tipos de explosivos, cada qual com características próprias e custos diferentes e também várias técnicas de medida de performance. Essas podem ser divididas em laboratoriais e de campo. As técnicas laboratoriais são realizadas baseadas em amostragem de explosivos tomadas direto nos furos (carregamento a granel ou nas embalagens), de modo a determinar conteúdo de água, de nitrato, de combustível, estabilidade química, viscosidade, densidade e outros. Existem, também, diversos testes que quantificam o parâmetro força ou trabalho realizado pelo explosivo, onde os mais comuns são: -Bloco de Traulz e Energia de Bolhas (*Underwater Bubble Test*).

Ocorre que esses testes servem para se ter apenas uma base do comportamento do explosivo sem medir a real interação explosivo-rocha. Devido a essa necessidade, vários

testes de campo foram desenvolvidos de modo a avaliar performance de explosivo, de sistemas de iniciação, e movimentação do afastamento num contexto mais amplo, relacionando explosivo e maciço rochoso. Esses testes foram desenvolvidos à partir de uma necessidade do mercado consumidor para avaliar e comparar performance de desmontes que estavam ocorrendo com pouca eficiência devido à qualidade dos explosivos e acessórios fornecidos pelos fabricantes. A indústria mineira se tornou consideravelmente interessada em técnicas de medida e comparação da performance de diferentes explosivos. Os problemas compreendem principalmente baixa escavabilidade, alto índice de furação secundária, danos à estruturas vizinhas e custos elevados (Scott, 1996).

Os resultados são usados para quantificar a variabilidade na qualidade dos explosivos, fornecendo dados para a seleção do melhor explosivo e plano de fogo para determinada situação. As técnicas são relativamente simples e produzem ótimos resultados. Normalmente consistem de furos simples que são monitorados usando diversos meios. Alguns desses meios compreendem fotografias de alta velocidade e vídeo de alta resolução, medida de pressão de gás, monitoramento de vibrações, medida de VoD dentro do furo e medida de fragmentação. Essas técnicas produzem uma medida do potencial de fragmentação do explosivo quando detonado na rocha (Cameron *et al.*, 1990).

8.1 Fotografia e Vídeo de Alta Definição

Para que se possa entender o que realmente ocorre em uma detonação é necessário gravá-la com algum equipamento de vídeo ou fotografia de alta velocidade. Uma detonação é um processo muito rápido para a percepção do olho humano, onde diferentes indivíduos podem perceber diferentes resultados (Konya, 1996d).

Fotografias de alta velocidade ou imagens de vídeo fornecem uma detalhada gravação do processo de desmonte, além de poderem ser examinadas quantas vezes forem necessárias para se ter uma compreensão suficiente de como ocorreu a detonação. Normalmente esses registros são feitos a céu aberto devido às boas condições de posicionamento da câmera e de iluminação. Essas informações permitem que se acompanhe segundo Scott e Cameron (1988):

- a) Performance dos retardos de superfície;
- b) Velocidade e trajetória do afastamento ou da face;

- c) Geração de gases;
- d) Eficiência do tampão;
- e) Ocorrência de detonação instantânea;
- f) Perda de furos;
- g) Movimentação do topo da bancada e ultralançamento;
- h) Geração de crateras.

Quanto ao equipamento, câmeras 16 mm de alta definição trabalham numa faixa de 2 à 40000 fps (quadros por segundo) ou 500 à 0,025 ms de intervalo entre quadros. As câmeras fotográficas de alta velocidade (figura 35) trabalham com até 500 fps ou 2 ms entre quadros. Ambos equipamentos produzem excelente informação, porém, o custo de aquisição e operação pode ser proibitivo para a grande maioria das empresas. No caso das câmeras 16 mm de alta definição, além de necessitarem de muita luz utilizam rolos de filme que duram normalmente de 7 à 21 segundos. Com relação às câmeras fotográficas de alta velocidade, essas apresentam o inconveniente de contarem com um número muito reduzido de laboratórios equipados para a revelação especial requerida. Os filmes precisam então ser despachados para laboratórios especializados, o que demanda tempo e recursos financeiros.

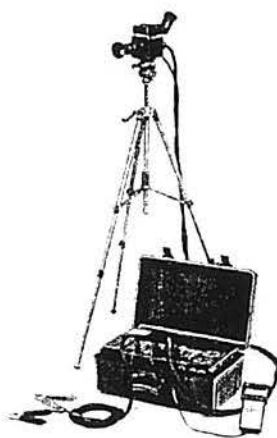


Figura 35. Câmera de alta velocidade.

Câmeras VHS de boa qualidade, Super-8 e S-VHS, normalmente são suficientes para se obter boa informação, com a vantagem de serem fáceis de operar, além do baixo custo. Essas podem obter uma precisão mínima de 30 fps ou 33,3 ms entre quadros (Konya, 1996d). A tabela 5 abaixo mostra uma comparação entre esses equipamentos.

Tabela 5. Quadro comparativo entre equipamentos para acompanhamento de detonações.

| EQUIPAMENTO | PRECISÃO MÍNIMA | | CUSTO APROXIMADO |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|------------------|
| | fps | ms | US\$ |
| CÂMERA 16 mm DE ALTA DEFINIÇÃO | 2-40.000 | 500-0.025 | 25.000-45.000 |
| CÂMERA SUPER 8 e S-VHS | 60 | 16.6 | 6.000 |
| CÂMERA VHS | 30 | 33.3 | 1.300 |
| CÂMERA FOTOGRÁFICA DE ALTA VELOCIDADE | 500 | 2 | 10.000-20.000 |
| CÂMERA FOTOGRÁFICA COM MOTOR DRIVE | 4 | 250 | 1.500 |

No caso de se utilizar uma câmera VHS comum essa deverá contar com alguns recursos como: portabilidade, *zoom* mínimo de 10X (depende da distância da filmagem), boa resolução, e se possível um contador de quadros para que se possa saber em que momento os eventos ocorreram. O videocassete onde o evento será reproduzido deverá contar também com alguns recursos, como boa resolução da operação “pausa”, e avanço quadro à quadro, entre outros, devendo ter de preferência quatro ou mais cabeças. Esses vídeos são os que oferecem melhor qualidade de imagens quando se usa recursos como câmera-lenta ou congelamento de quadro (Venkatesh *et al.*, 1996).

Quadros selecionados do filme, normalmente à cada 100 ms, são digitalizados para se localizar a posição dos marcadores (figura 36). Os marcadores podem ser tambores de óleo situados em intervalos conhecidos na face da bancada. Esses marcadores são suspensos por um cabo que é cortado no momento da iniciação do explosivo.

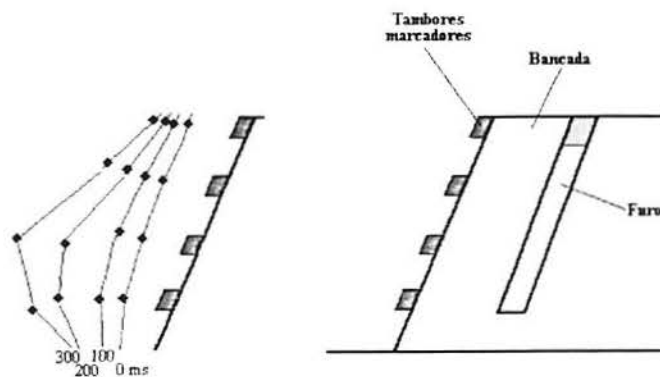


Figura 36. Posicionamento dos marcadores na face da bancada.

A câmara pode ser posicionada na frente da face ou em ângulo com a mesma (figura 37). A escolha do local depende do que o observador pretende capturar com a filmagem. Na posição frontal, pode-se visualizar simultaneamente a movimentação da face e do tampão. A posição oblíqua apresenta mais vantagens segundo Venkatesh *et al.*, (1996), pois captura movimentação do tampão, deslocamento horizontal da face e precisão dos retardos. Usando uma filmadora com contador de tempo, depois de feita uma correção para compensar ângulo de filmagem, pode-se obter dados comparativos entre velocidade e trajetória do afastamento para diferentes tipos de explosivos.

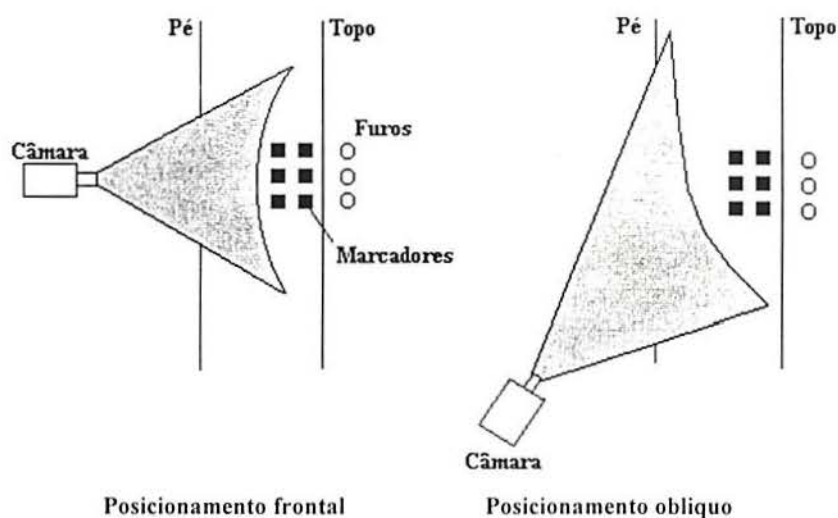


Figura 37. Vista superior para posicionamento frontal e oblíquo da câmara.

8.1.1 Estimativa da Energia Cinética

Segundo Scott e Cameron (1988), a energia cinética transferida do explosivo para a rocha, pode ser estimada a partir da velocidade de deslocamento horizontal do afastamento e da massa de material deslocado. A massa é calculada pela densidade da rocha, afastamento e espaçamento, sendo medida em megajoules (MJ) por unidade de peso do explosivo. Essa é convertida para energia cinética por quilograma (Kg) de explosivo e então comparada com ANFO “padrão”. A comparação entre explosivos dessa forma, só é válida para a mesma rocha e condições particulares onde o teste foi conduzido.

A fórmula a seguir pode ser aplicada:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

Onde :

E_c é a energia cinética em MJ/kg;

m é a massa de rocha deslocada em kg;

v é a velocidade de deslocamento horizontal em m/s.

Sabendo-se a densidade da rocha (2), pode-se estimar a massa deslocada. Deve-se levar em conta que essa estimativa é uma aproximação, supondo que a rocha seja um material com características homogêneas e livre de imperfeições como descontinuidades, o que é muito difícil de ser encontrado numa situação prática.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Onde:

ρ é a densidade da amostra;

m é a massa da amostra (rocha deslocada) em kg;

V é o volume da amostra em m^3 .

8.1.2 Escolha dos Retardos

Com o estudo da movimentação do afastamento (câmera com contador de tempo), chega-se ao tempo de resposta do material, pode-se calcular qual o tempo dos retardos mais indicado para a situação (Lewis, 1995).

8.2 Vibrações

A propagação de ondas de choque por um maciço rochoso provoca o surgimento de vibrações que podem ser captadas por instrumentos específicos. Quando uma carga explosiva é detonada no interior de um maciço rochoso, sua energia potencial é liberada num intervalo de tempo muito curto, provocando uma onda de choque que é utilizada no trabalho de fragmentação da rocha (Scott, 1996).

Uma detonação ainda é uma forma de emprego de energia considerada imperfeita, uma vez que parte da energia é liberada ao meio ambiente, propagando-se através do maciço rochoso e do ar na forma de ondas, ruído e calor. A rocha não é um meio isotrópico, logo cada situação encontrada terá uma propagação de onda diferente, devido a direção e mergulho de foliações e acamadamentos, distâncias entre planos de fraqueza, descontinuidades e flutuações no nível do lençol freático, além de parâmetros do próprio plano de fogo como performance do explosivo, acoplamento explosivo-rocha, intervalos de iniciação, entre outros (Persson *et al.*, 1993).

Medidas de vibração entre diferentes tipos de explosivos na mesma rocha permitem comparar a energia de choque dos mesmos que representa o potencial de quebra, refletindo na habilidade do explosivo de produzir uma pilha de material desmontado adequada, além de servirem também para estabelecer a melhor seqüência de iniciação da malha, indicar a extensão dos danos no maciço ou estruturas vizinhas e medir algumas propriedades dinâmicas da rocha (Cameron *et al.*, 1990).

Vibração e choque podem ser descritos matematicamente como o modo com que um corpo ou partícula se move em determinado intervalo de tempo (Persson *et al.*, 1993).

Ondas sísmicas são ondas que viajam através da Terra, representando a transmissão de energia através dessa. Os terremotos geram ondas sísmicas. A ciência que estuda os terremotos chama-se sismologia do grego *seismos*, que significa sacudir. Além das ondas

sísmicas naturalmente geradas, há muitas outras fontes de ondas sísmicas criadas pelo próprio homem. Quando essas ondas produzidas pelo próprio homem são sensíveis, isto quer dizer, quando elas podem ser percebidas, então elas são referidas como “vibração” (Konya, 1995).

8.2.1 Parâmetros de Onda

As propriedades que descrevem a movimentação das ondas são chamadas de parâmetros de onda. Assume-se, em geral, que as vibrações têm uma forma senoidal (figura 39), o que facilita sua representação matemática e não introduz erros demasiado importantes (Sanchez, 1987). Nessa hipótese simplificadora, relações matemáticas elementares descrevem o fenômeno da seguinte maneira:

$$y = A \text{ sen } (\omega t) \quad (3)$$

Onde:

y, é o deslocamento em m;

t, é o tempo em segundos(s);

A, é a amplitude ou valor máximo de y em metros (m);

ω , é a frequência angular em Rad / s dada pela fórmula:

$$\omega = 2 \pi f \quad (4)$$

Onde :

f, é a frequência em Hertz ou ciclos/seg.

Observando-se a figura 38 tem-se também a velocidade de propagação da onda (v) em m/s, ou seja, a velocidade com que a onda viaja através da terra, variando normalmente entre 300 e 7000 m/s dado pela equação 5.

$$v = A \omega \cos(\omega t) \quad (5)$$

A equação 6 mostra a aceleração da onda em m/s^2 .

$$a = -A \omega^2 \sin(\omega t) \quad (6)$$

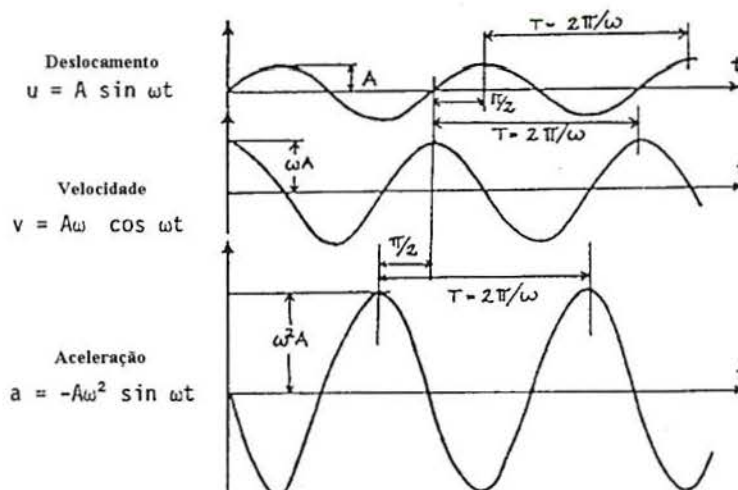


Figura 38. Movimento harmônico simples (Persson et al., 1993).

Outros parâmetros importantes são:

- Período (T) que é o tempo de uma oscilação completa ou ciclo;
- Frequência (f) que é o número de vibrações ou oscilações que ocorrem em um segundo (7).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{w}{2\pi} \quad (7)$$

- Comprimento de onda (λ) que é a distância crista a crista ou vale a vale medido em metros, segundo a fórmula 8.

$$\lambda = v T \quad (8)$$

8.2.2 Parâmetros de Vibração

Os parâmetros de vibração são usados para descrever a movimentação do terreno ou das partículas. Esses parâmetros são deslocamento, velocidade, aceleração, e frequência. Quando uma onda sísmica atravessa uma rocha, as partículas deslocam-se de modo que se movem de sua posição inicial. Isso se chama vibração. Os parâmetros fundamentais são descritos segundo Konya (1995) como sendo:

- Deslocamento (y) que constitui a distância com que uma partícula se move em relação à sua posição inicial em mm (10). O deslocamento é afetado principalmente pela quantidade de explosivo detonada, geologia do material e distância do local da medição.

$$y = \frac{V_p}{2 \pi f} \quad (10)$$

- Velocidade de partícula (V_p), é a velocidade com que as partículas oscilam ou se movem quando deixam sua posição inicial. As partículas descrevem órbitas elípticas ao redor da posição de repouso. É medida em mm/s.

- Aceleração (a), razão na qual a velocidade da partícula muda (11). É medida em frações de “g”, aceleração da gravidade na terra, podendo ser medida, também, em mm/s² (12).

$$a = \frac{2 \pi f V_p}{9810} \quad (11)$$

$$a = 4 \pi^2 f^2 A \quad (12)$$

- Frequência (f) que consiste no número de vibrações ou oscilações ocorridos em um segundo designados por ciclos/s ou Hertz (Hz).

8.2.3 Tipos de Ondas Sísmicas

A onda de choque é uma onda sísmica que pode se apresentar de diferentes maneiras. Muitos tipos de ondas sísmicas podem propagar-se em um sólido. A energia de vibração em um sólido é transmitida não somente de diferentes modos, mas também em diferentes velocidades. As mais comuns segundo Persson *et al.* (1993) são:

-As **Ondas-P** chamadas de longitudinais, de compressão, primárias, ou de choque;

-As **Ondas-S** chamadas de transversais, de cisalhamento, ou secundárias;

-As **Ondas-R** chamadas de Rayleigh, ou de superfície.

As frentes de onda têm formas diferentes; as ondas P se propagam por trações e compressões sucessivas do meio, vibrando as partículas na mesma direção de propagação da onda, e, ao atingirem uma superfície livre ou mudarem de meio de propagação a um ângulo diferente de 90^o, fenômenos de reflexão e refração dão origem às ondas S, onde a vibração é

perpendicular à direção de propagação (figura 39). As ondas P e S se propagam em todas as direções e são também chamadas ondas de volume. Na interface ar/terreno, as ondas de volume dão lugar às ondas ditas de superfície, que se propagam nesse limite. As ondas de superfície são caracterizadas por frequências mais baixas e fraca absorção; ondas R são as ondas de superfície mais encontradas e transportam a maior parte da energia propagada em superfície (figura 40).

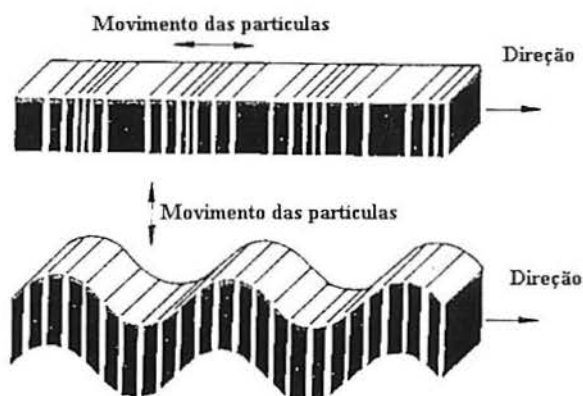


Figura 39. Diagrama de uma Onda-P e abaixo dessa uma Onda-S (Tamrock, 1984).

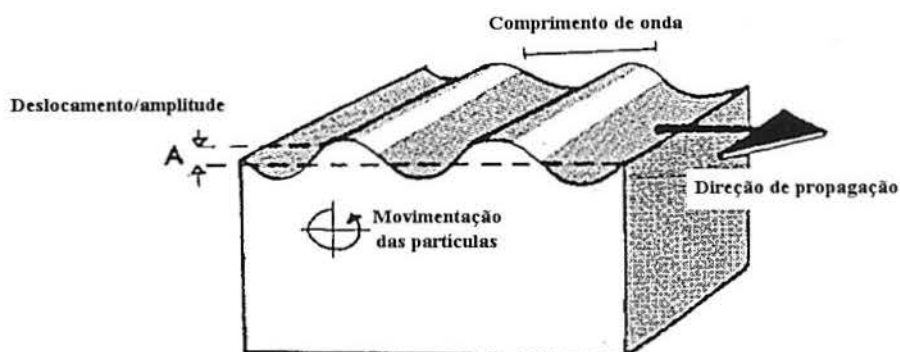


Figura 40. Diagrama de uma Onda Rayleigh (Persson et al., 1993).

Cada tipo de onda propaga-se com uma velocidade C_s , C_p ou C_r , que é característica do meio atravessado. A onda mais rápida é sempre a P, seguida pela onda S e pelas ondas de superfície. A velocidade de propagação depende apenas das características do meio. As velocidades são descritas segundo (Persson *et al.*, 1993) pelas equações 12, 13 e 14 abaixo:

$$\text{Ondas-P} \quad C_p = \left[\frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\text{Ondas-S} \quad C_s = \left[\frac{G}{\rho} \right] = \left[\frac{E}{(2\rho)(1+\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\text{Ondas-R} \quad C_r = \frac{0,86 + 1,14 \nu}{1 + \nu} \quad (14)$$

Onde:

E , é o módulo de elasticidade em Pa;

G , é o coeficiente de cisalhamento do material em Pa;

ρ , é a densidade do material em kg/m^3 ;

ν , é o coeficiente de Poisson;

C_p , é a velocidade de propagação da onda P;

C_s , é a velocidade de propagação da onda S;

C_r , é a velocidade de propagação da onda R.

Em geral, nas rochas cristalinas a velocidade de propagação das ondas longitudinais é da ordem de 5000-6000 m/s, maior do que em outras rochas. A onda de choque é amortecida à medida que sua frente se distancia da origem. Além do fenômeno puramente geométrico de dispersão da energia num espaço tridimensional, o caráter não completamente elástico das rochas e a presença de água preenchendo vazios são também fatores de amortecimento do abalo. A amplitude, a velocidade e a aceleração do movimento oscilatório diminuem com a distância, o mesmo acontecendo com a frequência de oscilação. Os sismos, captados a centenas ou milhares de quilômetros de seu epicentro, apresentam frequências bem mais baixas em torno de 2 Hz (ULF) e longos comprimentos de onda, o que permite que essas ondas viajem longas distâncias (Sanchez, 1987).

8.2.4 Instrumentação para Medição de Vibrações

Diversos tipos de aparelhos para medir vibrações vem sendo criados desde as primeiras investigações sobre vibrações produzidas por desmonte de rochas com explosivos e seus efeitos sobre estruturas. Entre eles destacam-se os vibrógrafos, os amplígrafos, os acelerômetros e os sismógrafos.

O U.S. Bureau of Mines (USBM) iniciou seu programa de pesquisas em 1930. O primeiro trabalho dessa equipe foi o desenvolvimento de um tipo de sismógrafo adequado à tarefa de captar vibrações engendradas durante as operações normais de lavra. Depois de um estudo sobre os aparelhos utilizados na captação de terremotos, os pesquisadores concluíram que seria necessário projetar e construir um sismógrafo que medisse diretamente a amplitude do movimento vibratório. Além disso, seria também necessário projetar e construir mesas vibratórias que, oscilando com frequências e amplitudes conhecidas e reguláveis, servissem para calibrar os sismógrafos. Já naquela época a motivação do estudo eram os casos de litígio entre mineradores e a população, que os acusava de causar danos às suas casas. A primeira publicação, ainda sem apresentar muitos resultados derivados de experimentos, data de novembro de 1936 (Sanchez, 1987).

Atualmente existem vários tipos de sismógrafos, como por exemplo: sismógrafos analógicos, sismógrafos de fita, sismógrafos de soma vetorial, sismógrafos de gráfico de barra e sismógrafos digitais. Esses últimos são muito usados devido à precisão, portabilidade e baixo custo de aquisição e manutenção.

O princípio básico de um sismógrafo consiste em um peso de grande inércia suspenso, atuando como uma massa inerte. Durante a vibração o instrumento se move, mas o peso tende a se manter imóvel. Esse movimento é registrado em forma de sinal elétrico por um transdutor eletromagnético chamado geofone, durante um tempo (t).

O geofone possui o mesmo princípio de um gerador elétrico. Consiste em um magneto (ímã) suspenso por uma mola com apenas um eixo para se deslocar, que funciona como uma massa inercial envolta por uma bobina (figura 41). O receptáculo, acoplado à bobina, é rigidamente fixo à superfície sujeita à vibração, e o magneto é acoplado ao receptáculo da mola. O movimento relativo entre os dois produz uma pequena diferença de potencial entre a bobina e o magneto. Apenas o movimento e a velocidade de cada um são importantes. Essa pequena voltagem (Voltagem Sensível Intrínseca) é proporcional à velocidade do movimento (Instantel, 1994).

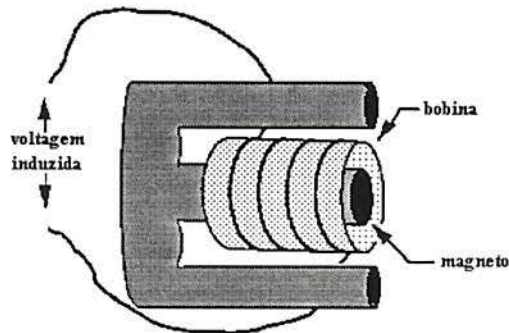


Figura 41. Estrutura funcional de um geofone (Instantel, 1994).

Os sismógrafos triaxiais possuem três geofones, um em cada plano, longitudinal (x), vertical (y) e transversal (z). Voltagens produzidas pelos geofones são proporcionais às velocidades de partícula ao longo das três direções. No sismógrafo Instantel DS-077 por exemplo, as voltagens de cada geofone são medidas 1024 vezes por segundo e convertidas à velocidade de partícula pelo microprocessador interno.

A aceleração por sua vez é obtida dividindo a diferença de velocidade pela diferença de tempo, 1024 vezes por segundo, enquanto que o deslocamento é encontrado multiplicando-se a velocidade pelo tempo.

A frequência é calculada contando quantos períodos ocorrem em um segundo. Porém, deve-se atentar para a ressonância do próprio aparelho. Todo geofone tem uma frequência própria devido à sua inércia para a qual a resposta é anormal. A partir de um certo valor acima dessa frequência ele dará um sinal elétrico proporcional à velocidade de vibração. É a chamada resposta linear ou plana, que pode ser colocada abaixo da frequência natural através de um sistema de compensação. Os fabricantes fornecem a curva de resposta do aparelho, que pode ser checada em laboratório. A tabela 6 mostra o crescimento desse erro para frequências captadas no sismógrafo Instantel DS-077. Frequências acima de 100 Hz nesse sismógrafo, não são plotadas devido ao grande erro intrínseco.

Tabela 6. Erro na leitura de frequência de um sismógrafo Instantel DS-077 (Instantel, 1994).

| Hz | Erro em Hz |
|------|------------|
| 0-30 | - |
| 50 | mais de 5 |
| 70 | mais de 8 |
| 90 | mais de 18 |
| 150 | mais de 50 |

Tendo em vista o espectro de frequências normalmente observado, recomenda-se que o aparelho de medida possa captar com precisão, movimentos a partir de 3 Hz ou mesmo de 2 Hz a 150 Hz para pedreiras e minas de carvão e de 5 Hz a mais de 200 Hz para trabalhos de construção (Sanchez, 1987). Ainda não existe uma norma nacional ou mesmo internacional para frequência e outras características de sismógrafos para acompanhamento de detonações.

Segundo Siskend (1996), a ISEE (International Society of Explosives Engineers) atualmente recomenda aparelhos capazes de registrar frequências de 2 à 250 Hz, capacidade de registrar mais de 1000 amostras por segundo por canal, acelerações maiores que 0,2 g e operar em temperaturas de -12 à +40°C.

Também importante é o correto acoplamento do sismógrafo na rocha. É fundamental que se fixe o sismógrafo na mesma rocha onde ocorre a detonação de modo que se capte a vibração correspondente à energia liberada no momento da detonação sem distorções devido a solo, vegetação rasteira e outros materiais (Konya, 1995).

Existem diversos tipos de acoplamento para sismógrafos, sendo os mais comuns o uso de colas especiais, parafinas, concretagem do aparelho dentro de um furo próximo e fixação por meio de parafuso. Este último oferece ótima fixação e não danifica o aparelho, permitindo fácil instalação (Scott, 1996).

No caso de investigação de danos causados por detonações em estruturas próximas, o sismógrafo é ancorado à uma estrutura como o centro de uma parede por exemplo, de modo que registra a resposta da estrutura perante a vibração e não a vibração na rocha abaixo propriamente dita (Sanchez, 1987).

Infelizmente em condições reais, a vibração das partículas não é transmitida igualmente em todas as direções. Para fins de comparação entre diferentes explosivos, as medidas devem ser feitas sempre no mesmo ponto do terreno de modo que as ondas atravessem sempre as

mesmas estruturas geológicas, como juntas e falhas, sofrendo os mesmos processos de dispersão e amortecimento (Konya, 1995).

A medição das vibrações é feita em três planos como mostra a figura 42, são eles: longitudinal, vertical e transversal.

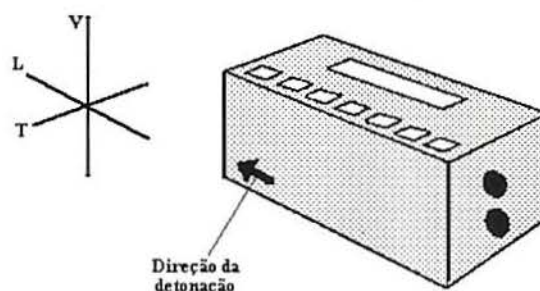


Figura 42. Detalhe dos três planos medidos por um sismógrafo e a correta orientação do eixo principal desse no sentido longitudinal (Instantel, 1994).

As três velocidades de partícula máximas em cada plano, PPV (*peak particle velocity*) são a decomposição vetorial do movimento do terreno. A soma vetorial ou resultante das velocidades de partícula é chamada de PVS (*peak vector sum*), sendo obtida conforme a fórmula 17.

$$PVS = [(L)^2 + (V)^2 + (T)^2]^{1/2} \quad (16)$$

Onde:

L, é a PPV ao longo do plano longitudinal ou radial;

V, é a PPV ao longo do plano vertical;

T, é a PPV ao longo do plano transversal.

Ocorre que não é muito fácil obter a PVS a partir do registro de três componentes, pois os máximos de cada componente ocorrem defasados. Obter a resultante máxima é um árduo trabalho a não ser que o instrumento de medida esteja acoplado a um microprocessador que a obtenha automaticamente. Uma estimativa da velocidade máxima é feita utilizando-se os módulos máximos de cada componente (17).

Segundo Sanchez (1987), essa estimativa trabalha sempre a favor da segurança, pois, na pior das hipóteses, a velocidade resultante estimada será igual à velocidade resultante real. Na quase totalidade dos casos, porém, a velocidade estimada é maior que a real. Estudos estatísticos do U.S. Bureau of Mines de medidas da resultante real e da estimada, mostraram que em média a estimativa excedeu a velocidade real em 24%.

Para se obter uma perfeita descrição da vibração de um maciço rochoso, existe outro método de medida chamado de PVS Real que calcula a PVS em cada instante, utilizando a maior resultante como base de cálculo, não importando em que momento tenha isso ocorrido. Esse método não superestima a vibração do terreno (Sen e Silitonga, 1985).

A norma brasileira NBR 9653 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986), superestima a PVS. Essa norma utiliza os módulos máximos de cada componente independente do momento em que eles ocorrem. Como a norma tem abordagem ambiental, ela naturalmente trabalha a favor da segurança, de modo que, na pior das hipóteses, a velocidade resultante estimada será no máximo igual a real. Para fins de estudo rigoroso do comportamento sísmico de um maciço rochoso frente a uma detonação, esse cálculo não deve ser utilizado (Sanchez, 1987).

8.2.5 Energia Relativa de Vibração

No registro de um fogo, não tem muita importância os diferentes tipos de onda gerados, mas o efeito total do abalo. Todavia, diferentes tipos de onda transmitirão diferentes quantidades de energia, segundo os tipos de terreno atravessados. Propagando-se com velocidades diferentes, os diversos tipos de ondas levarão tempos distintos para atingir pontos à mesma distância; o movimento das partículas afetadas será controlado pela energia que chega a cada instante e, a rigor, contida em cada tipo de onda (Sanchez, 1987).

Alguns trabalhos apontam a velocidade resultante de partícula como o parâmetro do movimento vibratório capaz de melhor representar o potencial de dano de um desmonte de

rocha com explosivos, bem como apontar até que vibração uma estrutura pode suportar sem sofrer danos depois de uma detonação (Persson *et al.*, 1993).

Segundo Cameron *et al.* (1990), vibrações na massa rochosa são produzidas primeiramente pela energia de choque do explosivo. Essa energia de choque é proporcional a energia da vibração do maciço. A energia de vibração pode ser estimada integrando o quadrado da PPV-L ou seja, vibração do plano longitudinal (17).

$$E_v = (1 / 2) \rho C_p \int L^2 dt \quad (17)$$

Onde:

E_v , é a energia de vibração por metro quadrado (J/m^2);

ρ , é a densidade da rocha (kg/m^3);

C_p , é a velocidade da Onda-P (m/s);

L , é a velocidade de partícula no plano longitudinal (mm/s).

Esse é um parâmetro confiável para comparar diferentes explosivos num mesmo maciço rochoso. Como na mesma rocha densidade e velocidade da Onda-P são constantes tem-se:

$$E_v = \int L^2 dt \quad (18)$$

Por outro lado, autores como Sen e Silitonga (1985), utilizam a PVS-Real como critério de dano ao maciço rochoso ou estruturas vizinhas abaladas por essas detonações.

8.3 Medida de VoD

A velocidade de detonação (VoD) de um explosivo é a velocidade na qual a onda de choque se propaga através do explosivo ou coluna de explosivos em um dado diâmetro como já foi definido anteriormente. Essa velocidade varia de explosivo para explosivo dependendo da composição, diâmetro do explosivo, tamanho das partículas dos seus ingredientes, densidade, grau de confinamento, da carga e do tipo de rocha.

A VoD de um explosivo mostra a razão com a qual o explosivo fornece energia ao meio. Um explosivo de baixa VoD fornece energia em pequenas taxas, quando geralmente tem-se a maior parte da energia na forma de pressão de gás. O inverso também é válido, pois quando se tem um explosivo de alta VoD, esse fornece alta energia de choque e brisância gerando pouca pressão de gás. Quanto mais alta então a VoD maior a habilidade do explosivo de quebrar rochas (Cameron *et al.*, 1990).

A medida da VoD indica o quão completa foi a reação de detonação do explosivo. Isto é feito comparando-se o valor medido com o valor teórico da VoD (19) para o explosivo em questão (Bauer *et al.*, 1984).

$$N = (v / v^*)^2 \quad (19)$$

Onde:

N, é a fração volumétrica do explosivo que reagiu;

v, é a velocidade medida;

v*, é a velocidade ideal do explosivo.

Pela medida de VoD também podemos estimar a pressão de detonação (Pd), que consiste na pressão da onda de detonação durante a reação explosiva (20). Essa pressão é responsável pela geração do primeiro pulso de choque ao redor da carga de explosivo. A magnitude desse pulso reflete a energia de choque do explosivo, efeito esse de fundamental importância na quebra das rochas (Cameron, 1996). Uma relação aceita internacionalmente é dada por Persson *et al.* (1993), como sendo:

$$P_d = 0,25 \rho (V_{oD})^2 \quad (20)$$

Onde:

P_d , é a pressão de detonação em Gpa;

ρ , é a densidade do explosivo em kg/ton;

V_{oD} , é a velocidade de detonação em m/s.

A V_{oD} de um explosivo deve ser medida dentro do furo, utilizando-se um iniciador que não destrua os sensores, como por exemplo, Nonel. Existem vários métodos para registrar V_{oD} de um explosivo como os sistemas Slifer, Probe Instanfel, fibras óticas e de cabos paralelos. Esse último funciona com simples pares de cabos paralelos cortados em intervalos regulares, de modo que os curtos-circuitos fechados no instante que a onda de detonação os alcança, são registrados por um relógio de alta velocidade como mostra a figura 43. Tendo-se o tempo e as distâncias, a V_{oD} é facilmente calculada.

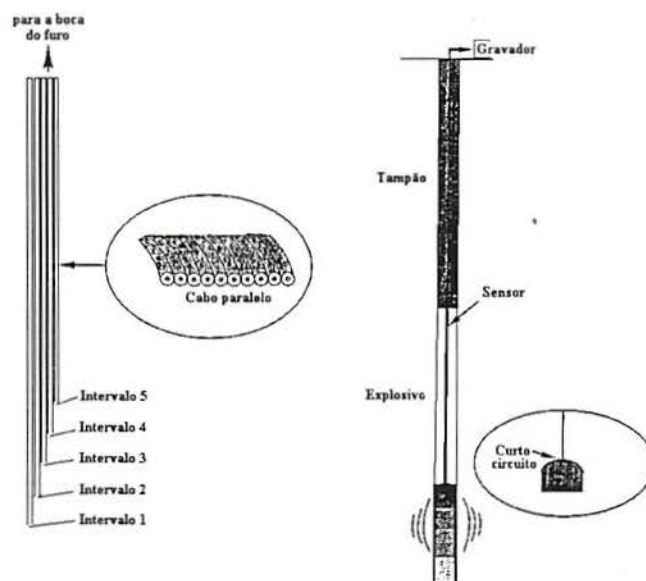


Figura 43. Sistema de medida de V_{oD} por cabos paralelos (Scott, 1996).

8.4 Fragmentação

Observações de fragmentação da rocha na pilha de minério conjuntamente com mapeamento de fraturas no maciço rochoso fornecem informação sobre o poder de quebra do explosivo. Essa quebra é melhor definida em termos de diâmetro médio de partícula (d50). A medida de fragmentação permite, também, que se calibre o modelo de fragmentação que pode ser usado para controlar e prever os efeitos de diferentes geometrias de plano de fogo (Cameron *et al.*, 1990).

A fragmentação é provavelmente o mais fundamental problema do desmonte de rocha com o uso de explosivos. O processo de detonação ainda é pouco compreendido devido a grande dificuldade de se descrever as diversas variáveis do processo. Essas variáveis incluem estrutura e propriedade do maciço rochoso, variabilidade da performance dos explosivos e a seqüência real dos eventos que ocorrem em grandes velocidades (Scott *et al.*, 1995).

Uma regra prática diz que, de modo geral, um explosivo de alta energia de choque é necessário para que uma rocha competente atinja a distribuição granulométrica desejada, por outro lado, um explosivo com alta energia de gás é usado quando a rocha não necessita muita energia de choque para atingir a granulometria requerida. As implicações de uma fragmentação não desejada incluem segundo Scott *et al.* (1995):

- diluição excessiva do minério;
- dificuldades de transporte e manuseio;
- baixa performance da britagem;
- alta variabilidade na qualidade do minério.

Para se medir fragmentação de uma detonação usava-se apenas observação visual, medidas de taxa de produção por hora nos britadores e número de matacões com diâmetro rejeitado na moega, observações essas valiosas, porém de pouca precisão e informação.

Vários métodos foram desenvolvidos para obtenção de melhores resultados, sendo que atualmente se usa análise estatística por peneiramento de toda a pilha e principalmente análise digital de fotografias. O peneiramento de larga escala é um processo extremamente caro e dispendioso.

A técnica de processamento digital de imagens de uma pilha é atualmente a melhor técnica em uso, pois além de mais rápida, é mais barata e não atrapalha o ciclo produtivo (Paley *et al.*, 1995). Para que a amostra seja representativa, é necessário que um mínimo de

20 fotos por pilha amostrada sejam tomadas. Essas fotos são feitas durante a remoção da pilha, sempre do mesmo ponto. Cada foto captura entre 150 e 250 fragmentos. Deve-se usar um disco ou outro marcador com dimensão conhecida para que posteriormente se possa saber a escala da fotografia (Scott, 1996). Como exemplo de sistemas usados, existem os australianos da JKMRC e SIROFRAG além do norte-americano WIPFRAG (figura 44).

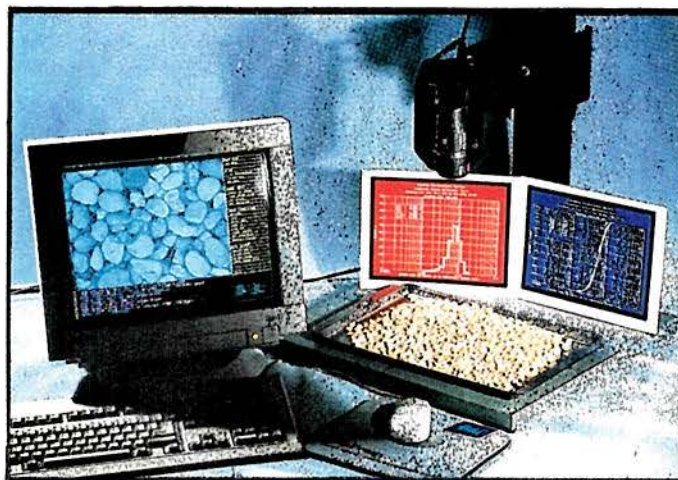


Figura 44. Sistema Wipfrag (Topec inc.).

Todos esses sistemas de foto-análise medem o tamanho dos blocos, a sua uniformidade, quantidade de matacos e finos cujas dimensões são determinadas previamente e os dados tratados geralmente pela equação de Rosin-Ramler. As imagens são capturadas de fotografias, filmagens ou diretamente “escaneadas” da pilha como no sistema SIROFRAG. Posteriormente, são processadas por *softwares* que reconhecem contornos dos blocos e realizam posterior análise estatística fornecendo gráficos de distribuição de tamanho e histogramas.

8.5 Pressão de Gás

A detonação de um explosivo numa rocha promove dois distintos mecanismos. O primeiro, uma onda de choque que se propaga pela rocha. O segundo, alta pressão de gás gerada na explosão que, além de empurrar a bancada, penetra nas discontinuidades, quebrando mais o material (Scott, 1996).

A penetração de gases na rocha tem grande influência na quebra e movimentação do afastamento, podendo ser monitorada de diversas formas. Uma dessas, consiste em preparar um furo paralelo e adjacente à um furo carregado, com um pequeno tubo de PVC conectado à um sensor de pressão de gás (piezelétrico). As leituras são registradas e gravadas em um gravador digital (figura 45).

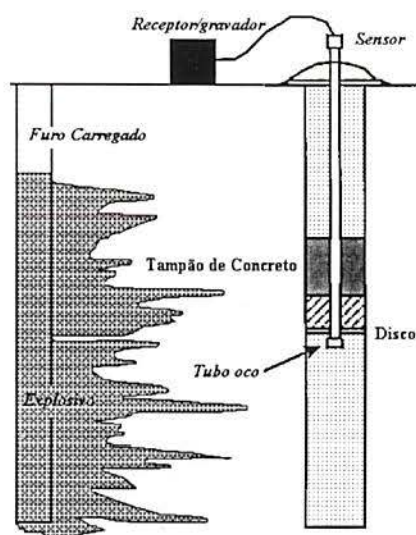


Figura 45. Instrumentação para monitorar pressão de gás (Cameron et al., 1990).

8.6 Variabilidade no Tempo dos Retardos

Esse problema afeta a detonação de grandes quantidades de explosivos, quando se necessita usar muitos retardos. Medidas feitas por Cameron *et al.* (1990), obtiveram espalhamentos do tempo dos retardos de até 14 % em peças de 65 ms na Austrália.

A figura 46 mostra esquematicamente o funcionamento de um sistema de testes por amostragem para controle de espalhamento do tempo de retardos.

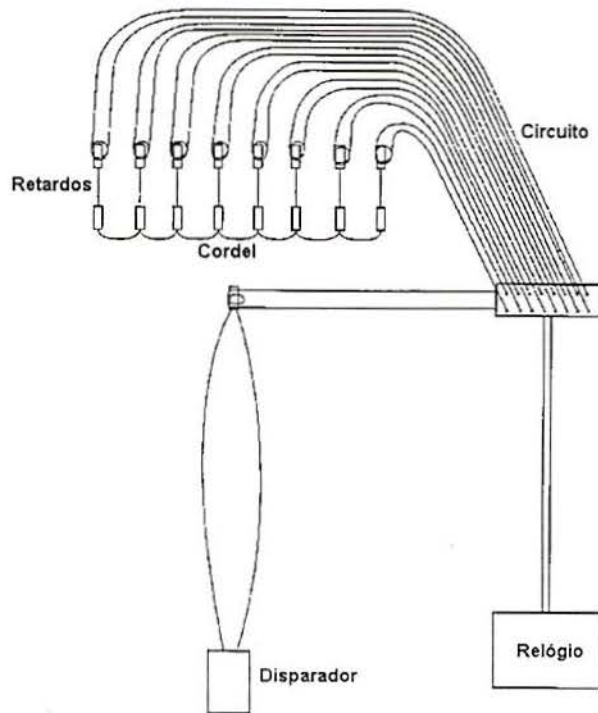


Figura 46. Teste de espalhamento dos tempos de retardos (Cameron et al., 1990).

A medida dos tempos de retardo fornece uma indicação da precisão desses componentes. Essa precisão é expressa como o desvio padrão entre os tempos fornecidos (ideal) e medido. As medidas são feitas usando-se uma combinação simples de circuitos elétricos, gravadores e relógios de alta precisão. A precisão da medida é função do tempo de retardo e da taxa de amostragem do gravador (Cameron et al., 1990).

Conhecendo-se esse dado pode-se prever muitos problemas ao se planejar um plano de fogo, como por exemplo, no caso de desmonte de grande quantidade de explosivos. Quanto maior o número de linhas e furos de uma malha, mais difícil o planejamento e a execução do desmonte. Os furos devem detonar de modo que sempre tenham uma face livre suficiente para lançar e armazenar o material desmontado. Essa face livre pode ser temporária, ou seja, o espaço de tempo de milissegundos entre duas linhas que estão sendo iniciadas. Se os retardos não fornecerem o tempo suficiente para criar um afastamento “dinâmico” diversos problemas podem ocorrer como pouca fragmentação, ultralancamento, perda de furos e vibrações.

9 Descrição Geral e Metodologia Experimental

Considerando-se as diferentes técnicas de monitoramento de desmontes, selecionou-se o estudo das vibrações como a mais adequada às necessidades desse trabalho. Essa técnica, de acordo com todos os trabalhos pesquisados, apresenta requisitos teóricos suficientes para embasar o estudo.

Segundo Cameron *et al.* (1990), a medição da vibração causada por diferentes explosivos em um mesmo maciço rochoso, permite comparar o potencial de quebra (fragmentação) que esses explosivos são capazes de produzir. Somando-se a isso é importante ressaltar a disponibilidade, facilidade e baixo custo de utilização de sismógrafos portáteis, como o que foi utilizado nesse trabalho.

Diversas detonações foram monitoradas durante um período de seis meses em uma pedreira de calcário. Junto do acompanhamento sísmico foram feitas constantes observações visuais simples como índice de “matacos” obtidos em cada detonação. Essa observação visual sobre o índice de “matacos” foi adotada apenas como uma informação adicional, devido a sua simplicidade e popularidade no meio mineiro e, principalmente por esse tipo de avaliação estar diretamente relacionada com a detonação secundária e conseqüente eficiência da operação de desmonte. Quanto maior for a necessidade de detonação secundária, maior é o custo e menor é a eficiência da operação de desmonte de um maciço rochoso (Olofsson, 1990).

O sismógrafo utilizado foi acoplado sempre no mesmo local por intermédio de um parafuso para melhor fixação. Foi preparada uma estação de coleta de dados fixa com concretagem de parafuso em um furo de martetele pneumático. Com esse procedimento, as vibrações captadas poderiam atravessar sempre as mesmas estruturas geológicas, fornecendo um banco de dados o mais representativo possível.

9.1 Localização da Área

O local onde foram realizados os testes situa-se na Pedreira Cerro do Cabelo da Mineradora Calcário Andreazza Ltda. em Vila Nova do Sul, RS, distando 300 Km à oeste de Porto Alegre, pela BR-290. A figura 47 apresenta a planta de localização da cidade de Vila Nova do Sul.

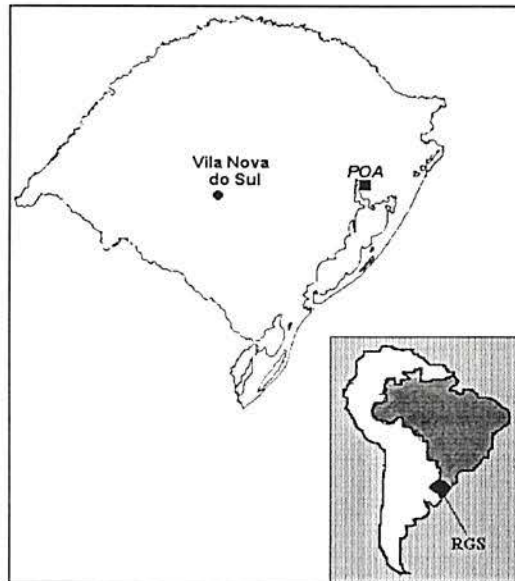


Figura 47. Planta de localização da cidade de Vila Nova do Sul.

9.2 Caracterização do Maciço Rochoso

O minério explotado é um mármore calcítico, apresentando-se na forma de lentes, com colorações em tons acinzentados, encaixados em rochas gnáissicas. A sua textura geralmente é sacaróide, apresentando boa cristalização. A lente principal apresenta forma tabular com atitude N75-80E e largura média 30 m.

O mármore apresenta pequeno número de juntas (1 a 2 por metro linear) variando de 1 a 3 m de comprimento por 1 a 230 mm de abertura e preenchidas pela rocha encaixante. Macroscopicamente os mármorees são de granulação média a grosseira, esbranquiçados, apresentando localmente cristais de calcita com 10 cm, maclados, com brilho vítreo.

As rochas ocorrentes na área do empreendimento estão representadas principalmente por litótipos gnáissicos, estruturados num flanco de uma antiforme que mergulha com uma inclinação média de 35°. São rochas de colorações acinzentadas, alternando bandas claras e

escuras. Podem apresentar coloração preta, sendo nesse caso fortemente micáceas. Macroscopicamente identificam-se cristais com tamanhos médios de feldspato, biotita e quartzo. A foliação gnáissica apresenta as seguintes medidas: (N82W; 22SW), (N70E; 30SE), (N80W; 45SW), (N85E; 32SE), (N70W, 25SW), (N75W; 23SW), (N72W; 41SW) e (N60E; 23SE). Pequenas dobras ocorrem, apresentando eixos com atitudes médias de (60-65°; S25-35SE). Em termos de fraturamentos dominam, aqueles orientados segundo os padrões N20-30E, seguindo-se os de direção N50E e, subordinadamente N50W e E-W. A lente marmorizada, possui contato concordante com as rochas gnáissicas encaixantes.

9.4 Desmonte

A antiga operação de desmonte na Pedreira Cerro do Cabelo, era feita apenas com dinamite. Cabe lembrar que dinamite é um explosivo que tem grande poder de arranque, porém, tem o maior custo por quilograma (R\$ 3,00 aproximadamente). A perfuração era realizada mediante o uso de martetele pneumático, com diâmetro de furação de 25 mm (1”). Os furos eram preenchidos com seis ou sete cartuchos de dinamite e iniciados por intermédio de cordel detonante, espoleta e estopim. A profundidade dos furos observada era 3,20 m. O afastamento e o espaçamento normalmente eram 1 x 1 m, feitos a critério do marteteleiro em pequenas bancadas irregulares. A operação apresentava pequena eficiência, produtividade reduzida, ultralançamento e altíssimo custo por metro cúbico (aproximadamente R\$ 2,00).

A partir da identificação desses problemas, foram feitos estudos e finalmente, implementado um novo programa de desmonte que alterou completamente o perfil dessa operação na pedreira. As mudanças requereram um novo plano de fogo, a aquisição de uma perfuratriz para permitir furação em diâmetros maiores do que 25 mm, a introdução do ANFO e, a padronização dos procedimentos de carregamento e preparação dos explosivos visando o aumento da produtividade e redução dos custos dos demontes.

De acordo com o novo plano de fogo, as rochas são desmontadas e carregadas para o beneficiamento pelo clássico método de desmonte por bancadas. São utilizadas quatro bancadas com alturas médias de 10 m, sendo duas de descobertura e duas de minério (figura 48). A largura da frente é de aproximadamente 50 m.

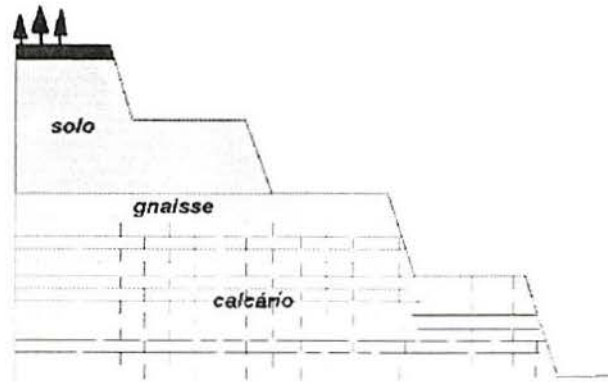


Figura 48. Perfil das bancadas utilizadas na Pedreira Cerro do Cabelo.

A descobertura é retirada com auxílio de escavadeira e caminhões com capacidade entre 8 e 15 ton, enquanto que a rocha abaixo é detonada, selecionada e enviada para a planta de britagem e moagem.

O equipamento de perfuração consiste em uma perfuratriz Gardner-Denver ATD3100, martelo PR123-17 e compressor Ingersoll Rand de 600 pcm (283,8 l/s). O capítulo 10 descreve com maior detalhamento o plano de fogo utilizado.

9.4 Equipamento para Monitoramento

As vibrações produzidas pelas detonações constituíram o parâmetro escolhido para acompanhar e comparar a performance dos explosivos principalmente pela simplicidade e confiabilidade das medições.

O sismógrafo utilizado, por ser um equipamento portátil, podia ser rapidamente instalado, alguns minutos antes da detonação sem prejudicar a rotina de trabalho normal da pedreira. O equipamento utilizado foi um sismógrafo digital Instantel Minimate DS-077 (figura 49). É um aparelho pequeno (8,1cm x 9,2cm x 16 cm), pesando em torno de 1,4 Kg. Pode gravar até 40 eventos antes da bateria se descarregar. As informações são guardadas numa memória interna, sendo posteriormente transferidas pelo *software* Instantel DS467 para um microcomputador IBM-PC, onde são processadas por *software* de análise Instantel DS567 e/ou Blastware III.



Figura 49. Sismógrafo Instantel DS-077.

A tabela 7 apresenta as especificações técnicas do sismógrafo usado no acompanhamento das detonações.

Tabela 7. Especificações técnicas do sismógrafo Instantel DS-077.

| Sísmica | |
|-----------------------|--|
| Faixa de Operação | 0 à 127 mm; |
| Disparador | 0,254 à 127 mm/s; |
| Análise de frequência | Frequência de pico, mais análises USBM, OSMRE e DIN 4150; |
| Precisão | Calibrado para 1% pela recomendação de Bruel & Kjaer em 15 Hz; |
| Ruído | |
| Faixa de Operação: | 2 a 250 Pa (100 a 142 dB) |
| Disparador | 4 a 250 Pa (106 a 142 dB) |
| Precisão | Calibrado para 0,4 dB recomendação de Bruel & Kjaer em 30 Hz; |
| Resposta | 2 a 250 Hz todos os canais(-3dB), |
| Geral | |
| Taxa de amostragem | 1024 amostras por canal por segundo; |
| Canais | 4; longitudinal, vertical, transversal e som; |
| Modos de gravação | Manual, solo, contínuo, automático; |
| Tempo de gravação | até 40 eventos de 1 seg; |
| Temperaturas extremas | Opera entre -20 e +60 graus C. |

9.5 Metodologia Experimental

O procedimento experimental para acompanhamento das detonações contou com as seguintes etapas:

9.5.1 Preparação da Bancada e Furação

Os testes foram realizados sempre na mesma bancada, cuja altura média era de 10m. O afastamento e o espaçamento foram rigorosamente marcados antes da furação e posteriormente conferidos na bancada em 2 x 3 m. A inclinação dos furos foi de aproximadamente 10 ° ou 5 : 1, subfuração de 0,5 m e diâmetro de furação 64 mm (2 1/2 ”). Cuidou-se para que o tampão ficasse em torno de 2 metros. As cargas iniciadoras e reforçadores utilizados foram emulsão BELMEX HD e BELMEX THOR AD, ou IBEGEL, cartuchos de 2” (51 mm). A tabela 8 mostra as principais características desses explosivos.

Tabela 8. Características técnicas das emulsões. (*)

| EMULSÃO | DENSIDADE g/cm ³ | VoD m/s | VOLUME GASOSO l/kg | FABRICANTE |
|----------------|--------------------------------|------------|-----------------------|------------|
| BELMEX HD | 1,17-1,20 | 4200 | 863 | Imbel |
| BELMEX THOR AD | 1,15-1,18 | 3500 | 864 | Imbel |
| IBEGEL | 1,15 | 4800 | 910 | IBQ |

* FONTE: Catálogos dos Fabricantes.

O principal explosivo utilizado foi o ANFO fabricado no próprio local e os ANFOs industriais NITRON e MAGNUM SE. Os acessórios de detonação foram retardos de 20 ms, cordel detonante NP5 e NP10, espoletas e estopim. Apesar do cordel detonante não ser o iniciador ideal para ANFO, esse acessório foi utilizado em todos os testes por ser o equipamento ainda mais empregado na grande maioria das mineradoras do país. A figura 50 apresenta um diagrama de uma bancada perfurada e a locação espacial dos furos.

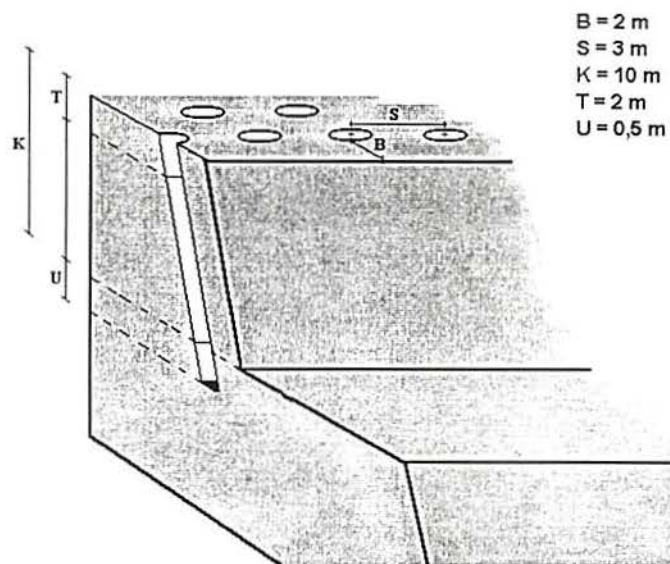


Figura 50. Características da bancada.

As características da furação são dadas pelos parâmetros indicados na tabela 9:

Tabela 9. Parâmetros da furação.

| | | |
|---------------|-------------------------|----------------------|
| \varnothing | Diâmetro dos furos | $2^{1/2}$ " ou 64 mm |
| | Inclinação dos furos | 5:1 ou 10° |
| H | Profundidade do furo | 9 à 12m |
| K | Altura da bancada | 8,5 à 11,5m |
| B | Afastamento | 2m |
| S | Espaçamento entre furos | 3m |
| U | Subfuração | 0,5m |
| T | Tampão | 2m |

O pacote de rochas detonado não apresentava umidade ou água em quantidade suficiente para comprometer a performance do ANFO.

9.5.2 Carregamento dos furos

O padrão de carregamento variou de 15 a 21 kg de ANFO, 1 carga de 2 x 24" de emulsão como carga iniciadora (*primer*) e uma ou duas cargas no meio da coluna como reforçador, segundo ilustrado na figura 51.

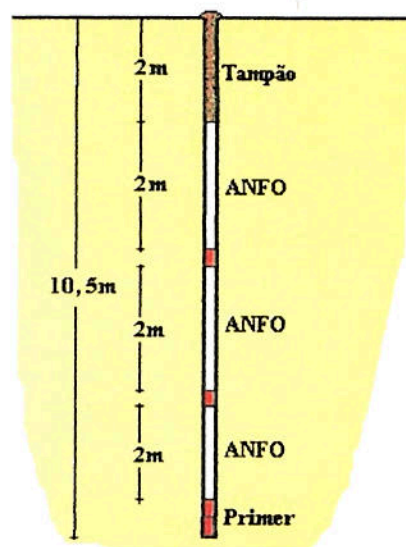


Figura 51 Perfil padrão dos furos.

O padrão de malha usado foi sempre 2 m de afastamento e 3 m de espaçamento (2 x 3), duas linhas, estagiadas, iniciadas com cordel detonante e separadas por retardo de 20 ms, segundo a figura 52.

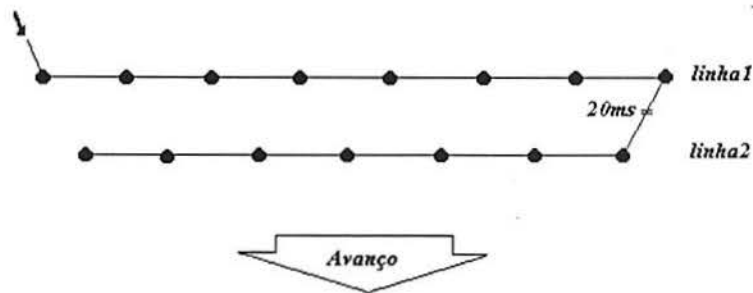


Figura 52. Padrão da malha utilizada nos testes.

9.5.3 Características dos Explosivos Tipo ANFO

O ANFO preparado na pedreira foi comparado com outros tipos de ANFOs produzidos no país. As características técnicas dos ANFOs industriais, são apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 Características técnicas dos explosivos (Fonte: catálogos dos fabricantes).

| ANFO | Densidade | Velocidade de detonação | Volume gasoso | Aditivos | Fabricante |
|-----------|-------------------|-------------------------|---------------|----------|-------------------------------------|
| | g/cm ³ | m/s | l/kg | | |
| NITRON | 0,6 | 2200* | 988 | | IBQ - Ireco Britanite Química Ltda. |
| MAGNUM SE | 0,63 | 3150** | 1080 | Alumínio | Explosivos Magnum Ltda. |

* Velocidade em tubo confinado de 25 mm.

** Velocidade em tubo confinado de 50 mm.

O ANFO preparado pela empresa (figura 53), é feito simplesmente misturando NA e óleo diesel em uma caixa metálica de 2 x 3 m com auxílio de uma pá de madeira, a uma razão de 94,4% de nitrato de amônio para 5,6% de óleo, considerada a melhor relação segundo Sen (1995).



Figura 53. Preparação do ANFO.

A mistura é colocada em baldes que depois são vertidos nos furos, sendo o carregamento feito de acordo com o plano de fogo (figura 54).



Figura 54. Carregamento dos furos com ANFO.

O nitrato de amônio utilizado (figura 55) foi fabricado pela Hydro Agri Sluiskil da Holanda para uso agrícola. Segundo certificado de garantia do lote utilizado, apresentava um total de nitrogênio de 33,5% e umidade máxima de 1%. A análise granulométrica do nitrato de amônio é apresentada na tabela 11. Nota-se que o diâmetro de partícula dominante dos grânulos é 2,83 mm, um valor considerado desfavorável segundo Sen (1995), que aconselha a utilização de diâmetros de grânulo de até 1,2 mm no máximo. O nitrato de amônio utilizado apresenta uma densidade de 0,9 g/cm³.

Infelizmente não foi possível determinar VoD dentro dos furos, volume gasoso, ou fragmentação da pilha de desmontado, que acrescentariam um maior número de informações aos testes. Porém, a medida da PPV é um importante recurso na investigação da energia transferida a massa rochosa pelo explosivo. A energia das vibrações é proporcional a energia de choque do explosivo. Uma comparação entre as características “vibratórias” de diferentes explosivos representa a comparação entre o potencial de fragmentação desses explosivos (Cameron *et al.*, 1990).



Figura 55. Grânulos do nitrato de amônio.

Tabela 11. Análise granulométrica do nitrato de amônio amostrado.

| Abertura (mm) | Retido (%) | Acumulado (%) |
|---------------|------------|---------------|
| 4,00 | 1,80 | - |
| 3,36 | 3,90 | 5,70 |
| 2,83 | 63,20 | 68,90 |
| 2,00 | 14,50 | 83,40 |
| 1,68 | 8,70 | 92,10 |
| 1,00 | 6,00 | 98,10 |
| 0,595 | 1,20 | 99,30 |
| Fundo | 0,30 | 99,60 |

9.5.4 Estação de Coleta de Dados

Foi criada uma base fixa onde se instalou o sismógrafo. Esta base foi localizada num ponto em frente a bancada utilizada nos testes. A figura 56 mostra o local de ancoragem do sismógrafo à uma distância aproximada de 90 m da primeira detonação.

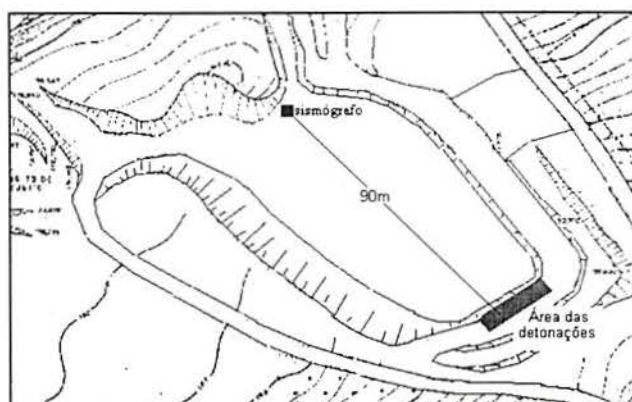


Figura 56. Croqui de localização do sismógrafo dentro da pedreira.

O sismógrafo foi ancorado no calcário em um furo de 1m de profundidade por 25 mm (1") de diâmetro. Uma haste de aço com rosca-sem-fim 3/8" e porca (figuras 57 e 58), foi firmemente concretada no furo. Desse modo se reduz a um mínimo a chance de anomalias na vibração captada pelo aparelho, resultantes de distorções devido a solo, vegetação ou outros materiais (Konya, 1995).



Figura 57. Sistema de fixação utilizado para o sismógrafo.

É importante que se compreenda que a vibração medida representa a reação tanto do transdutor (sismógrafo) como do seu acoplamento perante as vibrações do maciço rochoso. Para que as leituras sísmicas sejam válidas, é fundamental que o sensor esteja fixo de tal forma que ele faça parte da estrutura que se quer monitorar, captando as informações com a mínima distorção possível. O melhor método de acoplamento de um transdutor em um maciço rochoso consiste no uso de um parafuso previamente fixado na rocha. O acoplamento com parafuso é utilizado principalmente para monitoramento permanente em bases fixas (Scott, 1996).

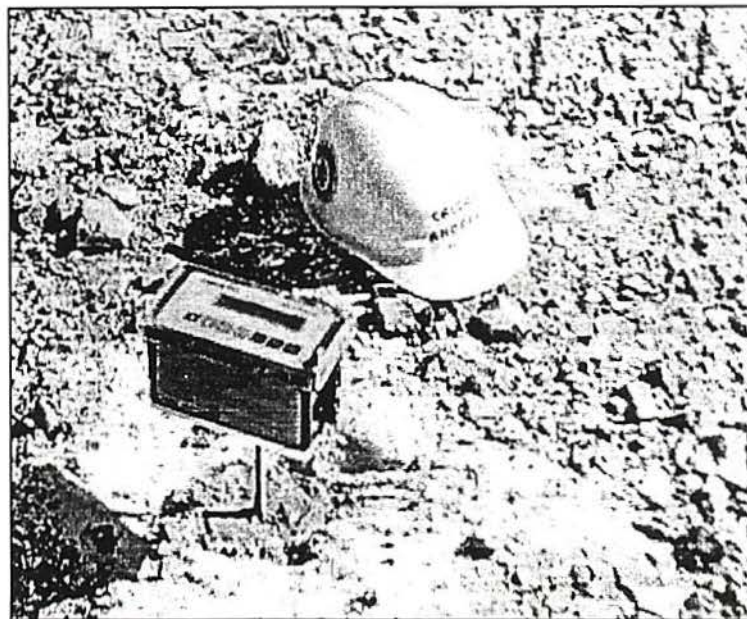


Figura 58. Detalhe do acoplamento do sismógrafo na rocha.

10 Análise dos Dados

O programa de testes realizado na Pedreira Cerro do Cabelo permitiu a comparação do ANFO produzido pela empresa e os ANFOs industrializados. Com o objetivo de estudar a variabilidade na performance dos explosivos, foram monitoradas oito detonações, separadas em quatro pares de testes com características similares. É praticamente impossível se repetir as mesmas condições em um maciço rochoso, porém, ao se utilizar explosivos de mesma formulação, no mesmo local e nas mesmas quantidades pode-se ter uma medida confiável da performance dos mesmos (Scott e Cameron, 1988).

Os explosivos utilizados foram o ANFO fabricado *in situ* e os ANFOs relacionados na tabela 10 que convencionou-se chamar nesse trabalho de ANFOs industriais. Para fins de comparação, o trabalho foi baseado na capacidade do explosivo de perturbar (vibrar) a rocha segundo dois critérios distintos. O primeiro é baseado em testes similares realizados por Djordjevic *et al.*, (1990), e, Cameron *et al.*, (1990) que utilizam o critério de velocidade máxima de partícula no plano longitudinal ou PPV-L como medida de energia transferida pela detonação. O segundo é baseado na resultante de velocidade de partícula real máxima ou PVS-Real segundo Sen e Silitonga (1985) e Sanchez (1987).

O parâmetro desmonte secundário ou “índice de matacos” foi utilizado como uma informação adicional para medida da qualidade do desmonte. Os fragmentos maiores de 1,5 m na sua maior dimensão foram registrados e classificados como “matacos” durante o carregamento da pilha de material desmontado. Foi determinado previamente que se a detonação produzisse até 10 desses fragmentos, receberia “GRAU 1”. Para os desmontes que produzissem entre 11 e 20 “matacos” a classificação seria “GRAU 2”. Essa classificação serviu para determinar por faixas a qualidade do desmonte em termos de eficiência na obtenção de material na granulometria desejada.

Secundariamente foi observado que não houve nenhuma dificuldade tanto no manuseio (transporte e acondicionamento no paiol) como na preparação (mistura e carregamento dos furos) de ANFO na pedreira. O único inconveniente do ANFO e dos ANFOs industriais é a facilidade com que o nitrato de amônio se dissolve devido à umidade do ar, sendo extremamente necessário armazená-los em um paiol seco.

A tabela 12 apresenta as PPVs do banco de dados obtido nos relatórios sísmicos (Anexo).

Tabela 12. Banco de dados do acompanhamento sismográfico.

| Nome do Arquivo | Data | PPV-L (mm/s) | PVS-R (mm/s) | Tipo de nitrato de amônio do ANFO |
|-----------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|
| E3975XCG.P90 | 14/01/1997 | 2,54 | 9,83 | Uso agrícola |
| E3975XCG.0E0 | 22/01/1997 | 5,33 | 8,78 | Comercial |
| E3975XCM.560 | 14/03/1997 | 15,70 | 22,30 | Uso agrícola |
| E3975MK6.750 | 12/03/1997 | 22,40 | 29,00 | Comercial |
| E3975XDO.BR0 | 08/04/1997 | 21,10 | 36,50 | Uso agrícola |
| E3975XCZ.PV0 | 09/05/1997 | 26,40 | 49,90 | Comercial |
| E3975XCM.DL0 | 22/05/1997 | 3,56 | 18,60 | Uso agrícola |
| E3975INH.UY0 | 27/06/1997 | 6,10 | 19,50 | Comercial |

10.1 Teste 1

Esse teste compreendeu duas detonações. Foram realizados em dias ensolarados, com temperaturas em torno de 25°C. A primeira bancada no dia 14 de janeiro de 1997 se encontrava a 87 m da estação de coleta de dados, e a segunda, no dia 22 de janeiro, se encontrava afastada 91 m do sismógrafo.

O sismógrafo foi preparado para operar no modo *single-shot*, disparando a partir de 5 mm/s de velocidade de vibração de partículas (disparador ou *trigger*) e gravando por 2 segundos.

Cuidou-se para que os furos fossem rigorosamente carregados com quantidades de explosivos iguais, porém, principalmente, devido à diferenças de densidades entre os explosivos testados e diferenças espaciais na rocha, como presença de fraturamento em maior ou menor escala, existe pequena variação nessas quantidades. Como o ANFO é carregado a granel e não ensacado é difícil obter um controle perfeito do carregamento e respeitar a geometria do fogo. Para que se consiga o tamponamento de 2 metros, dependendo das condições geomecânicas no entorno do furo e da viscosidade do explosivo, o material ocupará um maior volume se preencher um maior número de fraturas.

A tabela 13 apresenta os parâmetros principais e os resultados do primeiro par de detonações.

Tabela 13. Parâmetros das detonações e resultados do teste 1.

| | Explosivo | Unidade | ANFO | NITRON |
|--------------|--|-------------------|----------------|----------------|
| | Arquivo | | E3975XCG,P90 | E3975XCG,OEO |
| | Densidade | g/cm ³ | 0,9 | 0,6 |
| | Cordel detonante | | NP5 | NP5 |
| Ø | Diâmetro dos furos | | 2 1/2" ou 64mm | 2 1/2" ou 64mm |
| | Inclinação dos furos | | 5:1 ou 10° | 5:1 ou 10° |
| | Número de furos | | 9 | 9 |
| H | Profundidade do furo | m | 10,00 | 10,00 |
| K | Altura da bancada | m | 10,50 | 10,50 |
| B | Afastamento | m | 2,00 | 2,00 |
| S | Espaçamento entre furos | m | 3,00 | 3,00 |
| U | Subfuração | m | 0,50 | 0,50 |
| Tp | Tampão | m | 2,00 | 2,00 |
| | Carga básica por furo | kg | 16,00 | 15,10 |
| | Carga de emulsão IBEGEL | kg | 4,20 | 4,20 |
| | Carga total por furo | kg | 20,2 | 19,3 |
| | Carga total medida por furo | kg | 21,00 | 23,5 |
| | Carga total de explosivo | kg | 226,80 | 249,30 |
| Rc | Razão de carga | kg/m ³ | 0,472 | 0,519 |
| Fe | Furação específica | m/ m ³ | 0,19 | 0,19 |
| V | Volume desmontado | m ³ | 480 | 480 |
| PPV-L | <i>Peak particle velocity longitudinal</i> | mm/s | 2,54 | 5,33 |
| PVS-R | <i>Peak vector sum real</i> | mm/s | 9,83 | 8,78 |
| | Blocos > 1,5m | | 11 | 5 |
| | Índice de desmonte secundário | GRAU | 2 | 1 |

A carga total medida por furo foi de 21 kg no primeiro teste com ANFO e 23,5 no segundo teste com NITRON.

Diversos fatores podem influenciar a consistência dos resultados desse tipo de monitoramento de desmonte, segundo Scott e Cameron (1988), são eles:

- Precisão da furação;
- Controle da quantidade de carga iniciadora (potência do *primer*);
- Controle de tamponamento;
- Consistência da mistura;
- Quantidade de carga nos furos;
- Precisão dos retardos.

O fato de não se conseguir exatamente a mesma carga em cada par de testes deve-se provavelmente ao fato de que o maciço rochoso dificilmente é homogêneo e quase sempre varia espacialmente (Scott, 1996).

Em determinadas regiões do maciço rochoso se encontram maior ou menor número de descontinuidades, logo pode ocorrer de um explosivo encontrar maior número de fraturas, por exemplo, ocupando um maior volume dentro do furo. Os furos do desmorte com Nitron necessitaram maior quantidade de explosivo, provavelmente devido ao aumento do fraturamento.

Sísmicamente o ANFO obteve uma performance inferior ao Nitron. Segundo o critério de PPV-L, o sismógrafo registrou 2,54 mm/s contra 5,33 mm/s registrados para o Nitron. Pelo critério de PVS-R, o ANFO obteve performance (vibração) semelhante ao Nitron (9,83 contra 8,78 mm/s do Nitron).

Blocos maiores que 1,5 m produzidos na detonação foram observados, constatando-se que no aspecto de menor detonação secundária, o Nitron obteve melhores resultados. Entretanto, mesmo com capacidade superior de vibrar ou fragmentar o maciço rochoso e qualidade superior no que se refere a necessidade de detonação secundária, o custo por metro cúbico ao se utilizar o ANFO é inferior. O detalhamento dos aspectos econômicos do uso do ANFO é feito no capítulo 11.

10.2 Teste 2

Esse teste compreendeu duas detonações realizadas em dias ensolarados, com temperaturas de 27°C e de 31°C nos dias 14 e 12 de março de 1997, respectivamente. A estação de coleta de dados fixa se encontrava aproximadamente a 95 m no dia 12 e 100 m no dia 14.

O aparelho foi preparado para operar no modo *single-shot*, disparando a partir de 7 mm/s (14/03/97) e 20 mm/s (12/03/97) de velocidade de vibração de partículas (*trigger*), gravando por 2 segundos cada evento. A tabela 14 apresenta os parâmetros principais do segundo teste e os resultados obtidos.

Tabela 14. Parâmetros das detonações e resultados do teste 2.

| | Explosivo | Unidade | ANFO | NITRON |
|-------|--|-------------------|----------------|----------------|
| | Arquivo | | E3975XCM.560 | E3975MK6.750 |
| | Densidade | g/cm ³ | 0,9 | 0,6 |
| | Cordel detonante | | NP5 | NP5 |
| Ø | Diâmetro dos furos | | 2 1/2" ou 64mm | 2 1/2" ou 64mm |
| | Inclinação dos furos | | 5:1 ou 10° | 5:1 ou 10° |
| | Número de furos | | 19 | 19 |
| H | Profundidade do furo | m | 12,00 | 12,00 |
| K | Altura da bancada | m | 11,50 | 11,50 |
| B | Afastamento | m | 2,00 | 2,00 |
| S | Espaçamento entre furos | m | 3,00 | 3,00 |
| U | Subfuração | m | 0,50 | 0,50 |
| Tp | Tampão | m | 2,00 | 2,00 |
| | Carga básica por furo | kg | 19,45 | 15,10 |
| | Carga de emulsão IBEGEL | kg | 4,20 | 4,20 |
| | Carga total por furo | kg | 23,65 | 22,10 |
| | Carga total medida por furo | kg | 26,50 | 23,80 |
| | Carga total de explosivo | kg | 583,30 | 532,00 |
| Rc | Razão de carga | kg/m ³ | 0,450 | 0,410 |
| Fe | Furação específica | m/ m ³ | 0,17 | 0,17 |
| V | Volume desmontado | m ³ | 1296 | 1296 |
| PPV-L | <i>Peak particle velocity longitudinal</i> | mm/s | 15,70 | 22,40 |
| PVS-R | <i>Peak vector sum real</i> | mm/s | 22,30 | 29,00 |
| | Blocos > 1,5m | | 16 | 13 |
| | Índice de desmonte secundário | GRAU | 2 | 2 |

Nota-se que o ANFO apresentou PPV-L de 15,70 mm/s e PVS-R de 22,30 mm/s, ligeiramente inferiores ao Nitron com PPV-L de 22,4 mm/s e PVS-R 29,00 mm/s respectivamente. Ambos os critérios de avaliação de performance de explosivos indicaram que o Nitron foi ligeiramente superior no tocante a capacidade de vibrar (fragmentar) o maciço rochoso.

A detonação com ANFO resultou em 16 blocos maiores que 1,5 metro enquanto que com o NITRON esses blocos foram 13. Na pratica esses resultados podem ser considerados como similares. Na pedreira estudada, o trabalho e tempo consumidos na detonação secundária para uma diferença de três blocos, é praticamente o mesmo. As detonações foram classificadas na mesma faixa, recebendo GRAU 2.

10.3 Teste 3

As duas detonações do teste 3 foram realizadas em dias ensolarados, com temperaturas de 19°C e de 25°C, nos dias 8 de abril e 9 de maio de 1997, respectivamente. A estação se encontrava a 104 m no primeiro desmonte e 108 m no dia 9 de maio.

O aparelho foi preparado para operar no modo *single-shot*, disparando a partir de 7 mm/s de velocidade de vibração de partículas (*trigger*), gravando por 2 segundos cada evento. A tabela 15 apresenta os parâmetros principais do terceiro teste.

Tabela 15. Parâmetros das detonações e resultados do teste 3.

| | Explosivo | Unidade | ANFO | NITRON |
|-------|--|-------------------|----------------|----------------|
| | Arquivo | | E3975XDO.BRO | E3975XCZ.PVO |
| | Densidade | g/cm ³ | 0,9 | 0,6 |
| | Cordel detonante | | NP5 | NP5 |
| Ø | Diâmetro dos furos | | 2 1/2" ou 64mm | 2 1/2" ou 64mm |
| | Inclinação dos furos | | 5:1 ou 10° | 5:1 ou 10° |
| | Número de furos | | 21 | 21 |
| H | Profundidade do furo | m | 12,00 | 12,00 |
| K | Altura da bancada | m | 11,50 | 11,50 |
| B | Afastamento | m | 2,00 | 2,00 |
| S | Espaçamento entre furos | m | 3,00 | 3,00 |
| U | Subfuração | m | 0,50 | 0,50 |
| Tp | Tampão | m | 2,00 | 2,00 |
| | Carga básica por furo | kg | 20,00 | 20,60 |
| | Carga de emulsão IBEGEL | kg | 4,20 | 4,20 |
| | Carga total por furo | kg | 24,20 | 24,80 |
| | Carga total medida por furo | kg | 26,10 | 26,70 |
| | Carga total de explosivo | kg | 636,30 | 648,90 |
| Rc | Razão de carga | kg/m ³ | 0,440 | 0,450 |
| Fe | Furação específica | m/ m ³ | 0,25 | 0,25 |
| V | Volume desmontado | m ³ | 1440 | 1440 |
| PPV-L | <i>Peak particle velocity longitudinal</i> | mm/s | 21,10 | 26,40 |
| PVS-R | <i>Peak vector sum real</i> | mm/s | 36,50 | 49,90 |
| | Blocos > 1,5m | | 11 | 16 |
| | Índice de desmonte secundário | GRAU | 2 | 2 |

Segundo o critério de PPV-L o ANFO obteve 21,10 mm/s contra 26,40 mm/s do Nitron. Pelo critério de PVS-R a superioridade na capacidade de vibrar com maior intensidade o maciço rochoso se confirmou para o Nitron, que obteve PVS-R de 49,90 mm/s contra 36,50 mm/s do ANFO.

Entretanto, o número de blocos na detonação com ANFO foi inferior quando comparado com Nitron, significando uma operação mais eficiente no tocante à detonação secundária. O desmonte com ANFO resultou em 11 blocos maiores que 1,5 metro, enquanto que com o Nitron esses blocos foram 16. Ambas detonações foram classificadas como semelhantes, recebendo GRAU 2.

10.4 Teste 4

As duas detonações do teste 4 foram realizadas em dias ensolarados, com temperaturas de 17°C e de 13°C, nos dias 22 de maio e 27 de junho de 1997, respectivamente.

A estação se encontrava a 115 m no primeiro desmonte e 120 m no dia 27 de junho. O aparelho foi preparado para operar no modo *single-shot*, disparando a partir de 7 mm/s (22/05/97) e 1 mm/s (27/06/97) de velocidade de vibração de partículas (*trigger*), gravando por 2 segundos cada evento. A tabela 16 apresenta os parâmetros principais do terceiro teste.

Tabela 16. Parâmetros das detonações e resultados do teste 4.

| | Explosivo | Unidade | ANFO | MAGNUM SE |
|---------------|-------------------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| | Arquivo | | E3975XCM.DLO | E3975INH.UYO |
| | Densidade | g/cm ³ | 0,90 | 0,63 |
| | Cordel detonante | | NP5 | NP5 |
| \varnothing | Diâmetro dos furos | | 2 1/2" ou 64mm | 2 1/2" ou 64mm |
| | Inclinação dos furos | | 5:1 ou 10° | 5:1 ou 10° |
| | Número de furos | | 11 | 11 |
| H | Profundidade do furo | m | 10,00 | 10,00 |
| K | Altura da bancada | m | 10,50 | 10,50 |
| B | Afastamento | m | 2,00 | 2,00 |
| S | Espaçamento entre furos | m | 3,00 | 3,00 |
| U | Subfuração | m | 0,50 | 0,50 |
| Tp | Tampão | m | 2,00 | 2,00 |
| | Carga básica por furo | kg | 16,00 | 14,80 |
| | Carga de emulsão IBEGEL | kg | 4,20 | 4,20 |
| | Carga total por furo | kg | 20,20 | 19,00 |
| | Carga total medida por furo | kg | 21,40 | 19,90 |
| | Carga total de explosivo | kg | 281,60 | 265,10 |
| Rc | Razão de carga | kg/m ³ | 0,469 | 0,442 |
| Fe | Furação específica | m/ m ³ | 0,18 | 0,18 |
| V | Volume desmontado | m ³ | 600 | 600 |
| PPV-L | Peak particle velocity longitudinal | mm/s | 3,56 | 6,10 |
| PVS-R | Peak vector sum real | mm/s | 18,60 | 19,50 |
| | Blocos > 1,5m | | 10 | 8 |
| | Índice de desmonte secundário | GRAU | 1 | 1 |

Pode-se observar que o ANFO apresentou PPV-L inferior e PVS-R muito semelhante ao MAGNUM SE. Segundo o critério de PPV-L o ANFO obteve 3,56 mm/s, enquanto que o MAGNUM SE produziu 6,10 mm/s. Pelo critério de PVS-R, essa tendência de maior energia de vibração se confirmou, com o ANFO produzindo 18,60 mm/s e o MAGNUM SE 19,5 mm/s, porém com uma diferença não tão expressiva.

O desmonte com ANFO resultou em 11 blocos maiores que 1,5 metro, enquanto que com o NITRON esses blocos foram 8, significando praticamente a mesma necessidade de detonação secundária.

O teste 4 indica que apesar do ANFO ter sido produzido com nitrato de amônio não recomendado para explosivo e, o MAGNUM SE possuir alumínio que o torna mais brisante, ambos explosivos obtiveram performance semelhante nessa situação particular de pedreira de calcário.

11 Análise Econômica do ANFO

O melhor explosivo para uma operação de desmonte é aquele que tem a melhor relação custo-benefício de obter uma pilha de material fragmentada no tamanho desejado para ser beneficiada. Para uma situação particular de desmonte, o explosivo ótimo é aquele que produz o resultado esperado com o menor custo (Grouhel e Kleine, 1992).

Quando foi levantado o problema que ocorria com os desmontes na Pedreira Cerro do Cabelo, observou-se que o custo de explosivo por metro cúbico de rocha alcançava um valor aproximado de R\$ 2,00. Depois da implantação do novo plano de fogo, foi feito o monitoramento sísmico acompanhado da observação do índice de desmonte secundário e levantamento dos custos obtidos comparando-se o ANFO produzido *in situ* e ANFOs industriais. Para um mesmo projeto de plano de fogo, o ANFO apresentou custos inferiores aos ANFOs industriais obtendo resultados práticos muito semelhantes. A fim de realizar uma análise econômica comparativa entre os ANFOs utilizados, partiu-se primeiramente, da determinação dos custos dos insumos (tabela 17).

Tabela 17. Custo dos insumos utilizados para os testes.

| Insumo | Custo | Unidade |
|-------------------------------|-------|-----------|
| ANFO produzido <i>in situ</i> | 0,35 | R\$/kg |
| NITRON | 1,41 | R\$/kg |
| MAGNUM SE | 1,30 | R\$/kg |
| EMULSÃO IBEGEL | 2,24 | R\$/kg |
| EMULSÃO BELMEX THOR | 2,28 | R\$/kg |
| EMULSÃO BELMEX HD | 2,40 | R\$/kg |
| NP5 | 0,38 | R\$/m |
| ESPOLETA | 0,18 | R\$/peça |
| RETARDO 20ms | 3,80 | R\$/peça |
| ESTOPIM | 0,53 | R\$/m |
| DESMONTE SECUNDÁRIO | 2,00 | R\$/Bloco |

A partir do custo dos insumos utilizados, foi feito o cálculo do custo dos testes de ANFO e ANFO industrial. Observando a tabela 18, nota-se que o parâmetro de maior influência no custo por metro cúbico é a carga de explosivo básica, ou seja, a carga de ANFO utilizada nos testes.

Tabela 18. Custos dos testes.

| TESTES | CUSTO DO INSUMO | ANFO | ANFO "Industrial" |
|--------|--------------------------|--------|-------------------|
| | | R\$ | R\$ |
| 1 | CARGA BÁSICA | 66,15 | 298,21 |
| | EMULSÃO | 84,67 | 84,67 |
| | CORDEL DETONANTE | 45,03 | 45,03 |
| | ESPOLETA | 0,18 | 0,18 |
| | RETARDO 20MS | 3,80 | 3,80 |
| | ESTOPIM | 1,06 | 1,06 |
| | DESMONTE SECUNDÁRIO | 22,00 | 10,00 |
| | TOTAL | 221,89 | 442,95 |
| | CUSTO POR FURO | 22,32 | 49,21 |
| | CUSTO POR M ³ | 0,46 | 0,92 |
| 2 | CARGA BÁSICA | 176,22 | 637,60 |
| | EMULSÃO | 181,94 | 181,94 |
| | CORDEL DETONANTE | 291,00 | 291,00 |
| | ESPOLETA | 0,18 | 0,18 |
| | RETARDO 20MS | 3,80 | 3,80 |
| | ESTOPIM | 1,06 | 1,06 |
| | DESMONTE SECUNDÁRIO | 32,00 | 26,00 |
| | TOTAL | 626,20 | 1141,58 |
| | CUSTO POR FURO | 36,11 | 60,08 |
| | CUSTO POR M ³ | 0,53 | 0,88 |
| 3 | CARGA BÁSICA | 191,83 | 790,58 |
| | EMULSÃO | 211,68 | 211,68 |
| | CORDEL DETONANTE | 122,55 | 122,55 |
| | ESPOLETA | 0,18 | 0,18 |
| | RETARDO 20MS | 3,80 | 3,80 |
| | ESTOPIM | 1,06 | 1,06 |
| | DESMONTE SECUNDÁRIO | 22,00 | 32,00 |
| | TOTAL | 552,10 | 1161,85 |
| | CUSTO POR FURO | 26,29 | 55,32 |
| | CUSTO POR M ³ | 0,38 | 0,80 |
| 4 | CARGA BÁSICA | 82,39 | 284,57 |
| | EMULSÃO | 105,33 | 105,33 |
| | CORDEL DETONANTE | 87,30 | 87,30 |
| | ESPOLETA | 0,18 | 0,18 |
| | RETARDO 20MS | 3,80 | 3,80 |
| | ESTOPIM | 1,06 | 1,06 |
| | DESMONTE SECUNDÁRIO | 20,00 | 16,00 |
| | TOTAL | 300,06 | 498,24 |
| | CUSTO POR FURO | 27,27 | 45,29 |
| | CUSTO POR M ³ | 0,50 | 0,83 |

O desmonte secundário foi adicionado no custo final do desmonte. Cada bloco de dimensão maior que 1,5 m custa R\$ 2,00 para ser fragmentado. Esse cálculo leva em conta salário de um operador de marteleto pneumático de 1" (52 mm), desgaste do equipamento, estopim, espoleta e um cartucho de emulsão. Entretanto, o principal inconveniente da detonação secundária, nesse caso, é a perda de tempo que a operação demanda, quebrando o ritmo de produção da pedra pela remoção do equipamento que poderia ser danificado no lançamento de algum fragmento. A tabela 19 apresenta um resumo dos principais resultados e uma comparação percentual entre PPV-L, PVS-R, quantidade de explosivos por fogo, custo por metro cúbico, quantidade de explosivo e custo de explosivo relacionados com capacidade do explosivo de vibrar a rocha, segundo o critério de PVS-R.

Tabela 19. Comparação econômica ANFO vs. ANFO "industrial".

| | Parâmetro | Uni. | ANFO | ANFO "industrial" | Dif. (%) |
|---|--------------------------------------|----------|--------|-------------------|----------|
| 1 | PPV-L | mm/s | 2,54 | 5,33 | +52,34 |
| | PVS-R | mm/s | 9,83 | 8,78 | -10,68 |
| | Quantidade de explosivo | kg | 226,80 | 248,30 | +8,60 |
| | Custo do desmonte | R\$ | 221,89 | 432,95 | +48,74 |
| | Custo do metro cúbico | R\$/m3 | 0,46 | 0,92 | +50,00 |
| | Quantidade total de explosivo/ PVS-R | kg/mm/s | 23,07 | 28,39 | +18,73 |
| | Custo do desmonte/ PVS-R | R\$/mm/s | 22,57 | 49,31 | +54,22 |
| 2 | PPV-L | mm/s | 15,70 | 22,40 | +29,91 |
| | PVS-R | mm/s | 22,30 | 29,00 | +23,10 |
| | Quantidade de explosivo | kg | 583,30 | 532,00 | -8,79 |
| | Custo do desmonte | R\$ | 686,20 | 1141,58 | +39,89 |
| | R\$/m3 | R\$/m3 | 0,53 | 0,88 | +39,77 |
| | Quantidade total de explosivo/ PVS-R | kg/mm/s | 26,16 | 18,34 | -29,89 |
| | Custo do desmonte/ PVS-R | R\$/mm/s | 30,77 | 39,36 | +21,82 |
| 3 | PPV-L | mm/s | 21,10 | 26,40 | +20,07 |
| | PVS-R | mm/s | 36,50 | 49,90 | +26,85 |
| | Quantidade de explosivo | kg | 636,30 | 648,90 | +1,94 |
| | Custo do desmonte | R\$ | 552,10 | 1161,85 | +52,48 |
| | R\$/m3 | R\$/m3 | 0,38 | 0,80 | +52,50 |
| | Quantidade total de explosivo/ PVS-R | kg/mm/s | 17,43 | 13,00 | -25,41 |
| | Custo do desmonte/ PVS-R | R\$/mm/s | 15,12 | 23,28 | +35,00 |
| 4 | PPV-L | mm/s | 3,56 | 6,10 | +41,63 |
| | PVS-R | mm/s | 18,60 | 19,50 | +4,61 |
| | Quantidade de explosivo | kg | 281,60 | 265,10 | -5,85 |
| | Custo do desmonte | R\$ | 300,06 | 498,24 | +39,77 |
| | R\$/m3 | R\$/m3 | 0,50 | 0,83 | +39,75 |
| | Quantidade total de explosivo/ PVS-R | kg/mm/s | 15,14 | 13,59 | -10,23 |
| | Custo do desmonte/ PVS-R | R\$/mm/s | 16,13 | 25,55 | +36,86 |

De acordo com as tabelas 18 e 19, o fator principal determinante da variação de custo por metro cúbico desmontado entre ANFO e ANFO “industrial” é o valor de compra desse insumo. As seguintes observações podem ser feitas:

- A PPV-L do ANFO “industrial” quando comparada ao ANFO foi maior, variando entre +20,07 a +52,34 %;
- A PVS-R do ANFO “industrial” foi ligeiramente superior ao ANFO, variando de -10,68 a +26,85 %.

Na tabela 20, os valores médios das comparações são apresentadas. Os resultados indicam:

- Uma quantidade média 2 % menor de explosivo ANFO “industrial” foi usada nos testes;
- O custo total e por metro cúbico dos desmontes foi 45 % maior ao se usar ANFO “industrial”;
- A quantidade de ANFO necessária para produzir a mesma vibração que o ANFO “industrial” foi 10 % maior, em média, segundo o critério da PVS-R;
- O custo de explosivo para produzir a mesma quantidade de vibração nos desmontes foi 38,5 % maior (média) para o ANFO “industrial”.

A relação quantidade de explosivo pela PVS-R expressa a quantidade de carga necessária para produzir uma vibração de 1 mm/s no maciço rochoso. Nota-se que os ANFOs industriais quando comparados ao ANFO, conseguem produzir vibrações na rocha com menores quantidades de carga. Apesar disso, devido ao seu custo mais elevado, quando se relaciona custo do desmonte com PVS-R, pode-se observar que o ANFO produz a mesma vibração com um custo até 54,22 % menor. Os testes indicaram que é no mínimo 22 % mais caro utilizar ANFO industrial para produzir a mesma vibração na rocha estudada.

Tabela 20. Valores médios da comparação ANFO vs. ANFO “industrial”.

| Parâmetro | Unidade | ANFO | ANFO “industrial” | Dif. (%) |
|--------------------------------------|----------|--------|-------------------|----------|
| Quantidade de explosivo | kg | 432,00 | 423,00 | -2,08 |
| Rc | Kg/ m3 | 0,457 | 0,455 | -0,43 |
| Custo do desmonte | R\$ | 440,06 | 808,65 | +45,58 |
| Custo do metro cúbico | R\$/m3 | 0,46 | 0,85 | +45,88 |
| Quantidade total de explosivo/ PVS-R | kg/mm/s | 20,45 | 18,33 | -10,36 |
| Custo do desmonte/ PVS-R produzida | R\$/mm/s | 21,14 | 34,37 | +38,49 |

Supondo uma operação de 10.000 m³ mensais, a utilização de ANFO produzido na pedreira pode economizar R\$ 46.764,00 em um ano e R\$ 234.000,00 em um período de cinco anos em relação ao ANFO industrial ou ainda, R\$ 183.960,00 em um ano e R\$ 920.000,00 em cinco anos em relação ao plano de fogo anterior que utilizava dinamite. Essa redução refletirá diretamente no custo final do produto, diminuindo o custos fixo final da mineradora. O uso de ANFO pode viabilizar praticamente o dobro de operações de desmonte que seriam possíveis com os ANFOs industriais. A tabela 21 apresenta uma estimativa de custo de desmontes para os períodos de um e cinco anos.

Tabela 21. Estimativa de custos ANFO vs. ANFO “industrial”.

| | R\$/m ³ | Custo e volume desmontado | |
|------------------------|--------------------|---------------------------|------------------|
| | | m ³ | |
| | | 120.000 | 600.000 |
| | | 1 ano | 5 anos |
| ANFO | 0.467 | R\$ 56.040.00 | R\$ 280.200.00 |
| ANFO industrial | 0.857 | R\$ 102.804.00 | R\$ 514.200.00 |
| Plano de fogo anterior | 2,00(aprox.) | R\$ 240.000,00 | R\$ 1.200.000,00 |

Os ANFOs industriais, mesmo com capacidade superior de produzir maior fragmentação ao maciço rochoso apresentaram resultados práticos muito semelhantes, porém, tiveram sempre custo por metro cúbico superior ao ANFO produzido *in situ*. Esse apresentou boas características de manuseio como rápido carregamento do furo, tão simples como os ANFOs industriais.

12 Conclusões e Recomendações

A partir dos resultados obtidos com esse trabalho são possíveis as seguintes conclusões:

A seleção do explosivo correto para uma determinada operação mineira não pode ser baseada apenas no custo por quilograma de explosivo, densidade e sensibilidade à água, como vem ocorrendo tradicionalmente na maioria das empresas de mineração brasileiras. Esses critérios ignoram totalmente as diferentes características físicas, a interação com a rocha e a performance final do explosivo para se obter a granulometria desejada com o menor custo possível. A medida da performance dos explosivos mesmo em operações pequenas, produz uma boa quantidade de informações que são fundamentais para se escolher o melhor explosivo, ou então, remover a subjetividade da avaliação desse insumo numa operação mineira. Essa avaliação, também, pode controlar a variabilidade na qualidade de um explosivo nos desmontes de rocha e auxiliar no planejamento do plano de fogo.

A viabilidade técnica e econômica do emprego de ANFO produzido *in situ*, com nitrato de amônio para fertilizante ficou demonstrada, indicando ser possível obter um custo por metro cúbico 45 % menor que os ANFOs industrializados. O explosivo é perfeitamente viável quando comparado com outros ANFOs comercializados no país, de composição similar e que mostraram ter performance muito semelhante.

Mesmo com uma capacidade 10 % menor de perturbar (vibrar) o maciço rochoso, o ANFO produzido *in situ*, devido ao seu custo inferior, mostrou que pode ser 38% mais econômico para produzir a mesma quantidade de vibrações e obter resultados semelhantes aos do ANFO industrial.

O ANFO é um explosivo suscetível à diversos fatores, contudo, quando utilizado com a técnica correta é um explosivo estável, de fácil preparação e manuseio, rápido carregamento e principalmente baixo custo.

Tendo em vista os resultados obtidos nesse estudo, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

Avaliação da performance de explosivos utilizando-se outras técnicas de campo como medida de deslocamento e velocidade de afastamento por intermédio de câmera de alta velocidade, medida de velocidade de detonação *in situ*, medida de fragmentação por digitalização e monitoramento de pressão de gás;

Comparação entre performances de outras formulações de explosivos tipo ANFO comerciais ou fabricados no local de trabalho, explosivos tipo emulsão e aquagéis nas mais diversas situações de campo;

Comparação entre explosivos tipo ANFO que utilizam grânulo de nitrato de amônio para fertilizante e grânulo especial para indústria de explosivos.

Estudo para avaliar métodos práticos e confiáveis de fixação de sismógrafos em operações mineiras;

Estudo para sugerir normas e padrões dos métodos de avaliação da performance de explosivos tanto para testes de laboratório, como para testes de campo, de modo a eliminar a subjetividade das avaliações e a confusão que existe atualmente nos catálogos dos fabricantes;

Pesquisa, visando obter informações para padronização dos sismógrafos usados nos desmontes, de modo a minimizar problemas gerados por procedimentos de medição e leitura sem critérios pré-determinados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADERMAN, D. A. **Silicon or silver: imaging's future directions and analysis tool for explosives and mining research activities.** In: EXPLO 95, 1995, Brisbane, Aust. Exploring the role of rock breakeage in mining and quarrying, Carlton: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1995p. 273-277.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas : NBR 9653.** Rio de Janeiro, 1986. 9p.

BAUER, A.; GLYNN, G.; HEATER, R. D., *et al.* **A laboratory comparative study of slurry, emulsion and Heavy ANFO explosives.** Conference on Explosives and Blasting Technique, Proceedings, ISSE, 1984.

BORG, D. G. Bulk loaded emulsion explosives technology. **Coal Magazine**, Chicago, v.100, n.1, p.27-33, 1995.

BRZEZOWS, F. Danger of blasting in fiery mines. **The Journal of Explosives Engineering**, Cleveland, v.13, n.6, p.41-42, 1996.

CAMERON, A. R. The assessment of the quality and performance of bulk commercial explosives and accessories, Brisbane, Australia: 1990. Fragblast 90, Proceedings..., p. 223-231.

CAMERON, A. R. How to assess performance and reduce blast damage. **Engineering and Mining Journal**, Chicago, v.197, n.1, p. 26-32, 1996.

CAMERON, A. R.; GROUHEL, P. **The effects of the quality of bulk commercial explosives on blast performance** In: EXPLO 95, 1995, Brisbane, Aust. Exploring the role of rock breakeage in mining and quarrying, Carlton: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1995p, p.237-240.

CAMERON, A. R.; ADAMSON, W. R.; MCKENZIE, C. K. **Measuring the performance of commercial explosives under field conditions**, Brisbane, Australia: 1990. Fragblast 90, p.1-11.

CHILDS, J.; WATSON, J. T. Digidet: a new approach to electronic delay blasting. **Coal Magazine**, Chicago, v.101, n.8, p. 26, 1996.

DOLAN, J. E. Explosives in the service of man. **The Journal of Explosives Engineering**, Cleveland, v.14, n.1, p.8-12, 1997.

DJORDJEVIC, N.; KAVETSKY, A.; SCOTT, A. **Blast design optimisation to minimise induced vibrations of structures**, Brisbane, Australia:1990. **Fragblast 90**, Proceedings..., p.373-380.

GERALDI, J. L. P. **Instrumentação sísmica de detonações**. São Paulo: 1986. II Congresso Brasileiro de Mineração, Anais..., p.165-184.

GROUHEL, P.; KLEINE, T. H. **Designer: a spreadsheet for determining the most cost effective for an open cut blast**. Third Large Open Pit Mining Conference: 1992. Proceedings..., MacKay, Australia, p. 237-245.

GUSTAFSSON, R. **Swedish blasting technique**, Gothenburg, Sweden: SPI, 1973, 323p.

HOBBS, E. Taggants become an issue. **Coal Age Magazine**, Chicago, v.101, n.12, p.55, 1996.

HOPLER, R. B. Dinamit. **The Journal of Explosives Engineering**, Cleveland, v.14, n1, p.14-16, 1997.

ICI. **Teoria de desmonte de rochas**. Rio de Janeiro, 1989, 302p.

INDÚSTRIA DE MATERIAL BÉLICO DO BRASIL - IMBEL. **Curso de explosivos civis**. São Paulo, 1985, 328p.

INSTANTEL. DS-077 minimate: user manual . Kanata, Canada, 1995, 115p.

KOJOVIC, T.; MICHAUX, S.; MCKENZIE, C. **Impact of blast fragmentation on crushing and screening operations on quarry mining**. In: EXPLO 95, 1995, Brisbane, Aust. Exploring the role of rock breakage in mining and quarrying, Carlton: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1995p, p.427-436.

KONYA, C., J. **Blast design**, Montville, USA: 1995. Intercontinental Development, 230p.

KONYA, C., J. Priming blasting agents. **Engineering and Mining Journal**, Chicago, v.196, n.11, p.41-42, 1996a.

KONYA, C.,J. Blasting review & maintenance program, **Engineering and Mining Journal**, Chicago, v.197, n.11, p.74-76, 1996b.

KONYA, C., J. Detonation cord downlines cause energy losses, **Engineering and Mining Journal**, Chicago, v.197, n.9, p.37-35, 1996c.

KONYA, C., J. Simple equipment for blast diagnostic, **Engineering and Mining Journal**, Chicago, v.197, n.5, p.63-80, 1996d.

LANGFORS, U.; KIHLMSTROM, B. **Tecnica moderna de voladura de rocas**, Espartero, España, Urmo, 1963. 425p.

LEWIS, N. Farco mining makes productivity gains using emulsion-ANFO blends. **Coal Magazine**, Chicago, v.100, n.2, p.28-58, 1995.

OLOFSSON, S. O. **Applied explosives technology for construction and mining**, 2 ed.vv., Arla, Sweden: Applex, 1990. 304p.

PALEY, N.; LYMAN, G. J.; KAVETSKY A. **Optical blast fragmentation assessment**. In: EXPLO 95, 1995, Brisbane, Aust. Exploring the role of rock breakeage in mining and quarrying, Carlton: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1995p, p15-18.

PERSSON, P. A.; HOLMBERG, R.; LEE, J. **Rock blasting and explosives engineering** Boca Raton: CRC Press, 1993. 540p.

PILSHAW, S. R. Dealing with water in the blasthole. **Coal Magazine**, Chicago, v.99, n.11, p.44-46, 1994.

PONIEWIERKI, J.; CHEUNG, L. C. C.; MACONOCHIE, A. P. **Sirofrag: a new technique for post-blast rock fragmentation size distribution measurement**. In: EXPLO 95, 1995, Brisbane, Aust. Exploring the role of rock breakeage in mining and quarrying, Carlton: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1995p, p.263-267.

ROCHA, J. F. **Estudo da interação explosivo-material rochoso e controle das vibrações provocadas por explosões**. Itajubá, 1973. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola de Engenharia de Itajubá.

SANCHEZ, L. E. Incidência ambiental das vibrações, **Revista Brasil Mineral**, São Paulo, n.38, p.52-60, 1987.

SCHNEIDER, L. The use of ANFO on surface blasting operations, **The Journal of Explosives Engineering**, Cleveland, v.14, n.2, p.14-16, 1997.

SCOTT, A. **Explosives performance: who needs to know?** Brisbane, Australia: 1990, Fragblast 90. Proceedings..., p.319 - 323.

SCOTT, A.; CAMERON, A. **The field evaluation of explosives performance**. Explosives in Mining Workshop, Melbourne, Australia, Proceedings..., 1988, p.51-58.

SCOTT, A. **Open pit blast design: analysis and optimization**. Brisbane, Australia:, The University of Queensland, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre: 1996, 338p.

SCOTT, A.; CHITOMBO, G. P.; KLEINE, T.H. **The challenge of prediction and control of fragmentation in mining**. In: EXPLO 95, 1995, Brisbane, Aust. Exploring the role of rock breakeage in mining and quarrying, Carlton: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1995p., p. 507-516.

SEGUI, J. B.; MUNARETTI, E.; KOPPE J. C. **Influência do nitrato de amônio na performance do ANFO**, In: Congresso Ítalo-Brasileiro de Engenharia de Minas 4, 1996, Canela, RS. EGATEA: Revista da Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre, p. 31-36, nov. 1996. Número especial.

SEN, G. C. **Blasting tecnology for mining and civil engineers**. Sidney, Australia: University of New South Wales Press, 1995. 145p.

SEN, G. C. , SILITONGA, M. **Safe ground vibration levels in blasting operations.** 21 International Conference of Safety in Mines - Proceedings..., Sidney, Australia, 1985, p. 743-750..

SOARES, F. C. F. **Rochas minerais e pedras preciosas do Brasil;** dicionário analítico. 2.ed., São Paulo: Sandvik, 1990. 468p.

SISKIND D. E. Blasting seismograph standardization and calibration **The Journal of Explosives Engineering**, Cleveland, v.13, n.9, p. 46, 1996.

TAMROCK. **Handbook on surface drilling and blasting.** Tampere, Finland: 1984. Tampella, 308p.

VENKATESH, H. S.; ADHIKARI, G. R.; RAJU, N. M. **Application of high resolution video camera for blast evaluation.** In: EXPLOR 95, 1995, Brisbane, Aust. Exploring the role of rock breakage in mining and quarrying, Carlton: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1995p., p.269-271.

WORSEY, P.; WEEKS, B. Dispelling some myths about ammonium nitrate. **The Journal of Explosives Engineering**, Cleveland, v.14, n.6, p.18-21, 1997.

ANEXO
(Leituras Sísmicas)

Date/Time Vert at 10:48:45 Jan 14, 1997
 Trigger Source Geo: 5.00 mm/s
 Range Mic: 30.0 pa.(L)
 Record Time Geo: 127 mm/s
 2.0 sec at 1024 sps

Serial Number 3397 V 2.11 MiniMate
 Battery Level 6.4 Volts
 Calibration Uninitialized
 File Name E3975XCG.P90

Notes

Location: JOB # 0020
 Client:
 User Name:
 Converted: May 25, 1997 19:32:49 (V2.0)

Post Event Notes

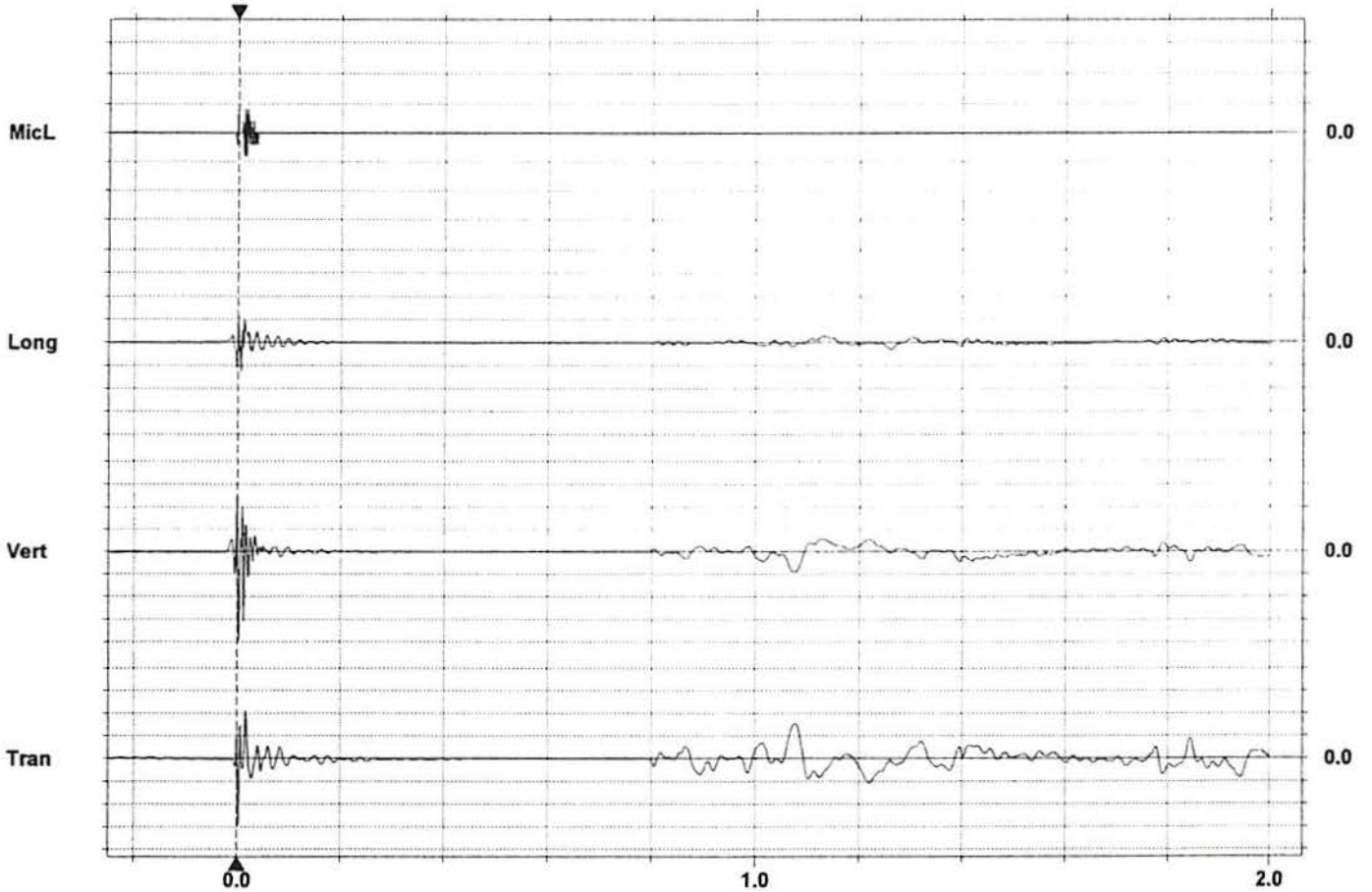
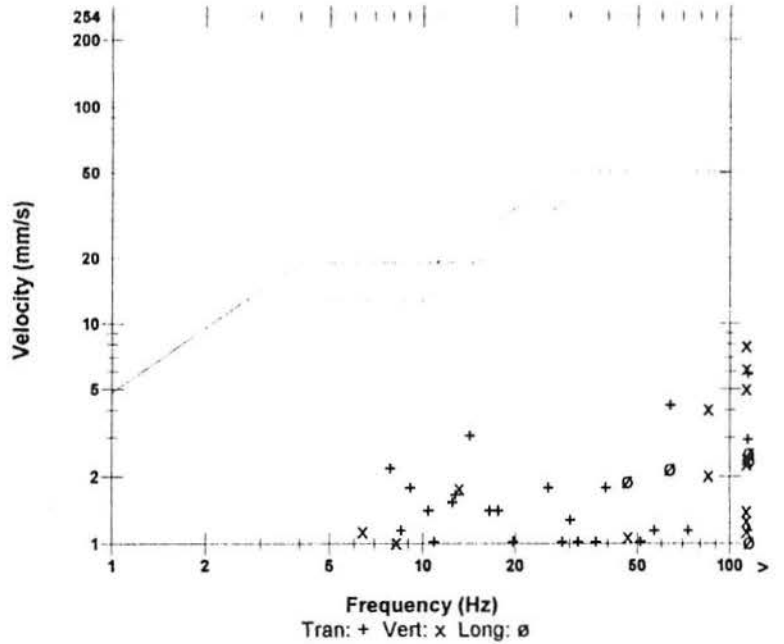
Microphone Linear Weighting
 PSPL 4.00 pa.(L) at 0.000 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 434 mv)

| | Tran | Vert | Long | |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| PPV | 5.84 | 7.87 | 2.54 | mm/s |
| ZC Freq | >100 | >100 | >100 | Hz |
| Time (Rel. to Trig) | 0.004 | 0.004 | 0.007 | sec |
| Peak Acceleration | 0.411 | 0.570 | 0.312 | g |
| Peak Displacement | 0.0458 | 0.0505 | 0.0105 | mm |
| Sensorcheck™ | Passed | Passed | Passed | |

Peak Vector Sum 9.83 mm/s at 0.004 sec

N/A: Not Applicable

USBM R18507 And OSMRE



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 2.00 mm/s/div Mic: 5.00 pa.(L)/div
 Trigger =

Date/Time Vert at 10:48:14 Jan 22, 1997
 Trigger Source Geo: 5.00 mm/s
 Mic: 30.0 pa.(L)
 Range Geo: 127 mm/s
 Record Time 2.0 sec at 1024 sps

Serial Number 3397 V 2.11 MiniMate
 Battery Level 6.4 Volts
 Calibration Uninitialized
 File Name E3975XCG.OE0

Notes

Location: JOB # 0020
 Client:
 User Name:
 Converted: May 25, 1997 19:32:33 (V2.0)

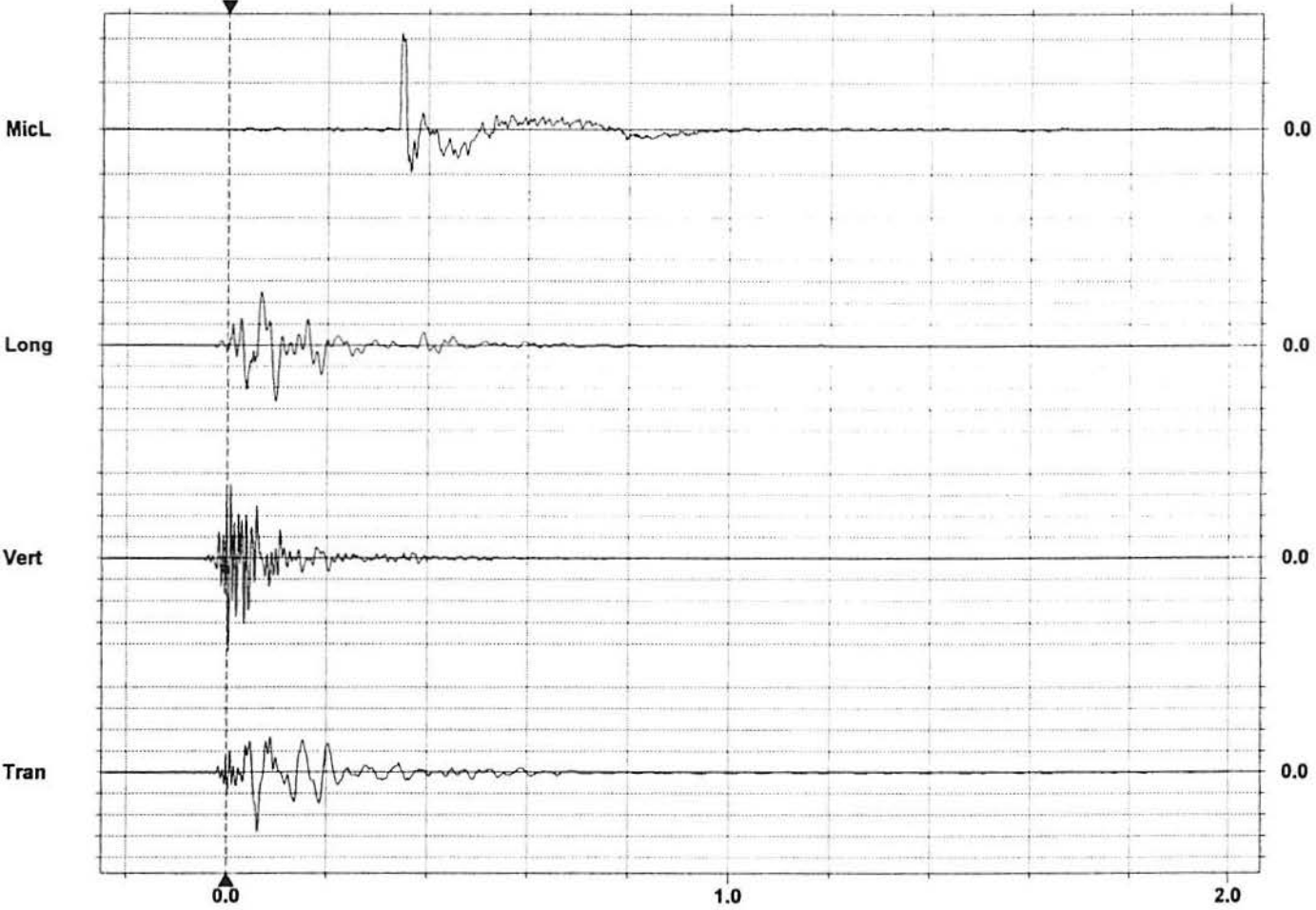
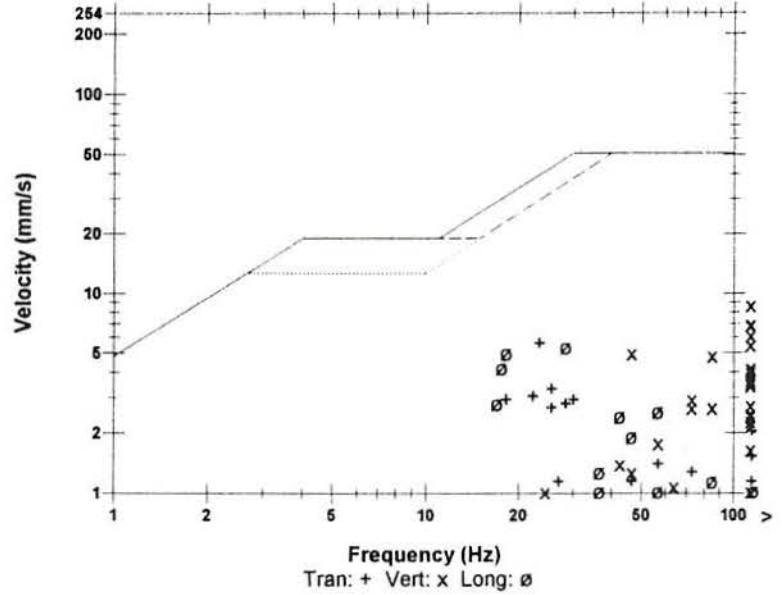
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 106 pa.(L) at 0.347 sec
 ZC Freq 32 Hz
 Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 434 mv)

| | Tran | Vert | Long | |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| PPV | 5.59 | 8.64 | 5.33 | mm/s |
| ZC Freq | 22 | >100 | 27 | Hz |
| Time (Rel. to Trig) | 0.063 | 0.004 | 0.098 | sec |
| Peak Acceleration | 0.133 | 0.610 | 0.119 | g |
| Peak Displacement | 0.0287 | 0.0138 | 0.0375 | mm |
| Sensorcheck™ | Passed | Passed | Passed | |

Peak Vector Sum 8.78 mm/s at 0.004 sec

USBM RI8507 And OSMRE



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 2.00 mm/s/div Mic: 50.0 pa.(L)/div
 Trigger = >-----<

Date/Time Vert at 12:46:18 Mar 14, 1997
 Trigger Source Geo: 7.00 mm/s
 Mic: 30.0 pa.(L)
 Range Geo: 127 mm/s
 Record Time 2.0 sec at 1024 sps

Serial Number 3397 V 2.11 MiniMate
 Battery Level 6.4 Volts
 Calibration Uninitialized
 File Name E3975XCM.560

Notes

Location: JOB # 0021
 Client:
 User Name:
 Converted: May 25, 1997 19:33:04 (V2.0)

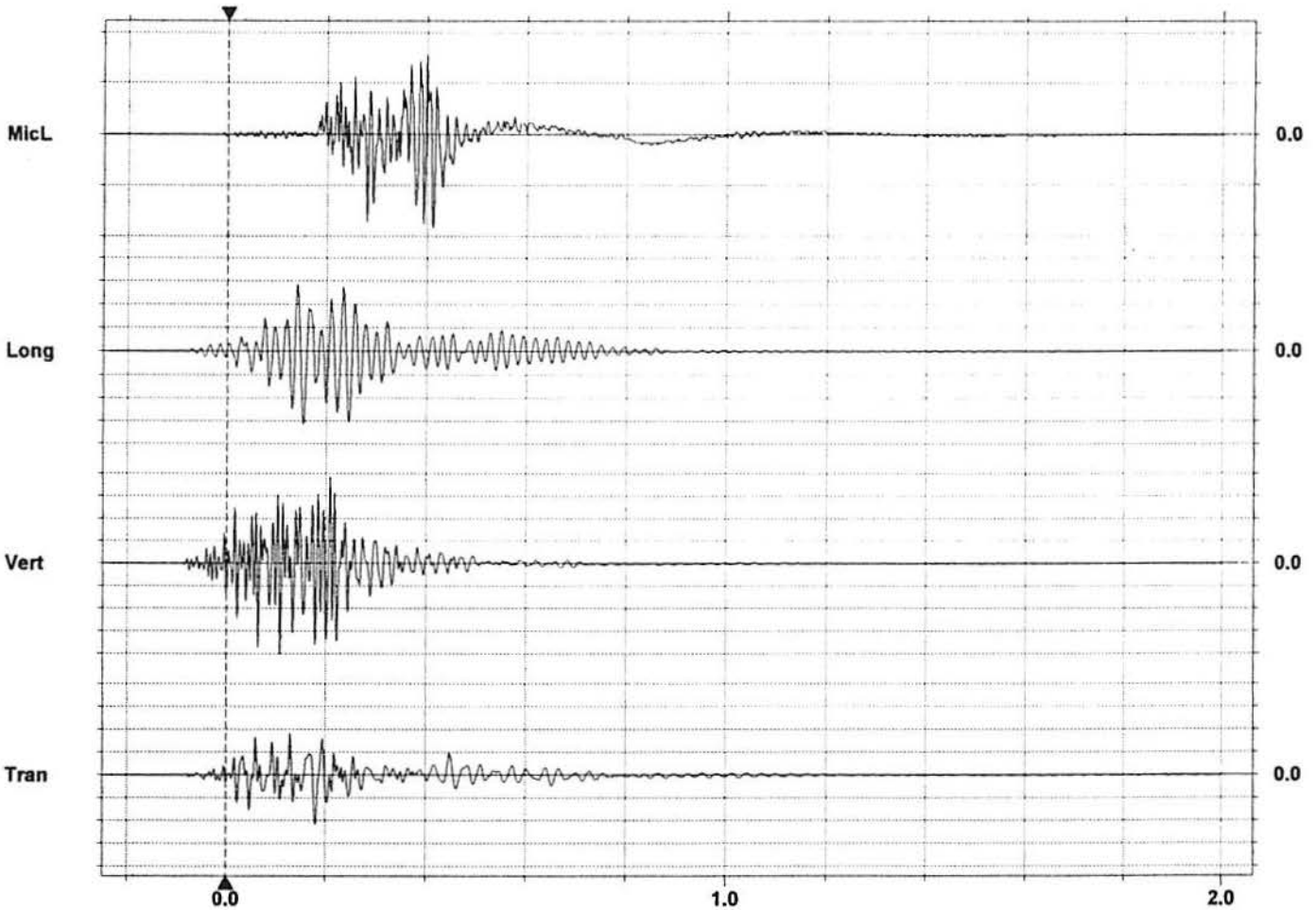
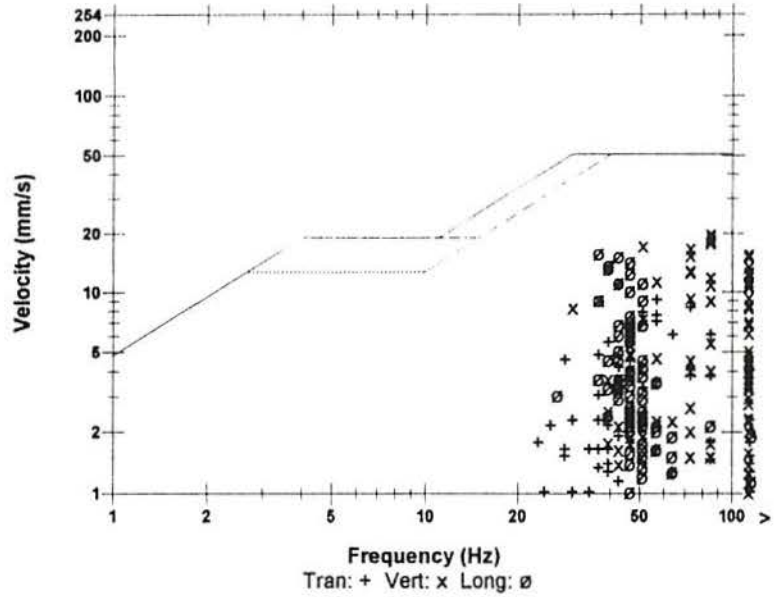
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 92.0 pa.(L) at 0.413 sec
 ZC Freq 64 Hz
 Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 434 mv)

| | Tran | Vert | Long | |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| PPV | 10.9 | 20.1 | 15.7 | mm/s |
| ZC Freq | 39 | 85 | 37 | Hz |
| Time (Rel. to Trig) | 0.180 | 0.109 | 0.153 | sec |
| Peak Acceleration | 0.424 | 1.17 | 0.490 | g |
| Peak Displacement | 0.0363 | 0.0435 | 0.0619 | mm |
| Sensorcheck™ | Passed | Passed | Passed | |

Peak Vector Sum 22.3 mm/s at 0.209 sec

USBM RI8507 And OSMRE



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 5.00 mm/s/div Mic: 50.0 pa.(L)/div
 Trigger =

Date/Time Long at 18:33:05 Mar 12, 1997
 Trigger Source Geo: 20.0 mm/s
 Range Geo: 127 mm/s
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps

Serial Number 3397 V 2.11 MiniMate
 Battery Level 6.1 Volts
 Calibration Uninitialized
 File Name E3975MK6.750

Notes

Location: JOB # 0002

Client:

User Name:

Converted: May 25, 1997 19:32:09 (V2.0)

Post Event Notes

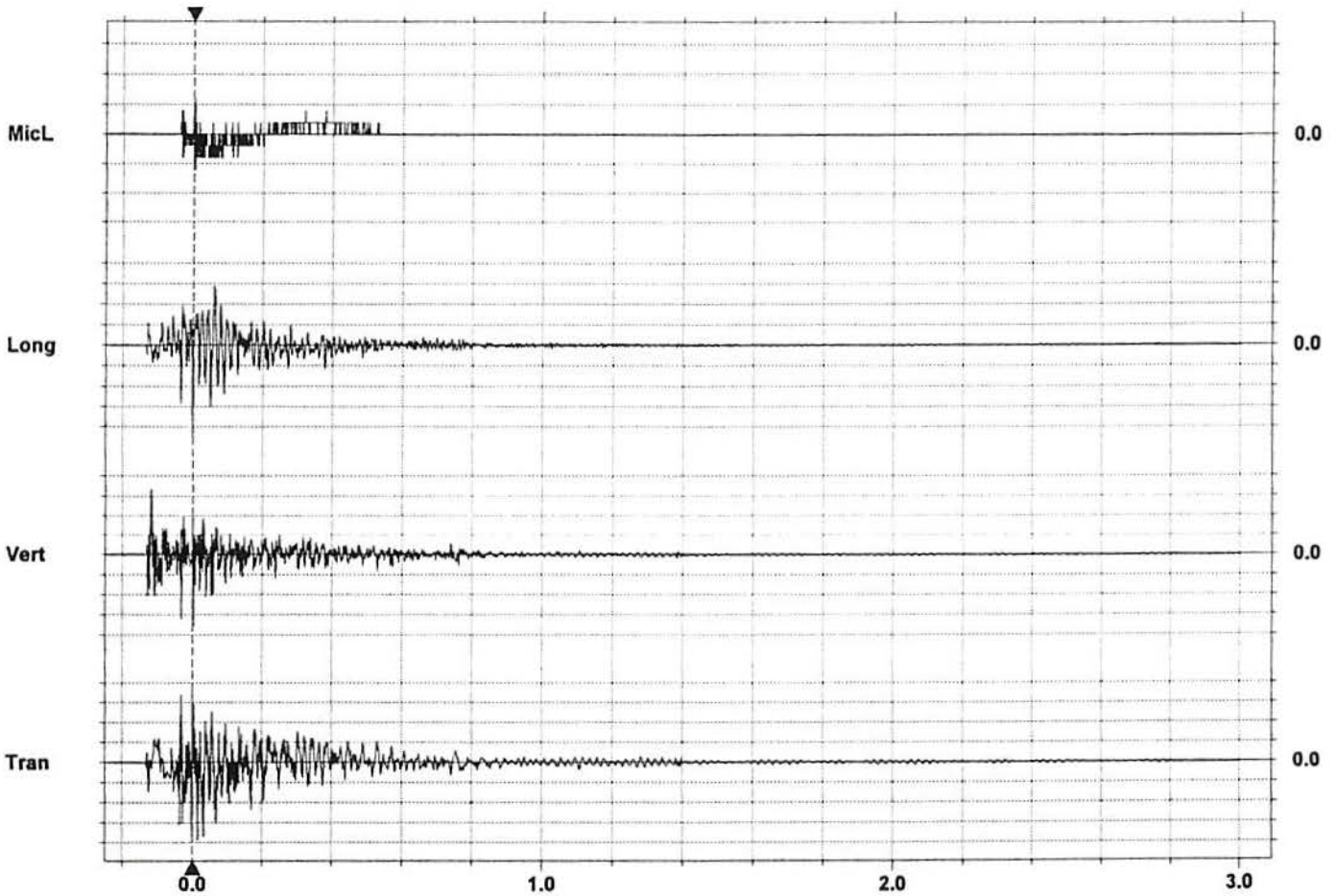
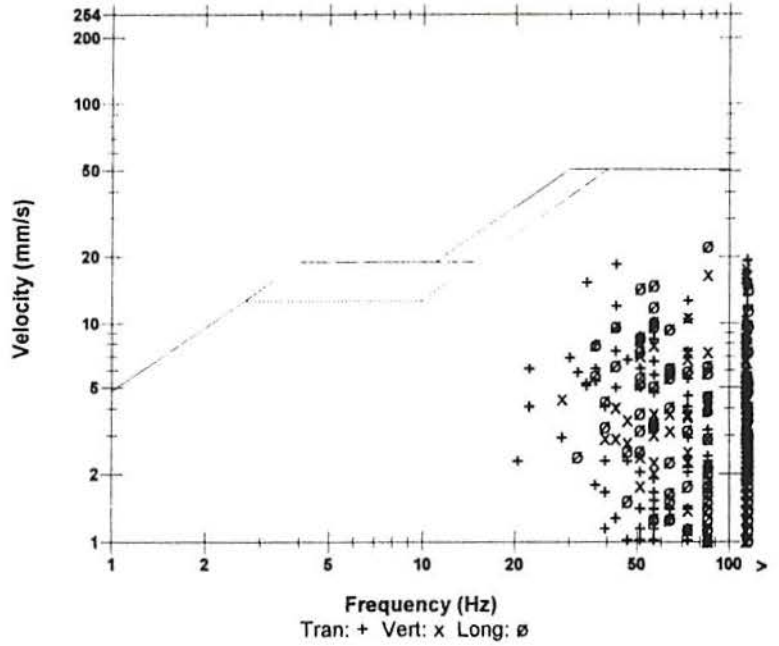
Microphone Linear Weighting
 PSPL 6.00 pa.(L) at 0.002 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 2 mv)

| | Tran | Vert | Long | |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| PPV | 19.3 | 17.8 | 22.4 | mm/s |
| ZC Freq | N/A | >100 | 85 | Hz |
| Time (Rel. to Trig) | 0.018 | 0.004 | 0.000 | sec |
| Peak Acceleration | 3.90 | 2.78 | 1.38 | g |
| Peak Displacement | 0.0499 | 0.0311 | 0.0428 | mm |
| Sensorcheck™ | Passed | Passed | Passed | |

Peak Vector Sum 29.0 mm/s at 0.000 sec

N/A: Not Applicable

USBM RI8507 And OSMRE



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 5.00 mm/s/div Mic: 5.00 pa.(L)/div
 Trigger = >-----<

Date/Time Vert at 17:52:39 April 8, 1997
Trigger Source Geo: 7.00 mm/s
 Mic: 40.0 pa.(L)
Range Geo: 127 mm/s
Record Time 5.0 sec at 1024 sps

Serial Number 3397 V 2.11 MiniMate
Battery Level 6.4 Volts
Calibration Uninitialized
File Name E3975XD0.BR0

Notes

Location: JOB # 0022
 Client:
 User Name:
 Converted: May 25, 1997 19:33:59 (V2.0)

Post Event Notes

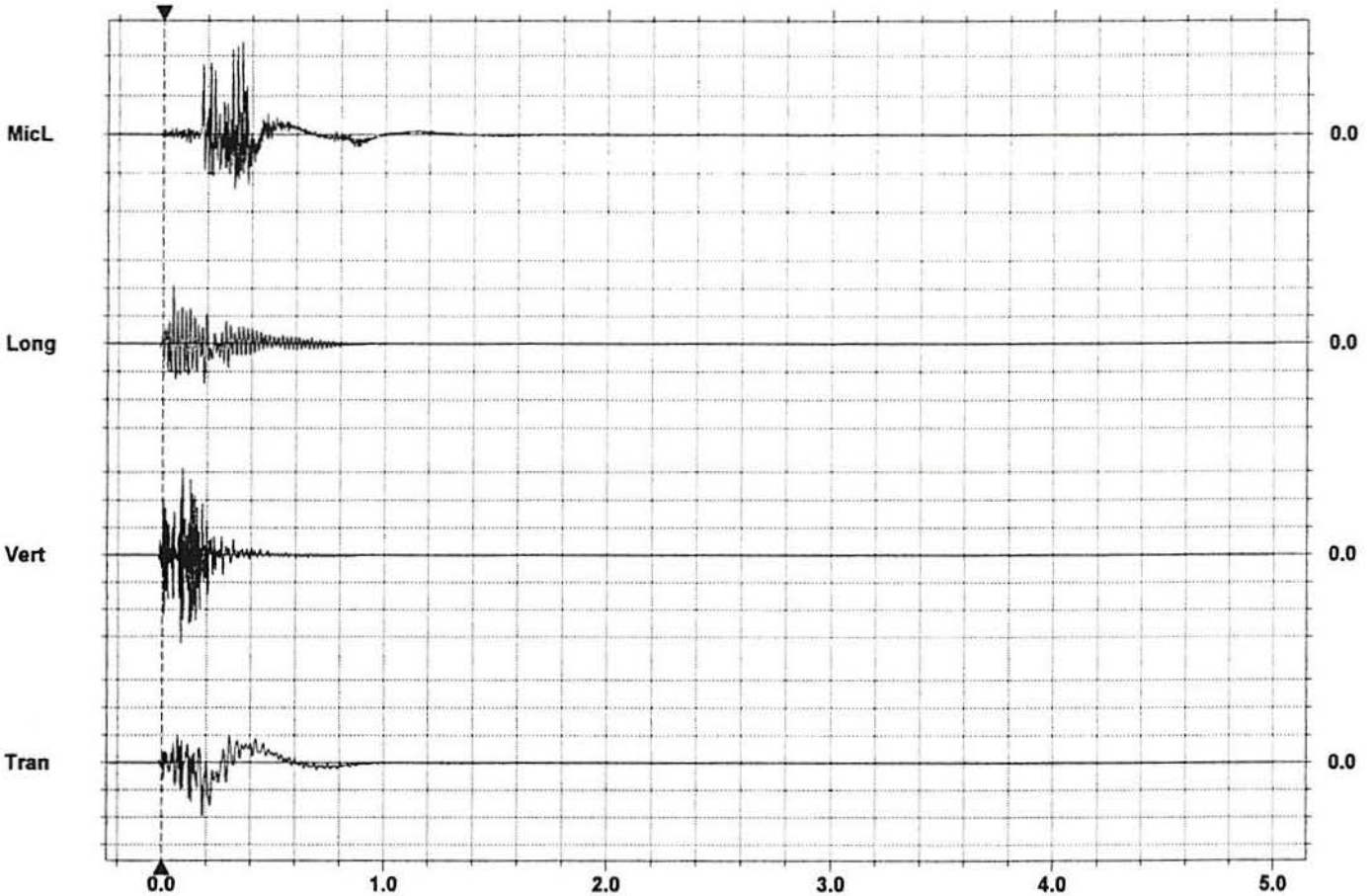
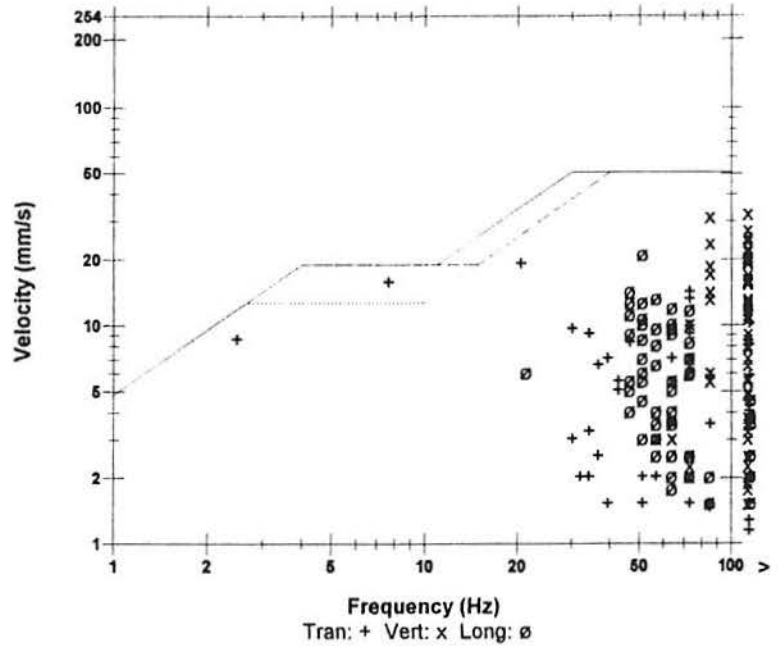
Microphone Linear Weighting
PSPL 116 pa.(L) at 0.355 sec
ZC Freq N/A
Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 434 mv)

| | Tran | Vert | Long | |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| PPV | 19.3 | 32.5 | 21.1 | mm/s |
| ZC Freq | 5.0 | >100 | 51 | Hz |
| Time (Rel. to Trig) | 0.185 | 0.084 | 0.048 | sec |
| Peak Acceleration | 0.583 | 2.00 | 0.610 | g |
| Peak Displacement | 0.508 | 0.0558 | 0.0561 | mm |
| Sensorcheck™ | Passed | Passed | Passed | |

Peak Vector Sum 38.5 mm/s at 0.084 sec

N/A: Not Applicable

USBM RI8507 And OSMRE



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 10.00 mm/s/div Mic: 50.0 pa.(L)/div
 Trigger =

Date/Time Vert at 17:39:31 May 9, 1997
 Trigger Source Geo: 7.00 mm/s
 Mic: 40.0 pa.(L)
 Range Geo: 127 mm/s
 Record Time 5.0 sec at 1024 sps

Serial Number 3397 V 2.11 MiniMate
 Battery Level 6.4 Volts
 Calibration Uninitialized
 File Name E3975XCZ.PV0

Notes

Location: JOB # 0022
 Client:
 User Name:
 Converted: May 25, 1997 19:33:39 (V2.0)

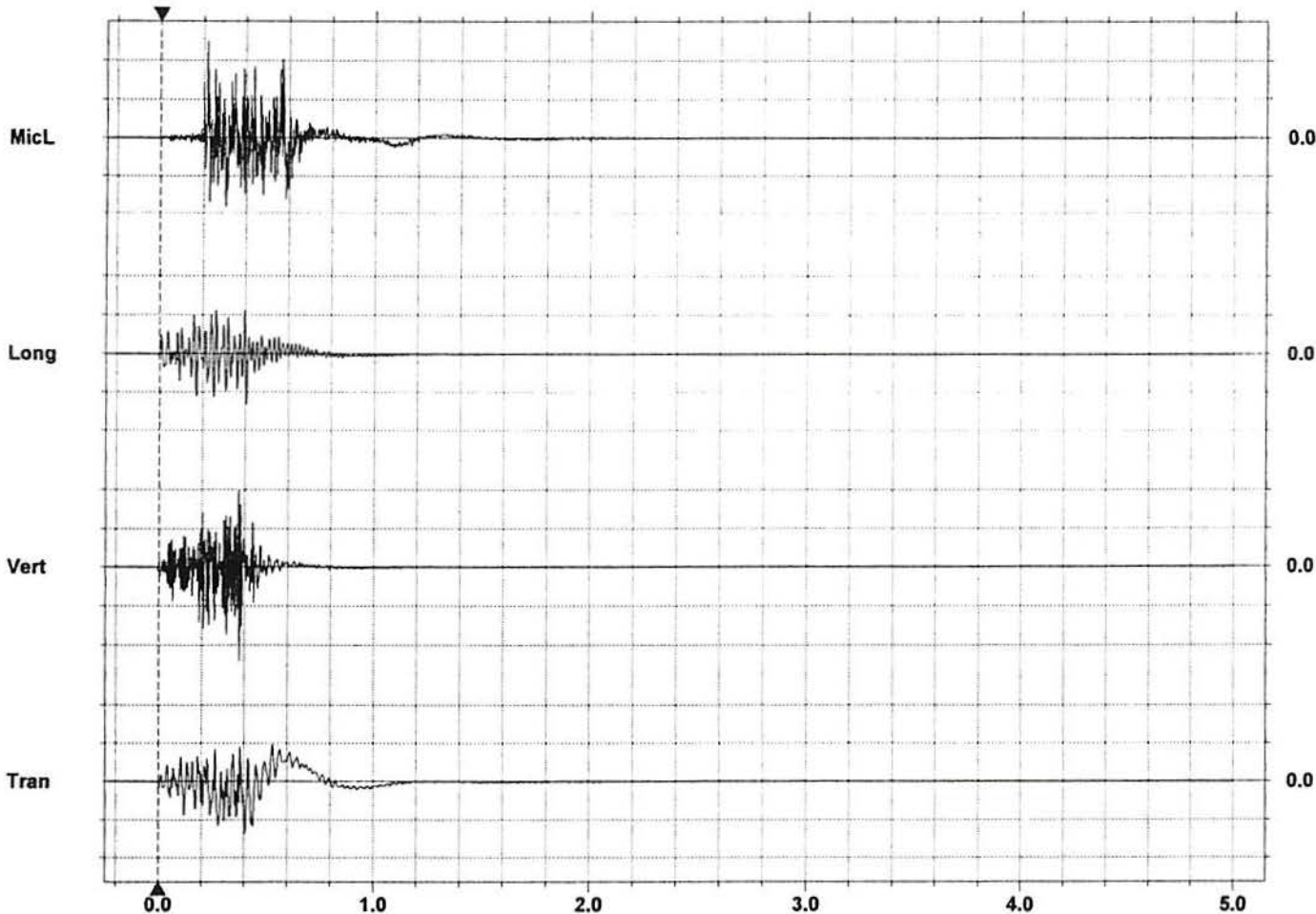
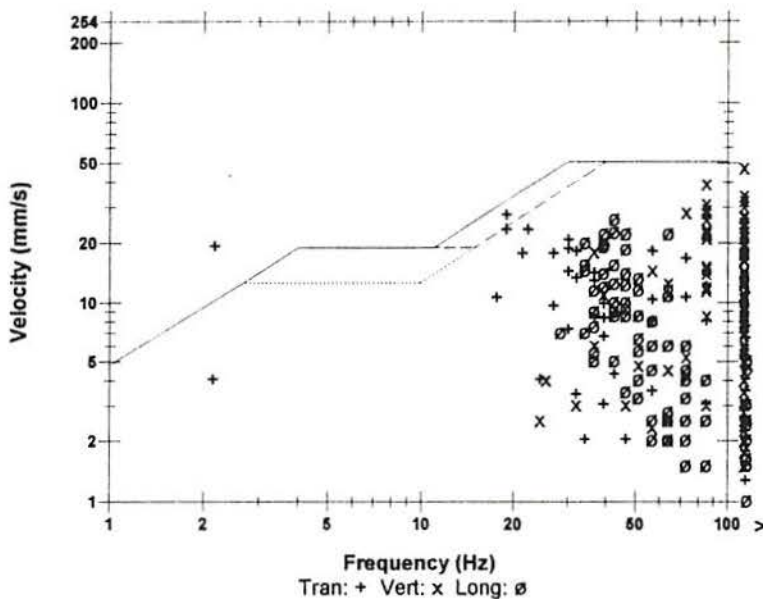
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 126 pa.(L) at 0.219 sec
 ZC Freq 34 Hz
 Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 434 mv)

| | Tran | Vert | Long | |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| PPV | 27.4 | 47.8 | 26.4 | mm/s |
| ZC Freq | 19 | >100 | 43 | Hz |
| Time (Rel. to Trig) | 0.405 | 0.377 | 0.405 | sec |
| Peak Acceleration | 0.848 | 2.81 | 0.954 | g |
| Peak Displacement | 1.08 | 0.0759 | 0.0902 | mm |
| Sensorcheck™ | Passed | Passed | Passed | |

Peak Vector Sum 49.9 mm/s at 0.377 sec

USBM RI8507 And OSMRE



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 20.0 mm/s/div Mic: 50.0 pa.(L)/div
 Trigger = \blacktriangleright \dashleftarrow

Date/Time Tran at 12:51:21 May 22, 1997
 Trigger Source Geo: 7.00 mm/s
 Range Geo: 30.0 pa.(L)
 Record Time 2.0 sec at 1024 sps

Serial Number 3397 V 2.11 MiniMate
 Battery Level 6.4 Volts
 Calibration Uninitialized
 File Name E3975XCM.DLO

Notes

Location: JOB # 0021
 Client:
 User Name:
 Converted: May 25, 1997 19:33:23 (V2.0)

Post Event Notes

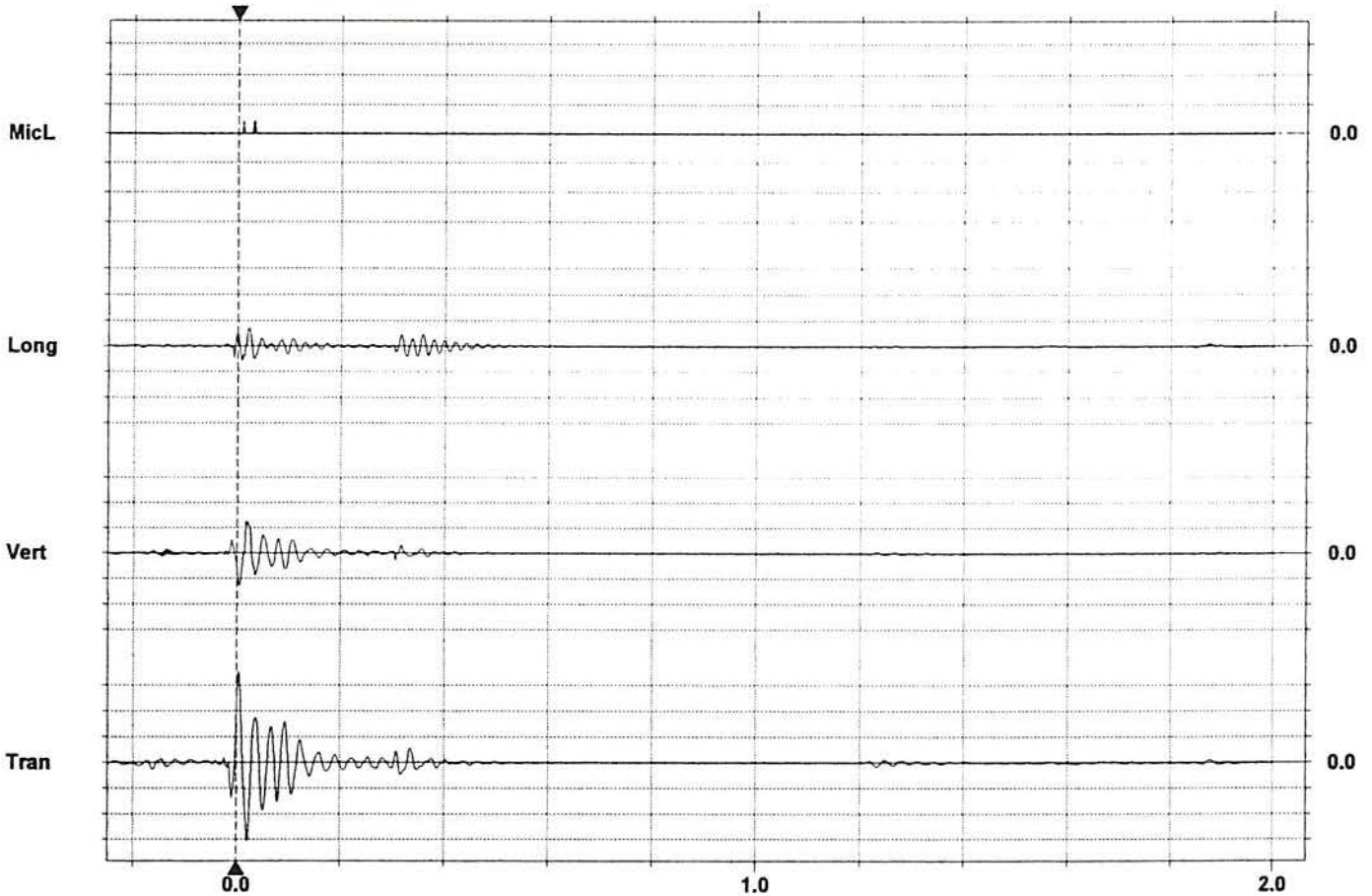
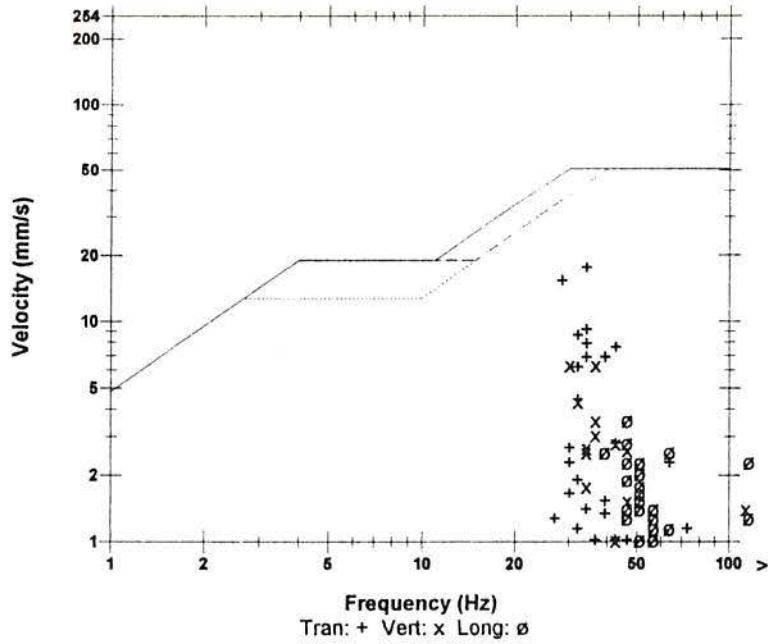
Microphone Linear Weighting
 PSPL 2.00 pa.(L) at 0.011 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Passed (Freq = 20.0 Hz Amp = 434 mv)

| | Tran | Vert | Long | |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| PPV | 17.5 | 6.35 | 3.56 | mm/s |
| ZC Freq | 34 | 30 | 47 | Hz |
| Time (Rel. to Trig) | 0.005 | 0.006 | 0.023 | sec |
| Peak Acceleration | 0.398 | 0.278 | 0.159 | g |
| Peak Displacement | 0.0797 | 0.0310 | 0.0127 | mm |
| Sensorcheck™ | Passed | Passed | Passed | |

Peak Vector Sum 18.6 mm/s at 0.005 sec

N/A: Not Applicable

USBM RI8507 And OSMRE



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 5.00 mm/s/div Mic: 5.00 pa.(L)/div
 Trigger =

Date/Time Vert at 15:32:58 June 27, 1997
 Trigger Source Geo: 1.00 mm/s
 Range Geo: 127 mm/s
 Record Time 2.0 sec at 1024 sps

Serial Number 3397 V 2.11 MiniMate
 Battery Level 6.4 Volts
 Calibration Uninitialized
 File Name E3976INH.UY0

Notes

Location: JOB # 0001
 Client:
 User Name:
 Converted: May 25, 1997 19:34:16 (V2.0)

Extended Notes

Post Event Notes

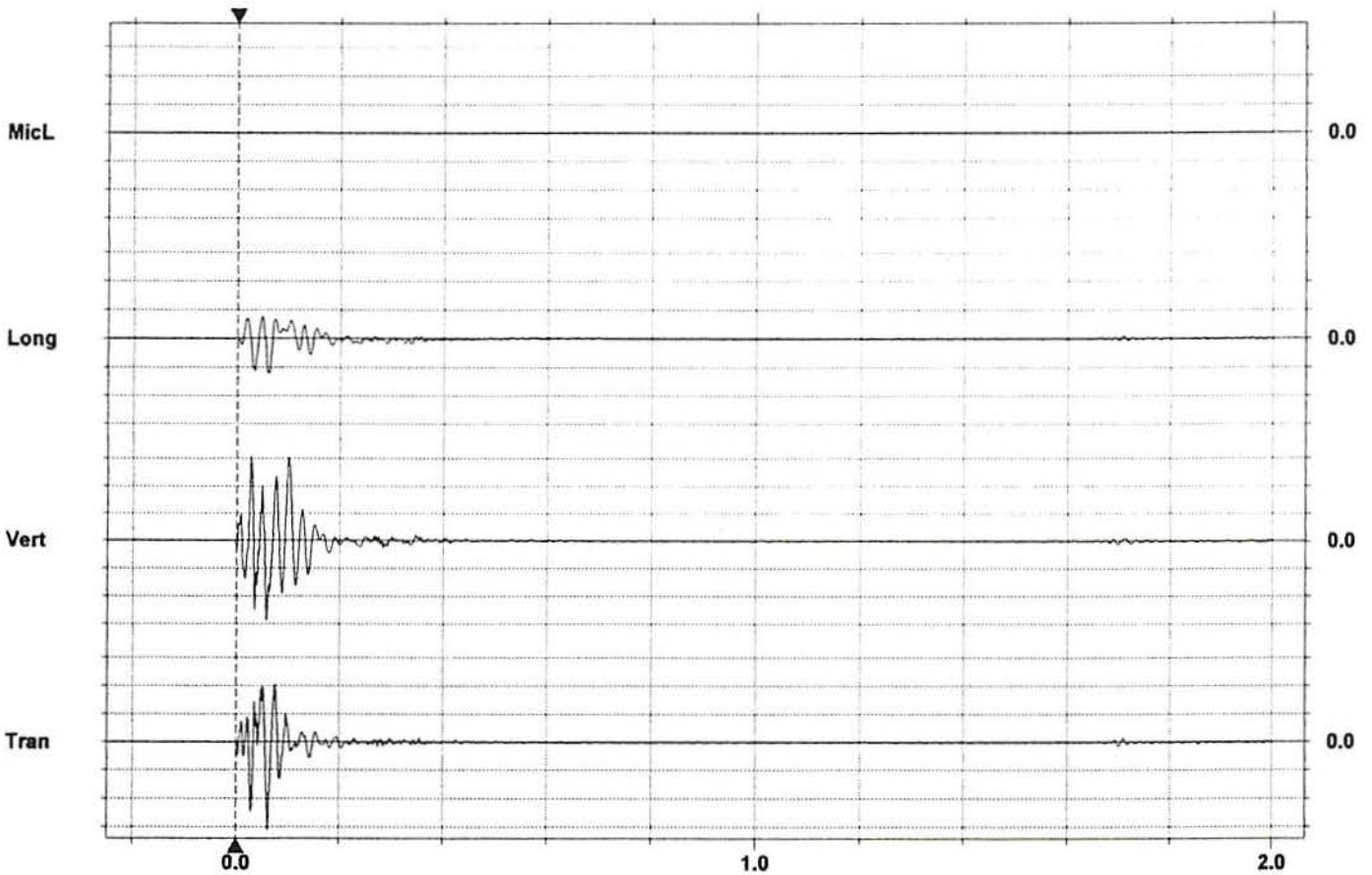
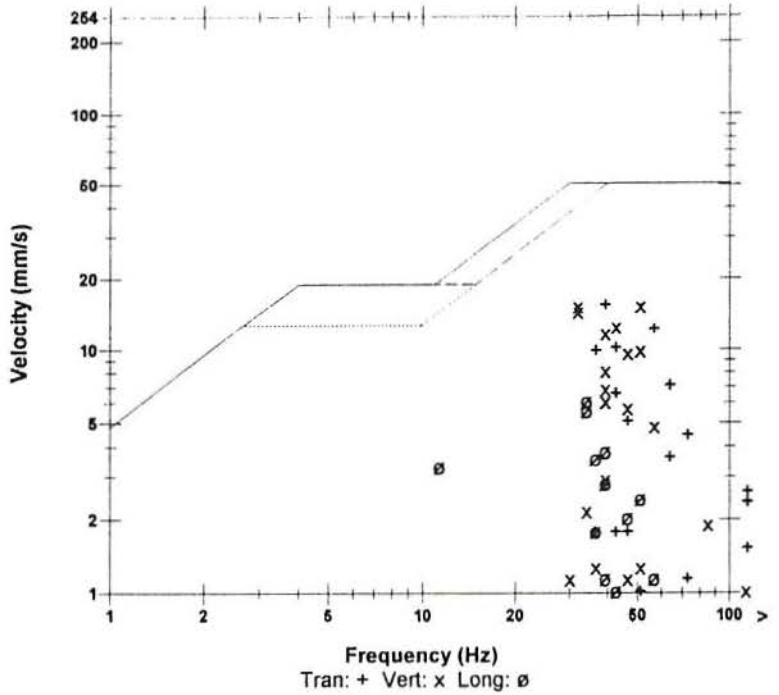
Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.0 pa.(L) at -0.249 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 2 mv)

| | Tran | Vert | Long | |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| PPV | 15.5 | 15.2 | 6.10 | mm/s |
| ZC Freq | 39 | 51 | 37 | Hz |
| Time (Rel. to Trig) | 0.063 | 0.028 | 0.061 | sec |
| Peak Acceleration | 0.530 | 0.689 | 0.172 | g |
| Peak Displacement | 0.0525 | 0.0691 | 0.0430 | mm |
| Sensorcheck™ | Passed | Passed | Passed | |

Peak Vector Sum 19.5 mm/s at 0.029 sec

N/A: Not Applicable

USBM RI8507 And OSMRE



Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 5.00 mm/s/div Mic: 5.00 pa.(L)/div
 Trigger = \blacktriangleright \dashleftarrow