

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)

**DESMONTE COM EXPLOSIVO EM LAVRA SUBTERRÂNEA
DE CARVÃO: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E
UTILIZAÇÃO DE ANFO**

JOSÉ ANTÔNIO KURCEWICZ

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA

Porto Alegre, RS
2004

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)

**DESMONTE COM EXPLOSIVO EM LAVRA SUBTERRÂNEA
DE CARVÃO: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E
UTILIZAÇÃO DE ANFO**

JOSÉ ANTÔNIO KURCEWICZ
ENGENHEIRO DE MINAS

Dissertação realizada no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do 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 e Tecnologia Mineral

Porto Alegre, RS
2004

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

ORIENTADOR:

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima

Dr. Enrique Munaretti

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira
Coordenador do PPGEM

DAS UTOPIAS

***Se as coisas são inatingíveis...ora!
Não é motivo para não querê-las...
Que tristes os caminhos, se não fora
A presença distante das estrelas!***

Mario Quintana

"Dedico este trabalho ao meu filho Felipe e à minha esposa Maria de Lourdes, pela compreensão, confiança e amor.

À minha irmã Gabriela pela luta em proporcionar condições aos meus estudos nos estágios iniciais da minha formação".

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Felipe C. L. Costa, pela orientação na elaboração desse trabalho, pela paciência, amizade e incentivo para o meu aperfeiçoamento técnico e profissional.

Ao Eng^o. Edison Douglas Montedo, pelo carinho e atenção dispensados, pela contribuição técnica e pelos esforços dispendidos para a realização deste trabalho no âmbito da empresa.

À UFRGS e à Escola de Engenharia por proporcionarem as condições para o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa.

Ao Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM), por disponibilizar toda sua infra-estrutura para realização desse estudo, contribuindo para o desenvolvimento científico do país.

Ao Professor Paul Nicholas Worsley – RMERC – UMR – USA, pelas importantes sugestões na implementação dos trabalhos de sismografia e no sistema de avaliação dos retardos. Ao Professor Paulo Salvadoretti pelas idéias e pelo auxílio na interpretação dos sismogramas. Ao colega Enrique Munaretti pelo incentivo material e pessoal na realização deste trabalho.

À Carbonífera Metropolitana S.A. pelo apoio à pesquisa, disponibilizando toda a infra-estrutura necessária para a realização dos trabalhos que culminaram na realização desta dissertação.

Aos colegas do LPM, Pablo Carlin Diaz, Leandro José de Oliveira, Fernando Gambin, Paul Cézanne Pinto, Gianfrancesco O. Cerutti e Anderson Oliveira da Silva que prestaram a sua contribuição a este trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM).

À Fundação Luiz Englert pela bolsa concedida.

SUMÁRIO

Lista de figuras	x
Lista de tabelas.....	xvii
Lista de equações.....	xvii
Resumo	xviii
Abstract	xx

Capítulo 1

Introdução	1
1.1 Meta	5
1.2 Objetivos	6
1.3 Metodologia	6
1.4 Organização desta Dissertação.....	8

Capítulo 2

Controle de qualidade do desmonte com explosivos	9
2.1 Geometria do desmonte	10
2.2 Carregamento dos furos com explosivos	19
2.3 Análise da fragmentação da pilha de desmontado	22
2.4 Análise de desempenho do desmonte a partir de dados de vibração (PPV)	30
2.5 Controle de qualidade do sistema de iniciação	38

Capítulo 3

Desempenho do desmonte de carvão com explosivos em lavra subterrânea	43
---	----

3.1 Localização	44
3.2 Geologia	44
3.3 Método de lavra	47
3.4 Metodologia	48
3.4.1 Levantamento de dados de geometria de desmonte	48
3.4.2 Fotografias da pilha do desmontado	49
3.4.3 Monitoramento sismográfico	51
3.5 Coleta de dados de geometria de desmonte	53
3.6 Análise de imagens - fragmentação	67
3.7 Monitoramento sismográfico	71
3.8 Análise dos resultados de desempenho do desmonte	77

Capítulo 4

ANFO no desmonte em lavra subterrânea de carvão	84
4.1 Aspectos relevantes no emprego de explosivos baseados em ANFO no desmonte de rocha	84
4.2 Propriedades do ANFO	86
4.2.1 Velocidade de detonação	86
4.2.2 Densidade e distribuição granulométrica	87
4.2.3 Percentagem de óleo diesel	87
4.2.4 Umidade	88
4.2.5 Iniciação – Pressão de detonação	91
4.2.6 Tamanho do iniciador	94
4.2.7 Iniciação do ANFO acondicionado em cartuchos plásticos	95
4.2.8 Posição do iniciador no furo	96
4.2.9 Geração de gases tóxicos	96
4.2.10 Reatividade com a pirita	97
4.3 Metodologia	98
4.4 Seleção do iniciador	100

4.5 Testes de iniciação em superfície	101
4.6 Desenvolvimento de cartucho plástico	105
4.7 Testes de desempenho em subsolo	107
4.8 Análise de imagens - fragmentação.....	110
4.9 Monitoramento sismográfico	111
4.10 Parâmetros de desempenho e custos obtidos.....	116
4.11 Análise dos resultados de desempenho do ANFO	118

Capítulo 5

Variabilidade dos tempos de retardo do sistema de iniciação com tubo de choque	119
5.1 Metodologia	119
5.2 Coleta e análise dos dados.....	123
5.2.1 Ensaio com retardos de 25 ms	123
5.2.2 Ensaio com retardos de 650 ms.....	129
5.3 Análise da metodologia e dos resultados obtidos	132

Capítulo 6

Conclusões e recomendações	134
----------------------------------	-----

Referências bibliográficas	138
---	-----

Anexos	146
---------------------	-----

Anexo A – Planilha de campo com os dados dos desmontes

Anexo B – Sismogramas

Anexo C – Fotografias – Análise da fragmentação

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Principais parâmetros no estudo do controle de desempenho do desmonte (Adaptado de Persson et al., 1993).....	3
Figura 2.1	Tipos de erros de perfuração em rocha (Adaptado de Singh, 1996)	14
Figura 2.2	Exemplos de desvios de perfuração em rocha com inclinações diferentes das camadas (Adaptado de Singh, 1996)	15
Figura 2.3	Ciclo ideal de perfuração e desmonte (Adaptado de Bellairs, 1995)	17
Figura 2.4	Zona de máxima eficiência do ciclo de perfuração e desmonte (Adaptado de Bellairs, 1995).....	18
Figura 2.5	Exemplos de fotoanálise: (a) Imagem de caminhão carregado com produto do desmonte; (b) a foto digitalizada (Adaptado de Maerz et al., 1987).....	25
Figura 2.6	Forma de aquisição de imagem em pilhas: (a) Ensaio com pilha em forma de cone; (b) Em local de descarga para teste; (c) Croqui para estabelecer um procedimento de aquisição de imagens; (d) e (e) Imagens de pilhas <i>in situ</i> com escala de referência (Adaptado de Singh et al., 1990)	26
Figura 2.7	Fotografia de uma pilha em ponto de carga em subsolo (Adaptado de Singh et al., 1990)	27
Figura 2.8	Amostragem fotográfica de uma pilha com o emprego de bolas como escala de referência (Adaptado de Noy & Booth, 1997)	27
Figura 2.9	Fotografia e imagem digitalizada (Adaptado de Rholl et al., 1993) .	28
Figura 2.10	Sismograma mostrando a falha na iniciação de cargas conforme o tempo previsto (Adaptado de Cameron et al., 1995).....	32
Figura 2.11	Modelo de simulação baseado na superposição de eventos individuais (Adaptado de Djordjevic, 1997)	33
Figura 2.12	Sismograma mostrando o pulso de onda gerado pela iniciação das cargas conforme o tempo previsto no plano de fogo (Adaptado de Adamson & Bailey, 1999)	34

Figura 2.13 Plano de fogo monitorado e sinal obtido com sismograma (Adaptado de Mohanty & Yang, 1997)	35
Figura 2.14 Plano de fogo e sismogramas: (a) Plano de fogo e seqüência de iniciação; (b) pulso de onda de um furo detonado e (c) sismograma de uma detonação completa (Adaptado de Mancini <i>et al.</i> , 1995) ...	36
Figura 2.15 Sismograma típico de um desmonte monitorado em abertura de túnel (Adaptado de Adamson <i>et al.</i> , 1999)	37
Figura 2.16 Sinais de vibração e originados pela detonação do pilão. Em (a) mostrando um bom desempenho no primeiro; em (b) um resultado mostrando falhas na iniciação das cargas (Adaptado de Adamson <i>et al.</i> , 1999).....	37
Figura 2.17 Variação dos tempos de retardos para três diferentes fabricantes (Adaptado de Crosby, 1998)	41
Figura 2.18 Vista em planta do método de determinação de espalhamento de retardos (Adaptado de Eloranta, 1992).....	42
Figura 3.1 Mapa de localização	44
Figura 3.2 Perfil da Camada Barro Branco (Extraído de Fabrício, 1973)	46
Figura 3.3 Método de lavra por Câmara e Pilares em avanço e localização dos equipamentos (Adaptado de Anon., 1998)	47
Figura 3.4 Primeira escala de referência (trena) utilizada na análise de imagens	50
Figura 3.5 Segunda e definitiva escala de referência (bolas plásticas) utilizada na análise de imagens	50
Figura 3.6 Sismógrafo Instantel <i>Minimate</i> TM <i>DS-077</i> empregado no monitoramento das vibrações.....	51
Figura 3.7 Sismógrafo Instantel <i>Minimate</i> TM <i>DS-077</i> ancorado ao teto sendo ativado para monitorar um desmonte	52
Figura 3.8 Plano de fogo representativo do desmonte referente ao evento 18.....	56
Figura 3.9 Plano de fogo padrão praticado no conjunto mecanizado 03	57
Figura 3.10 Convenção empregada para a análise dos desvios de emboque dos furos	57

Figura 3.11 Variação da razão de carga em função do avanço e volume obtidos	58
Figura 3.12 Ilustração do desvio médio e do seu respectivo desvio padrão para todos os furos dos desmontes monitorados	59
Figura 3.13 Histograma de desvio para o furo 1 na direção x	60
Figura 3.14 Histograma de desvio para o furo 2 na direção x	60
Figura 3.15 Histograma de desvio para o furo 3 na direção x	61
Figura 3.16 Histograma de desvio para o furo 4 na direção x	61
Figura 3.17 Histograma de desvio para o furo 5 na direção x	62
Figura 3.18 Histograma de desvio para o furo 6 na direção x	62
Figura 3.19 Histograma de desvio para o furo 7 na direção x	63
Figura 3.20 Histograma de desvio para o furo 8 na direção x	63
Figura 3.21 Histograma de desvio para o furo 9 na direção x	64
Figura 3.22 Histograma de desvio para o furo 10 na direção x	64
Figura 3.23 Histograma de desvio para o furo 11 na direção x	65
Figura 3.24 Histograma de desvio para o furo 12 na direção x	65
Figura 3.25 Histograma de desvio para o furo 5 na direção y	66
Figura 3.26 Histograma de desvio para o furo 6 na direção y	66
Figura 3.27 Histograma de desvio para o furo 7 na direção y	67
Figura 3.28 Imagem nº 1 referente ao evento 1, onde ao centro podem ser visualizadas as escalas de referência.	68
Figura 3.29 Digitalização dos contornos dos blocos na imagem referente ao evento 1	69
Figura 3.30 Imagem digitalizada do desmonte referente ao evento 1.....	69
Figura 3.31 Imagem nº 1 do desmonte referente ao evento 18 utilizando bolas como escalas de referência	70
Figura 3.32 Imagem digitalizada do desmonte referente ao evento 18	70
Figura 3.33 Desenho esquemático das estações de monitoramento	71
Figura 3.34 Níveis de velocidade de pico de partícula esperados para os desmontes (Worsey <i>et al.</i> , 2000)	72

Figura 3.35	Modelo de pulso de onda obtido em desmorte convencional	73
Figura 3.36	Representação esquemática do teste controlado	73
Figura 3.37	Modelo de pulso de onda obtido em teste de detonação controlado	74
Figura 3.38	Pulso de onda obtido com o desmorte do evento 18.....	75
Figura 3.39	Pulso de onda obtido com o desmorte do evento 3.....	76
Figura 3.40	Pulso de onda obtido com o desmorte do evento 20.....	76
Figura 3.41	Pulso de onda obtido com o desmorte do evento 4.....	77
Figura 3.42	Perfuração do Banco (parte inferior da face) mostrando a inclinação dada à lança da perfuratriz resultando numa das fontes de desvios	78
Figura 3.43	Simulação de furo no Banco com inclinação de 10 graus	79
Figura 3.44	Simulação de furo no Banco com inclinação de 15 graus	79
Figura 3.45	Perfuração de furo no Banco com inclinação de nove graus.....	80
Figura 3.46	Ilustração mostrando a localização de deslocamentos na face após a realização do corte	81
Figura 3.47	Ilustração do fenômeno de ocorrência da "Rafa Prensada"	81
Figura 4.1	Influência do diâmetro, densidade e confinamento na velocidade de detonação do ANFO (Adaptado de Smith, 1982).....	86
Figura 4.2	Energia liberada pela reação e velocidade de detonação em função do percentual de óleo diesel no ANFO (Adaptado de Hopler, 1998)	88
Figura 4.3	Influência da temperatura na alteração da estrutura cristalina e da densidade do nitrato de amônio (Adaptado de Munaretti, 2002) ...	89
Figura 4.4	Influência da umidade na velocidade de detonação do ANFO (Adaptado de Crosby, 1998)	89
Figura 4.5	Testes de resistência à água do ANFO acondicionado em cartuchos de poliéster e polietileno (Adaptado de Kurcewicz <i>et al.</i> , 2002)	90
Figura 4.6	Velocidade de detonação do ANFO (50% prill, 50% de prills moídos) para diferentes iniciadores. Testes realizados em tubo de aço com 52 mm (Adaptado de Persson <i>et al.</i> , 1993)	92

Figura 4.7	Influência do diâmetro do iniciador e da distância do ponto de iniciação na velocidade de detonação do ANFO (Adaptado de Hustrulid, 1999)	93
Figura 4.8	Influência da pressão de detonação na velocidade do ANFO (Adaptado de Hustrulid, 1999)	93
Figura 4.9	Distância necessária em relação ao diâmetro do furo para que um explosivo alcance a sua VOD (Adaptado de Hustrulid, 1999)	94
Figura 4.10	Comprimento mínimo do iniciador necessário para dois tipos de explosivos alcançarem a VOD (Adaptado de Sen, 1995)	95
Figura 4.11	Iniciação do ANFO pelo fundo do furo mostrando o correto posicionamento da espoleta no iniciador (Adaptado de Persson <i>et al.</i> , 1993)	96
Figura 4.12	Modelo teórico de geração de gases tóxicos em função do percentual de óleo diesel no ANFO (Adaptado de Hopler, 1998)	97
Figura 4.13	Visualização de um tubo carregado com ANFO. A linha azul corresponde ao cordel detonante empregado como medida indireta de velocidade de detonação e a linha amarela refere-se ao tubo de choque do sistema de iniciação	99
Figura 4.14	Teste de detonação em tubo de aço onde pode ser visualizado a iniciação do cordel pelo final da carga de ANFO colocada no tubo	102
Figura 4.15	Teste em tubo de aço carregado com ANFO derramado. Em (a) tubo com a carga antes da detonação; (b) e (c) sobras de tubo após a detonação onde pode ser visualizada a parte intacta do tubo que corresponde ao tampão	103
Figura 4.16	Tubos de aço com diâmetro de 55 mm carregados com iniciadores de 0,195; 0,250; 0,278 e 0,333 kg. Em 4.16a tubos preparados para o ensaio e em 4.16b os resultados obtidos.....	104
Figura 4.17	Ensaio em tubos de diâmetro de 55 mm e massas de iniciador de 0,195; 0,250; 0,278 nos três primeiros tubos e o quarto com um iniciador de 0,278 kg e ANFO a granel. Em 4.17a os tubos	

preparados e em 4.17b os resultados após o ensaio	104
Figura 4.18 Configurações de cartuchos testados para acondicionar o ANFO ..	105
Figura 4.19 Teste de resistência à água com cartucho de poliéster. Em (a) cartucho antes do ensaio; Em (b) após o primeiro minuto de imersão e em (c) após cinco minutos	106
Figura 4.20 Teste de resistência à água com cartucho de polietileno. Em (a) cartucho antes do ensaio; Em (b) após o primeiro minuto de imersão e em (c) após cinco minutos	107
Figura 4.21 Plano de fogo padrão praticado no conjunto mecanizado 5	108
Figura 4.22 Plano de fogo teste com ANFO com 14 furos testado na mesma área de operação do conjunto mecanizado 5	108
Figura 4.23 Fragmentação obtida em desmonte com ANFO	110
Figura 4.24 Blocos com diâmetro igual ou superior à escala identificados no desmonte com ANFO.....	111
Figura 4.25 Sismógrafo Instantel <i>Minimate™ Plus</i> empregado no monitoramento com ANFO	113
Figura 4.26 Registro típico de vibração de um teste de desmonte com ANFO que apresentou um bom resultado em fragmentação e lançamento	114
Figura 4.27 Registro de vibração de um desmonte mostrando problemas com o funcionamento das cargas referentes aos retardos de 25, 125 e 225 ms	115
Figura 4.28 Sismograma de um teste de desmonte com ANFO que apresentou um bom resultado em fragmentação e lançamento e problema localizado na iniciação da carga relacionada ao retardo de 125 ms.....	115
Figura 5.1 Sismógrafo <i>Instantel Minimate™ Plus</i> empregado nos ensaios.....	121
Figura 5.2 Configuração adequada para um ensaio em uma circunferência com raio de 20,0 m e 21 espoletas interconectadas.....	121
Figura 5.3 Ensaio em campo. Em (a) pode ser visualizado um teste	

	montado e em (b) o mesmo teste em execução	122
Figura 5.4	Configuração adotada para a realização do teste de variabilidade com retardos de 25 ms	124
Figura 5.5	Registro de ruído obtido no teste de campo nº 1 com retardos de 25 ms. Os algarismos de 1 a 21 identificam a ordem de detonação e os valores acima do eixo dos tempos registra o momento de chegada do pulso de sobrepressão acústica no microfone	125
Figura 5.6	Registro de ruído fornecido pelo teste de campo nº 2 realizado com retardos de 25 ms	125
Figura 5.7	Registro de ruído referente ao teste de campo nº 3 realizado com retardos de 25 ms	126
Figura 5.8	Histograma obtido com os dados dos três ensaios de campo realizados com retardos de 25 ms	128
Figura 5.9	Configuração adotada para os testes de campo com retardos de 650 ms	129
Figura 5.10	Registro de ruído obtido com o teste de campo nº 1 realizado com retardos de 650 ms	130
Figura 5.11	Registro de ruído obtido com o teste de campo nº 2 realizado com retardos de 650 ms	130
Figura 5.12	Histograma obtido com os dados dos ensaios de campo realizados com retardos de 650 ms	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Especificações técnicas do sismógrafo Instantel - <i>Minimate</i> TM <i>DS-077</i>	52
Tabela 3.2	Planilha de coleta de dados de geometria e carregamento.....	54
Tabela 3.3	Desvio de emboque (colar) em relação ao eixo x (em cm)	55
Tabela 3.4	Desvios de emboque (colar) em relação ao eixo y (em cm).....	56
Tabela 3.5	Dados de desempenho técnico e econômico dos desmontes	58
Tabela 3.6	Índice de blocos (em %).	68
Tabela 3.7	Planilha de coleta de dados de sismografia.....	72
Tabela 4.1	Distribuição granulométrica recomendada para o <i>prill</i> poroso de nitrato de amônio (Adaptado de Crosby, 1998)	87
Tabela 4.2	Parâmetros empregados nos testes de ANFO em tubo de aço	102
Tabela 4.3	Planilha de coleta de dados de geometria e carregamento.....	109
Tabela 4.4	Índice de blocos de desmontes realizados com ANFO (em %).....	110
Tabela 4.5	Especificações técnicas do sismógrafo Instantel – <i>Minimate</i> TM <i>Plus</i>	113
Tabela 4.6	Índices de desempenho e custos obtidos no desmonte com ANFO	117
Tabela 5.1	Tempos obtidos nos ensaios para retardo de 25 ms	127
Tabela 5.2	Tempos obtidos nos ensaios para retardo de 650 ms.....	131

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1	Reação estequiométrica para o NH_4NO_3 para um balanço positivo de oxigênio.....	85
Equação 4.2	Expressão utilizada para o cálculo da pressão de detonação	91

RESUMO

O desmonte com explosivos é uma das mais relevantes operações unitárias na lavra subterrânea de carvão no Brasil. Esta operação tem como objetivo a obtenção de ROM com uma distribuição granulométrica adequada, de tal forma que o impacto final na combinação com os custos de perfuração, limpeza e transporte sejam minimizados.

A implantação de um controle de desempenho do desmonte, amparado em dados de geometria, análise de imagens e no monitoramento de vibrações, é uma ferramenta que permite avaliar as operações de desmonte. O controle de desempenho do desmonte deve englobar os seguintes parâmetros: geometria, desempenho do sistema de iniciação, desempenho da detonação, caracterização das propriedades do maciço rochoso e sua influência no processo de detonação, fragmentação e danos causados pelo desmonte às áreas adjacentes.

Essa dissertação propõe métodos de diagnóstico para o desmonte com explosivos em subsolo amparados em dados de geometria, na análise de imagens e no monitoramento de vibrações. Investigou-se, também, a exequibilidade do uso de ANFO em perfuração de pequeno diâmetro com o objetivo de reduzir os custos globais de desmonte. Testes de desempenho foram realizados em superfície e subsolo, com um agente explosivo à base de nitrato de amônio e óleo combustível embalados em cartuchos plásticos. Complementando o controle de desempenho do desmonte e o estudo de viabilidade do emprego de ANFO, foi proposta a aplicação de metodologia para o controle de qualidade do sistema de iniciação das cargas explosivas com tubo de choque.

A adoção da metodologia desenvolvida mostrou-se apropriada para a elaboração de diagnósticos do desmonte com explosivos, tornando a tomada de decisão mais segura na introdução de melhorias nos sistemas de desmonte com explosivos possibilitando visualizar a necessidade de agregar qualidade à mão-de-obra com o desenvolvimento de programas de treinamento. Os estudos de adequação do ANFO apresentaram resultados positivos na sua aplicação em cenários particulares de desmonte

subterrâneo, assim como a adoção da metodologia para o controle de qualidade dos sistemas de retardos demonstrou ser uma técnica eficiente e segura.

ABSTRACT

Blasting is one of the most important unit operations in underground coal mining in Brazil. This operation aims at obtaining ROM with an adequate granulometric distribution, so that the final impact, in addition to drilling, loading and transportation costs, is minimized.

The implantation of blasting performance control, supported by geometric data, image analysis and vibration monitoring, is a tool that allows the evaluation of blasting operations. Blasting performance control should encompass the following parameters: geometry, performance of the initiation system, characterization of the properties of the rock mass and its influence in the blasting and fragmentation process and damage caused by the blasting to the adjoining areas.

This dissertation proposes diagnostic methods for underground blasting with explosives supported by geometric data, image analysis and vibration monitoring. The feasibility of ANFO use in small diameter drilling, with the objective of reducing global costs in blasting, was also investigated. Performance tests were carried out on surface and underground, with an explosive agent based on ammonium nitrate and combustible oil wrapped in plastic cartridges. Complementing the blasting performance control and the study on the feasibility of ANFO use, the application of a quality control methodology for the initiation system of explosive charge with shock tube was proposed.

The adoption of this methodology was considered appropriate for the elaboration of diagnostics about blasting with explosives, turning decision-making on the introduction of improvements in blasting systems with explosives more reliable, making it possible to visualize the necessity of aggregating quality to labor with the development of training programs. The studies on ANFO suitability presented positive results in their application in particular underground blasting environments. Moreover, the adoption of the proposed methodology for the quality control of delay systems was considered an efficient and safe technique.

Capítulo 1

Introdução

Na indústria mineral, uma das principais operações é o desmonte de rocha com o emprego de explosivos. Esta atividade reflete-se diretamente nas operações subseqüentes como o carregamento e transporte, influenciando diretamente os custos finais do produto.

As operações unitárias que compõem um ciclo em desmonte de rocha com explosivos são: o projeto de um plano de fogo, a perfuração obedecendo rigorosamente ao mesmo, a seleção de explosivo adequado às características litológicas do maciço, a escolha e a correta execução do tampão para permitir uma melhor interação explosivo/rocha e a seleção de um método de iniciação eficiente. Os melhores procedimentos técnicos empregados no dimensionamento de um plano de fogo e uma criteriosa escolha dos explosivos e métodos de iniciação não são suficientes para a garantia na obtenção da fragmentação adequada ao sistema de carregamento e transporte. As características litológicas (descontinuidades, presença de água, tipos litológicos presentes, etc.) interferem diretamente no desempenho do explosivo e na qualidade da fragmentação final.

A análise da fragmentação em desmonte de minas subterrâneas pode ser utilizada para: avaliação dos planos de fogo empregados, comparação de diferentes tipos de explosivos sob condições similares, avaliação de diferentes métodos de iniciação e o impacto dessas variáveis na composição final dos custos de produção. A análise desses parâmetros é importante para determinar

se o grau de fragmentação que está sendo alcançado está dentro de uma distribuição adequada ao processo de produção. Uma distribuição granulométrica aquém das especificações exigidas pode resultar em dificuldade de escavação da pilha pelos equipamentos de carregamento, baixa produtividade e aumento dos custos de manutenção. Nos estágios iniciais de testes de explosivos e métodos de iniciação, recomenda-se que seja incorporado o controle de desempenho do desmonte (Persson *et al.*, 1993). O controle de desempenho de desmonte deve englobar os seguintes parâmetros (Figura 1.1):

- i. geometria do desmonte;
- ii. desempenho do sistema de iniciação;
- iii. desempenho da detonação;
- iv. caracterização das propriedades do maciço rochoso e sua influência no processo de detonação;
- v. fragmentação;
- vi. danos causados pelo desmonte às áreas adjacentes.

A geometria do desmonte inclui o posicionamento dos furos e a estrutura da rocha até uma profundidade igual ao avanço projetado. A correlação da estrutura da rocha e a posição dos furos de desmonte permitem quantificar e posicionar a carga de explosivos, visando obter um melhor rendimento na fragmentação. Também, podem ser evitados danos a áreas adjacentes controlando a diluição e minimizando-se os problemas relacionados a estabilidade do teto.

O desempenho dos retardos, analisado em um sismograma, permite avaliar os intervalos de tempo real exibidos pelos elementos e compará-los às informações dos fabricantes. A performance dos iniciadores pode ser verificada com medidas de velocidade de detonação ou por vibrações medidas por meio de acelerômetros posicionados próximos ao local de detonação. Pode-se, também, determinar se alguma iniciação de cargas em furos adjacentes ocorreu por onda de tensão (detonação por simpatia) ou se a iniciação não foi satisfatória.

O grau de reprodutibilidade da amplitude de vibração por meio de uma

equação de previsão dos níveis de vibração não é adequado para uma correlação quantitativa entre os dados do sismograma e o desempenho do explosivo dentro do furo, exceto para falhas características no funcionamento das cargas no momento da detonação. As variações nos sinais obtidos nos sismogramas são atribuídas a fatores inerentes à região onde o explosivo está atuando, como presença de face livre, geração de novas faces, posição da carga e características geológicas do maciço no entorno mas, possibilitam avaliar qualitativamente o desempenho da iniciação (Mohanty & Yang, 1997).

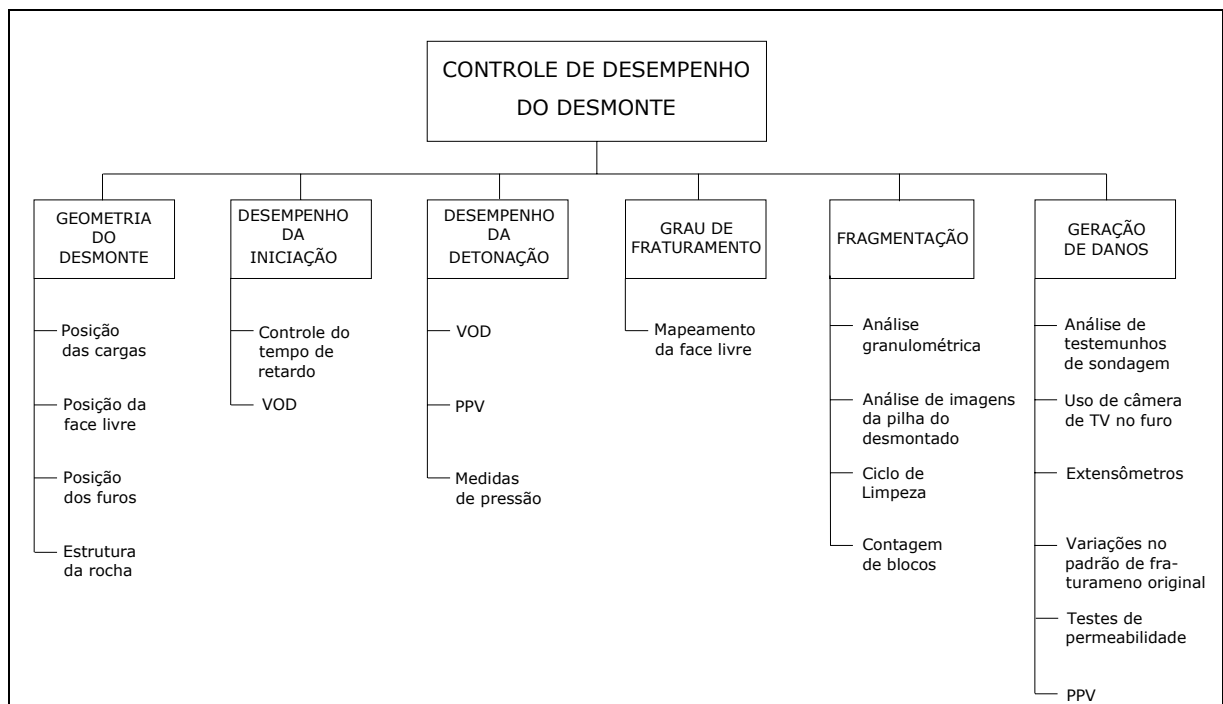


Figura 1.1 Principais parâmetros no estudo do controle de desempenho do desmonte (Adaptado de Persson *et al.*, 1993).

Conforme Persson *et al.* (1993), a interação onda de choque-macijo rochoso pode ser analisada por medidas de velocidade de detonação. A forma do pulso e a magnitude do sinal subsidiam a análise do funcionamento da carga de explosivo. Dessensibilização por onda de choque, carregamento dinâmico por movimento do maciço no entorno de furos adjacentes fazendo com que cargas atinjam o seu diâmetro crítico ou por penetração dos gases gerados pela detonação através de fraturas que conectam dois ou mais furos, podem interferir no funcionamento das cargas dos furos próximos. Explosivos sensibilizados com

microbolhas de ar podem perder a sua sensibilidade devido ao carregamento dinâmico após a detonação de furos adjacentes, principalmente se algum sistema de fratura intercepta diversos furos.

Em situações em que propriedades características do maciço rochoso possam interferir no processo de iniciação, recomenda-se a realização de testes de permeabilidade ou ensaios de perda de água, os quais possibilitam avaliar o grau de fraturamento do maciço e auxiliar na escolha do explosivo e na forma de carregamento mais adequada para este tipo de situação (Persson *et al.*, 1993).

A fragmentação pode ser verificada a cada ciclo de detonação. Essa informação em conjunto com dados de desempenho da detonação, descrição das orientações estruturais e da resistência da rocha, podem conduzir a possíveis alterações na geometria do desmonte para uma próxima etapa com melhorias na prática existente.

A distribuição de tamanho e forma dos fragmentos de rocha após a detonação acrescentam informações na avaliação dos testes realizados em desmonte. A análise da fragmentação é corriqueiramente realizada por peneiramento, todavia esta metodologia é muito trabalhosa e de custo alto para os volumes de material envolvidos neste estudo. Fotografias da pilha de desmontado ou dos pontos de carregamento com posterior análise da imagem gerada podem fornecer informações importantes sobre a distribuição granulométrica e a fragmentação. Os acompanhamentos do ciclo de limpeza e contagem de blocos grosseiros nas imagens são parâmetros que permitem uma análise da eficiência em fragmentar o material (Persson *et al.*, 1993).

Técnicas de contagem de blocos, em alguns casos podem ser empregadas. O principal objetivo no emprego desta técnica é definir o tamanho que constitui um bloco porque, de fato, deseja-se o número de blocos que exceda uma dada dimensão. O índice pode ser simplesmente o número de blocos encontrados por unidade de volume. A condição ideal seria que todo o material gerado em um desmonte fosse medido para uma avaliação adequada da fragmentação. Os custos envolvidos neste tipo de operação não se justificam, e conseqüentemente, outras práticas de amostragem adequadas a partir de regras bem definidas e aceitas podem ser adotadas. Esta condição elimina a aplicação de análise de granulometria por peneiramento em operações de desmonte em subsolo. Amostragem regular dos pontos de carregamento com equipamento fotográfico

realizado em intervalos regulares durante a operação de carregamento, pode ser utilizada para produzir uma amostra representativa. Tais medidas, combinadas com uma contagem convencional de blocos e controle dos custos gerados pelo desmonte secundário podem formar um sistema de monitoramento do desmonte (Singh *et al.*, 1990).

A introdução de melhorias no sistema de desmonte pela seleção e adequação de explosivos eficientes, seguros e com custos competitivos, passa obrigatoriamente por testes com ANFO. A partir de 1950, explosivos baseados em ANFO encontraram uma grande variedade de aplicações em mineração, indústria de agregados e construção civil. A predominância do seu emprego em desmonte de rochas é atribuída principalmente a fatores econômicos e a sua praticidade e segurança no manuseio. O ANFO tem seu uso limitado pela pouca resistência à água e à baixa densidade, fatores que devem ser bem conhecidos antes da sua introdução em um sistema de desmonte. Existem outros fatores que exercem uma grande influência nas características de detonação do ANFO, como a velocidade de detonação, densidade, iniciação, percentagem de óleo diesel, geração de gases tóxicos, reatividade com a pirita, etc (Hopler, 1998).

Dentro deste contexto, insere-se o escopo da dissertação. Faz-se necessário o uso de técnicas de controle de desempenho do desmonte de rochas com explosivos. Essas técnicas são pouco difundidas e quase não empregadas no setor mineral, principalmente nas empresas mineradoras de carvão do sul do Brasil, sendo estas o alvo deste trabalho.

1.1 Meta

A meta dessa dissertação é desenvolver uma metodologia para diagnosticar o desmonte subterrâneo de carvão, amparados em dados de geometria, na análise de imagens e no monitoramento de vibrações. Avaliar o desempenho do ANFO em condições específicas e desenvolver procedimentos para o controle de qualidade do sistema de iniciação.

1.2 Objetivos

Para atingir as metas dessa dissertação, alguns objetivos foram estabelecidos:

- i. definir procedimentos para avaliação do desmonte levando em consideração os aspectos de lavra;
- ii. aplicar procedimentos para o uso de análise de imagens como técnica de medida de eficiência da fragmentação;
- iii. utilizar medidas de vibrações como forma de diagnosticar a eficiência do desmonte;
- iv. avaliar a utilização de ANFO adequado às condições de minas subterrâneas de carvão sul-brasileiras;
- v. propor um procedimento para o controle de qualidade dos sistemas de iniciação com tubo de choque empregados nos desmontes em subsolo.

1.3 Metodologia

A metodologia empregada neste trabalho envolveu o acompanhamento contínuo do processo de preparação, perfuração, desmonte e limpeza das frentes de lavra de mina de carvão amparados no monitoramento de vibrações e coleta de imagens da pilha do desmontado. Para a geração de um banco de dados e posterior análise dos resultados obtidos, foram adotados os seguintes procedimentos:

- i. revisão bibliográfica para levantamento do estado da arte na utilização de explosivos e acessórios, elaboração de ANFO *in situ* e monitoramento das vibrações;
- ii. definição de um programa de testes com a seleção de pontos para monitoramento;
- iii. a coleta de dados referente a geometria do desmonte como: comprimento e posição dos furos na face (afastamento e espaçamento), dimensões da frente, posição, comprimento e massa da carga por furo, sistema de iniciação, tamanho e tipo de tampão;
- iv. a coleta de imagens (fotografias) da pilha de desmontado imediatamente após as detonações, após o transporte de aproximadamente 50% do material desmontado e antes da conclusão dos trabalhos de limpeza;
- v. monitoramento dos níveis de vibração de todos os desmontes a partir de estações fixas pré-definidas, ancorando o sismógrafo ao teto da galeria por meio de um parafuso de teto;
- vi. estudo da variabilidade dos retardos com a realização de testes de campo com monitoramento utilizando sismógrafo;
- vii. estudo e desenvolvimento de uma formulação de ANFO e caracterização tecnológica de seus componentes;
- viii. estudo e seleção de um explosivo iniciador (*primer*) mais indicado para a iniciação do ANFO;
- ix. realização de testes de detonação com o ANFO em tubos de aço na superfície;
- x. elaboração de um plano de fogo e testes com ANFO com a coleta de dados segundo a metodologia acima descrita;
- xi. adequação do plano de fogo em função dos resultados obtidos;
- xii. Análise e avaliação dos resultados.

1.4 Organização desta dissertação

O Capítulo 1 introduz o assunto, enfoca o problema, definindo o ferramental básico para a solução.

O Capítulo 2 faz uma revisão do estado da arte na implantação de um controle de desempenho do desmonte com explosivos, na análise da fragmentação por meio de imagens e no monitoramento das vibrações e ruído como ferramenta de medida de eficiência do desmonte e sistemas de iniciação.

O Capítulo 3 apresenta os dados obtidos na primeira etapa com o levantamento dos dados da geometria do plano de desmonte, análise de imagens e no monitoramento das vibrações.

O Capítulo 4 descreve as condições técnicas básicas para um bom funcionamento do ANFO, dados dos testes de campo e posterior implantação no ciclo produtivo, incluindo o plano de fogo adotado, a análise de imagens e no monitoramento das vibrações.

O Capítulo 5 descreve a metodologia empregada para o controle de qualidade (variabilidade) do sistema de iniciação com tubo de choque dos desmontes e apresenta os dados coletados em testes realizados no campo.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e recomendações para investigações futuras.

Capítulo 2

Controle de qualidade do desmonte com explosivos

Este capítulo tem por finalidade revisar o estado da arte das técnicas empregadas no controle de qualidade do desempenho do desmonte com explosivos convencionais em lavra subterrânea. Utiliza-se para tal o levantamento de dados da geometria do desmonte, análise de imagens e monitoramento das vibrações. Numa segunda parte, são revisados os aspectos técnicos mais importantes e os procedimentos que podem ser empregados na aplicação de metodologia de controle de qualidade dos sistemas de iniciação de explosivos com tubo de choque empregados na lavra.

Em desmonte de rocha com explosivos, a acuracidade da perfuração aliada a um dimensionamento adequado do plano de fogo, escolha correta do tipo explosivo e um sistema de iniciação eficiente são fatores preponderantes na qualidade da fragmentação obtida. Ferramentas como o levantamento de dados da geometria do plano de fogo durante a perfuração, imagens do material desmontado e dados obtidos a partir dos sismogramas dos desmontes, possibilitam avaliar o desempenho do desmonte e fornecer subsídios para modificações que se fizerem necessárias.

Para uma melhor ordenação, esta revisão bibliográfica foi subdividida em cinco tópicos:

- i. aspectos relacionados à geometria do desmonte como locação e execução dos furos, posição da face livre, estrutura da rocha;
- ii. técnicas empregadas no carregamento dos furos;
- iii. análise de imagens para avaliar a fragmentação;
- iv. dados de vibração (PPV) para avaliar o desempenho da detonação;
- v. metodologia para o controle de qualidade do sistema de iniciação.

2.1 Geometria do desmonte

O planejamento, projeto e execução de desmonte com explosivos não é uma ciência exata. Devido a grande variação das características das rochas, das estruturas geológicas e dos tipos de explosivos passíveis de serem empregados, torna-se praticamente impossível determinar na forma de um modelo matemático, uma solução capaz de definir um plano de fogo ajustado a todas estas configurações possíveis sem a realização de testes preliminares com ensaios de campo. Durante todo o planejamento de um projeto de plano de fogo, dois princípios básicos devem ser seguidos:

- i. os explosivos têm um melhor desempenho quando a face livre está praticamente paralela à coluna de explosivos no momento da detonação;
- ii. a malha de perfuração deverá estar adequada, pois é neste espaço pré-determinado em cálculo e testes de campo que a rocha estará em movimento e expansão. Confinamento em excesso de massas explosivas é uma das causas determinantes de falhas no processo de desmonte, tais como, ultraquebra, vibrações no maciço, sobrepressão acústicas, repés, ultralançamento, cortes no sistema de iniciação e fragmentação abaixo dos parâmetros exigidos.

Num ambiente produtivo, a eficiência do processo de desmonte é determinada pela habilidade de um operador em executar um furo a partir de uma localização planejada do colar (emboque) até uma posição prevista do

fundo do furo. Uma grande parte dos problemas que são relacionados a deficiências ou falta de eficiência do desmonte, são na verdade originadas na perfuração. A avaliação da eficiência do desmonte deve, primeiro, começar por um exame detalhado da prática de perfuração.

O aumento do afastamento e/ou do espaçamento dos furos devido a uma prática inadequada de perfuração, implicará na presença de repé, elevação dos níveis de vibração, aumento do tempo de confinamento dos gases da detonação o que ocasionará um aumento na incidência dos danos ao maciço. Danos gerados pelo desmonte devido a uma má prática de perfuração, além de gerar fogos secundários, aumentarão a exigência aos equipamentos de limpeza e transporte, tempo de instalação dos sistemas de suporte, redução da segurança. Isso tudo implicará em galerias com contornos irregulares, vindo a influenciar no ciclo de limpeza com reflexos nos custos de manutenção e de suporte bem como na eficiência da ventilação. Por outro lado, a diminuição do afastamento e/ou do espaçamento poderá resultar na interação das cargas de explosivos. Falhas e baixas eficiências na detonação são, na verdade, desperdício da energia liberada pelo explosivo (e perfuração).

A locação final de um furo é o produto de uma série de atividades que antecedem a perfuração. O plano de fogo, além da posição de emboque do furo, deve determinar o comprimento e o ângulo dos furos. Para uma boa prática de perfuração, o ponto de emboque de um furo deve ser marcado na face com o emprego de tinta assim como a indicação da direção deverá ser marcada nas laterais e teto das galerias. A qualidade da abertura (geometria) influencia na qualidade da perfuração devido às limitações físicas impostas pelo equipamento de perfuração. A retilinidade de um furo durante o processo de perfuração é controlada pelo operador do equipamento com ajustes na velocidade de avanço, percussão e rotação. Desvios gerados após a iniciação, serão influenciados pela geologia e pelas limitações técnicas do equipamento.

As principais fontes de erro na perfuração geradas antes do *bit* iniciar a penetração no maciço rochoso são: inexistência de inspeção da frente, de marcação do plano de fogo na face, erros no posicionamento do equipamento e alinhamento da lança tendo como conseqüência erros no emboque dos furos. Após o início de um furo, os desvios são gerados pelas limitações físicas do equipamento, prática de perfuração incorreta quanto ao avanço e rotação postos

à perfuratriz, condições do equipamento associado ao estado das hastes, bits, vazamentos no sistema de acionamento (hidráulico ou ar comprimido) e a condicionantes impostas pela geologia do maciço. A soma total destes fatores fornece uma medida da acuracidade final da perfuração (Forsyth *et al.*, 1995).

De acordo com Sen (1995), com a introdução de sistemas hidráulicos mais modernos, as condições mecânicas dos equipamentos de perfuração rotativa e percussiva estão próximas da perfeição. Porém, os principais fatores a serem considerados quando se deseja alcançar bons resultados com a perfuração, é executar os furos de acordo com os parâmetros estabelecidos em projeto. Os desvios em excesso da perfuração produzem uma fragmentação inadequada, comprometendo a segurança. Além disso, furos com grandes desvios oferecem mais resistência ao fluxo de saída do material desmontado pelo *bit*, reduzindo as velocidades de avanço, gerando aumento do ciclo, paradas imprevistas por quebras com perdas de produtividade e o conseqüente aumento dos custos de produção.

Segundo Revey (1998), o desenvolvimento de técnicas em perfuração e desmonte ocorre num processo multiforme. Muitas melhorias são alcançadas na execução diária das atividades de desmonte pelas equipes de produção, enquanto outras são introduzidas por avanços técnicos no desenvolvimento de explosivos e o emprego de tecnologia de ponta na fabricação de equipamentos de perfuração. Fabricantes de explosivos, consultores independentes, pesquisadores ligados a órgãos governamentais e profissionais ligados à indústria mineral, são outras fontes de idéias com relação à introdução de novos avanços e atualizações na tecnologia de perfuração e desmonte.

As operações de perfuração, carregamento e desmonte em subsolo se constituem em ciclos de trabalho de curta duração, devendo, merecer um melhor planejamento. A marcação dos furos na face de acordo com um plano de fogo pré-estabelecido bem como o emboque e a perfuração devem ser cumpridos rigorosamente de acordo com o planejado. Os furos devem ser executados no local pré-determinado, com a direção e inclinação correta para a obtenção da precisão e acuracidade exigida nesta etapa. (Olofsson, 1988).

Os desvios da perfuração são um fator quantitativo freqüentemente negligenciado sob todos os aspectos, incluindo-se, os limites técnicos relacionados às características do maciço rochoso. A análise e o estudo do

desmonte no seu conjunto tenderá a tornar-se vantajosa no dimensionamento das cargas de explosivos se, na elaboração do plano de fogo for dada a devida importância à qualidade da perfuração (Langefors & Kihlström, 1963).

Uma operação de desmonte pode ser totalmente prejudicada se não for dada a devida atenção à qualidade da perfuração. Os desvios da perfuração são definidos como uma composição de três componentes: qualidade na locação do colar do furo, qualidade no alinhamento do equipamento e desvios da trajetória. Os desvios do colar (emboque) do furo referem-se ao local onde o furo foi iniciado comparado com o local marcado na face. Desvios relacionados ao ângulo de emboque (direção) estão relacionados à habilidade do operador de iniciar o furo e mantê-lo alinhado com a direção planejada. A componente final dos desvios é o desvio da trajetória e é uma consequência da interação entre o equipamento de perfuração e a massa rochosa bem como a habilidade que o operador tem sobre o controle de alguns parâmetros de perfuração, tais como, rotação, avanço, percussão (Hendricks *et al.*, 1991).

Conforme Persson *et al.* (1993), um valor considerado normal para os desvios de colar, é de no máximo três vezes o diâmetro do furo. Desvios angulares dependem basicamente da qualidade com que a equipe responsável executa o alinhamento do equipamento com a direção planejada de perfuração, como também das condições mecânicas e dos recursos disponíveis no equipamento. Os desvios do furo dependem basicamente da relação comprimento/diâmetro do furo aumentando com o aumento da pressão de avanço da perfuratriz.

Conforme Singh (1996), o desvio de perfuração é a diferença entre a posição planejada e a posição realizada do eixo geométrico do furo. É composto por três componentes distintas: erro de marcação ou emboque, erro de alinhamento e erro por desvio da trajetória (Figura 2.1). A diferença entre a profundidade planejada e a realizada de um furo é também um erro mas, é diferente de um erro de desvio do ponto de vista técnico embora com implicações similares. Como regra geral, erros de emboque e de alinhamento estão associados a fatores externos ao furo propriamente dito, mas os desvios referentes a erros de trajetória têm origem em fatores internos e externos ao furo. Erros de emboque e de alinhamento são fáceis de identificar, examinar e compreender as causas, mas os desvios de trajetória são mais difíceis de

investigar e identificar as fontes.

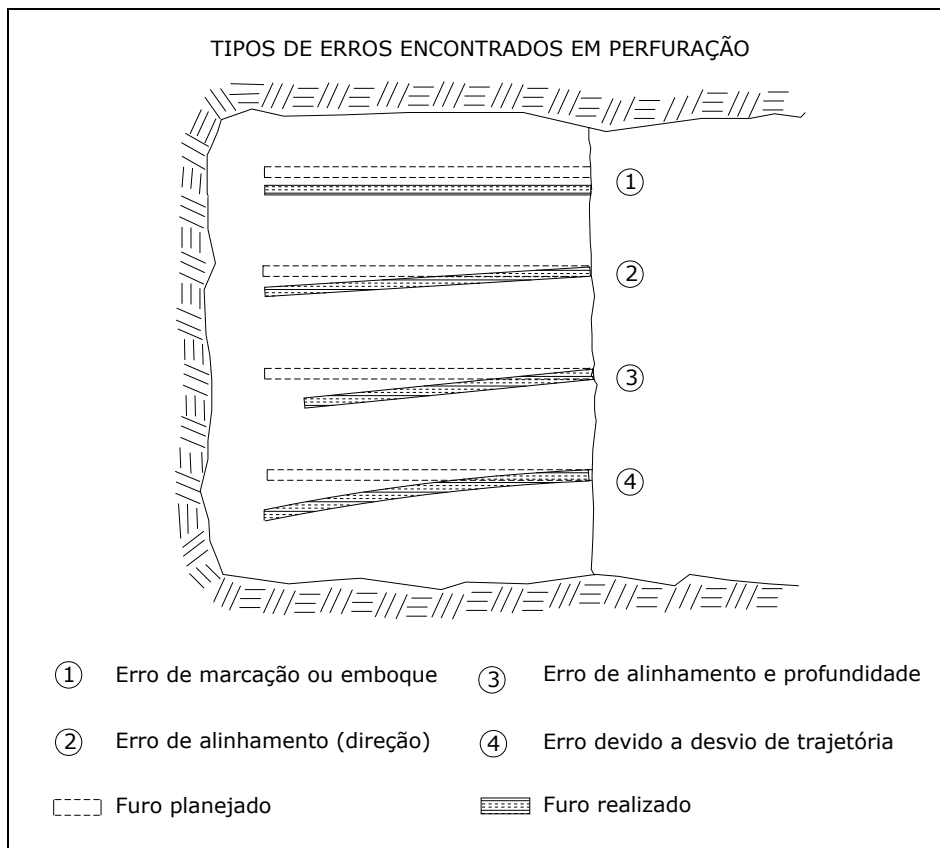


Figura 2.1 Tipos de erros de perfuração em rocha (Adaptado de Singh, 1996).

Segundo o mesmo autor, os desvios de perfuração são as resultantes de forças assimétricas que atuam sobre o *bit* de perfuração. Estas forças podem ter as suas origens em parâmetros do equipamento, variáveis operacionais ou causas originadas em feições geológicas presentes na massa rochosa. Já é bem conhecido, que a perfuração inclinada tem uma tendência maior de desviar do que a vertical e que furos de pequeno diâmetro geram maiores desvios que os de maior diâmetro. Os principais aspectos relacionados à geologia do maciço que contribuem para desvios em perfuração são:

- i. Resistência da rocha;
- ii. Estratificação e foliação (mergulho, espessura, e coesividade do contato entre as camadas);
- iii. Juntas (orientação, preenchimento e abertura das juntas);

iv. Estratificação.

Na Figura 2.2 são ilustrados exemplos de desvios conforme varia a inclinação das camadas em um maciço rochoso.

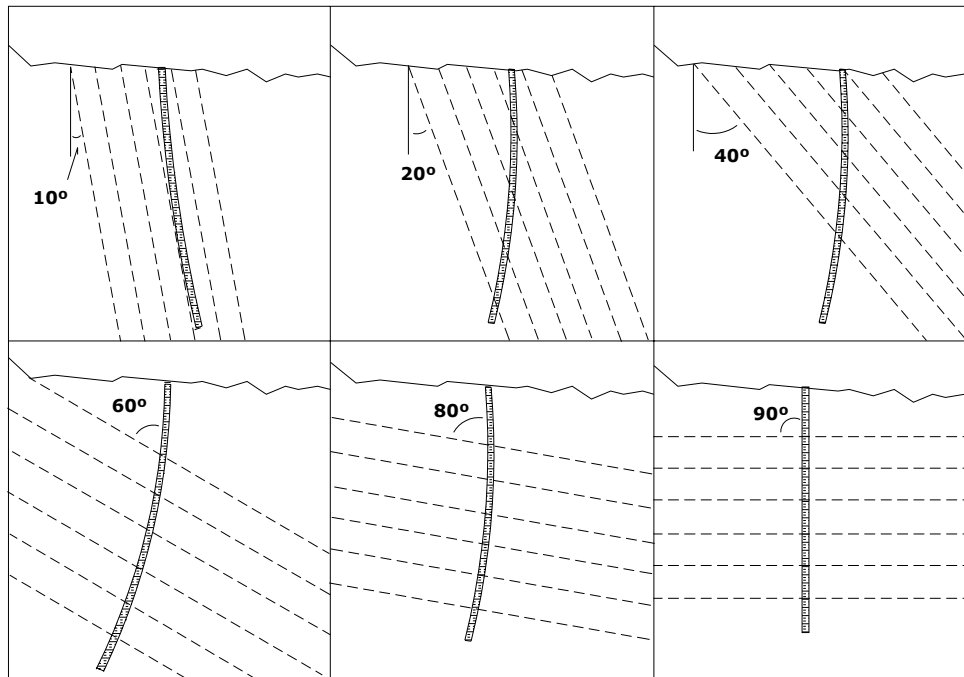


Figura 2.2 Exemplos de desvios de perfuração em rochas com inclinações diferentes das camadas (Adaptado de Singh, 1996).

Osen (1985) ressalta que os benefícios previstos por um bom projeto de desmonte podem ser totalmente perdidos devido a uma prática inadequada de perfuração. O mesmo autor questiona sobre a validade de se utilizar computadores para determinar consumo específico de explosivos e determinar as toneladas produzidas se, deparamos freqüentemente com operadores de equipamento de perfuração que simplesmente determinam o espaçamento e o afastamento com um simples deslocamento dos olhos, sem nenhum cuidado em realizar estas medidas com um mínimo de acuracidade.

Hartman (1987) divide em quatro grupos os fatores que afetam o desempenho da perfuração. O primeiro grupo é composto pelas variáveis operacionais, as quais são afetadas por quatro componentes do sistema: perfuratriz, haste, *bit* e o fluido. Estes componentes são em grande parte, controláveis e divididos em duas categorias. Uma relacionada às variáveis

compostas pela potência da perfuratriz, percussão, rotação, avanço e tipo de haste e a segunda à vazão e propriedades do fluido gerador de energia.

O segundo grupo é composto por fatores relacionados ao furo propriamente dito. Estes fatores incluem o diâmetro, comprimento e inclinação dos furos e são regidos por exigências externas à operação, originando o que se pode chamar de variáveis independentes. Em operações de desmonte em subsolo, o diâmetro da perfuração varia dentro de um intervalo de 40 mm até 175 mm.

O terceiro grupo são fatores cujas variáveis também são independentes e tem a sua origem determinada pelas propriedades da rocha, condições geológicas e o estado de tensões atuante em torno do furo. Podem ser denominados de fatores de perfurabilidade. São fatores que determinam a resistência da rocha à perfuração, estabelecendo limites ao desempenho da perfuratriz.

O quarto grupo refere-se aos denominados fatores de serviço que consistem basicamente na mão-de-obra e na supervisão empregada, suprimento de energia, ambiente em que se está realizando o trabalho, etc. Estas variáveis também são consideradas como variáveis independentes, originadas basicamente por fatores externos e com efeitos sobre o desempenho da perfuratriz.

No caso especial de desmonte de carvão com explosivos e com o emprego de cortadeira para a geração de face livre, Hartman (1987) considera que a realização do corte visando reduzir o consumo de explosivos e a obtenção de melhores resultados na fragmentação são regidas pelos mesmos fatores que atuam sobre a perfuração. As dimensões usuais de um corte são de 150 mm para a altura, variando de 2,4 a 3,0 m para a profundidade.

Conforme Bellairs (1995), a adoção do conceito de ciclo ideal de perfuração e desmonte (Figura 2.3) é de vital importância, tornando-se um método eficiente para minimizar custos através do aumento da eficiência do desmonte. A fragmentação afeta diretamente as operações de carregamento e transporte.

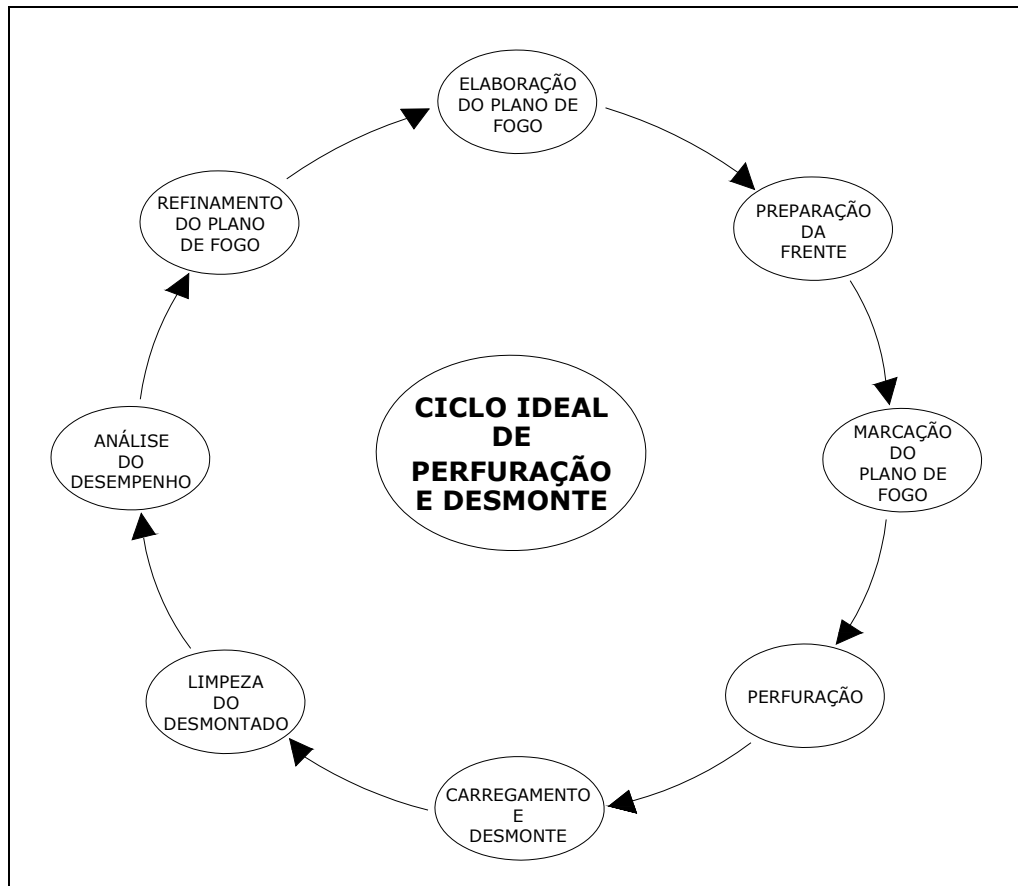


Figura 2.3 Ciclo ideal de perfuração e desmonte (Adaptado de Bellairs, 1995).

Este ciclo ideal pode ser alcançado quando se produz um determinado tipo de bem mineral ao mais baixo custo para uma determinada operação mineira. Desta definição resulta que:

- i. Os custos de perfuração e explosivos devem ser analisados separadamente dos custos totais;
- ii. As mudanças no projeto de plano de fogo devem ser analisadas em relação aos custos totais (perfuração, desmonte, carregamento e transporte, britagem e beneficiamento, etc.);
- iii. O ciclo ideal de perfuração e desmonte pode ser representado por uma faixa representada como zona de máxima eficiência que compõem os custos totais (Figura 2.4).

O ciclo é alcançado quando um determinado minério é produzido a um custo unitário mínimo a uma determinada taxa de produção para uma configuração particular de parâmetros operacionais.

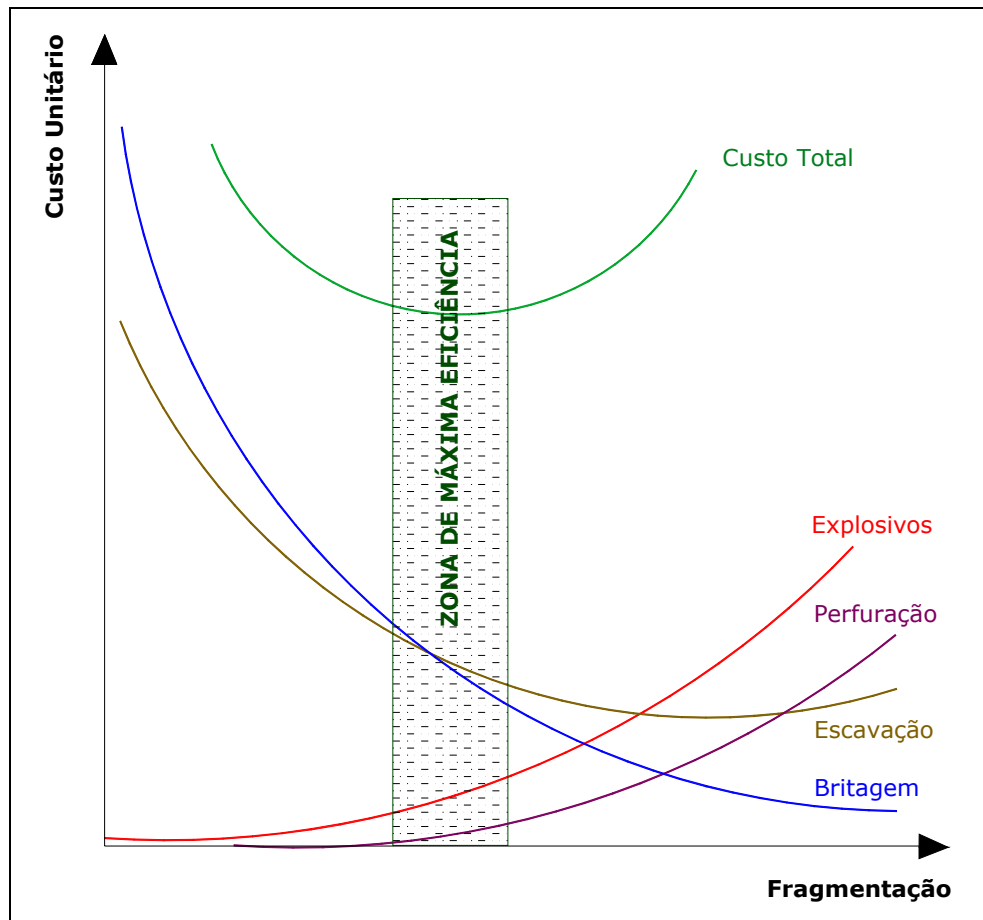


Figura 2.4 Zona de máxima eficiência do ciclo de perfuração e desmonte (Adaptado de Bellairs, 1995).

Na tentativa de introduzir melhorias nos resultados de um determinado plano de fogo, a melhor estratégia é alterar somente um parâmetro a ser estudado. Passa-se para um outro parâmetro após a obtenção de repetibilidade em pelos menos três testes, podendo então, adotar este novo projeto e iniciar o estudo de uma outra variável.

Gadberry (1981 e 1985) propõe que a análise dos problemas comumente encontrados em perfuração e desmonte e que afetam sensivelmente os custos deve passar obrigatoriamente por um trabalho a ser realizado na área de supervisão e gerenciamento. A partir de um planejamento eficaz, coordenações eficientes de pessoal e materiais, objetivos bem definidos, controle e

acompanhamento de desempenho, ensino e treinamento aliado a um espírito de equipe o sucesso destas operações unitárias estará garantido.

2.2 Carregamento dos furos com explosivos

Segundo Dick (1973), o procedimento técnico que deve ser adotado para o carregamento de furos com explosivos é determinado primeiramente pelo diâmetro do furo e pelo tipo de explosivo a ser empregado. Quanto ao diâmetro, os furos de até 100 mm podem ser considerados de pequeno diâmetro.

O carregamento de furos com explosivos é a operação que envolve a colocação de todos os componentes especificados no plano de fogo, tais como, iniciadores, carga principal de explosivos, sistema de iniciação e tampão. Concomitantemente com esta operação, é necessário realizar a inspeção dos furos executados na frente de serviço. A operação consiste em verificar possíveis obstruções, presença de água e se a profundidade dos furos está de acordo com o projeto. Furos com comprimento abaixo ou acima do projetado, devem ser corrigidos. Furos curtos tendem a aumentar os custos do desmonte e gerar problemas para perfuração em desmontes posteriores, provocar ultralancamento os quais podem vir a ser causas de acidentes. Furos com comprimento acima do projetado levam ao aumento no consumo de explosivos, elevação dos níveis de vibração e conseqüentemente danos ao meio circundante. Espera-se instabilização do maciço com o aumento dos custos de escoramento. Furos obstruídos devem ser limpos e, na impossibilidade da limpeza total, não carregados e executada uma nova perfuração com os ajustes necessários ao plano de desmonte.

A água presente no interior dos furos deve ser extraída e na impossibilidade devido à infiltrações, a introdução dos cartuchos de explosivos nos furos deve ser extremamente cuidadosa, para evitar a obstrução com posteriores prejuízos ao desmonte.

Quando furos de pequeno diâmetro são carregados, o primeiro passo é a colocação da carga iniciadora. Esta deve ser colocada no fundo do furo para alcançar o máximo de confinamento do ponto de iniciação. Este procedimento ajuda a evitar falhas durante o processo de detonação. Evita também que cargas

explosivas falhadas sejam movimentadas com o material desmontado durante o processo de limpeza e transporte.

Em desmontes com furos de pequeno diâmetro são comumente empregados explosivos encartuchados, tais como, emulsões, aquagéis ou a base de nitroglicerina. Quando o carregamento é feito manualmente, nestes cartuchos, são feitos pequenos cortes para se alcançar um melhor acoplamento explosivo/explosivo e explosivo/furo, mantendo-se uma densidade linear de carga adequada com o projeto de desmonte. Este confinamento é realizado com o pressionamento firme do explosivo com o auxílio de uma haste de madeira ou metal não condutor (operação comumente denominada de "atacamento"). Os cartuchos devem ser colocados individualmente para o posicionamento correto da carga no furo e a obtenção de um acoplamento adequado. Esta operação de "adensamento" não deve ser realizada com a carga iniciadora para evitar riscos de acidente. Outra forma de se obter um melhor confinamento e de aumento na densidade linear de carregamento é a escolha de cartuchos com um diâmetro mais próximo possível do diâmetro do furo (Hopler, 1998).

Para minimizar o ultralancamento e danos causados pelo deslocamento de ar durante a detonação, o final da carga de explosivos no furo (tampão) deverá estar entre 14 a 28 vezes o diâmetro do furo. Quando este tipo de evento não é problema e/ou ANFO é empregado no desmonte, as cargas poderão estar próximas do colar embora seja considerado que os últimos 30 a 60 cm da coluna de explosivos poderão ser perdidos por projeção.

O emprego de tampão reduz o problema de deslocamento de ar e ultralancamento, além de ajudar no confinamento dos gases gerados durante o processo de detonação. O tamponamento de furos horizontais deve ser bem analisado quanto às vantagens que propiciará em função do tempo e custos envolvidos nesta operação. Em minas de carvão subterrâneas, o tamponamento deve ser feito com material incombustível. Em casos especiais, cartuchos para tampão preenchidos com água podem ser adotados, pois reduzem a geração de poeira a partir da detonação evitando a formação de uma atmosfera adequada à ignição pela presença de poeira e gases (Dick, 1973).

O carregamento estagiado de furos de pequeno diâmetro é duvidoso quanto às vantagens oferecidas pelo método, pois os furos em minas subterrâneas são curtos desfavorecendo o emprego da técnica. De acordo com

Bellairs (1995), no processo de execução do carregamento dos furos com explosivos, devem ser tomados cuidados para assegurar que os parâmetros estabelecidos na fase de dimensionamento sejam obedecidos. Representações gráficas do plano de perfuração, carregamento e iniciação devem ser confeccionadas numa linguagem clara e de fácil compreensão para o controle dos parâmetros durante a execução.

A profundidade dos furos deve ser conferida, preenchendo-se com material estéril os furos mais longos que o projetado e perfurando os furos mais curtos. O explosivo iniciador deve ser adequado e colocado no fundo do furo com a finalidade de se obter o melhor ganho de energia na interação explosivo/rocha circundante no momento da detonação.

A massa de explosivo na coluna deve estar de acordo com o cálculo de projeto e bem distribuído ao longo do furo. O explosivo deve ser distribuído como altura/comprimento de coluna e não como peso da coluna.

O tamponamento dos furos deverá ser adequado em comprimento, proporcionando um melhor confinamento das cargas. Moxon *et al.* (1993) desenvolveram testes em escala de laboratório com tipos diferentes de materiais para tampão, observando que um aumento na fragmentação e um decréscimo no movimento da rocha ocorreu, quando o tempo de retenção do tampão esteve abaixo do tempo de movimento inicial da face.

A granulometria e tipo de material empregado no tampão são fatores importantes a serem considerados durante o processo de escolha, pois além do confinamento das cargas durante a detonação, o manuseio inadequado pode vir a danificar o sistema de iniciação, interferindo negativamente no resultado da detonação (Konya & Davis, 1978). A adoção de procedimentos corretos no carregamento e na iniciação do desmonte pode conduzir a operação a uma economia significativa no consumo de explosivos, minimizando o aparecimento de falhas na detonação e criando condições para que a detecção e análise de eventuais problemas tornem-se mais rápidas e confiáveis (Mohanty & Yang, 1998).

Em desmonte, inspeções, avaliações e controles adequados associados a normas de procedimentos são ferramentas muito importantes para o treinamento de pessoal. Esta prática fornece informações mais confiáveis e cria bons hábitos de trabalho. Os sistemas que empregam padrões adequados

alimentam e encorajam a disciplina no local de trabalho (Withey, 1995).

No carregamento e desmonte com cargas desacopladas, uma análise criteriosa deve ser realizada, pois segundo Konya *et al.* (1987), em testes de laboratório e campo não foram observados bons resultados em termos de lançamento. Cargas desacopladas também podem gerar efeito canal (Liu *et al.*, 1988; Xuguang, 1994). O efeito canal é o fenômeno que ocorre quando tem início a reação de detonação, originando uma onda de choque (camada de plasma), que por sua vez comprime o ar existente entre a parede do furo e o cartucho de explosivo logo à frente, que ainda não reagiu, atenuando a energia da detonação até o impedimento completo da frente de reação através da coluna de explosivo e a conseqüente falha. Este fenômeno tem sido comum a quase todos os tipos de explosivos em furos de pequeno diâmetro e em operações de desmonte subterrâneo é um fenômeno bem conhecido.

Emulsões são explosivos nos quais o oxigênio para a reação é fornecido pelas bolhas de ar/gás presentes e geradas durante a gaseificação no processo de produção ou através de microbolhas de vidro ou plástica. O fenômeno de dessensibilização dinâmica (*dead-pressing*) é característico deste tipo de explosivo (Nie, 1993 e 1997) e pode ocorrer por causas associadas à qualidade da malha de perfuração ou aos tempos de retardos.

Outro fenômeno é a detonação simpatética. Conforme estudos desenvolvidos por Mohanty & Deshaies (1992), explosivos sensibilizados com bolhas de ar/gás podem ser mais propensos a este fenômeno do que os sensibilizados por microbolhas de vidro ou plástico.

2.3 Análise da fragmentação da pilha de desmontado

A fragmentação pode ser avaliada a cada ciclo de detonação. Essa informação, em conjunto com dados de desempenho da detonação, descrição das orientações estruturais e da resistência da rocha, pode conduzir a possíveis alterações na geometria do desmonte para uma próxima etapa de melhorias na prática existente.

A distribuição de tamanho e forma dos fragmentos de rocha após a detonação acrescenta informação na avaliação dos testes realizados em desmonte. Fotografias da pilha de desmontado ou dos pontos de carregamento com análise da imagem gerada podem fornecer importantes informações sobre a distribuição granulométrica e a fragmentação.

De acordo com Konya (1995), dois fundamentos muito importantes devem ser aplicados corretamente com o intuito de controlar a fragmentação. Inicialmente, a energia liberada pelo explosivo deve ser aplicada em pontos estratégicos da rocha. Posteriormente, a liberação desta energia deve ser controlada para permitir que as interações entre rocha/energia venham a ocorrer. A distribuição desta energia dentro da massa rochosa é dividida em duas regiões distintas. A primeira, armazenar uma quantidade suficiente de energia pelo emprego de uma quantidade de explosivo adequada. A segunda área está relacionada com a distribuição dessa quantidade de explosivo numa configuração geométrica que venha maximizar o trabalho fornecido pela liberação da energia para a fragmentação dessa massa rochosa.

A liberação da energia contida por uma determinada massa de explosivo, de forma errada, no tempo, pode mudar o resultado final, ainda que a distribuição dessa massa tenha sido feita corretamente. Alterações no tempo de iniciação das cargas devido a problemas com os tempos dos retardos e aos espalhamentos associados aos mesmos, poderão gerar falhas refletindo-se na fragmentação final e possíveis aumentos nos níveis de vibração, sobrepressão acústica e ultralancamento.

Segundo Scott (1996), o conceito para se considerar uma fragmentação ótima depende de padrões específicos para cada situação. Depende do porte dos equipamentos a serem empregados na limpeza e transporte, devendo satisfazer às exigências quanto à distribuição granulométrica de plantas de britagem e moagem. Esse conceito deve ser analisado de outra forma quando se trata de moagem semi-autógena, onde um espectro mais amplo na distribuição granulométrica é necessário para se atingir o máximo de eficiência nesse tipo de operação. Atenuar a presença de finos em determinadas operações ou de material com granulometria mais grosseira em outras, também podem ser metas contidas dentro do conceito de fragmentação "ótima".

Vários modelos têm sido propostos com o objetivo de prever a

fragmentação pelo desmonte com explosivos. Modelos empíricos e modelos que identificam os mecanismos específicos do processo de fragmentação são os mais divulgados na literatura embora modelos numéricos também sejam aplicados.

Segundo Scoble *et al.* (1991), a fragmentação produzida em operações subterrâneas não pode ser simplesmente caracterizada pela determinação do tamanho médio de fragmentos e por uma curva característica de distribuição granulométrica como normalmente é realizado a partir de desmontes de superfície. Num ambiente de produção em subsolo, o sistema de transporte de materiais, a geometria das aberturas associada às características próprias da pilha de material desmontado, são fatores adicionais no controle da produtividade e dos custos. Estes fatores resultam num maior impacto causado pela granulometria sobre a produtividade em subsolo do que em superfície. Comparado com o desmonte de superfície, os finos e os blocos em subsolo podem afetar com mais intensidade a produtividade do carregamento e transporte devido a menor escala de forças atuantes na escavação, menor capacidade da caçamba dos equipamentos e operação em ambiente de escavação confinado.

Material carregado e transportado pelos equipamentos em subsolo, não tem origem somente nos realces e aberturas projetadas. Ultraquebra e deslocamentos originados por outros fatores podem ser a maior fonte de blocos e de diluição. Todo e qualquer planejamento para introduzir melhorias na fragmentação deve levar em consideração aspectos relacionados à estabilidade das escavações, danos induzidos ao maciço pelo desmonte com explosivos, custos de suporte como também prever os desvios de perfuração e a diluição.

Atualmente técnicas computacionais estão sendo desenvolvidas para aperfeiçoar e permitir uma avaliação rápida dos parâmetros físicos da fragmentação, enquanto que, o desempenho dos equipamentos é continuamente monitorado para quantificar os esforços dispendidos na escavação, carga transportada e produtividade.

A prática comum na avaliação e controle da fragmentação tende a ser mais qualitativa, falhando em aceitar que grandes progressos podem ser alcançados na produtividade com a aplicação de conhecimentos de engenharia no desmonte de rochas com explosivos. As propriedades físicas e mecânicas da rocha detonada e a sua interação com os equipamentos de mineração ainda são

pouco conhecidos. Ainda há a necessidade de se montar um dispositivo de coleta de dados confiável para medir as propriedades relativas ao desempenho dos equipamentos em ambiente subterrâneo, a fim de quantificar a interação entre o produto da detonação, o carregamento e o sistema de transporte de materiais subsequentes.

Quanto ao modelamento da fragmentação, Scott (1996) diz que melhorias podem ser alcançadas na fragmentação por método de tentativa e erro com base em relatórios a partir de observações feitas na mina e posteriores mudanças no plano de fogo e cruzamento dos dados de desmonte. Porém, esta metodologia é lenta, tediosa e ineficiente. Uma boa abordagem é utilizar modelos de fragmentação para conduzir as mudanças no projeto de desmonte e confirmar as previsões do modelo com testes locais rigidamente controlados.

A execução de análises de medida da fragmentação em desmontes tornou-se uma operação importante na indústria mineral (Maerz *et al.*, 1987). No método de fotoanálise, imagens obtidas com fotografias da rocha desmontada são digitalizadas (Figura 2.5), possibilitando a realização de medidas da distribuição granulométrica. A contagem de blocos e a sua estimativa visual também podem ser realizadas a partir dessas imagens digitalizadas. O método é rápido e tem revelado acuracidade suficiente para determinados propósitos.

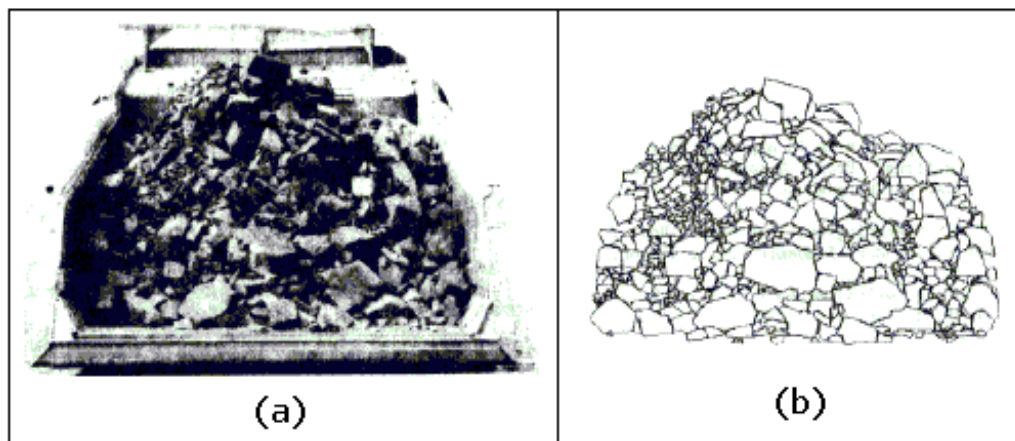


Figura 2.5 Exemplo de fotoanálise: (a) Imagem de caminhão carregado com produto do desmonte; (b) a foto digitalizada (Maerz *et al.*, 1987).

Conforme Singh *et al.* (1990), a análise da fragmentação em desmonte de

subsolo é uma ferramenta que permite ao usuário avaliar o desempenho do plano de fogo, comparar o desempenho de diferentes tipos de explosivos sob condições semelhantes e minimizar os custos de produção. É muito importante estabelecer qual o grau de fragmentação desejado, pois muitos problemas associados ao desmonte não se mostram sempre visíveis. Contagem de blocos em imagens da pilha é uma técnica que pode ser empregada em análise da fragmentação, mas é importante definir o que constitui um bloco. Exemplificando, um índice pode ser o número de blocos por unidade de volume.

O método ideal seria medir todos os fragmentos via processo de peneiramento, mas o custo de tal empreendimento não se justifica. Por isso uma amostragem, com base em técnicas conhecidas e plenamente aceitáveis, é adotada, viabilizando e facilitando a análise da fragmentação em operações de mineração subterrânea. Na Figura 2.6, são mostradas formas de aquisição de imagens em céu aberto para posterior análise. Na Figura 2.7, é mostrada uma imagem de um ponto de carga em subsolo onde a iluminação é deficiente e um objeto esférico é utilizado como escala de referência.

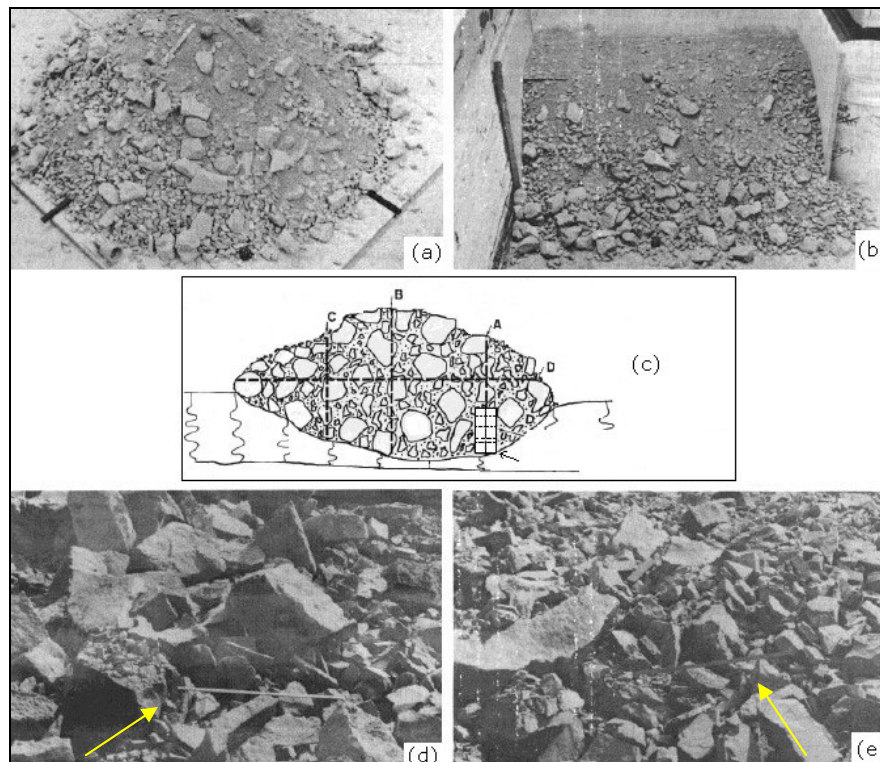


Figura 2.6 Forma de aquisição de imagem em pilhas: (a) Ensaio com pilha em forma de cone; (b) Em local de descarga para teste; (c) Croqui para estabelecer um procedimento de aquisição de imagens; (d) e (e) Imagens de pilhas *in situ* com escala de referência (Adaptado de Singh *et al.*, 1990).



Figura 2.7 Fotografia de uma pilha em ponto de carga em subsolo (Adaptado de Singh *et al.*, 1990).

Na Figura 2.8, Noy & Booth (1997) mostram a aquisição de imagens com escala esférica (ex.: bola de borracha, de plástico, etc.) para evitar distorções na análise comparativa entre fragmentos e a escala e um posicionamento mais correto da câmera fotográfica.

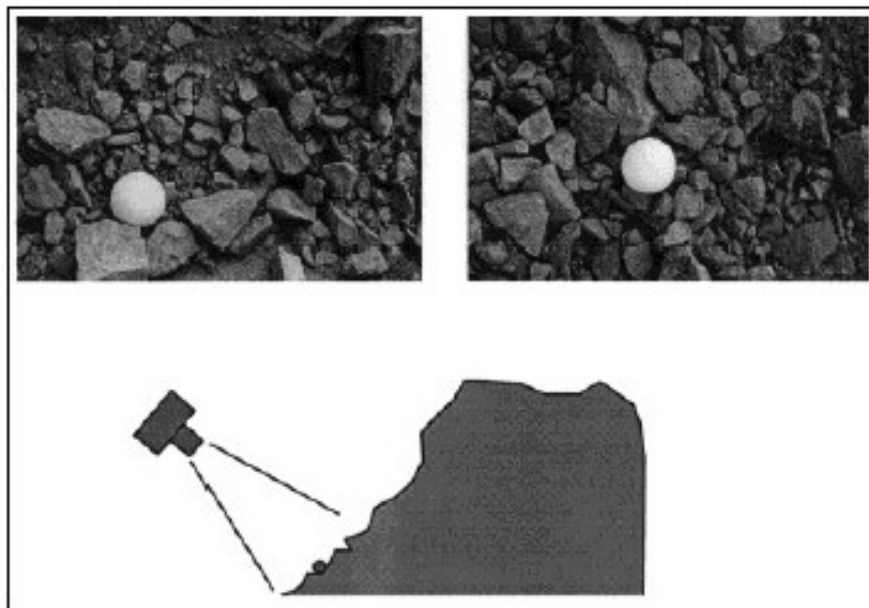


Figura 2.8 Amostragem fotográfica de uma pilha com o emprego de bolas como escala de referência (Adaptado de Noy & Booth, 1997).

Rholl *et al.* (1993) ressaltam a importância de que a avaliação da fragmentação com o emprego de técnicas fotográficas e o seu processamento digital é conveniente, prático, de baixo custo e não interrompe o ciclo de produção (Figura 2.9).

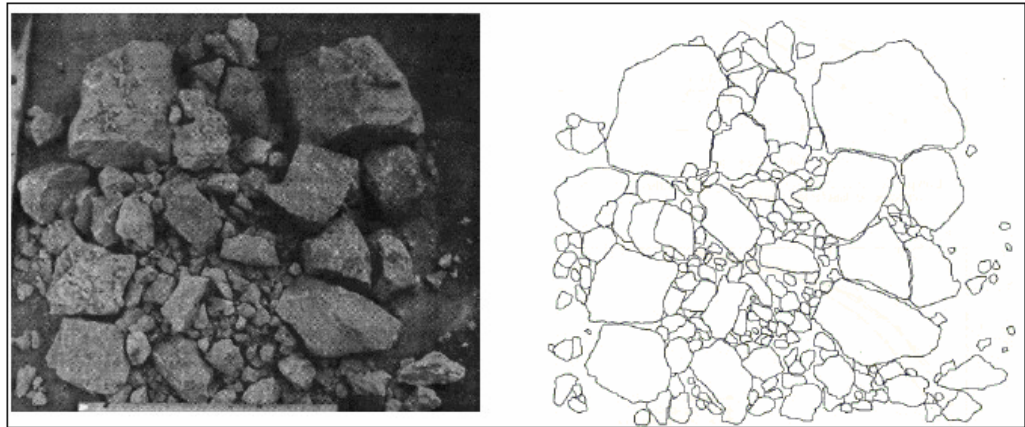


Figura 2.9. Fotografia e imagem digitalizada (Adaptado Rholl *et al.*, 1993).

Por outro lado, a acuracidade é uma das principais limitações técnicas. A acuracidade na avaliação da distribuição granulométrica por meio de fotografias depende de diversos fatores que geram erros na interpretação. Estes erros incluem:

- i. Fotografias têm a resolução limitada e fragmentos menores que um determinado tamanho não são identificados (finos);
- ii. A terceira dimensão não é visualizada e imagens fotográficas podem ser facilmente distorcidas;
- iii. Somente os fragmentos da superfície da pilha são visualizados;
- iv. Sobreposição de fragmentos de rocha;
- v. Visualização de duas faces do mesmo fragmento gerado pelo efeito aresta pode mascarar a análise.

Otuonye (1985) diz que um dos objetivos mais importantes em qualquer operação de desmonte de rocha é a fragmentação e o lançamento. A necessidade freqüente de redução dos custos de mineração exige a avaliação

contínua de desmontes em grande escala e em conjunto com o desenvolvimento de índices de medida de fragmentação mais acurados. Um modelo para a fragmentação baseado em dados de campo é de primordial importância para o desenvolvimento da tecnologia de desmonte com explosivos.

Um modelo adequado auxilia na escolha de um equipamento e na introdução de melhorias nos sistemas utilizados para o dimensionamento de equipamentos das operações de lavra. A procura de um ponto ideal para os custos de carregamento, transporte e cominuição depende da fragmentação desejada e esta, está estritamente ligada ao projeto de perfuração e desmonte.

Segundo Kleine & Cameron (1997), a determinação da distribuição granulométrica de rocha desmontada com explosivos é um processo um pouco complicado devido a grande faixa de tamanho de fragmentos presentes numa pilha e da dificuldade de se obter amostras estatisticamente confiáveis do material. Análise granulométrica por sistema fotográfico, trabalha com a tomada de fotografias e o posterior processamento destas imagens por digitalização em computador. A tomada de imagens envolve uma boa iluminação, escolha de um equipamento fotográfico adequado e a definição de escalas de referência com rigor. A preparação e treinamento de uma equipe de técnicos para avaliação da fragmentação por análise de imagens equivale a construir e equipar um pequeno laboratório para peneiramento com uma equipe treinada para levar a cabo a rotina de amostragem e análise.

Na opinião de Persson *et al.* (1993) a fragmentação, sempre que possível, deveria ser examinada com a devida atenção a cada ciclo completado. Nem todos os métodos de mineração permitem um estudo imediato da fragmentação, mas é possível levar a cabo um estudo do desempenho da fragmentação no momento do carregamento ou no esvaziamento dos pontos de carga. Basta para isso, um planejamento adequado de ciclos e movimentos dentro de um método de mineração. A distribuição e a forma dos fragmentos acrescentam informações importantes a uma análise de testes de desempenho do desmonte. A melhor análise de fragmentação é o peneiramento, mas é de difícil execução e inexequível do ponto de vista dos custos envolvidos. O acompanhamento do ciclo de limpeza e contagem de blocos grosseiros nas imagens são parâmetros que permitem uma análise da eficiência em fragmentar o material.

A coleta de imagens em tempo real possibilita um monitoramento contínuo

da distribuição granulométrica do fluxo de material em uma correia transportadora ou de rocha desmontada transportada em caminhões.

A distribuição granulométrica ideal de uma fragmentação (Dowding, 1985) torna-se difícil de definir, pois é função do uso final a que se destina o produto, ou seja, somente remoção ou remoção e transporte até uma estação de britagem. O carregamento e transporte de rocha desmontada com carregadeiras e caminhões exige um tamanho médio de fragmento menor do que uma remoção com um equipamento do porte de uma *dragline*. Um exemplo real das diferenças na granulometria exigida conforme a utilização final do material é o tipo de desmonte em pedreiras e na descobertura em minas de carvão a céu aberto. Em pedreiras, sempre que é empregado um estágio de britagem após o desmonte com explosivos, é exigida uma distribuição granulométrica com um tamanho médio menor do que em uma mina de carvão, pois implica em custos de britagem ao passo que na remoção numa mina de carvão pode-se operar com uma granulometria maior, pois o trabalho realizado é somente de remoção do material.

De acordo com Scott (1996), os problemas mais comuns relacionados à fragmentação são detectados quando a distribuição granulométrica não é a adequada ao processo subsequente ao desmonte. A indicação de ineficiência no processo de fragmentação é o aumento da quantidade de grandes blocos ou de finos produzidos pelo desmonte com explosivos. As principais fontes para ineficiência são: um mau desempenho do explosivo, problemas no dimensionamento do plano de fogo, grau de fraturamento presente na rocha, alterações significativas na composição do maciço rochoso ou erro de implantação no campo do projeto de desmonte.

2.4 Análise de desempenho do desmonte a partir de dados de vibração (PPV)

Os sinais e os dados fornecidos por sismogramas são ferramentas que podem ser utilizadas em análises importantes do desempenho do desmonte. Podem tornar-se valiosos para o engenheiro responsável pelo desmonte, determinar a melhor forma de alcançar um controle confiável dos níveis de

vibração associado a um desempenho satisfatório do desmonte sob ponto de vista da fragmentação. A qualidade da perfuração e do carregamento é outro problema que afeta os níveis de vibração, podendo, também ser avaliada no conjunto de informações fornecidas por um sismograma e dados de geometria do desmonte.

Os sismogramas, portanto, podem se tornar uma ferramenta de diagnóstico para determinar onde, numa detonação, um problema ocorreu com base na análise dos dados de vibração (Konya, 1995). De acordo com Persson *et al.* 1993, a dessensibilização da carga no furo pode ocorrer pela propagação da onda de choque, pelo movimento do maciço no entorno do furo ou pela penetração dos gases da detonação através das fraturas que estejam conectando furos adjacentes. O rígido controle na preparação das cargas a partir de dados obtidos em testes de campo pode ajudar a explicar problemas com o desempenho de explosivos do tipo ANFO. Explosivos sensibilizados com microbolhas de vidro, plástico ou ar como as emulsões podem ser afetadas pelo carregamento dinâmico gerado por detonações de furos adjacentes, especialmente se estiverem interconectados por um sistema de fraturas. Os fatores acima expostos afetam o desempenho da detonação o qual pode ser monitorado a partir do conhecimento da forma do pulso e da magnitude do sinal obtido com medidas de vibrações.

Segundo Cameron *et al.* (1995), o monitoramento de vibrações geradas por desmontes com explosivos envolve a medida da velocidade de pico de partícula em um ou mais pontos próximos ao local da detonação. Esta abordagem permite que modificações introduzidas num plano de fogo sejam detectadas pelos níveis de vibração, mas não fornecem dados para uma análise detalhada da detonação.

O estado de arte neste tipo de abordagem é a obtenção da forma de onda completa do evento monitorado. Pulsos de ondas adequadas e corretamente adquiridas no espaço e no tempo possibilitam que todas as cargas sejam individualmente identificadas e posteriormente comparadas com o tempo planejado. Falhas na detonação podem ser devidamente identificadas e as possíveis causas investigadas. Falhas que ocorrem em uma detonação incluem todas as cargas que não iniciam ou detonam conforme o tempo planejado, incluindo as detonações por simpatia, instantâneas e fora de uma seqüência pré-

determinada. A Figura 2.10 mostra o monitoramento de vibrações onde pode ser identificado o pico relacionado a uma iniciação instantânea de cargas e o início da detonação planejada segundo um plano de fogo pré-estabelecido.

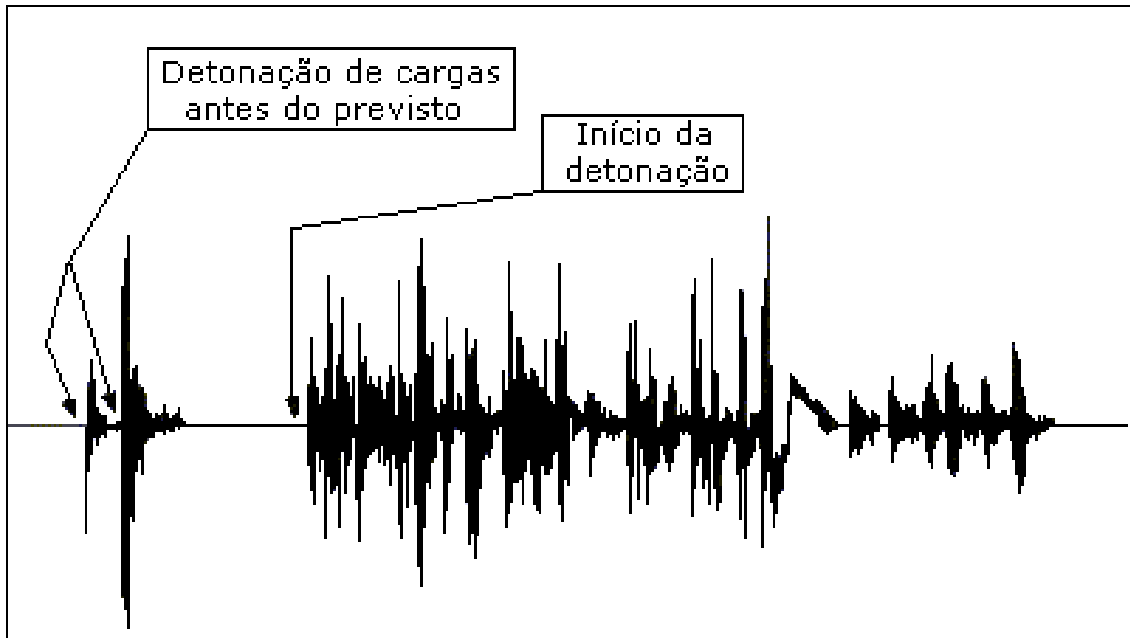


Figura 2.10 Sismograma mostrando a falha na iniciação de cargas conforme o tempo previsto (Adaptado de Cameron *et al.*, 1995).

Segundo Djordjevic (1997), modelos aproximados podem ser construídos a partir de dados de vibração da detonação de furos individualmente. A vibração induzida ao maciço por um evento de pequena magnitude (detonação de somente um furo) pode ser utilizado para construir um modelo de previsão para um desmonte com múltiplos furos. Este modelo de simulação baseado na superposição de eventos é mostrado na Figura 2.11.

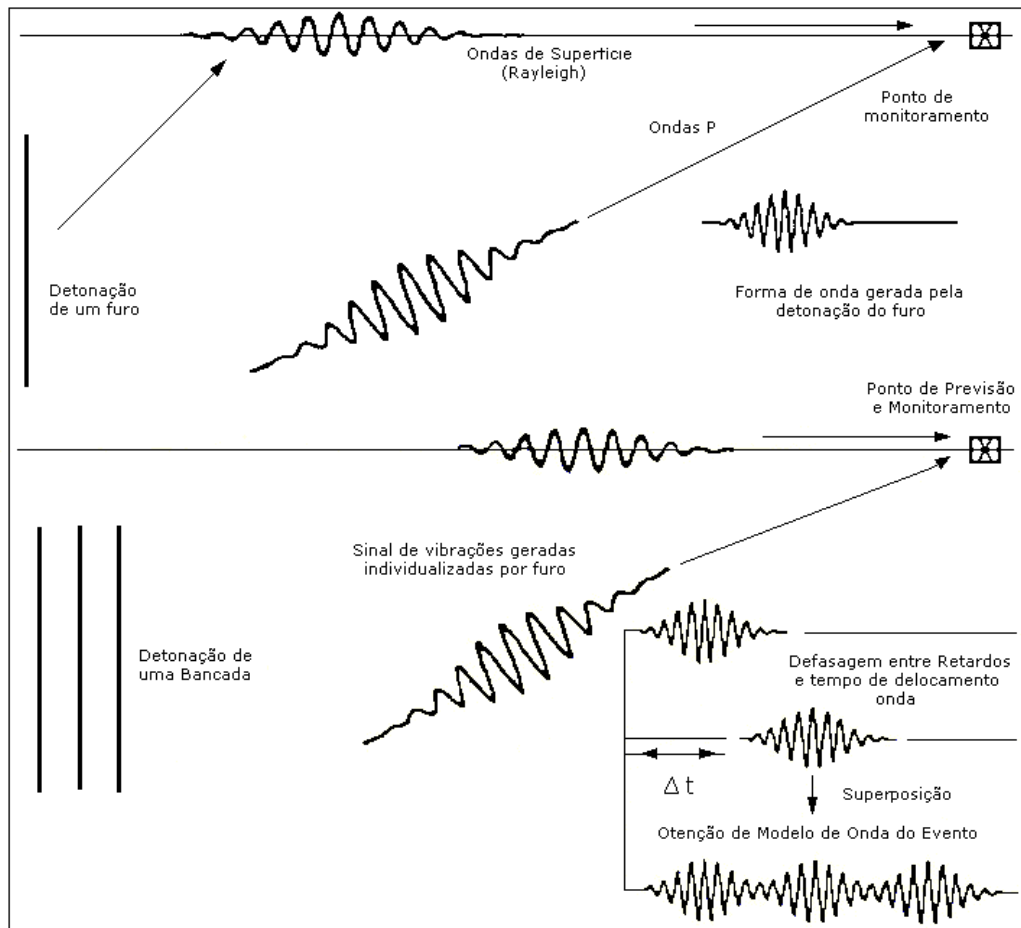


Figura 2.11 Modelo de simulação baseado na superposição de eventos individuais (Adaptado de Djordjevic, 1997).

O monitoramento das vibrações geradas por desmonte além de introduzir controles para adequar às legislações vigentes pode, ao mesmo tempo tornar-se uma ferramenta de medida da produtividade pela correlação dos dados de vibração com o grau de fragmentação (Anderson *et al.*, 1988).

Adamson & Bailey (1999), em trabalhos de introdução de melhorias na execução de aberturas para a obtenção de face livre em painéis de lavra (*slot raises*), comprovaram a eficiência do uso do monitoramento de vibrações como ferramenta capaz de detectar indicações da perda de energia liberada pelo explosivo por falta de confinamento. Problemas com a seqüência de detonação ou ultraconfinamento devido a desvios ocorridos na perfuração foram reportados como também mostram dados quando a iniciação da detonação se mostrou correta, detonando as cargas dentro do tempo planejado, traduzindo-se em eficiência em fragmentação e qualidade na execução da abertura subterrânea.

A Figura 2.12 mostra o plano de fogo empregado e o sismograma obtido a partir de um desmorte.

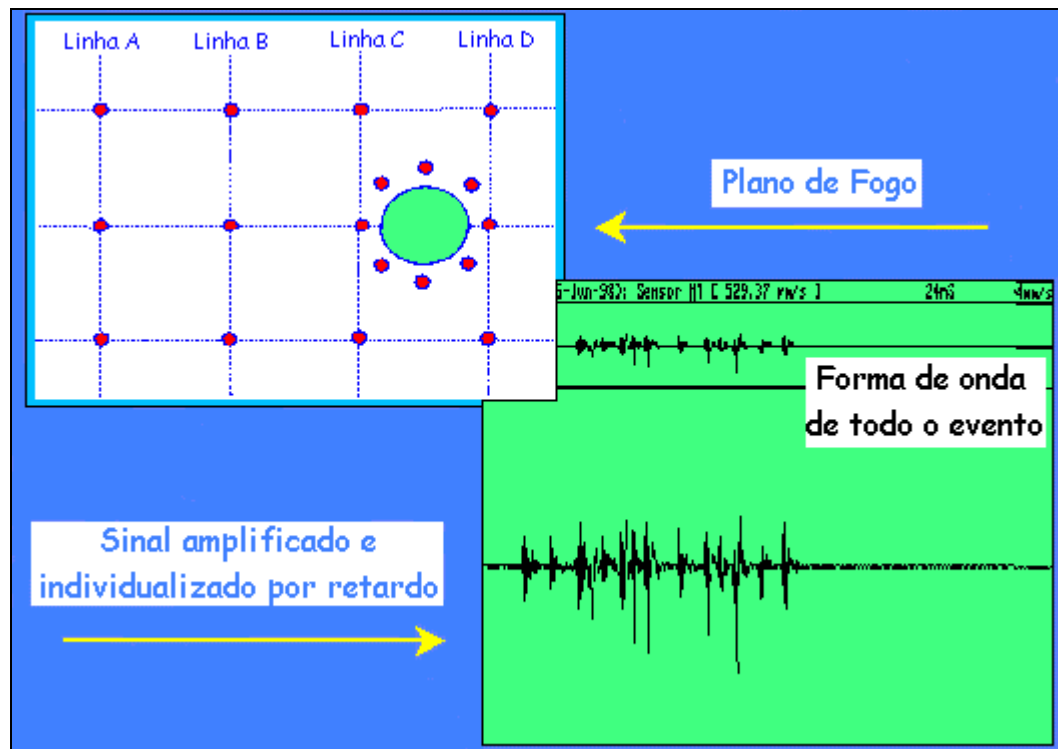


Figura 2.12 Sismograma mostrando o pulso de onda gerado pela iniciação das cargas conforme o tempo previsto no plano de fogo. (Adaptado de Adamson & Bailey, 1999).

Mohanty & Yang (1997), alertam para os cuidados que devem ser tomados na análise de desempenho e falhas com explosivos a partir de sinais de vibração. Uma seleção correta do equipamento para monitoramento, cuidados no carregamento e com o sistema de iniciação devem ser observados. A obtenção de reprodutibilidade ou sinais consistentes de vibração é muito difícil, principalmente em ambiente subterrâneo onde os planos de fogo possuem outras características e complexidades comparados a uma detonação na superfície. As variações nos sinais de vibração são inerentes à complexidade da região onde o explosivo está reagindo (existência de face livre e a geração de outras, posição das cargas e variações litológicas). Estes fatores podem gerar reflexão, difração e refração das ondas, influenciando no sinal obtido pelo aparecimento de alterações não previstas pela contribuição de sinais gerados por ondas de superfície e ondas de corpo. O grau de reprodutibilidade da amplitude da vibração não é adequado para uma correlação quantitativa com o desempenho do explosivo no furo com

exceção para falhas típicas.

A amplitude do sinal obtido pode ser correlacionada com o desempenho do explosivo no furo sob o ponto de vista qualitativo. Para uma estimativa quantitativa da energia liberada são necessárias medidas de velocidade de detonação. Na figura 2.13, são mostrados o plano de fogo de um monitoramento bem como o traço típico do sinal obtido. Toda a perfuração é paralela com furos de 45 mm de diâmetro e comprimento de 3,6 metros. Para o monitoramento, foram montadas duas estações a 12,5 e a 39 m do local de detonação.

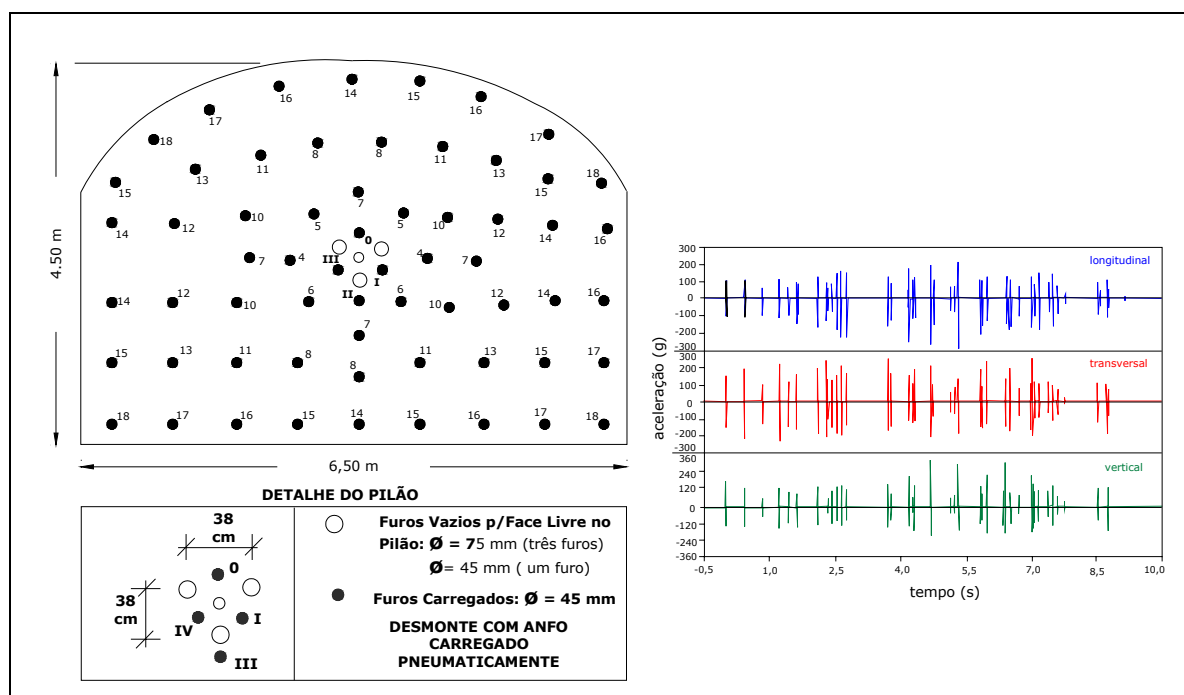


Figura 2.13 Plano de fogo monitorado e sinal obtido com sismograma (Adaptado de Mohanty & Yang, 1997).

Mancini *et al.* (1995), com o objetivo de estudar os parâmetros mais importantes que controlam uma detonação e desenvolver procedimentos e instrumentos capazes de dar suporte a este estudo, realizaram uma série de monitoramentos durante a escavação de um túnel com uma seção de 3,5 x 3,5 m em uma mina de ferro na Áustria. Foram monitoradas detonações de furos individuais, uma detonação decomposta (cargas com mesmo tempo de retardo sendo detonadas separadamente e em seqüência) e um desmorte regular. A partir da análise dos sismogramas foi possível detectar o espalhamento dos

retardos de mesmo tempo nominal. Devem-se selecionar taxas de amostragem no sismógrafo adequadas aos tempos de retardos para possibilitar a identificação dos eventos. Falhas na iniciação das cargas, congelamentos na área do pilão também podem ser identificados. Esta metodologia para ser aplicável a qualquer mina subterrânea, túnel rodoviário ou em hidrelétricas ainda precisa ser validada. Na figura 2.14, são mostrados o plano de fogo com a seqüência de iniciação, o monitoramento de um furo detonado e de uma detonação completa.

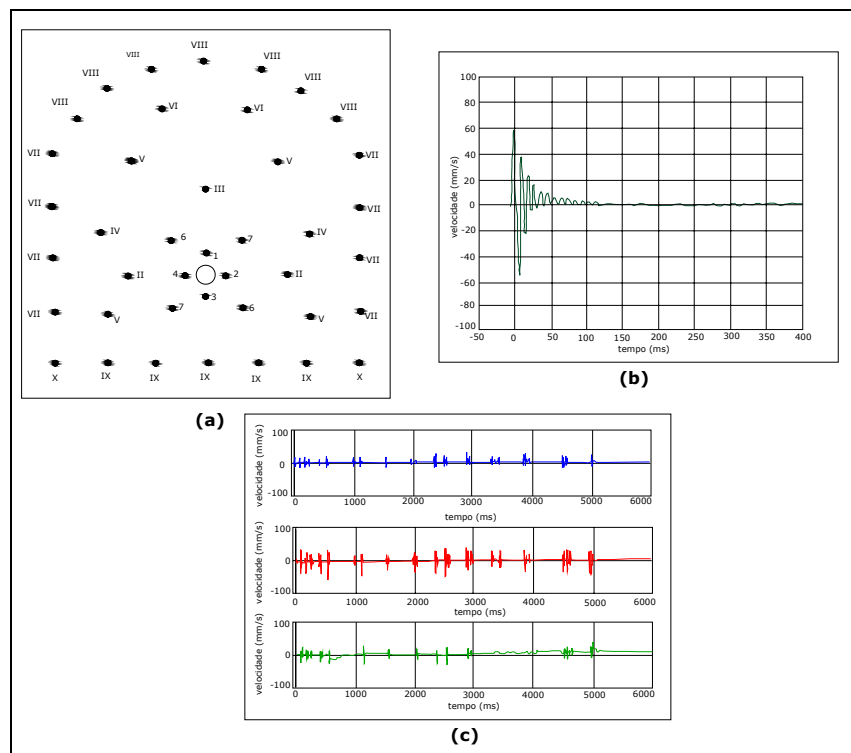


Figura 2.14 Plano de fogo e sismogramas: (a) Plano de fogo e seqüência de iniciação; (b) pulso de onda de um furo detonado e (c) sismograma de uma detonação completa (Adaptado de Mancini *et al.*, 1995).

Segundo Adamson *et al.* (1999), é possível a partir da forma de onda gerada em um sismograma, obter com um certo grau de acuracidade, os tempos em que cada carga detonou e, por meio disso estimar o desempenho dos retardos. A eficiência da detonação pode ser avaliada observando-se as amplitudes relativas, seus níveis absolutos de vibração, permitindo uma análise do plano de fogo por partes (analisar o desempenho do pilão separadamente do restante do desmonte). A figura 2.15 mostra um sismograma de uma detonação completa e na figura 2.16, dois sismogramas com sinais obtidos na região do pilão.

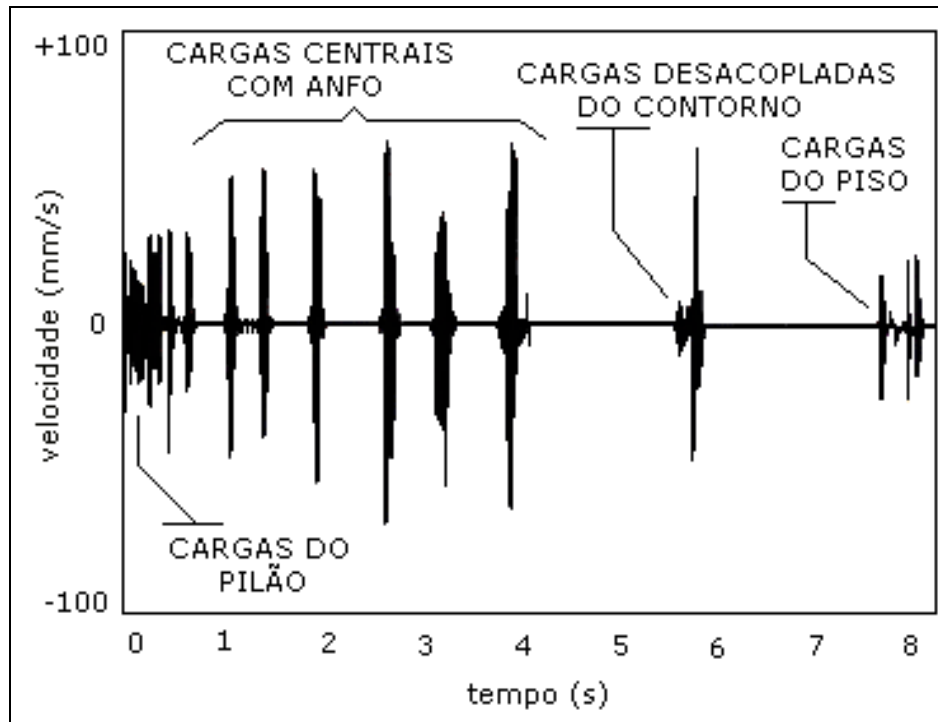


Figura 2.15 Sismograma típico de um desmonte monitorado em abertura de túnel (Adaptado de Adamson *et al.*, 1999).

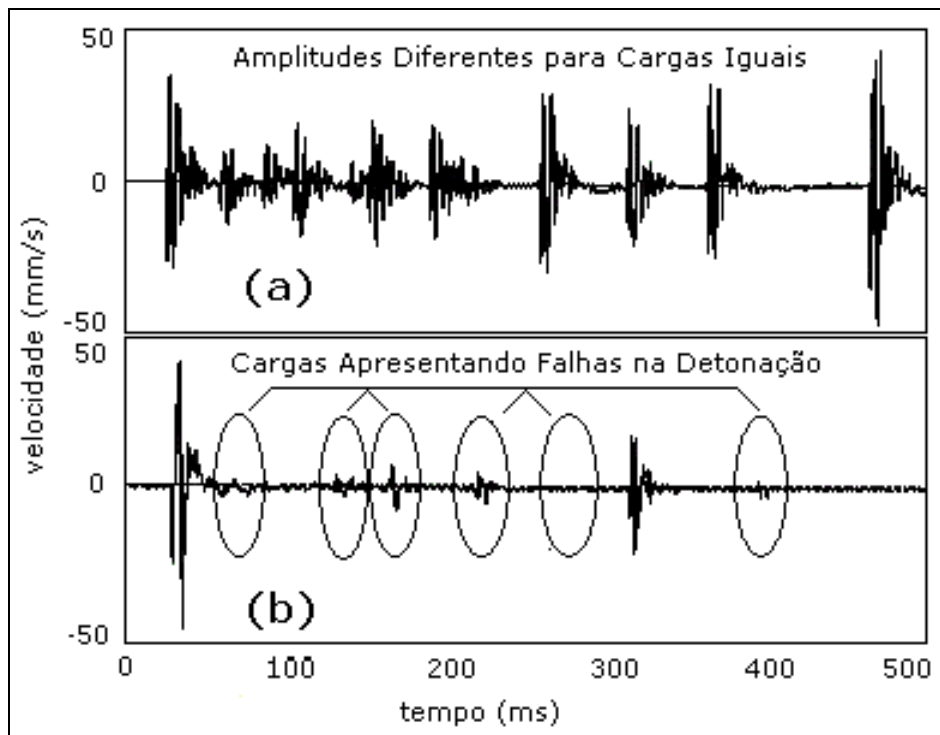


Figura 2.16 Sinais de vibração originados pela detonação do pilão. Em (a) mostrando um bom desempenho no primeiro; em (b) um resultado mostrando falhas na iniciação das cargas (Adaptado de Adamson *et al.*, 1999).

2.5 Controle de qualidade do sistema de iniciação

O alcance de bons resultados nas operações de desmonte de rocha, além da seleção dos explosivos, depende da correta escolha e utilização adequada dos dispositivos de iniciação. Dispositivo iniciador é o termo empregado pelos fabricantes de explosivos para descrever qualquer mecanismo que pode ser empregado para dar início a um processo de deflagração ou uma detonação (Hopler, 1998). Os dispositivos de iniciação se dividem em duas categorias: elétricos e não elétricos dependendo basicamente da sua principal fonte de energia.

Atualmente os dispositivos de iniciação mais empregados em minas subterrâneas são os sistemas não elétricos sendo que na grande maioria das minas brasileiras é empregado o sistema *None!*TM no acionamento de cargas explosivas. Este sistema, que emprega o tubo de choque, é totalmente seguro e livre de acidentes na presença de corrente elétrica e rádio-freqüências. É insensível ao impacto, choque e atrito, não gerando ruído. Além disso, é compatível com todos os explosivos comerciais incluindo as gelatinas mais sensíveis disponíveis no mercado. Não interfere no desempenho dos explosivos sensibilizados por microbolhas e são insensíveis à iniciação por fogo estando ou não confinados (Crosby, 1998).

Assim como o sismógrafo pode ser empregado para medir os efeitos das vibrações e melhorar o desempenho do desmonte, os retardos do qual fazem parte os sistemas não elétricos permitem que cargas sejam controladas. Visa-se maximizar o emprego da energia do explosivo em fragmentação e controlar os níveis de vibração, ultralancamento e sobrepressão acústica.

Os sistemas de retardos devem fornecer a precisão máxima para que o planejamento de um desmonte aconteça conforme um plano de fogo pré-determinado. Iniciadores com alta precisão, associados a planos de fogo adequados podem estabelecer uma correlação direta com o controle de vibrações e melhorias na fragmentação (Chiappetta & Reil, 1986).

Segundo Konya (1989), o controle da precisão deste tipo de dispositivo é importante, pois um desempenho dos retardos se refletirá no desempenho do desmonte. Métodos de controle de precisão com base no tempo de queima e

posterior análise estatística tornam-se necessários, pois há grandes contradições entre os dados fornecidos pelos fabricantes.

Deacon *et al.* (1997) em estudo comparativo na iniciação de desmontes com sistemas não elétricos e sistemas programados eletronicamente verificaram melhorias na fragmentação a partir de análise granulométrica realizada em pontos de carga de uma mina subterrânea de cobre.

Em estudos experimentais desenvolvidos com a manutenção dos mesmos padrões e parâmetros na elaboração e execução do plano de fogo e explosivos empregados, Roy & Singh (1999), observaram que os desmontes onde os níveis de vibração, ultralancamento, perfil da pilha e percentual de grandes blocos aumentaram, níveis significativos de espalhamento dos tempos de retardo também foram encontrados. Concluíram, também, que há um aumento dos custos de desmonte quando são implementados sistemas com tubo de choque em substituição a métodos convencionais de iniciação com cordel detonante, mas os ganhos de desempenho no desmonte podem anular este efeito pelas melhorias na fragmentação e segurança além de ser um sistema ambientalmente mais adequado.

Segundo Heilig & Mckenzie (1988), o dimensionamento do tempo de iniciação de um desmonte é de vital importância para a fragmentação, controle dos níveis de vibração e danos induzidos ao maciço. Na falta de informação sobre o espalhamento de lotes de retardos, o desvio dos tempos de retardos a ser adotado deverá levar em consideração o tempo nominal de iniciação. Em estudos desenvolvidos, para um simples lote, o espalhamento encontrado estava em torno de duas vezes o tempo nominal de queima.

O sequenciamento correto do sistema de iniciação de um desmonte é um dos parâmetros mais importantes a ser considerado. Além da introdução de melhorias no desempenho da fragmentação, danos ocasionados pelo desmonte, níveis de vibração e suas frequências principais são dependentes do intervalo de tempo entre furos adjacentes. O controle de vibrações e a sua análise através do pulso de onda gerado por um furo requer detonadores precisos. Dependendo do espalhamento gerado por sistemas de iniciação convencionais e das frequências fornecidas pela sua forma de onda pode se tornar impossível prever a amplitude e suas frequências dificultando análise final do evento (Katsabanis *et al.*, 1995).

De acordo com Crosby (1998), sistemas de iniciação com espoletas

elétricas ou não-elétricas não detonam de acordo com o tempo nominal declarado pelos catálogos dos fabricantes, podendo ser encontrados espalhamentos de ± 15 ms para micro-retardos e de ± 100 ms para macro-retardo. Na Figura 2.17, é mostrada uma análise estatística de distribuição de tempos para retardos de superfície de três fabricantes. Nos gráficos, pode ser observado como tempos diferentes podem se superpor. Também pode ser observado que além da superposição poderá ocorrer a inversão dos tempos de iniciação devido a grande variabilidade dos tempos dos retardos.

Adamson *et al.* (1999) analisam o tempo de espalhamento dos retardos a partir de dados de vibração em desmonte subterrâneo para a análise de tempos de queima. Devido a grande velocidade com que as ondas se deslocam dentro do maciço, e com sismógrafo instalado próximo ao desmonte, é possível desconsiderar o tempo de deslocamento da onda entre o ponto de detonação e o ponto monitorado. Os dados coletados permitem observar os tempos individualizados e realizar uma análise de espalhamento.

O monitoramento de desmontes em túneis mostra sismogramas que permitem avaliar o desempenho da detonação e fornecer subsídios para uma análise de tempos (Mancini *et al.*, 1995; Mohanty & Yang, 1997). Um método prático de analisar espalhamento nos tempos de iniciação em sistemas não elétricos é sugerido por Eloranta (1992).

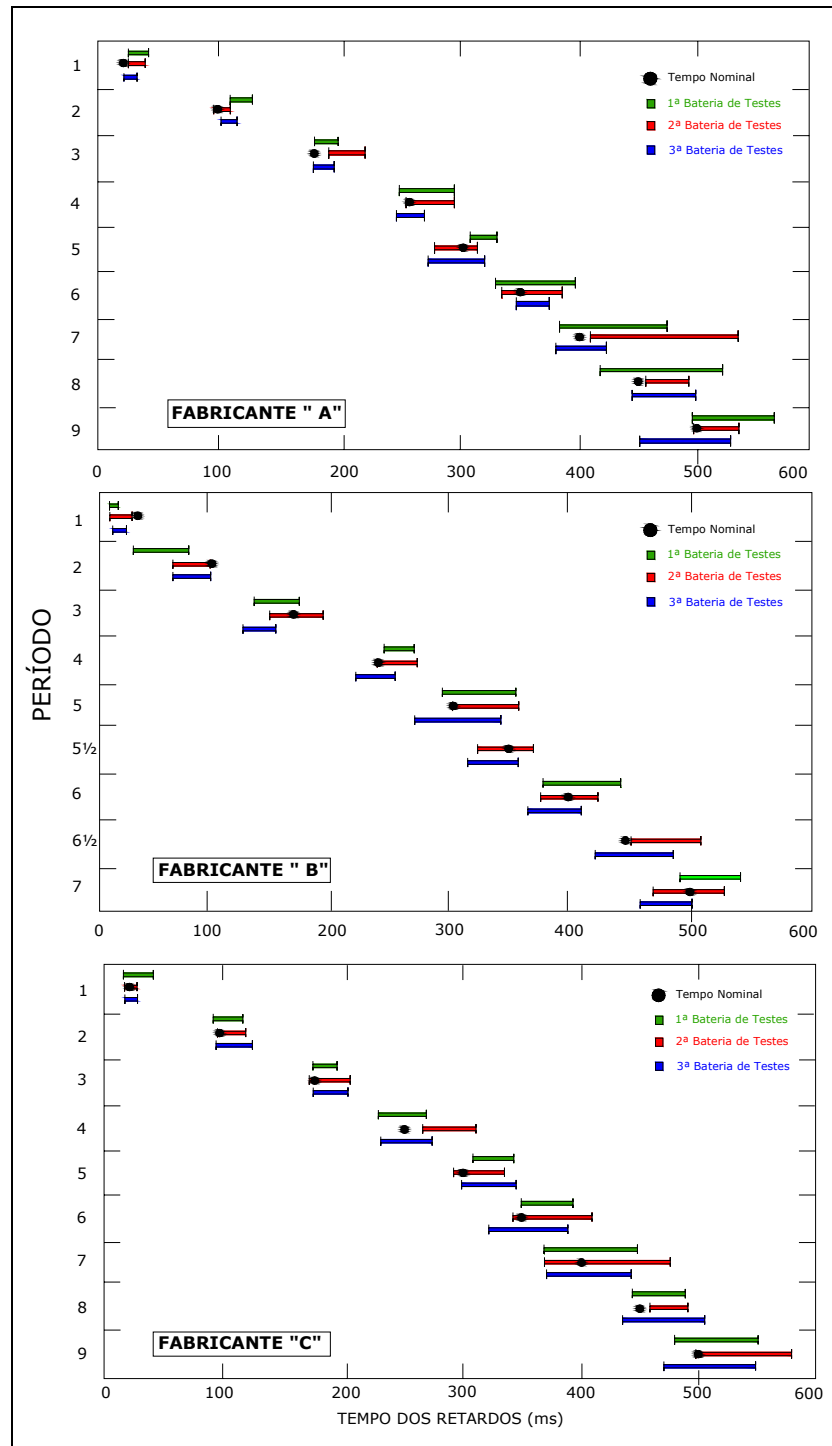


Figura 2.17 Variação dos tempos de retardos para três diferentes fabricantes (Adaptado de Crosby, 1998).

O método consiste na análise dos tempos com o emprego de um microfone acoplado a um dispositivo de captação e gravação de ruído instalado no centro de uma circunferência e equidistante de todas as espoletas (Figura 2.18).

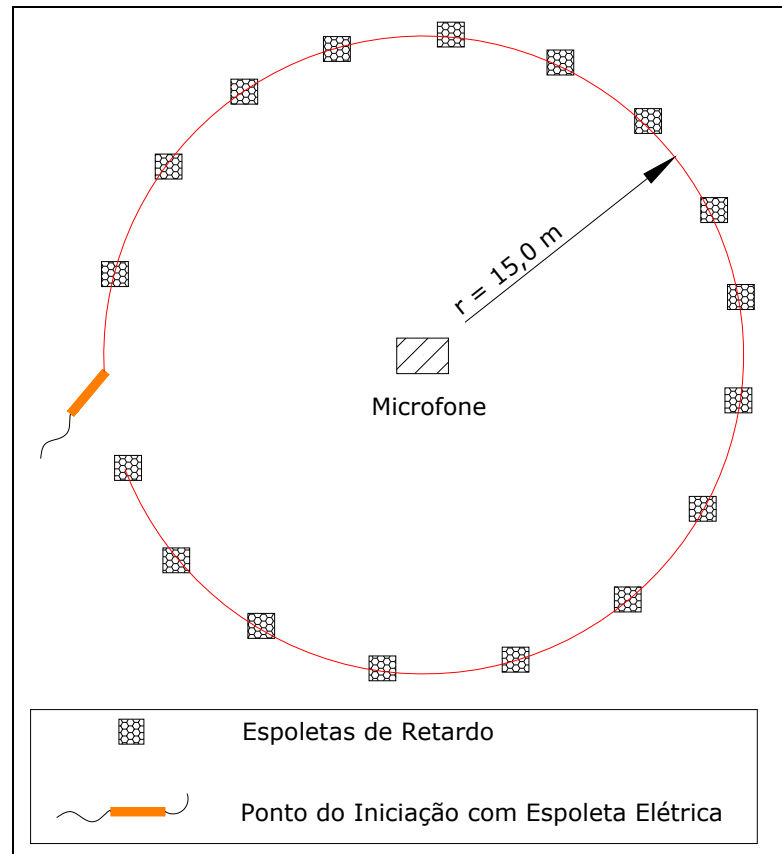


Figura 2.18 Vista em planta do método de determinação de espalhamento de retardos (Adaptado de Eloranta, 1992).

Segundo Worsey *et al.* (2000), a utilização de um microfone acoplado a um dispositivo de captação como um sismógrafo digital, permite realizar um estudo de espalhamento de retardos. Cuidados devem ser tomados quanto às distâncias entre espoletas, com manutenção das distâncias constantes entre as espoletas e o microfone e ausência de ventos fortes ou fontes de ruído que possam ativar o microfone.

Com base nas técnicas empregadas na avaliação de desempenho do desmonte com explosivos, no Capítulo 3 é apresentado um estudo de caso em lavra subterrânea de carvão.

Capítulo 3

Desempenho do desmonte de carvão com explosivos em lavra subterrânea

Neste capítulo, é apresentado o estudo de caso desenvolvido na avaliação de desempenho do desmonte com explosivos. Inicialmente, são apresentados dados sobre a localização da área onde a mina está em operação e um resumo de alguns aspectos geológicos locais e regionais considerados relevantes. Também é mostrada uma síntese do método de lavra empregado na extração do carvão em subsolo.

Dando seqüência, são apresentadas as metodologias empregadas na coleta dos dados e os equipamentos utilizados para o desenvolvimento da análise. Após, é feita a apresentação dos dados acompanhados de uma análise sucinta.

A montagem dos bancos de dados utilizado nesta dissertação foi realizada com as informações que foram coletadas durante os levantamentos e observações das operações rotineiras de produção conforme metodologia descrita no item 3.4. Dados e informações complementares e a infra-estrutura necessária para o desenvolvimento dos trabalhos foram disponibilizados pela Carbonífera Metropolitana S.A.

3.1 Localização

A Mina Esperança, onde este estudo foi desenvolvido, é operada pela Carbonífera Metropolitana S.A., uma das principais produtoras de carvão por lavra subterrânea do Brasil. A mina está localizada no município de Treviso (Figura 3.1), distante 30 km a noroeste de Criciúma. No ano de 2000, a empresa produziu 1,5 milhões t de carvão ROM e em 2001 e 2020, 1,6 milhões de toneladas.

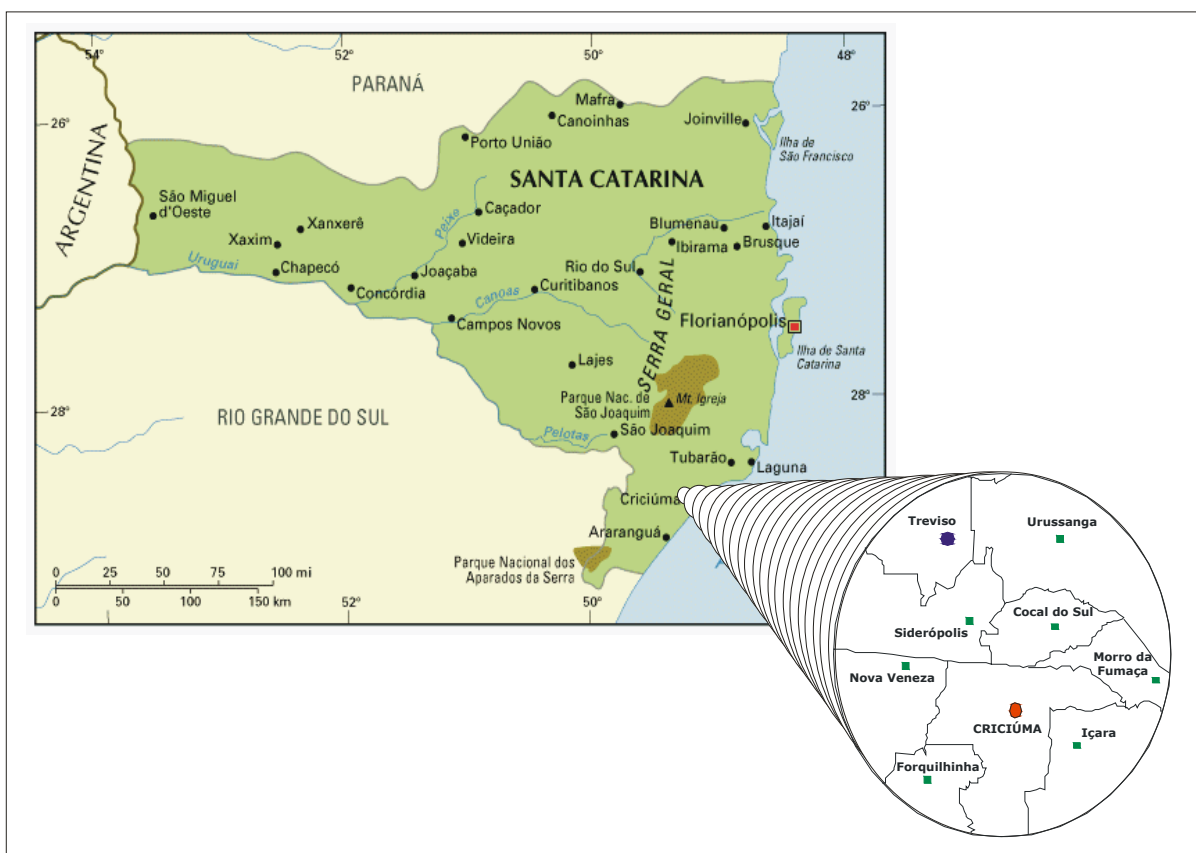


Figura 3.1 Mapa de localização.

3.2 Geologia

A Camada de Carvão Barro Branco, pertencente à Formação Rio Bonito, é a mais importante, sob o ponto de vista econômico, devido a sua ampla

distribuição horizontal e persistência em toda a bacia carbonífera. Essa camada vem sendo lavrada economicamente desde os primórdios da mineração de carvão no Estado de Santa Catarina até os dias atuais. Na região onde está localizada a Mina Esperança, sua profundidade média varia entre 180 e 230 m, apresentando espessuras de camada variando entre 1,80 e 2,20 metros.

É constituída por leitos de carvão intercalados com siltitos e folhelhos (Figura 3.2), em proporções aproximadamente equivalentes e seu perfil típico, com as denominações regionais dos leitos, pode ser assim resumido:

- **Forro:** é um leito de carvão preto com finas lâminas ou lentes mais brilhantes (vitrênio), algo piritoso, com espessura média de 0,35 m. Algumas vezes, intercalam-se no Forro uma ou mais lentes de silito ou folhelho cinza escuro a preto, conhecidos regionalmente por "Bexiga";

- **Quadração:** é um pacote de siltitos e folhelhos com cor que varia do cinza a preto, com espessura média de 0,60 m, contendo algumas finas intercalações de carvão. Na porção norte da área (nas proximidades do Rio Hipólito e Rio Laranjeiras) aparece intercalada na Quadração uma camada de arenito de granulometria média a fina, branco e muito duro;

- **Coringa:** é um fino leito de carvão com lâminas e lentes brilhantes, pouco piritoso, que normalmente ocorre entre a Quadração e o Silito Barro Branco. Sua espessura média é de 0,06 m;

- **Silito Barro Branco:** é um leito de silito cinza claro, ocasionalmente apresentando tonalidades escuras, que se altera a uma argila branca. A denominação da Camada Barro Branco foi dada em alusão a alteração desta rocha. Sua espessura média é de 0,28 m;

- **Banco:** é um pacote de carvão com intercalações de leitos de folhelhos e siltitos pretos. O número de leitos de estéril varia de 1 até 5, sendo mais comum ocorrerem três. A espessura média do Banco é de 0,67 m, com 0,20 m de material estéril. Seu carvão apresenta muita pirita, lâminas e lentes de vitrênio.

O piso da mina é composto por arenitos maciços, quartzosos, com granulação mais grosseira e bastante coesos, o que facilita a movimentação de equipamentos na mina. O teto imediato é constituído por siltitos, arenitos laminados e arenitos maciços. Os siltitos são claros, normalmente fraturados subverticalmente, com espessuras variáveis (desde poucos centímetros até 2,50

m). Os arenitos laminados apresentam fina alternância clara e escura, sendo constituídos por arenitos finos, predominantemente quartzosos, mais friáveis. No topo da seqüência do teto imediato, normalmente ocorrem arenitos maciços, de coloração clara leitosa, granulação mais grosseira, quartzosos e pouco friáveis (Fabrício, 1973).

Devido à proximidade com a Serra Geral, a tectônica da mina é mais complexa, ocorrendo não só diques de diabásio (com espessuras de até 4 m e que cortam subverticalmente a camada de carvão) como também falhamentos com rejeitos de até 6,50 m.

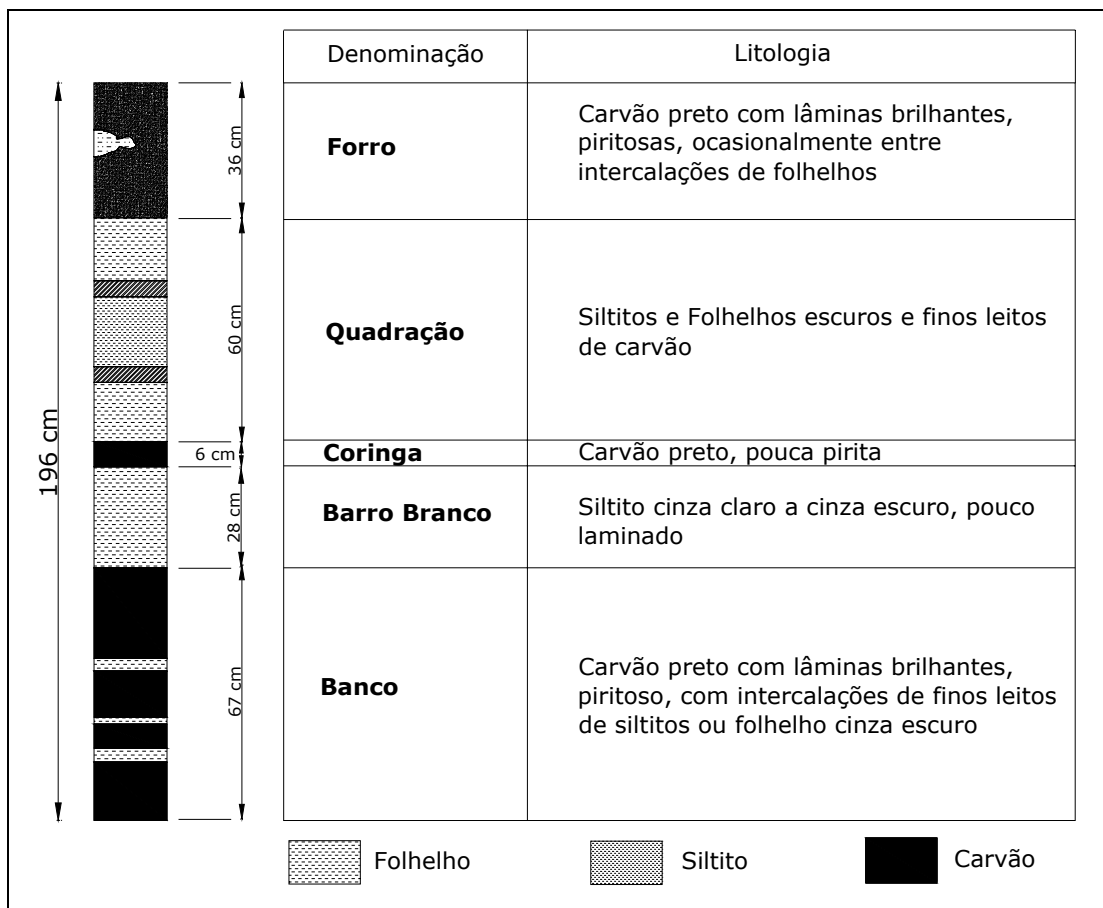


Figura 3.2 Perfil da Camada Barro Branco (Extraído de Fabrício, 1973).

3.3 Método de lavra

O método de lavra empregado é o de câmara e pilares em avanço com conjuntos mecanizados. Cada conjunto mecanizado é composto por:

- i. Perfuratriz de teto
- ii. Cortadeira de carvão
- iii. Perfuratriz de frente
- iv. Desmonte
- v. Carro carregador
- vi. Carro transportador
- vii. Alimentador britador
- viii. Centro de força

Na Figura 3.3 (Anon., 1998), é apresentado o sistema de lavra com a locação dos equipamentos acima descritos em suas operações.

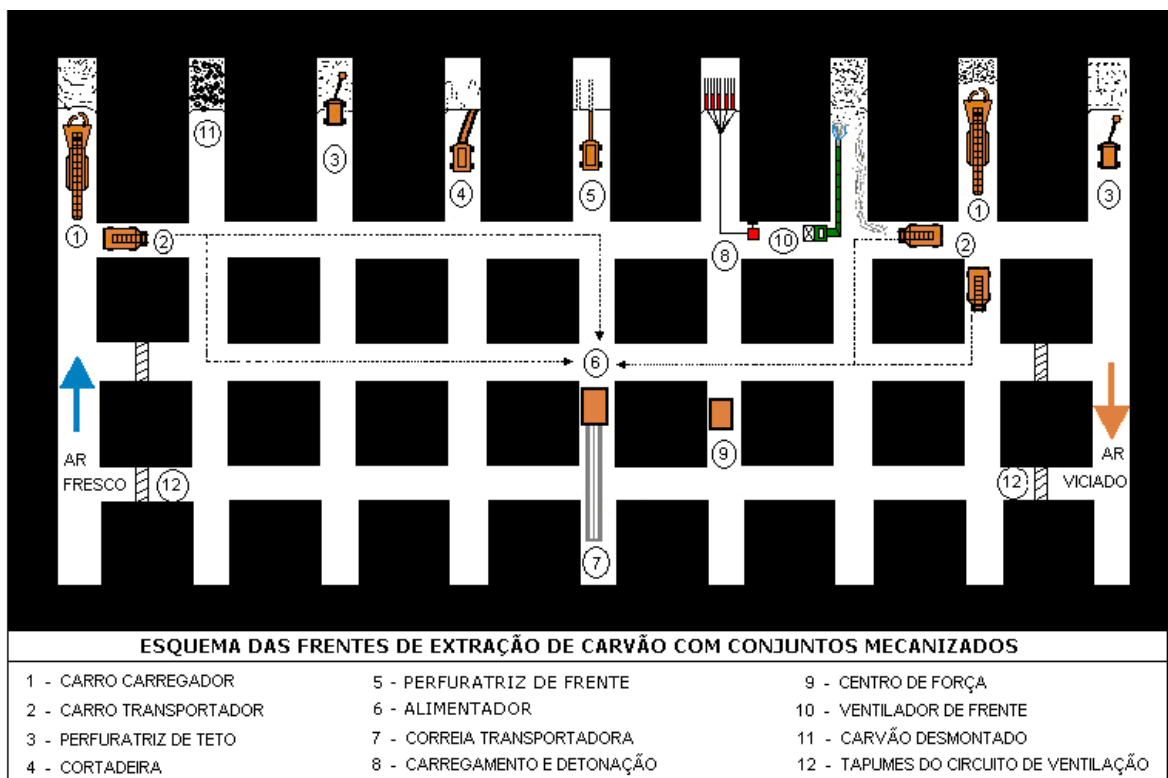


Figura 3.3 Método de lavra por Câmara e Pilares em avanço e localização dos equipamentos (Adaptado de Anon., 1998).

3.4. Metodologia

Com base nas metas estabelecidas no Capítulo 1, ítem 1.1, foram definidos os procedimentos a serem adotados nos trabalhos de acompanhamento do desmonte em função das características operacionais da lavra. Levou-se em consideração aspectos das etapas de preparação, perfuração, carregamento e detonação, adequando o sistema de ancoragem do sismógrafo ao teto para a realização das medidas de vibrações.

Nesta etapa, definiram-se quais as variáveis a serem estudadas e sua influência no desempenho do desmonte, entre elas a:

- i. a geometria do desmonte: posição dos furos na face, posição das cargas nos furos e a posição da face livre;
- ii. o sistema de iniciação: levantamento dos tempos de retardo utilizados e a seqüência de iniciação dos furos;
- iii. a fragmentação: fotografias do desmonte para avaliação da fragmentação com a contagem de blocos de diâmetro exagerado levando em consideração o sistema de transporte do ROM;
- iv. o desempenho da detonação: coleta de dados referente a velocidade de pico de partícula (PPV).

3.4.1 Levantamento de dados de geometria do desmonte

No levantamento dos dados geometria do desmonte, em conjunto com a colocação do sistema de iniciação e dos explosivos nos furos, foram coletados os seguintes dados:

- i. medidas de afastamento e espaçamento reais obtidas no campo, levando em consideração as marcações empregadas nas frentes pela produção e comparação com o plano de fogo padrão adotado pela empresa;
- ii. levantamento da posição do corte, medida de sua largura e profundidade e medida da altura da galeria;

- iii. medida da profundidade dos furos da Quadração, Forro e Banco;
- iv. presença de água e tipo de limpeza realizada antes do carregamento dos furos;
- v. tipo de explosivo, tamanho dos cartuchos e quantidade por furo;
- vi. sobre a execução de adensamento manual ("atacamento") do explosivo no furo;
- vii. posição no furo do cartucho da coluna escorvado;
- viii. tipo e comprimento dos acessórios de iniciação utilizados, bem como tempo dos retardos e distribuição dos tempos no carregamento da face;
- ix. gramatura do cordel empregado na ligação com o sistema de iniciação das cargas com tubo de choque, tipo e comprimento da espoleta acoplada;
- x. observação quanto à execução do tampão e tipo de material;
- xi. medida do avançamento após a detonação e transporte do ROM. Para isto, antes da detonação era escolhido um ponto de referência (parafuso de teto) para as medidas levantadas com trena metálica.

3.4.2 Fotografias da pilha do desmontado

A tomada de fotografias da pilha após a realização do desmonte com explosivos, realizou-se em três etapas:

- i. uma imagem imediatamente após a detonação;
- ii. a segunda após a retirada de aproximadamente 50% do material desmontado;
- iii. a terceira e última próximo ao final do ciclo de limpeza.

A escala de referência empregada para a análise granulométrica nos testes iniciais foram duas trenas (0,20 m) dispostas em ângulo de 90° (Figura 3.4 e 3.5). Em seguida evolui-se para a utilização de bolas plásticas de diâmetro conhecido e de cor contrastante com o meio para uma melhor visualização e a obtenção de uma escala mais acurada.

O equipamento utilizado para a tomada de imagens foi uma máquina

fotográfica manual com lente de 50 mm dotada de um *flash* externo adequado para um ambiente sem iluminação. O filme fotográfico adotado foi o exigido pela máquina, 35 mm e com sensibilidade ISO - 400 ASA. A melhor velocidade do obturador foi de 1/60 e *f*/11 para a abertura do diafragma. A distância da pilha do desmontado até o ponto adotado para a tomada das fotos foi em torno de 5,0 metros.



Figura 3.4 Primeira escala de referência (trena) utilizada na análise de imagens.



Figura 3.5 Segunda e definitiva escala de referência (bolas plásticas) utilizada na análise de imagens.

3.4.3 Monitoramento sismográfico

Para a coleta de dados de velocidade de pico de partícula, foram adotados os seguintes procedimentos:

- i. definição do local das estações;
- ii. medição da distância entre a estação e o local de detonação em todos os eventos;
- iii. ancoragem do sismógrafo com parafuso empregado na sustentação do teto das galerias com o posicionamento correto dos eixos dos geofones conforme as suas direções de vibração (Figura 3.7);
- iv. instalação dos geofones a um parafuso de teto cujo furo esteja completamente preenchido com resina de modo a obter um perfeito acoplamento do sistema rocha-geofones.

O sismógrafo utilizado no monitoramento foi um modelo fabricado pela Instantel Inc., o *Minimate™ DS-077* (Figura 3.6). Neste modelo, cujas especificações são apresentadas na Tabela 3.1, o conjunto formado pelos três geofones está instalado dentro do equipamento juntamente com os componentes eletrônicos de controle e aquisição dos dados.



Figura 3.6 Sismógrafo Instantel *Minimate™ DS-077* empregado no monitoramento das vibrações.



Figura 3.7 Sismógrafo Instantel *Minimate™ DS-077* ancorado ao teto sendo ativado para monitorar um desmonte.

Tabela 3.1 Especificações técnicas do sismógrafo Instantel - *Minimate™ DS-077*.

SÍSMICA	
Faixa de Operação	0 a 127 mm;
Disparador (<i>trigger</i>)	0,25 a 127 mm/s;
Análise de frequência	Frequência de pico, mais análises USBM, OSMRE e DIN 4150;
Precisão	Calibrado para 1% (referência: de Bruel & Kjaer em 15 Hertz);
RUÍDO	
Faixa de Operação	100 a 142 dB (2 a 250 Pa);
Disparador (<i>trigger</i>)	106 a 142 dB (4 a 250 Pa);
Precisão	Calibrado para 0,4 dB (referência: de Bruel & Kjaer em 30 Hertz);
Resposta de frequência	linear, 2 a 250 Hz em todos os canais (-3dB), independente do tempo de gravação;
GERAL	
Taxa de amostragem	1024 amostras por canal por segundo;
Tempo de registro fixo	1 a 10 segundos em incrementos de um segundo
Modo de registro	Manual, um evento, contínuo ou automático
Canais	4; longitudinal, vertical, transversal e som;

3.5 Coleta de dados de geometria do desmonte

Os dados obtidos durante os trabalhos de campo são apresentados na seguinte ordem:

- i. os dados referentes à geometria do desmonte;
- ii. análise de imagens;
- iii. monitoramento sismográfico.

Os dados referentes à geometria do desmonte foram organizados conforme a Tabela 3.2, que contém os parâmetros principais de desmonte, coletados antes e durante o carregamento. Os dados referentes aos afastamentos e espaçamentos reais foram medidos na face após a perfuração estabelecendo-se o plano de fogo representativo de cada desmonte (Figura 3.8) os quais foram posteriormente comparados com o plano de fogo padrão estabelecido (Figura 3.9).

Para a quantificação dos desvios de emboque para cada furo, no plano xy , foi adotada uma convenção para a análise dos desvios e ilustrada pela Figura 3.10. A partir da comparação do plano de fogo representativo de cada desmonte com o plano de fogo padrão, foram obtidos os desvios de emboque e tabulados conforme as Tabelas 3.3 para a direção x e a Tabela 3.4 para a direção y . Essas tabelas apresentam os desvios médios para cada furo acompanhados do seu respectivo desvio padrão.

Para a análise da eficiência dos desmontes foram tabulados os dados representativos do desempenho técnicos e econômicos representados pelo avanço e razão de carga, respectivamente. Na Tabela 3.5 são apresentados os dados obtidos com o avançamento real de cada detonação e mostrar o seu efeito sobre a razão de carga sumarizado na Figura 3.12. Pode-se observar que a razão de carga varia inversamente com o avanço real obtido, sendo este um dos fatores predominantes na análise de desempenho do desmonte.

Todos os demais dados gerados pelos 21 eventos monitorados estão dispostos em tabelas e são apresentados no Apêndice A.

Tabela 3.2 Planilha de coleta de dados de geometria e carregamento.

PLANILHA DE DESMONTE EM SUBSOLO - EVENTO 18				
Data: 02/12/99		Horário: 16:31:40		Método de Lavra: Câmara e Pilares
Altura (m): 2,10			Largura (m): 5,75	
Profundidade de Corte da Rafa (m): 2,70			Diâmetro Furos (mm): 41	
Nº de Furos: 12		Secos []	Água [X]	Área(m ²): 12,08
Comprimento dos Furos (m): 2,60			Metros Perfurados (m): 31,20	
Perfuração Específica (m/m ³): 0,985			Avanço/Fogo (m): 2,60	
Volume Desmontado (m ³): 31,40			Carga Total de Explosivos (kg): 8,02	
Razão de Carga (kg/m ³): 0,255			Tampão (m): um cartucho argila de 20 cm	
EXPLOSIVOS/ SISTEMA DE INICIAÇÃO - EVENTO 18				
Tipo: Gelatina - 113 g p/cart.		Diâmetro (mm): 25		Compr. Cartucho(mm): 200
Densidade (g/cm ³):		Volume de Gás (l/kg):		VoD (m/s):
Resistência à Água: Boa		Concentração de Carga (kg/m):		Sensibilidade: Esopoleta nº 8
Iniciador (tipo/peso): Não		Reforçador (tipo/peso): Não		-
Tipo: tubo de choque - Tipo A			Comprimento (m): 6,00 e 9,00	
Tempo dos Retardos (ms): 25/125/225/350/500/650/1100			Cordel Detonante (g/m): 5 g/m (um metro) e uma Esopoleta nº 8 c/estopim	
CARREGAMENTO - EVENTO 18				
Furo	Carga por Furo (kg)	Seqüência	Retardos (ms)	Carga por Espera (kg)
1	0,791	T1	25	T1 = 0,791
2	0,791	T2	125	
3	0,791	T2	125	T2 = 1,582
4	0,791	T3	225	
5	0,791	T3	225	T3 = 1,582
6	1,130	T4	350	T4 = 1,130
7	0,791	T5	500	
8	0,791	T5	500	T5 = 1,582
9	0,339	T6	650	
10	0,339	T6	650	T6 = 0,678
11	0,339	T8	1100	
12	0,339	T8	1100	T8 = 0,678
TOTAL	8,02	-	-	-

Tabela 3.3 Desvio de emboque (colar) em relação ao eixo x (em cm).

Furo Evento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	30	20	15	5	20	15	5	5	25	60	55	5
2	50	12.5	12.5	20	30	22.5	5	5	47.5	57.5	27.5	10
3	45	15	20	30	20	5	20	15	10	5	20	20
4	40	2.5	52.5	60	25	37.5	25	15	7.5	27.5	32.5	35
5	35	7.5	22.5	30	35	22.5	20	55	37.5	12.5	7.5	5
6	45	60	45	0	60	45	15	25	15	45	15	15
7	25	5	22.5	20	15	12.5	5	10	15	2.5	7.5	30
8	5	10	10	40	20	15	10	5	15	35	80	5
9	25	40	55	20	5	30	5	0	n/d	50	5	5
10	20	30	20	30	25	10	5	35	50	2.5	15	35
11	15	22.5	32.5	5	15	12.5	5	5	7.5	7.5	7.5	5
12	25	7.5	7.5	45	15	12.5	35	5	12.5	57.5	32.5	5
13	25	32.5	22.5	35	25	12.5	35	5	27.5	2.5	12.5	15
14	25	15	15	40	5	10	25	5	20	25	0	15
15	40	27.5	22.5	20	30	7.5	30	20	37.5	17.5	7.5	15
16	50	52.5	32.5	5	40	32.5	5	10	37.5	27.5	17.5	5
17	35	35	20	20	25	30	15	0	10	35	10	10
18	60	57.5	27.5	0	25	7.5	0	10	2.5	22.5	2.5	45
19	20	20	30	65	20	20	50	80	25	10	15	35
20	45	45	25	20	35	40	5	20	45	60	15	20
21	55	60	5	0	65	60	10	25	15	15	15	45
m (*)	34.05	28.24	24.29	24.29	26.43	21.67	15.71	16.90	23.13	27.50	19.05	18.10
σ	13.94	17.86	13.05	18.34	14.57	14.27	13.03	19.05	14.29	20.04	18.73	13.49

(*) Obs: **m** é a média do desvio (cm) e **σ** é o desvio padrão.

Tabela 3.4 Desvios de emboque (colar) em relação ao Eixo y (em cm).

Evento	Furo		
	5	6	7
1	20	20	20
2	15	15	20
3	15	15	15
4	5	15	15
5	20	5	10
6	30	5	15
7	5	15	30
8	10	5	10
9	5	15	10
10	5	10	15
11	25	25	30
12	20	25	25
13	15	35	10
14	15	35	10
15	15	10	20
16	20	10	15
17	25	10	10
18	20	15	15
19	15	15	25
20	30	30	25
21	15	35	25
m	16.43	16.9	17.62
σ	7.41	9.15	6.66

onde **m** é a média do desvio (cm) e **σ** é o desvio padrão

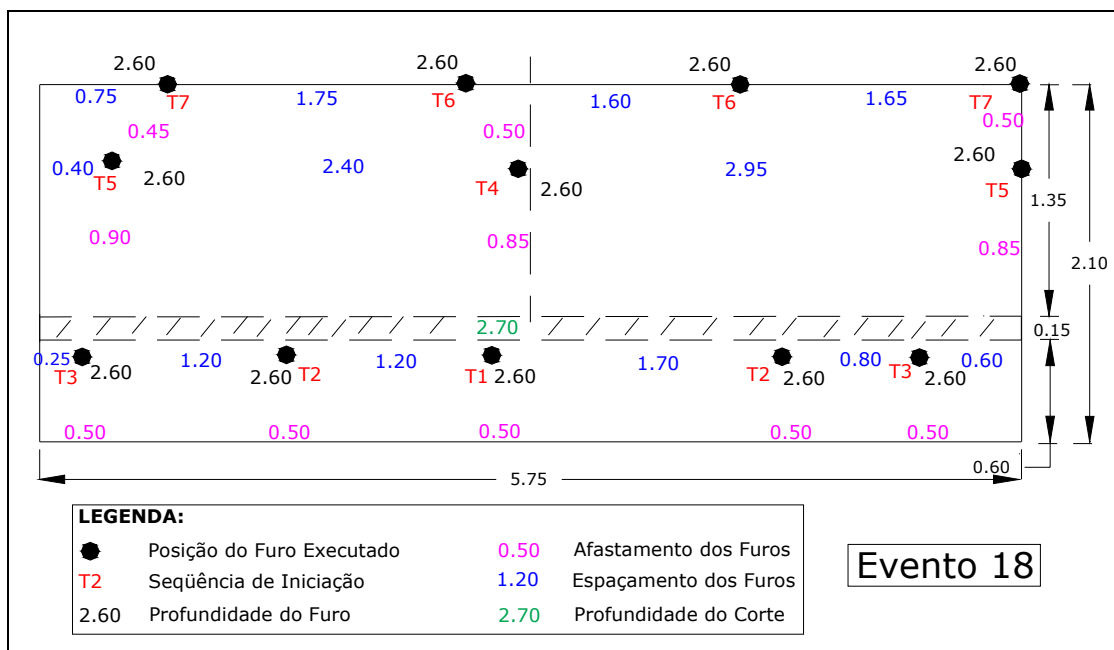


Figura 3.8 Plano de fogo representativo do desmonte referente ao evento

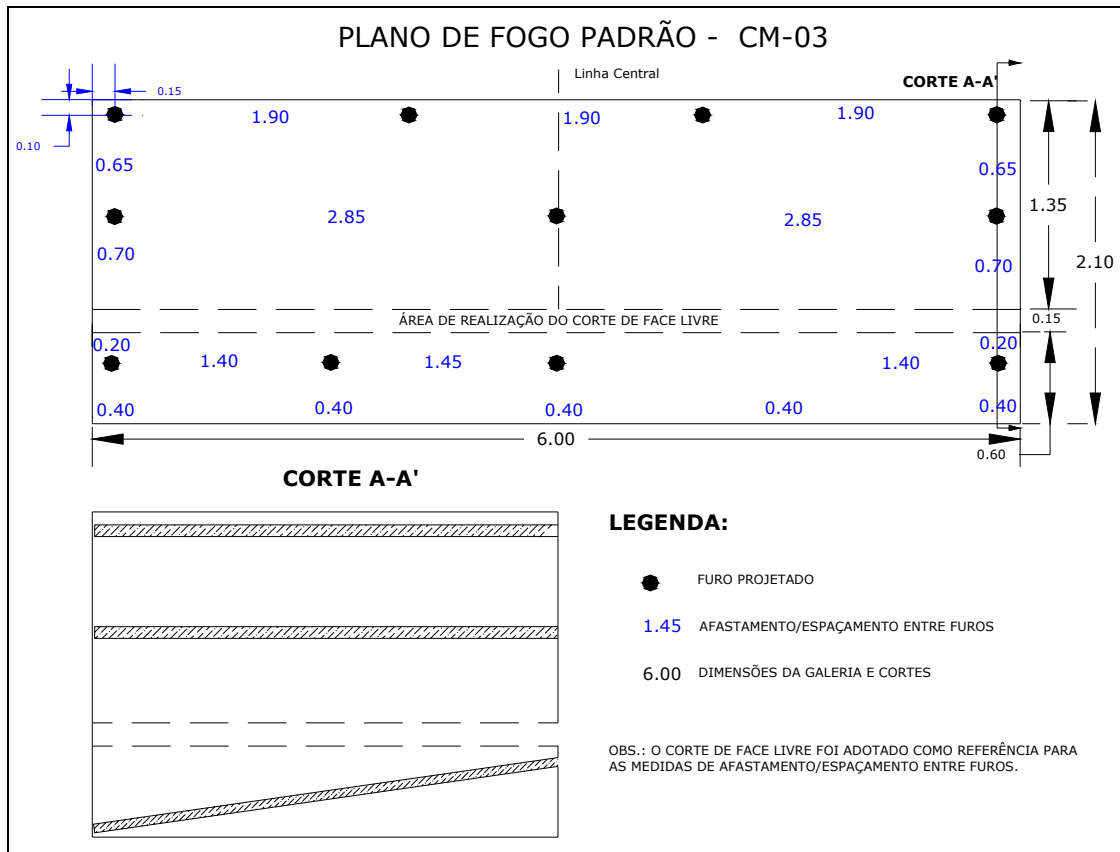


Figura 3.9 Plano de fogo padrão praticado no conjunto mecanizado 03.

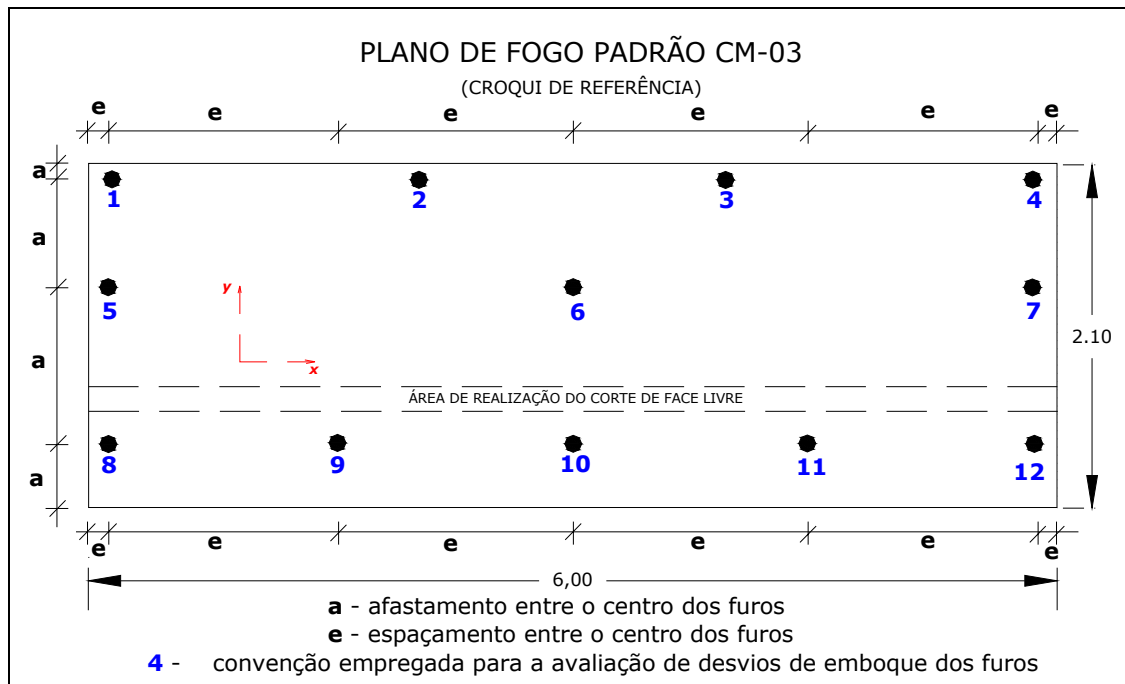


Figura 3.10 Convenção empregada para a análise dos desvios de emboque dos furos.

Tabela 3.5 Dados de desempenho técnico e econômico dos desmontes.

Evento	Consumo de Explosivos (kg)	Largura da Galeria (m)	Altura da Galeria (m)	Área (m ²)	Avanço Obtido	Volume Desmontado (m ³)	Razão de Carga (kg/m ³)
2	8,02	6,15	2,10	12,92	2,50	32,29	0,248
3	8,02	6,00	2,10	12,60	2,50	31,50	0,255
4	8,02	5,85	2,10	12,29	2,45	30,10	0,266
5	8,02	5,55	2,10	11,66	2,20	25,64	0,313
6	7,23	5,80	2,10	12,18	2,25	27,41	0,264
7	8,02	5,85	2,10	12,29	1,90	23,34	0,344
8	8,02	5,60	2,10	11,76	2,40	28,22	0,284
12	8,02	5,95	2,10	12,50	2,10	26,24	0,306
13	8,02	5,65	2,10	11,87	2,00	23,73	0,338
14	8,02	5,55	2,10	11,66	2,00	23,31	0,344
15	8,02	5,95	2,10	12,50	1,70	21,24	0,378
18	8,02	5,75	2,10	12,08	2,60	31,40	0,255
19	8,02	5,70	2,10	11,97	2,30	27,53	0,291
20	8,02	5,60	2,10	11,76	2,25	26,46	0,303
21	8,02	5,10	2,10	10,71	2,00	21,42	0,374
média	7,97	5,74	2,10	12,05	2,21	26,65	0,304

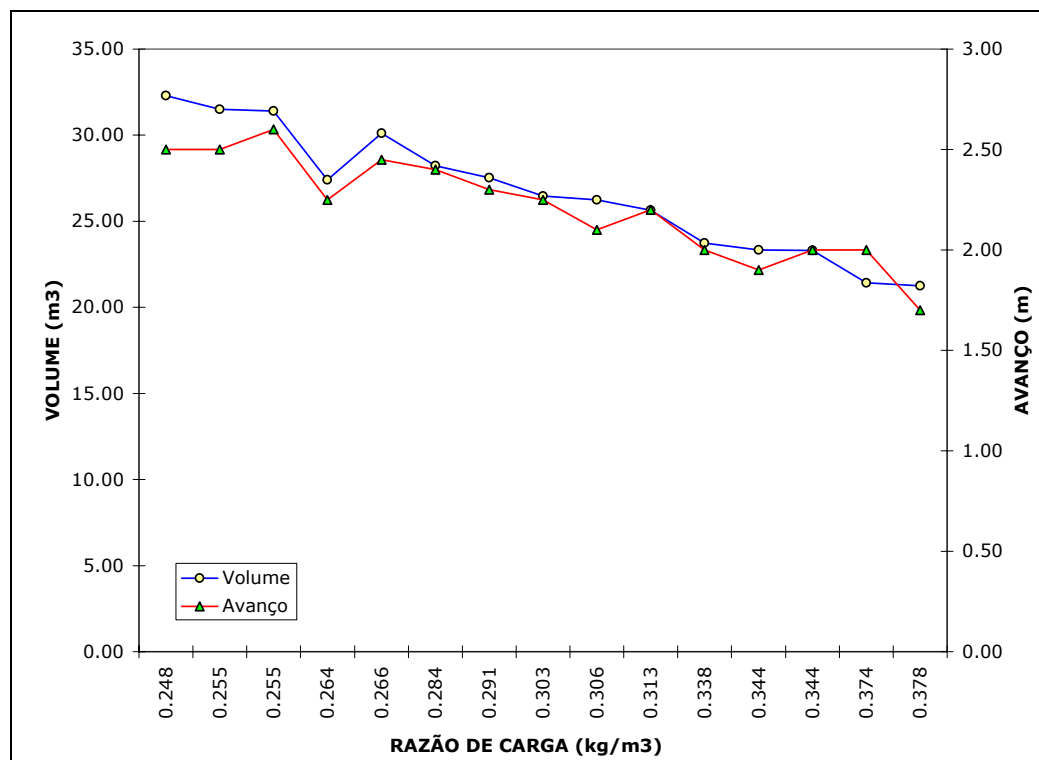


Figura 3.11 Variação da razão de carga em função do avanço e volume obtidos.

Com base na coleta de dados de desvio de emboque e visualizados nas Tabelas 3.3 e 3.4, foram gerados histogramas de desvio para cada furo com o auxílio do *software histplt* da biblioteca *GSLIB* (Deutsch & Journal, 1998). Os histogramas de desvio para o eixo x podem ser visualizados nas Figuras 3.13 a 3.24. Para o eixo y, são visualizados nas Figuras 3.25 a 3.27.

Para o eixo y foram analisados desvios associados somente aos furos da quadração, pois no banco e no forro esta variável não está presente devido ao acúmulo de material após o corte e ao teto da galeria, respectivamente.

Na análise dos histogramas não foi possível um estudo estatístico mais detalhado em função do número de amostras (21 eventos acompanhados) não ser representativo para o desenvolvimento de uma análise que possibilitasse a geração de conclusões mais acuradas.

Na Figura 3.12 são sumarizados os desvios médios para cada furo juntamente com o desvio padrão.

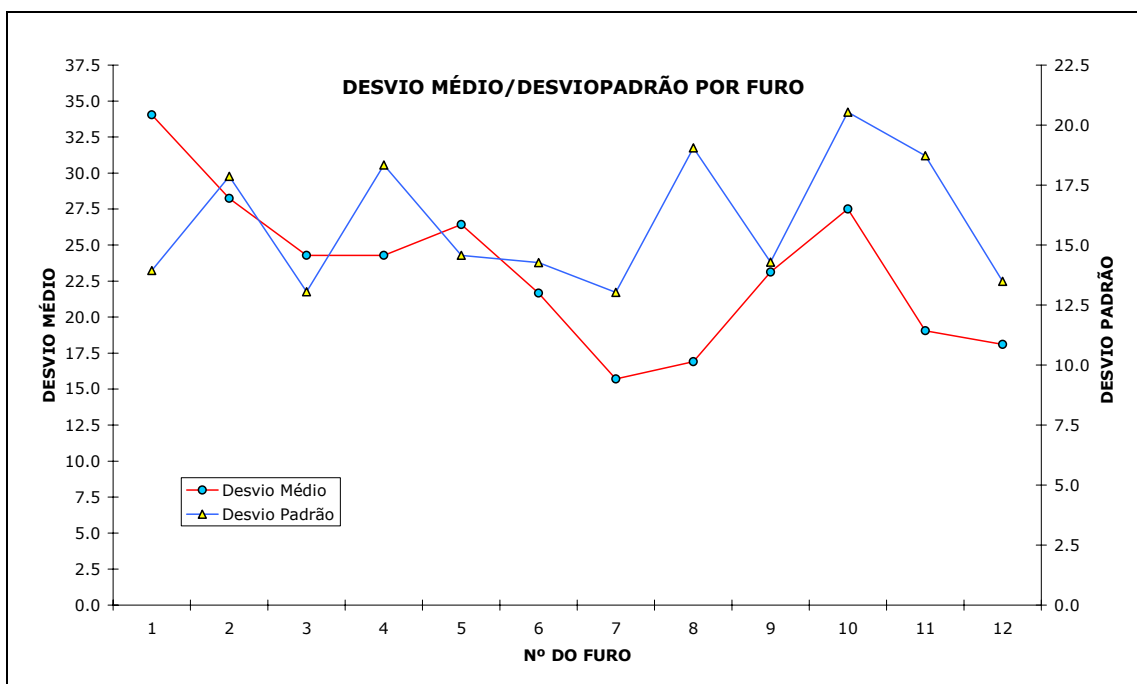


Figura 3.12 Ilustração do desvio médio e do seu respectivo desvio padrão para todos os furos dos desmontes monitorados.

Segundo Persson *et al.*, 1993, no emboque dos furos são aceitos desvios de até três vezes o diâmetro do furo. Castro *et al.*, 1986, diz que, valores admissíveis para desvios de emboque devem ser iguais à metade do diâmetro empregado na perfuração. De acordo com o diâmetro empregado na perfuração

dos desmontes (43 mm), a Figura 3.12 possibilita visualizar as deficiências de qualidade na prática de perfuração em função dos valores atingidos pelos desvios de emboque dos furos para os eventos acompanhados.

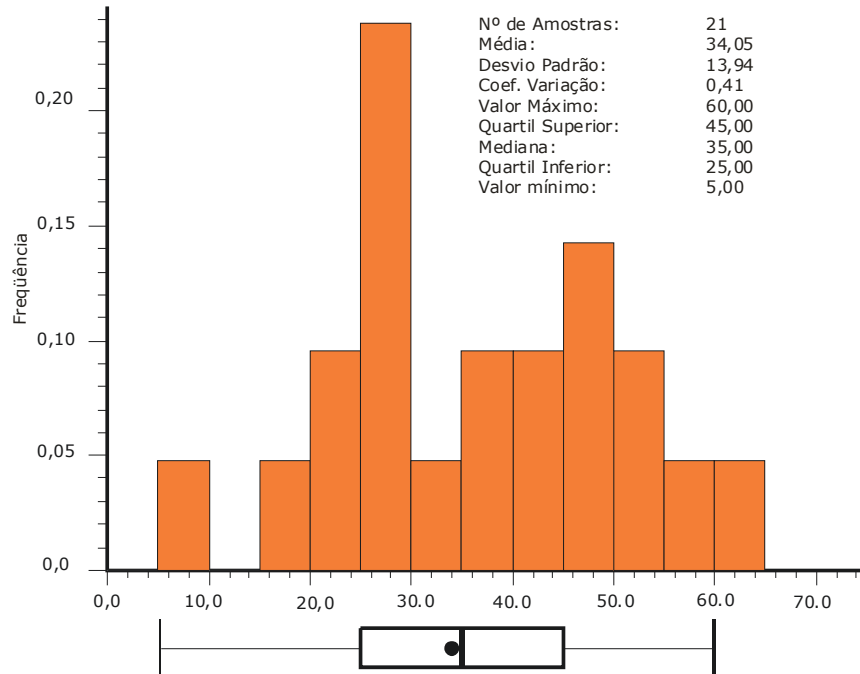


Figura 3.13 Histograma de desvio para o furo 1 na direção **x**.

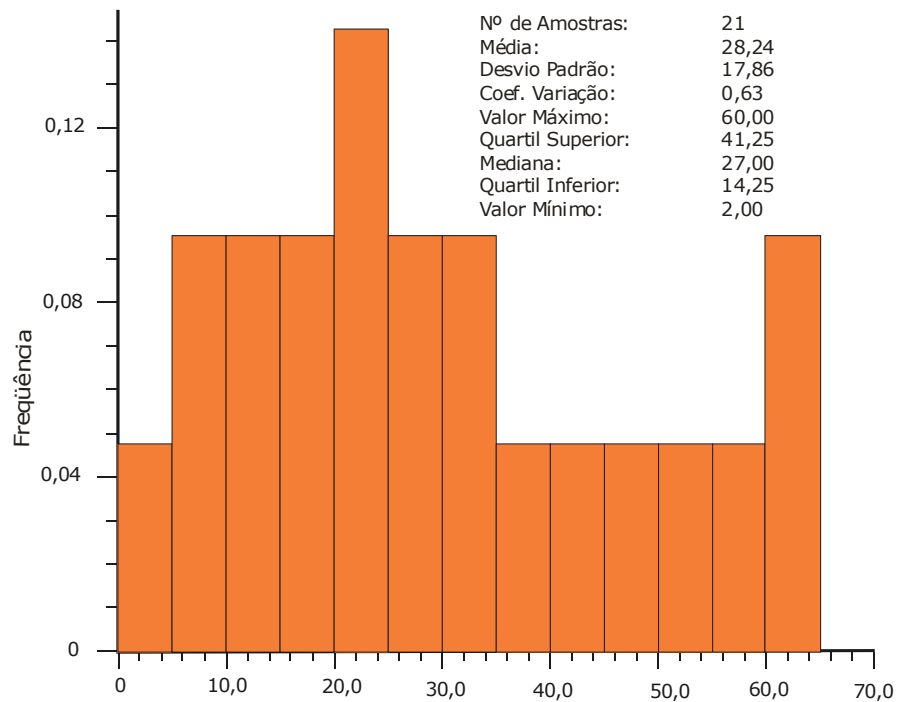


Figura 3.14 Histograma de desvio para o furo 2 na direção **x**.

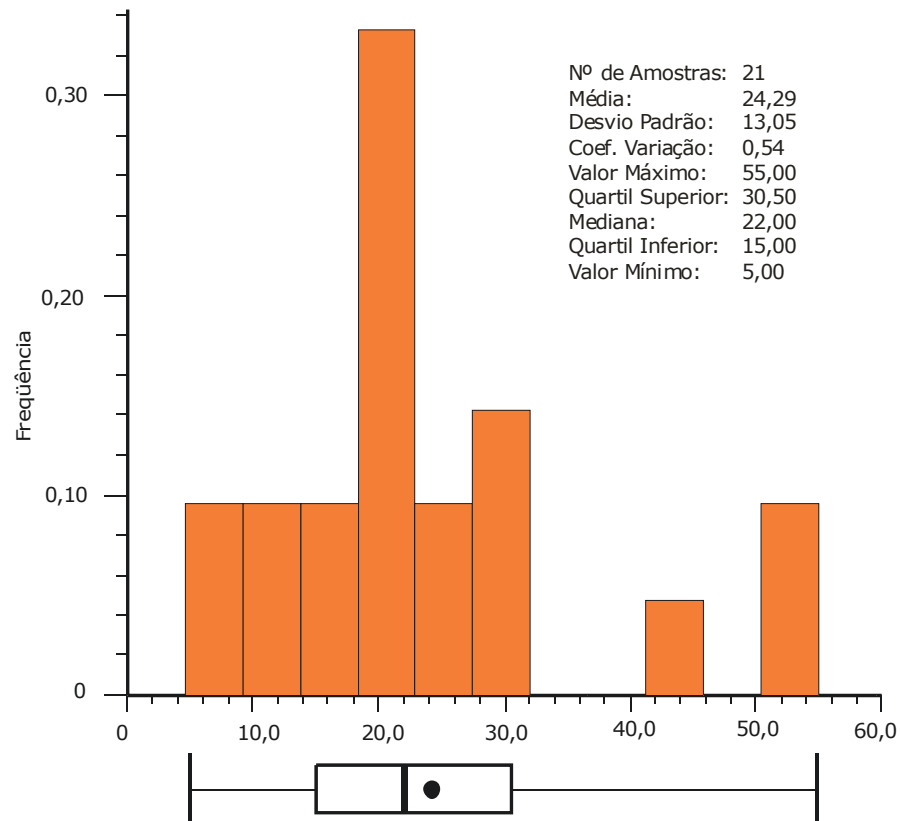


Figura 3.15 Histograma de desvio para o furo 3 na direção x .

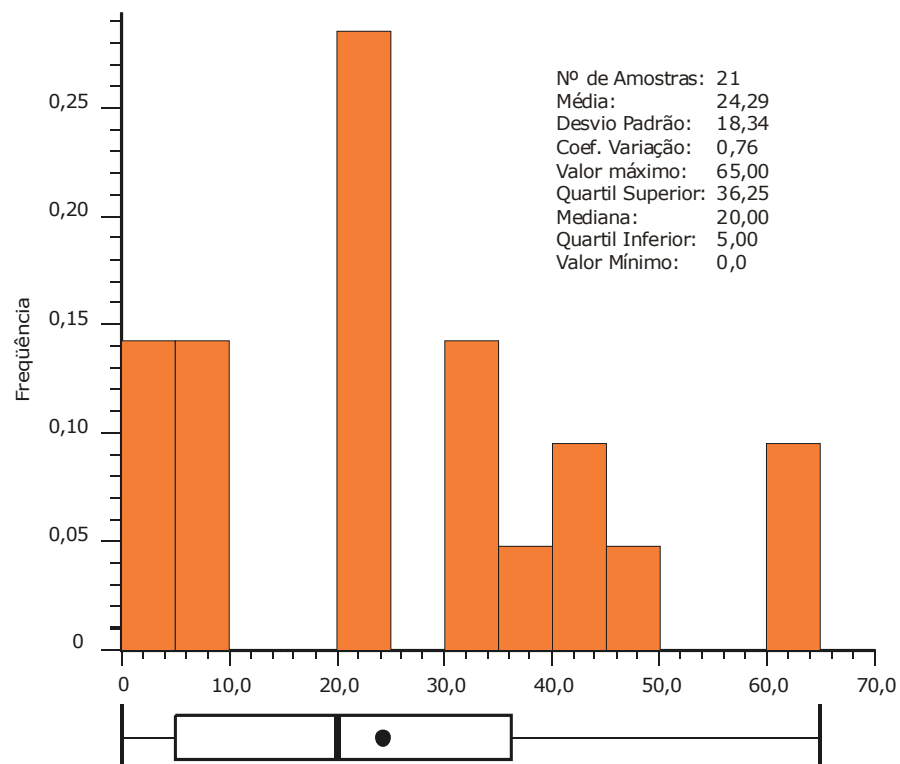


Figura 3.16 Histograma de desvio para o furo 4 na direção x .

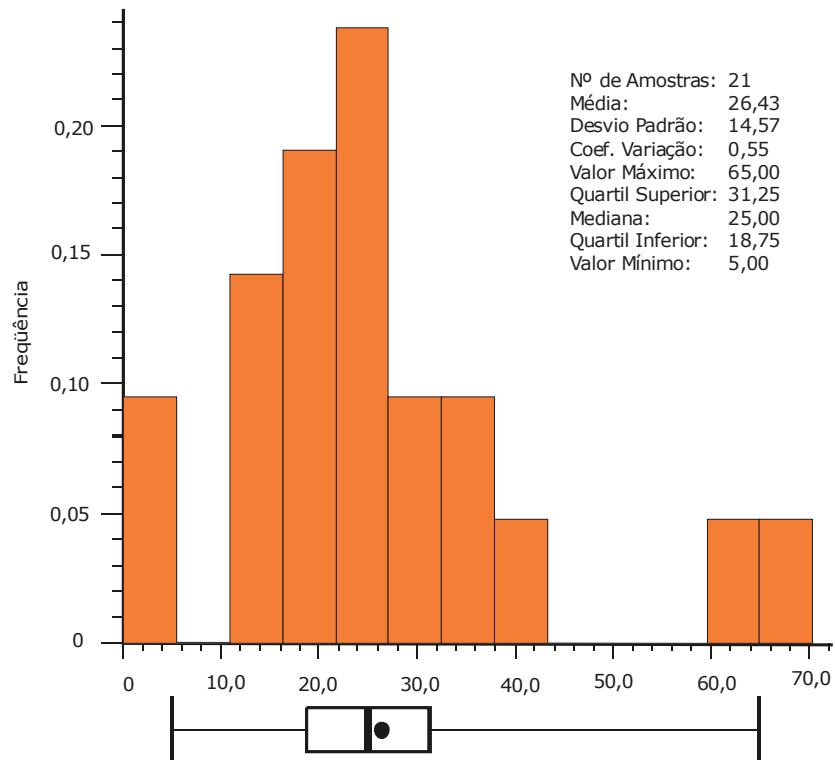


Figura 3.17 Histograma de desvio para o furo 5 na direção x .

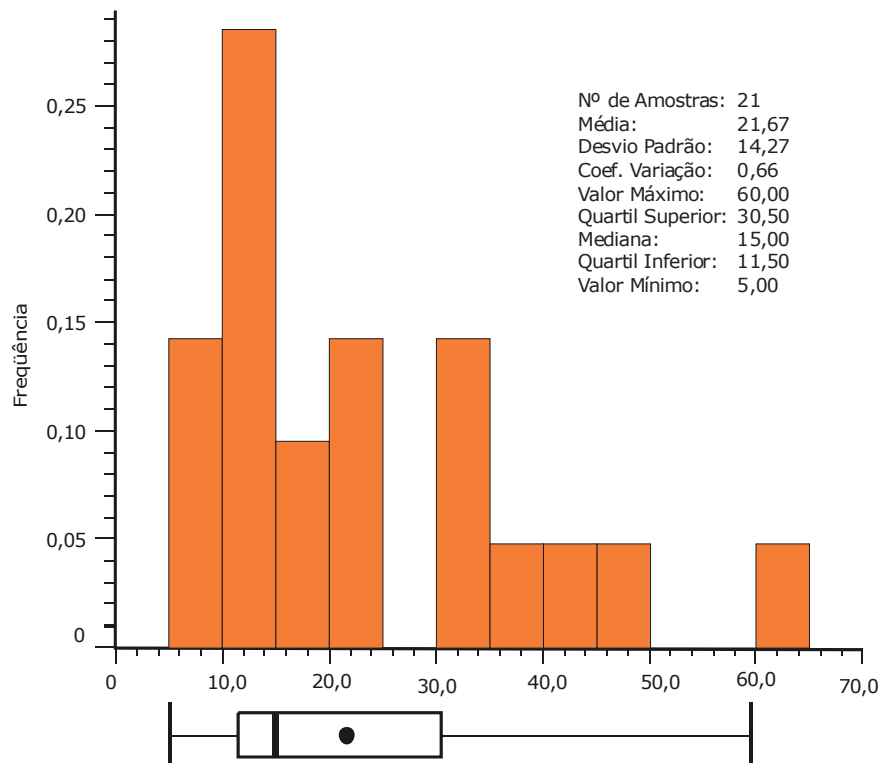


Figura 3.18 Histograma de desvio para o furo 6 na direção x .

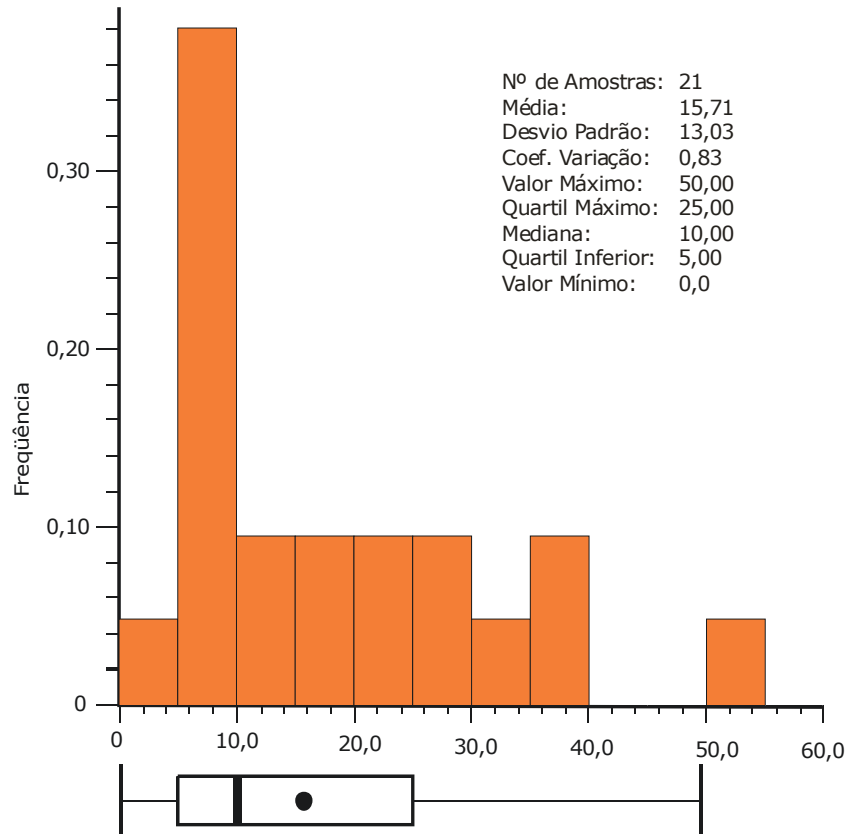


Figura 3.19 Histograma de desvio para o furo 7 na direção **x**.

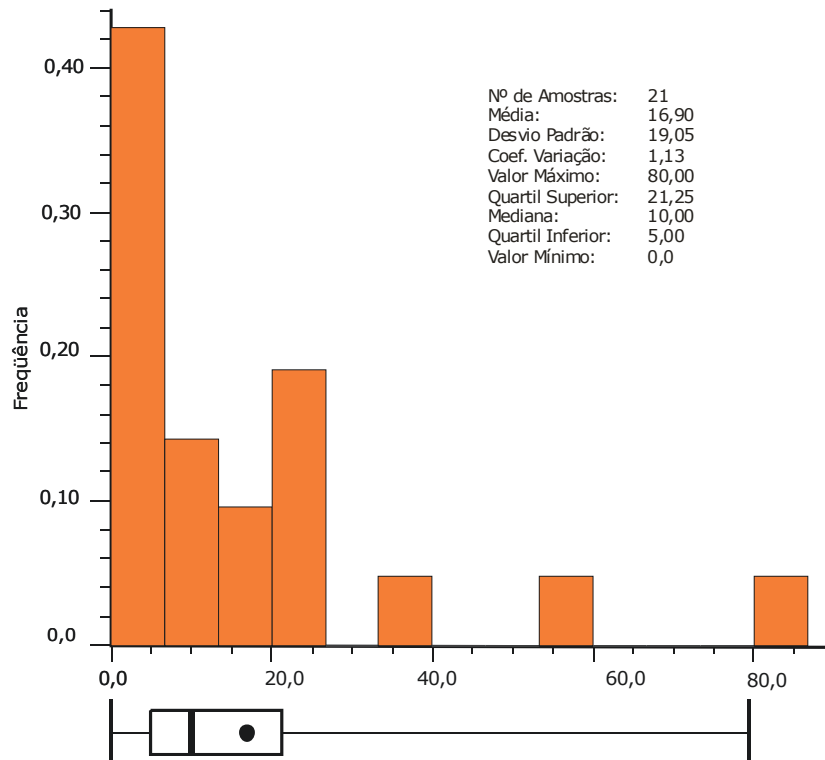


Figura 3.20 Histograma de desvio para o furo 8 na direção **x**.

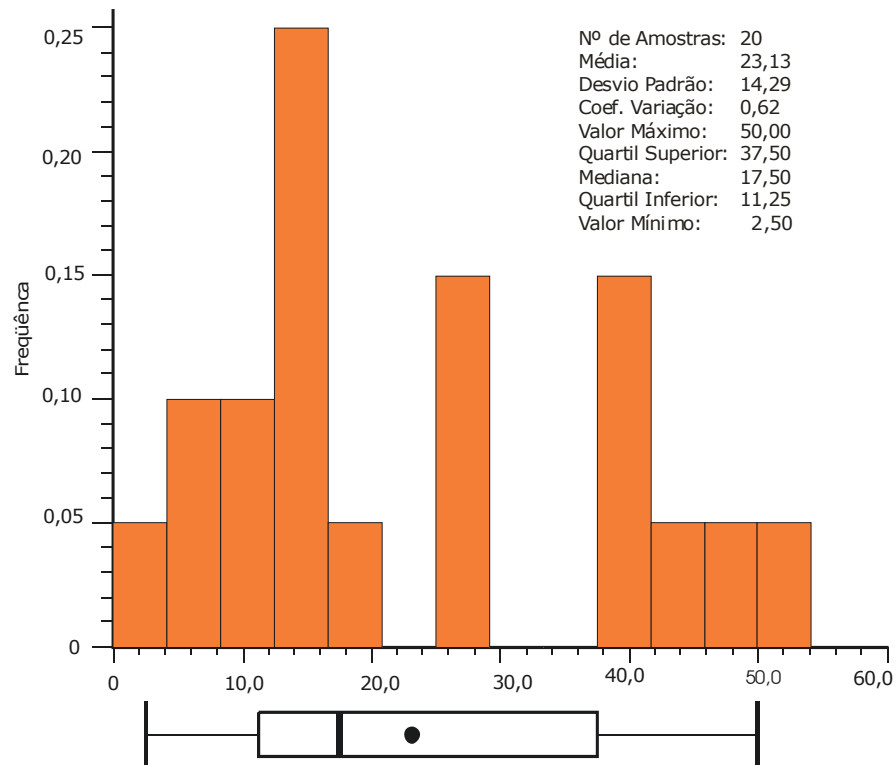


Figura 3.21 Histograma de desvio para o furo 9 na direção x .

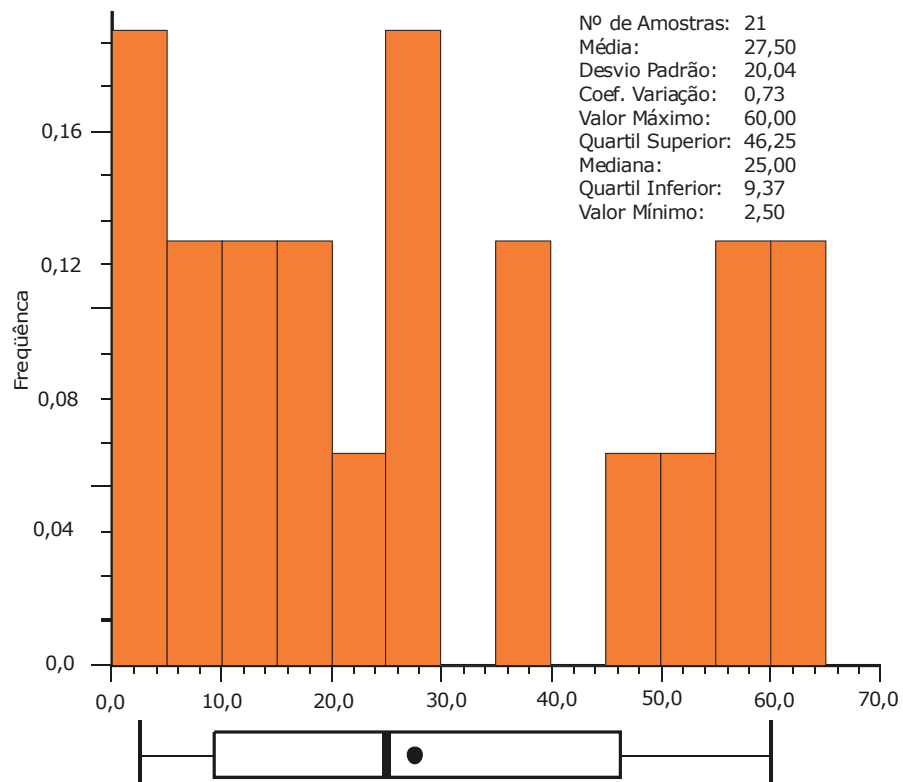


Figura 3.22 Histograma de desvio para o furo 10 na direção x .

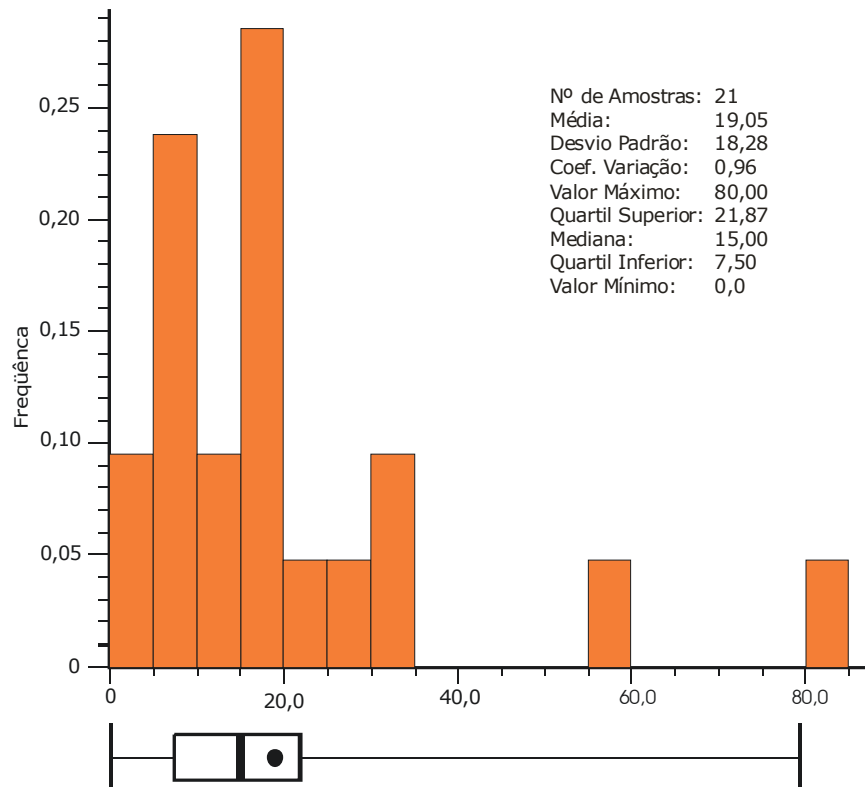


Figura 3.23 Histograma de desvio para o furo 11 na direção x .

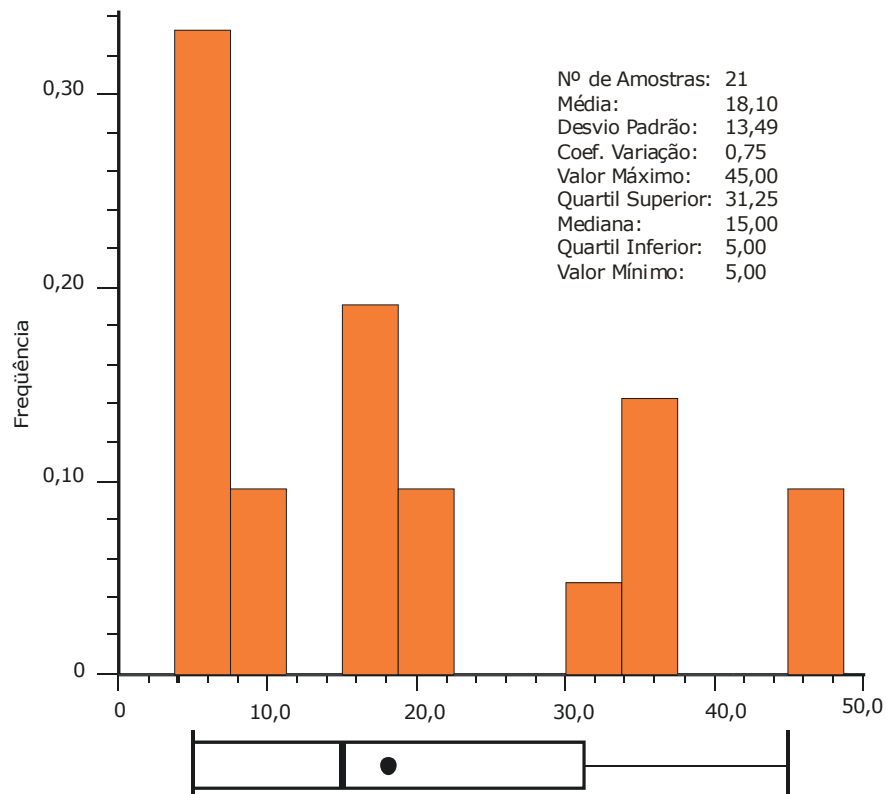


Figura 3.24 Histograma de desvio para o furo 12 na direção x .

As Figuras 3.25 a 3.27 representam os histogramas obtidos com os desvios em y conforme convenção adotada e mostrada na Figura 3.10.

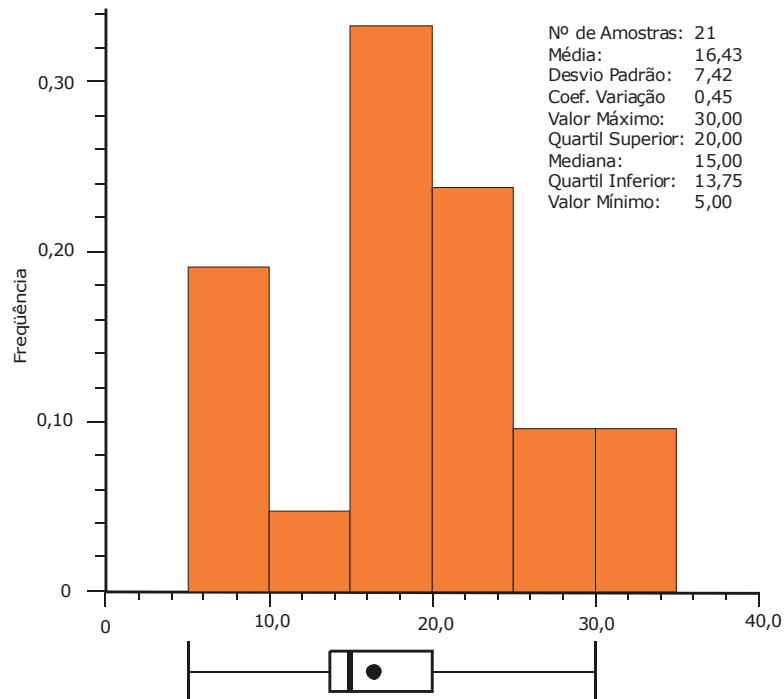


Figura 3.25 Histograma de desvio para o furo 5 na direção y .

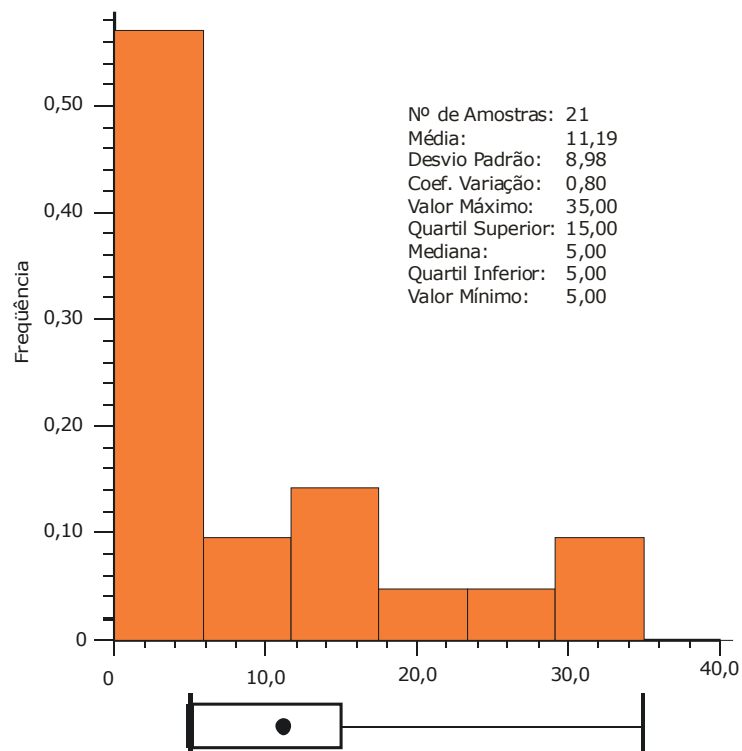


Figura 3.26 Histograma de desvio para o furo 6 na direção y .

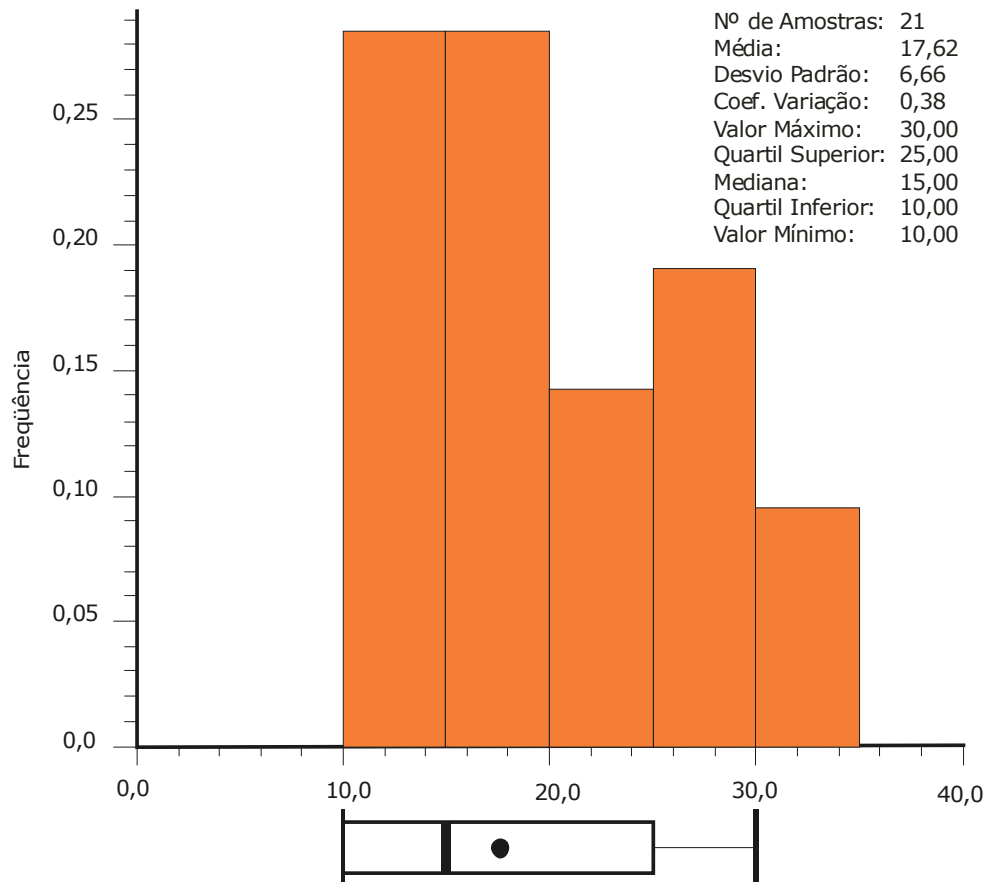


Figura 3.27 Histograma de desvio para o furo 7 na direção y .

3.6 Análise de imagens - fragmentação

De acordo com a metodologia descrita no item 3.4.2 e com o objetivo de determinar o percentual de blocos grosseiros, as imagens foram digitalizadas e delineados os fragmentos iguais ou maiores que a escala de referência. Após, calculou-se a área total da imagem e a área correspondente aos blocos. As imagens obtidas e os dados gerados pela análise são apresentados no Apêndice B e C respectivamente. Na Tabela 3.6, são apresentados os resultados obtidos com a análise de imagens referente a dez eventos de um total de 21 eventos monitorados.

Tabela 3.6 Índice de blocos (em %).

Nº da detonação	Frente	nº de fotos tomadas	% blocos (em área)
1	G4	1	17,68
2	G3	1	23,82
12	G4	1	22,02
13	G2	2	22,51
14	G3	3	18,21
15	G4	1	17,78
16	G1	1	22,28
18	G4	1	26,07
20	T3 - G1/G3	2	29,20
21	T3 - G1/G2	2	30,81
m (*)			23,04
σ			4,59

(*) Obs: **m** é a média do percentual de blocos e σ é o seu desvio padrão.

Exemplos de análise de imagens referente aos desmontes dos eventos 01 e 18 são mostradas nas Figuras 3.28 a 3.32. Nas Figuras 3.28 a 3.30, podemos visualizar na seqüência a primeira imagem tomada logo após a detonação do evento 01, a identificação dos blocos e a posterior digitalização. O mesmo é mostrado nas Figuras 3.31 e 3.32 com relação ao desmonte do evento 18.



Figura 3.28 Imagem nº 1 referente ao evento 1, onde ao centro podem ser visualizadas as escalas de referência.

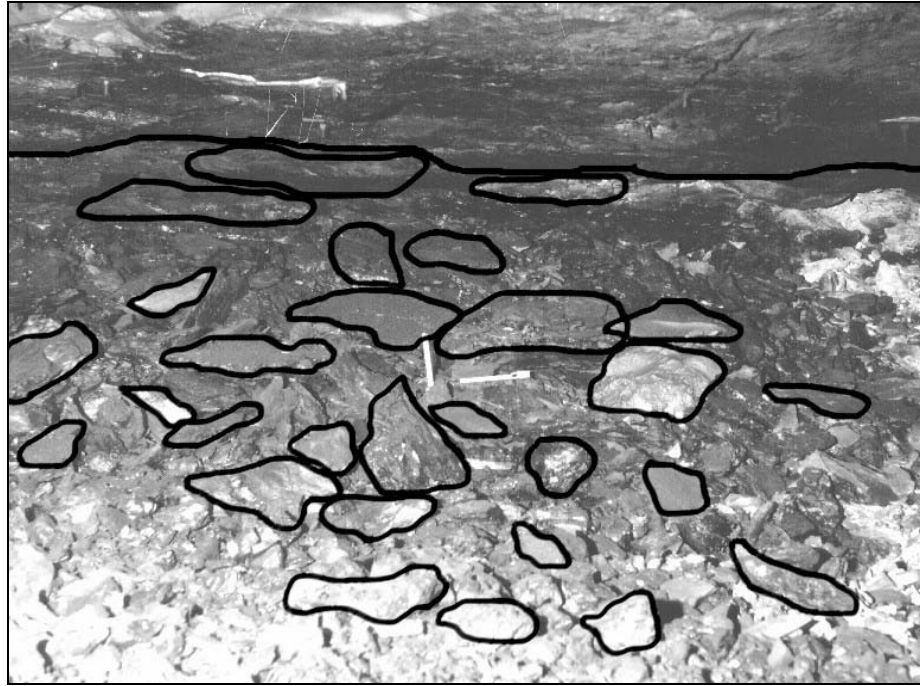


Figura 3.29 Digitalização dos contornos dos blocos na imagem referente ao evento 1.

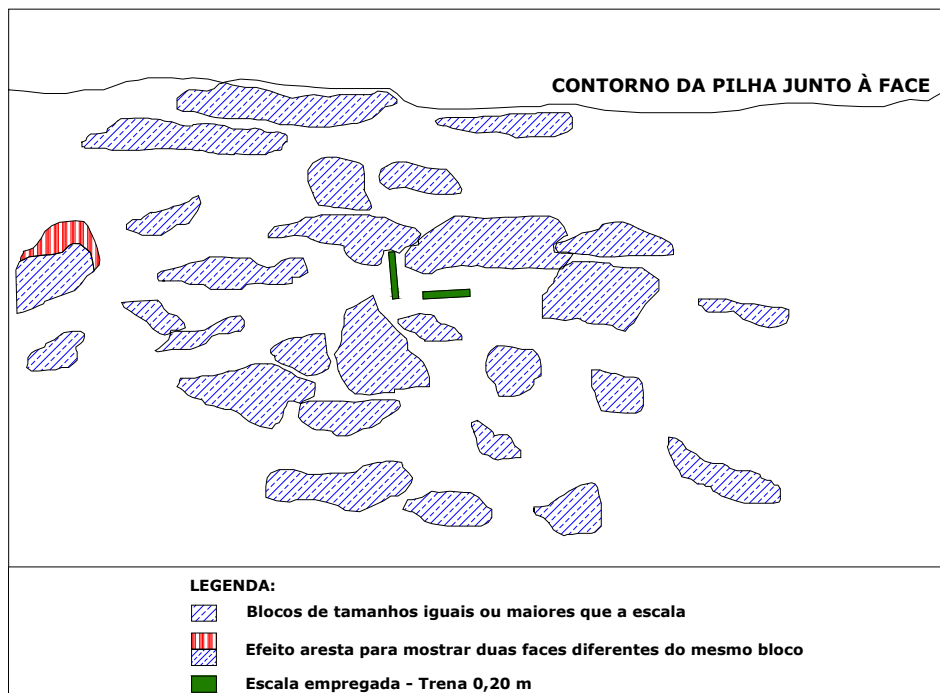


Figura 3.30 Imagem digitalizada do desmonte referente ao evento 1.

Na Figura 3.30, a área de cor vermelha é utilizada para mostrar a visualização de duas faces do mesmo fragmento gerado pelo efeito aresta.



Figura 3.31 Imagem nº 1 do desmonte referente ao evento 18 utilizando bolas como escalas de referência.

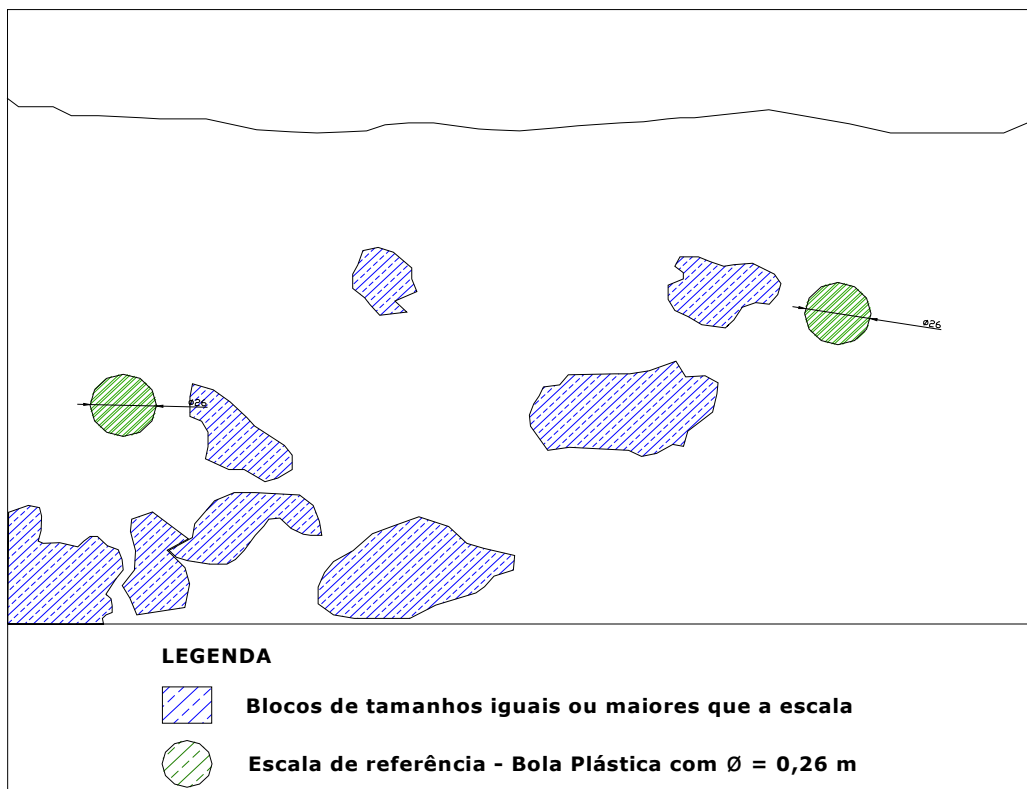


Figura 3.32 Imagem digitalizada do desmonte referente ao evento 18.

3.7 Monitoramento sismográfico

A coleta de dados de vibração foi realizada a partir de estações fixas conforme o desenho esquemático mostrado na Figura 3.33 e anotados em planilha conforme a Tabela 3.7. A análise dos níveis de vibração gerados pelos desmontes foi embasada em modelos de acordo com a posição do furo na face, carga por espera e confinamento. Para confirmar a previsão teórica dos níveis de vibração (Figura 3.34), foram realizados dois monitoramentos em subsolo.

O primeiro passo, conforme mostra a Figura 3.35, foi monitorar um desmonte de produção e avaliar qualitativamente a forma do pulso de onda conforme o tempo de retardo. O segundo passo, conforme é mostrado nas Figuras 3.36 e 3.37 foi confirmar estes tempos de chegada do pulso a partir de uma detonação controlada, com pequenas cargas por espera, iguais em massa e em furos com espaçamento e profundidade iguais.

Neste teste, foram detonados somente sete furos, com um retardo por furo e por tempo correspondendo aos tempos de retardos do sistema de iniciação com tubo de choque utilizado nos desmontes do sistema de produção da mina.

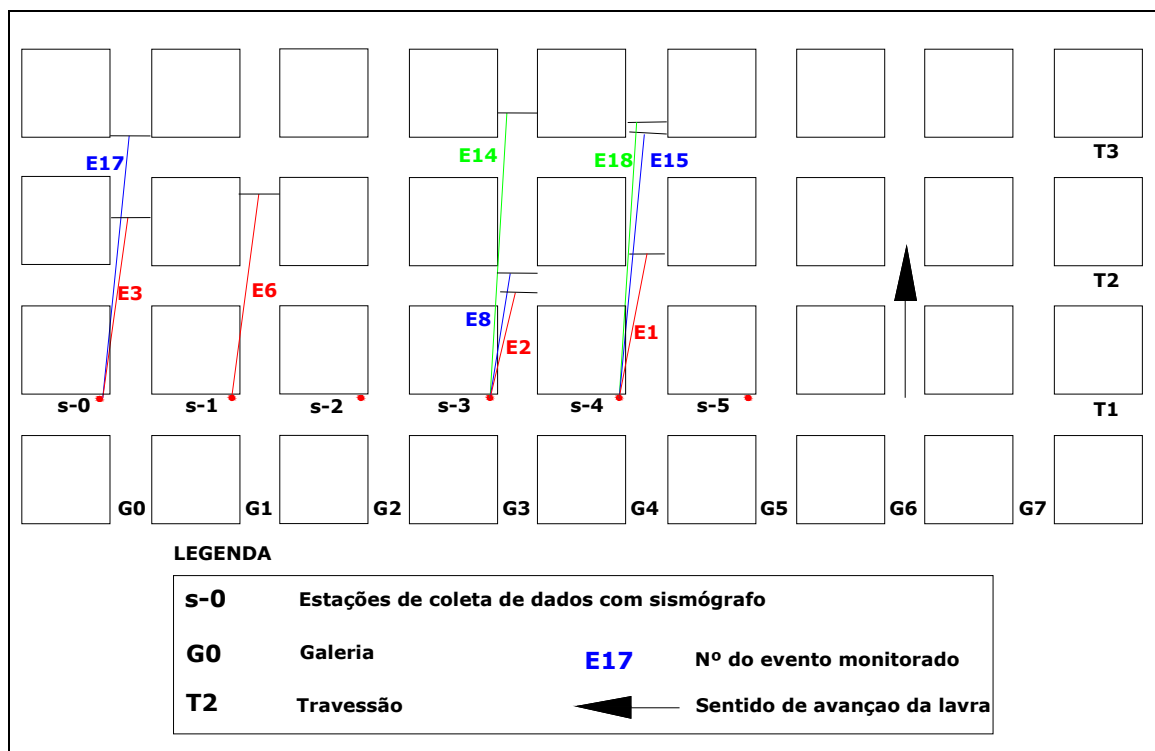


Figura 3.33 Desenho esquemático das estações de monitoramento.

Para a análise dos eventos, os níveis de vibração esperados nos sismogramas obtidos nos monitoramentos dos desmontes em subsolo, deveriam se comportar conforme a seqüência:

$$T5 \geq T4 > T3 > T2 \approx T1 > T6 > T7$$

onde **Tn** representa a seqüência de detonação dos retardos.

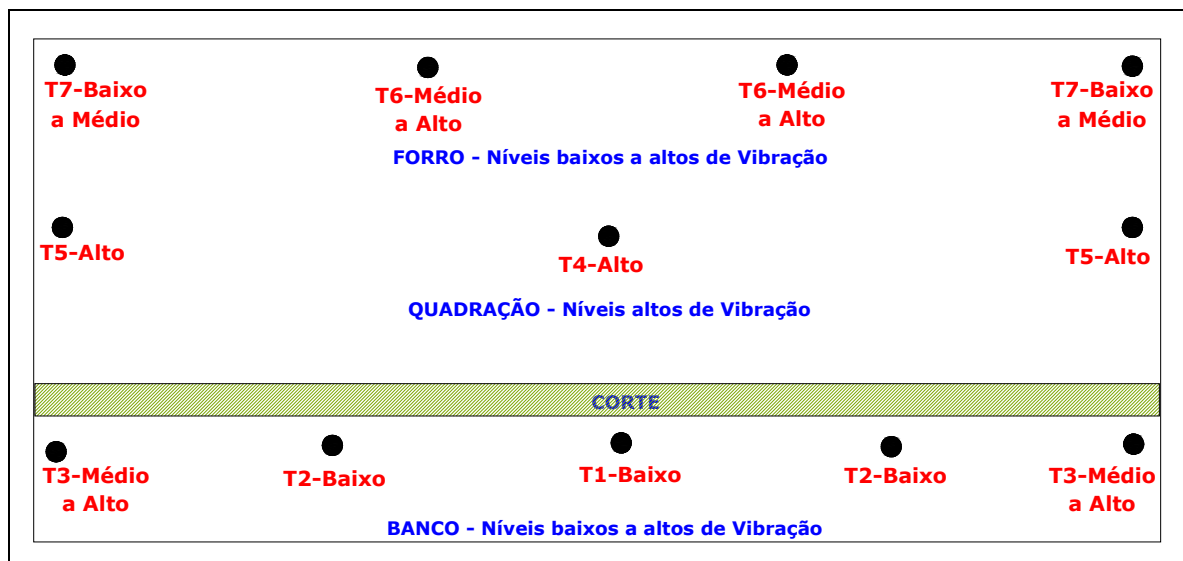


Figura 3.34 Níveis de velocidade de pico de partícula esperados para os desmontes (Worsey *et al.*, 2000).

Tabela 3.7 Planilha de coleta de dados de sismografia.

SISMOGRAFIA – EVENTO 18	
PPV (mm/s): 7,57	Qme (Carga Máxima por Espera - kg): 1,582 kg
Distância Sismógrafo à Frente (m): 40,72	Estação (nº ou nome): S-4
Observações:	
Carga Máxima por Espera iguais nos tempos de retardo T2; T3 e T5	

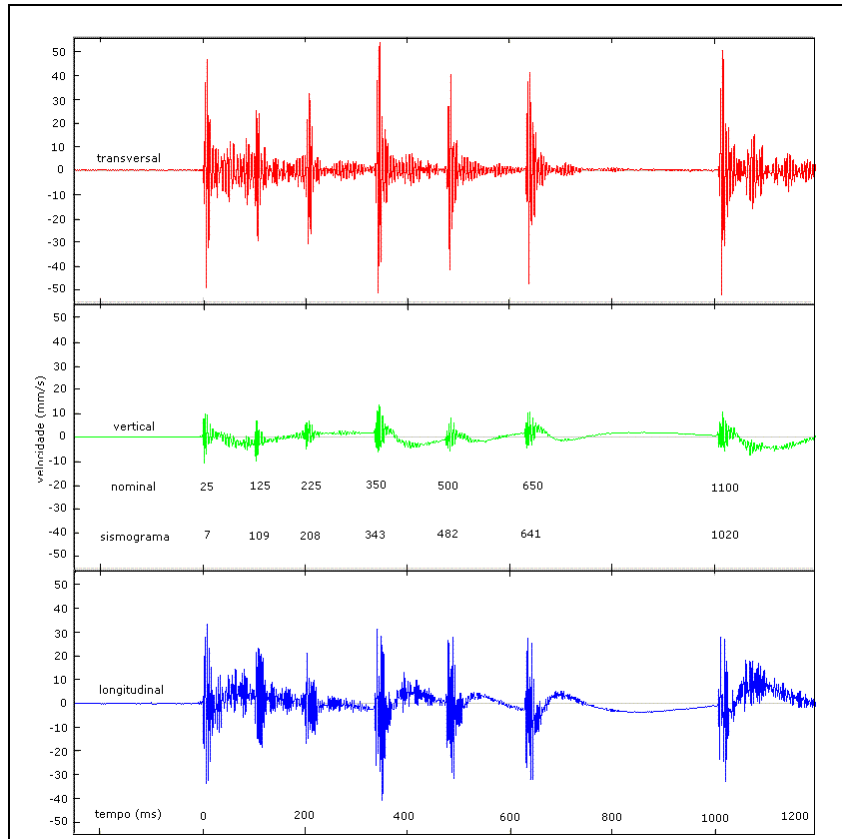


Figura 3.35 Modelo de pulso de onda obtido em desmorte convencional.

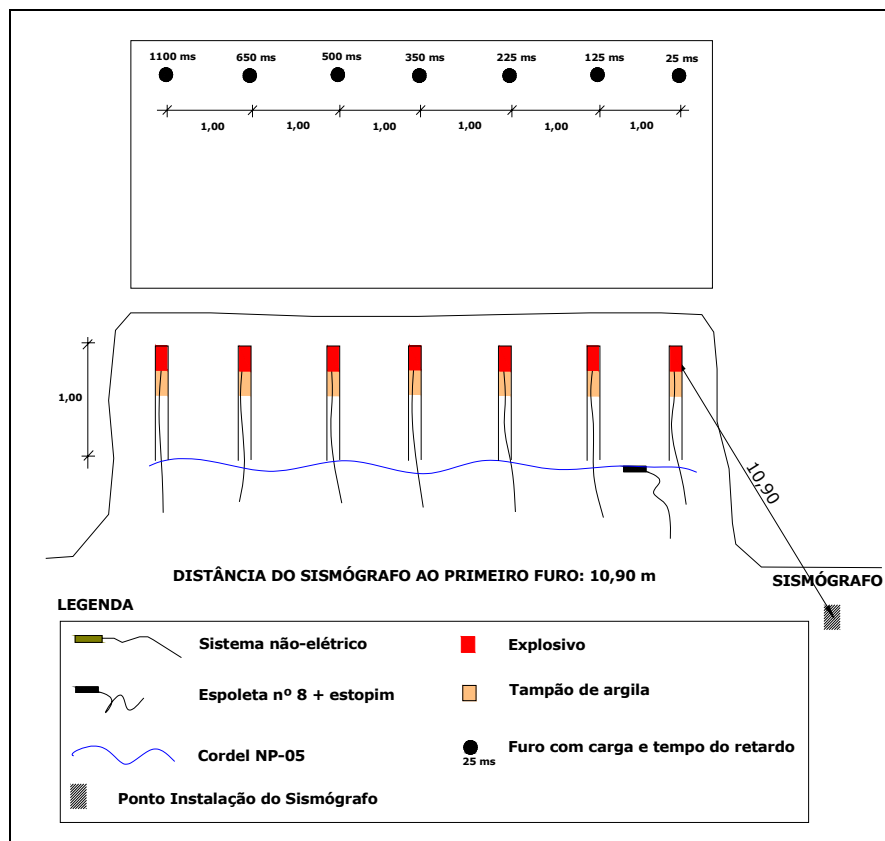


Figura 3.36 Representação esquemática do teste controlado.

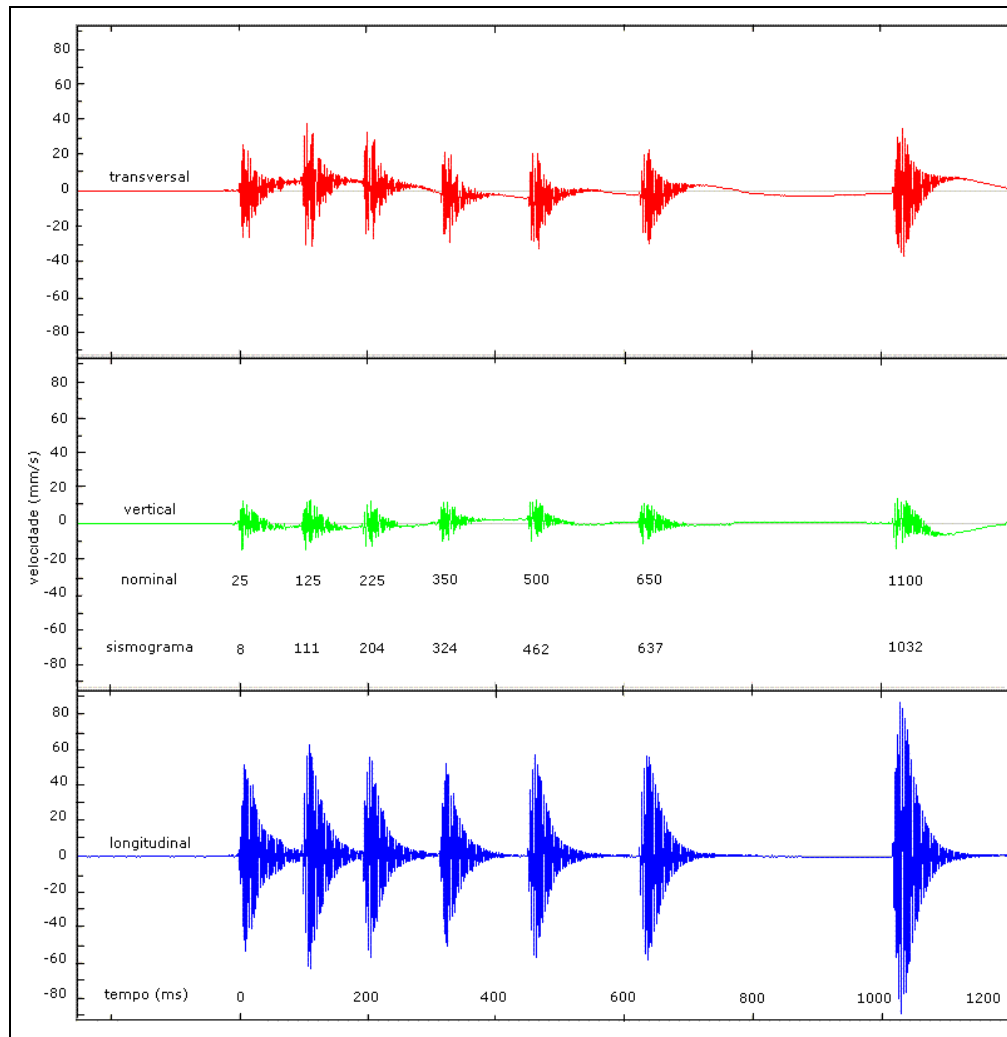


Figura 3.37 Modelo de pulso de onda obtido em teste de detonação controlado.

De posse dos modelos de previsão teórica dos níveis de vibração, como ilustrado nas Figura 3.34, e dos modelos gerados pelos dois testes realizados e monitorados em subsolo, estabeleceu-se uma correlação com os sismogramas dos 21 desmontes de produção. Nesta correlação, procurou-se identificar os tempos de acordo com os retardos e desenvolver uma análise qualitativa baseada na amplitude relativa dos mesmos.

O sismograma do desmonte relativo ao evento 18 é mostrado na figura 3.38 onde podem ser identificados os tempos dos retardos. Nas figuras 3.39; 3.40 e 3.41 são mostrados os sismogramas referentes aos desmontes relativos aos eventos 03, 20 e 04 onde foram identificados os pulsos relativos aos tempos de retardo, relacionando com os tempos nominais fornecidos pelo fabricante e a seqüência de iniciação dos furos.

A análise dos sismogramas obtidos em todos eventos monitorados confirmou a previsão teórica dos níveis de vibração a partir dos modelos obtidos no subsolo conforme é mostrado pelas Figuras 3.35 e 3.37. Nas Figuras 3.38, 3.39, 3.40 e 3.41 podem ser visualizados os sismogramas mais representativos da análise realizada.

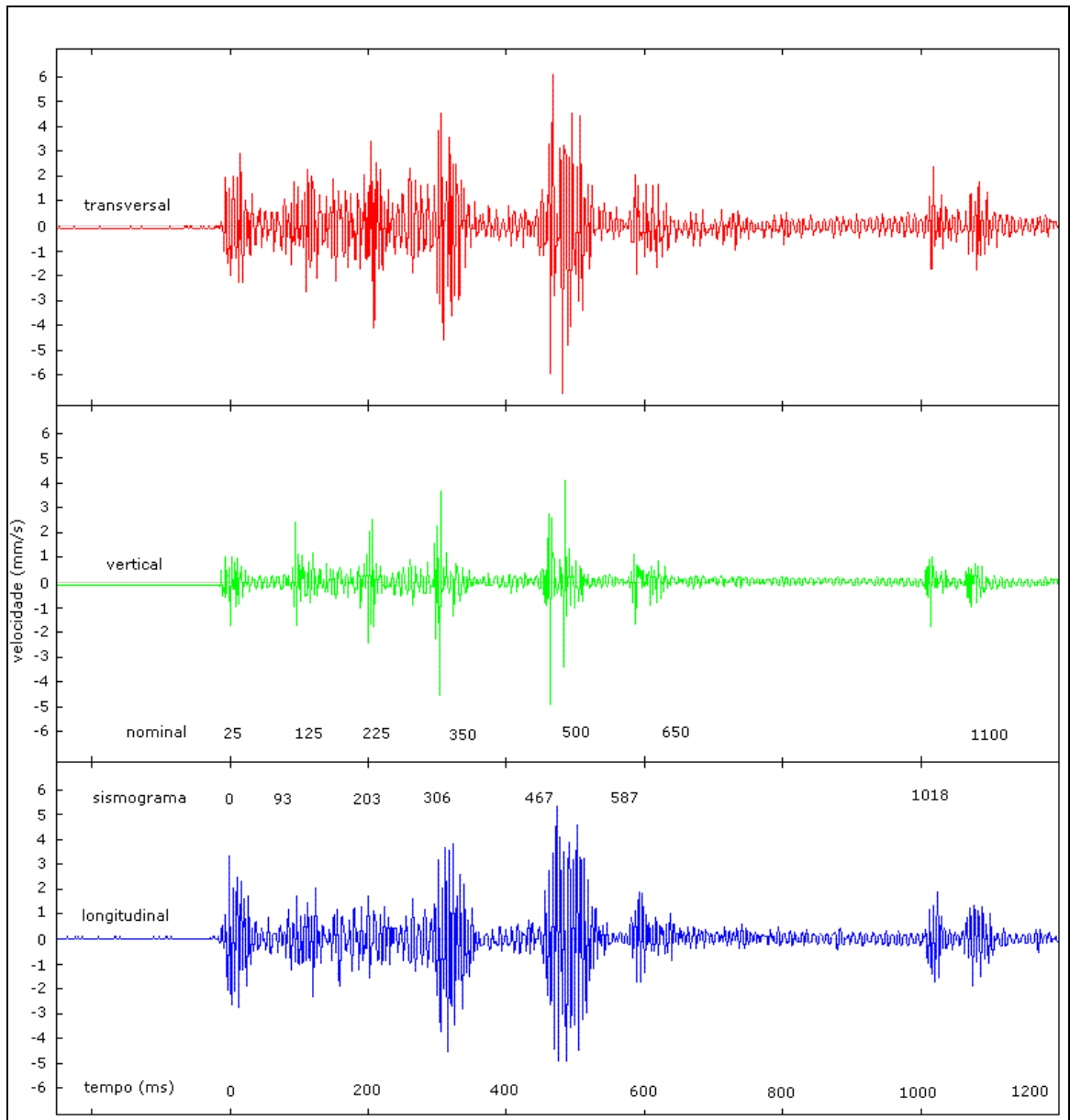


Figura 3.38 Pulso de onda obtido no desmorte do evento 18.

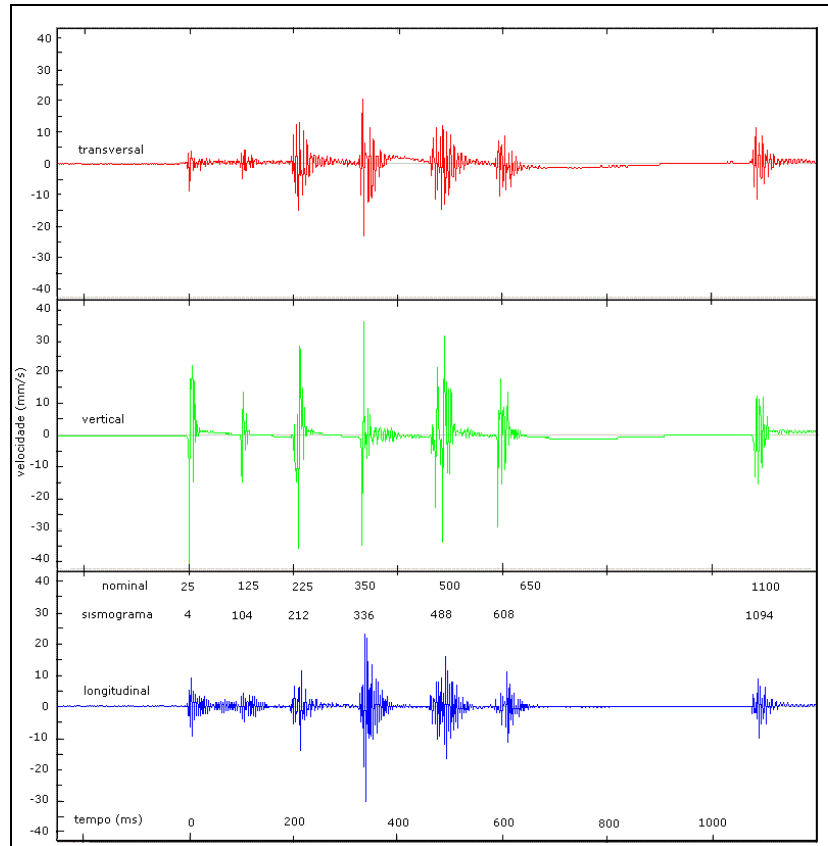


Figura 3.39 Pulso de onda obtido com o desmonte do evento 3.

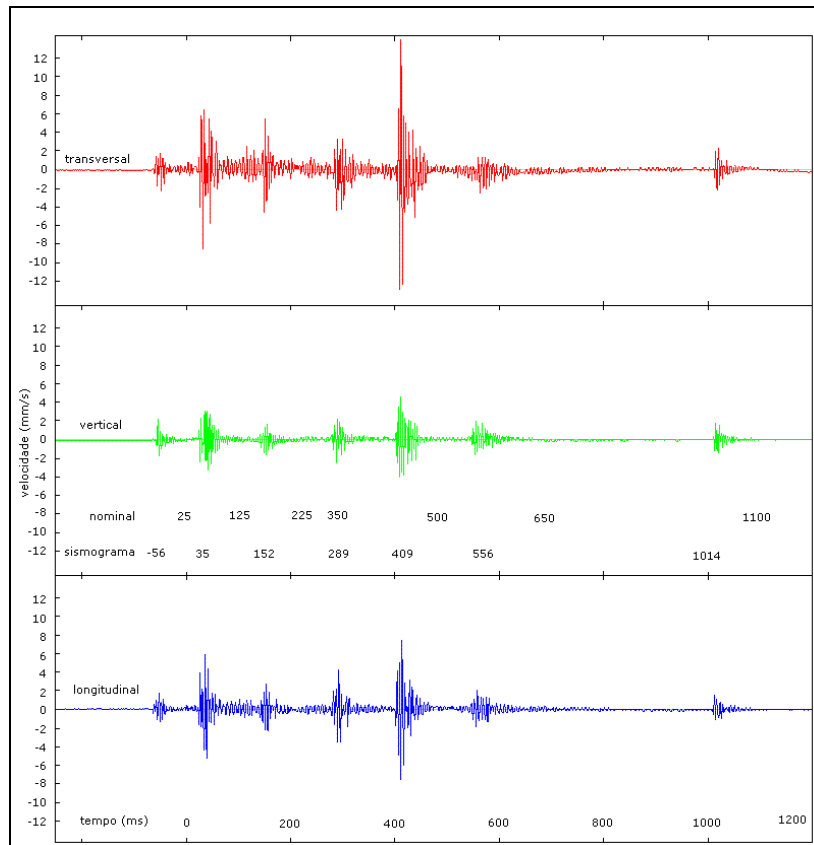


Figura 3.40 Pulso de onda obtido com o desmonte do evento 20.

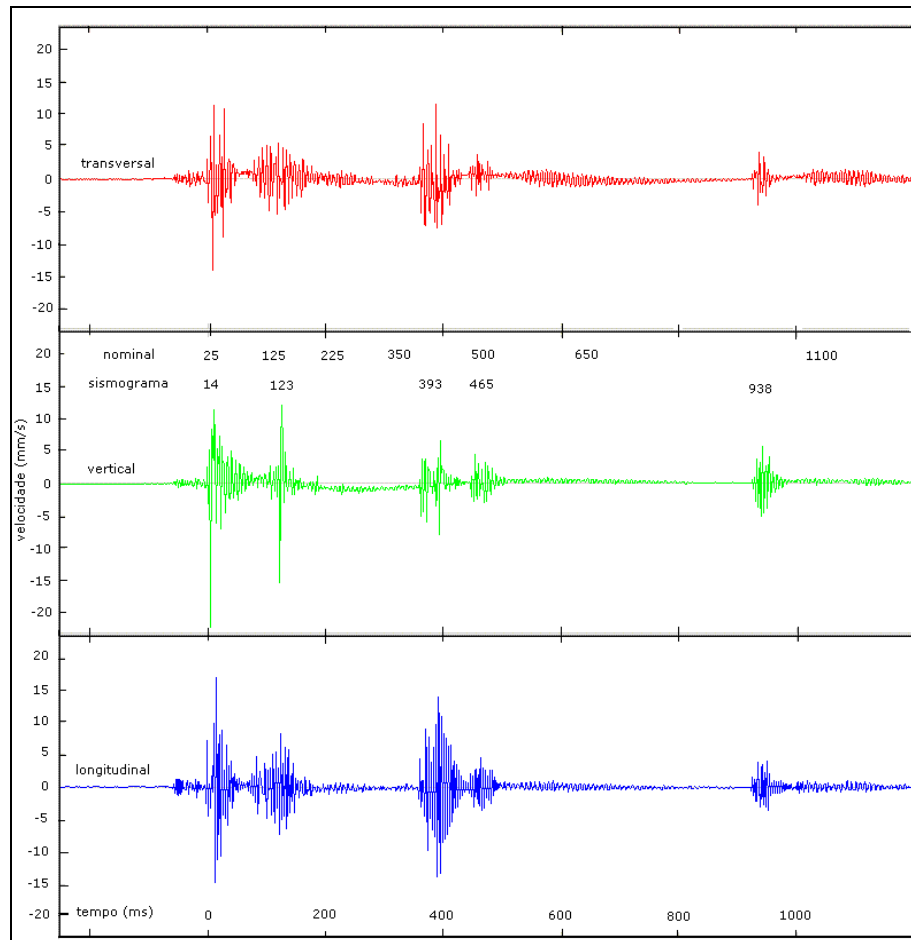


Figura 3.41 Pulso de onda obtido com o desmorte do evento 4.

3.8 Análise dos resultados de desempenho do desmorte

Os dados obtidos com os levantamentos da posição dos furos demonstraram que o desvio de emboque de furos é significativo de acordo com as Tabelas 3.3 e 3.4. Os histogramas gerados furo a furo mostram uma grande variabilidade nos desvios, a qual pode ser atribuída à falta de marcação do plano de fogo na face, ficando a execução a critério do operador, das condições mecânicas do equipamento e da frente (largura, comprimento do corte, condições da face e qualidade de limpeza).

Durante a perfuração, observou-se que o acúmulo de material gerado pela cortadeira é um dos fatores que interfere na execução adequada dos furos no Banco (parte inferior da face). A acumulação deste material ("moinha") obriga o operador da perfuratriz inclinar a lança da perfuratriz com relação ao plano horizontal, fazendo com que mais uma variável seja acrescentada à perfuração

(Figura 3.42).

As Figuras 3.43 e 3.44 simulam uma inclinação de 10° e 15° da lança com a horizontal durante a perfuração para um corte de 3,0 m e furo com o mesmo comprimento. Situações mais críticas quanto à inclinação foram observadas durante o monitoramento dos eventos que compõe este estudo.

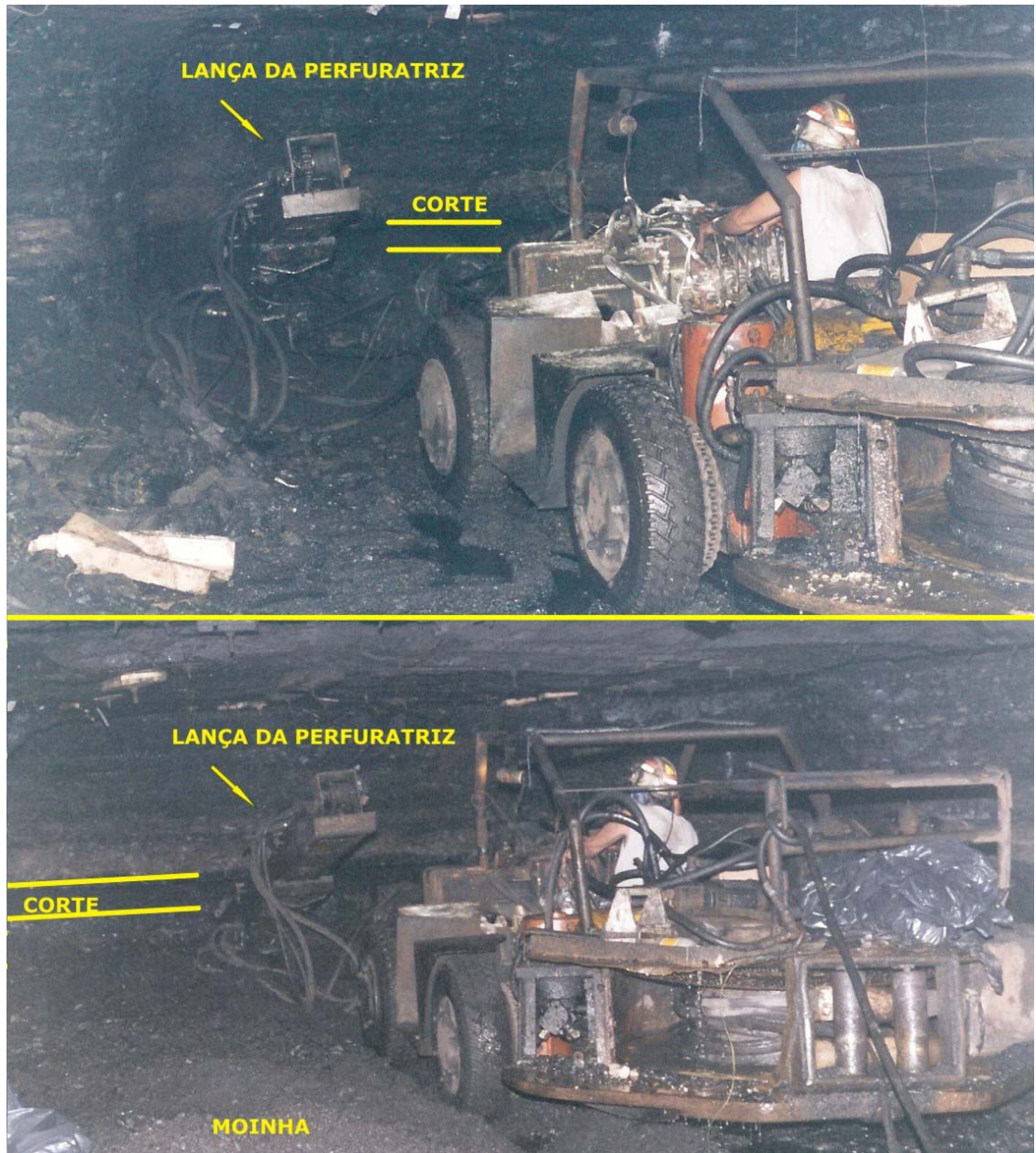


Figura 3.42 Perfuração do Banco (parte inferior da face) mostrando a inclinação dada à lança da perfuratriz resultando numa das fontes de desvios.

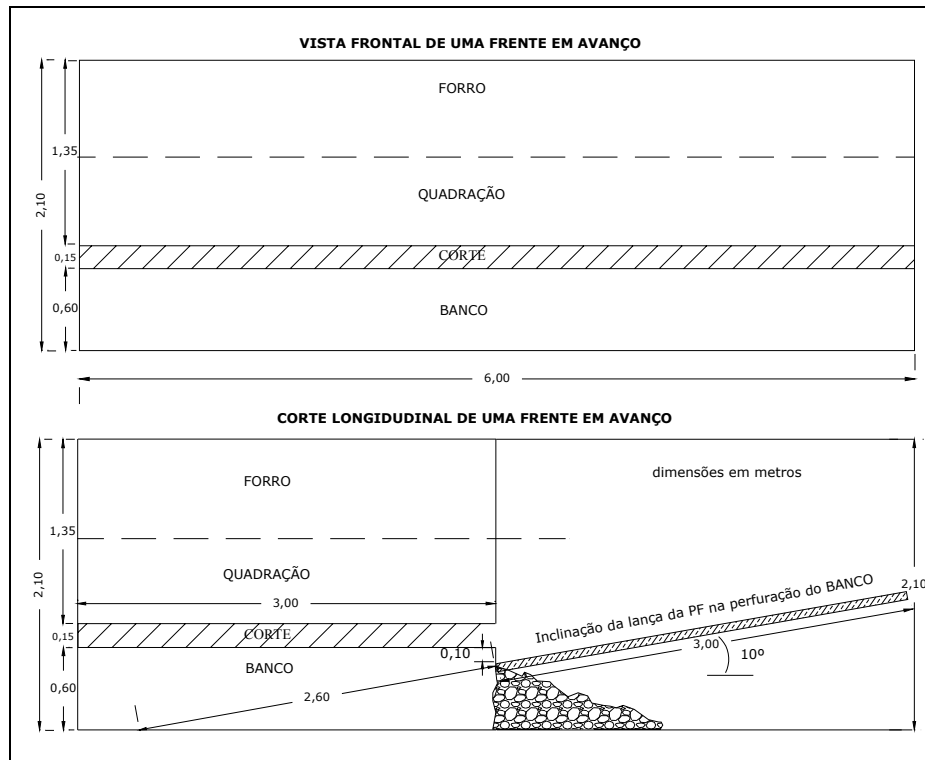


Figura 3.43 Simulação de furo no Banco com inclinação de 10° .

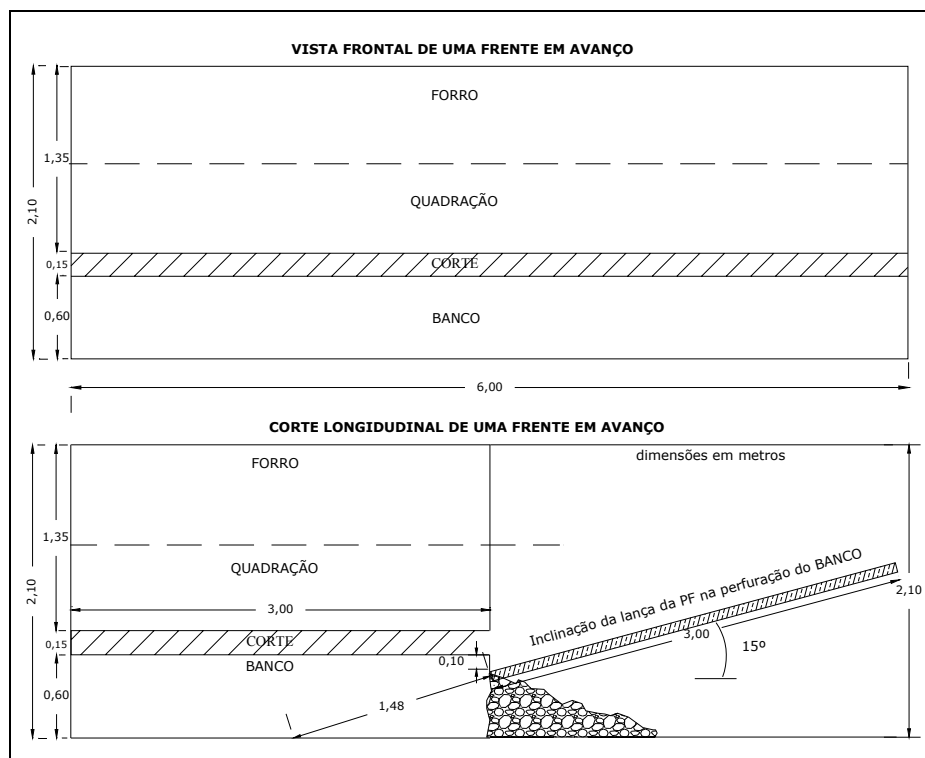


Figura 3.44 Simulação de furo no Banco com inclinação de 15° .

A Figura 3.45, mostra uma situação real na execução de um furo na porção inferior da face (Banco) com uma inclinação de nove graus.

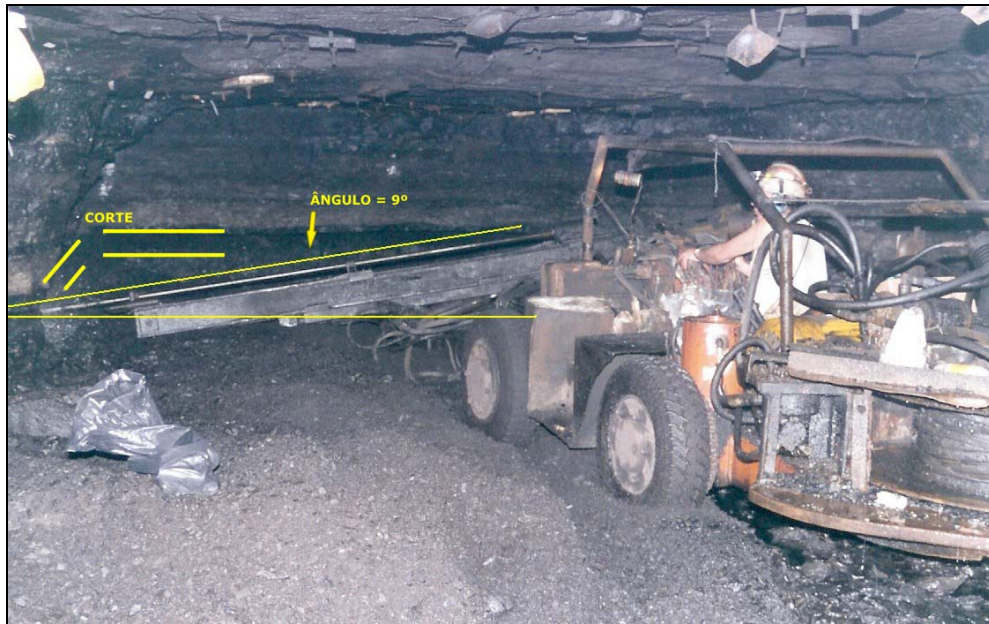


Figura 3.45 Perfuração de furo no Banco com inclinação de nove graus.

Durante os trabalhos de carregamento, os furos apresentaram problemas devido ao acúmulo de material e água. Em alguns casos ocorreu a obstrução parcial do furo, refletindo-se na qualidade do desmonte. As principais causas da obstrução dos furos têm origem no acúmulo de água da perfuração durante a execução de furos inclinados no Banco, como mostra a Figura 3.45. O acúmulo de água próximo ao Banco, mantém ou transporta por arraste o material originado nessa operação, para dentro dos furos, contribuindo para a obstrução parcial dos mesmos.

A execução do tampão não segue um padrão pré-estabelecido, sendo realizada segundo critério do executor e da disponibilidade de material. A análise de imagens da pilha de desmontado mostrou que o material grosseiro provém majoritariamente de deslocamentos do teto e da falta de obediência a um plano de fogo padrão. Também, ocorrem deslocamentos na face logo após a execução do corte de face livre, devido ao alívio de tensões. Esta situação, pode gerar blocos, pois não são tomados os cuidados necessários com a adequação da perfuração e desmonte para minimizar os problemas gerados por esta situação (Figura 3.46).

Os principais fatores que influenciam na fragmentação e no avanço estão relacionados à geometria do desmonte. A falta de qualidade na execução da perfuração devido à não obediência ao plano de fogo também gera blocos. É uma das principais causas da ocorrência da "rafa prensada" (congelamento). Este

fenômeno pode ser visualizado na Figura 3.47.

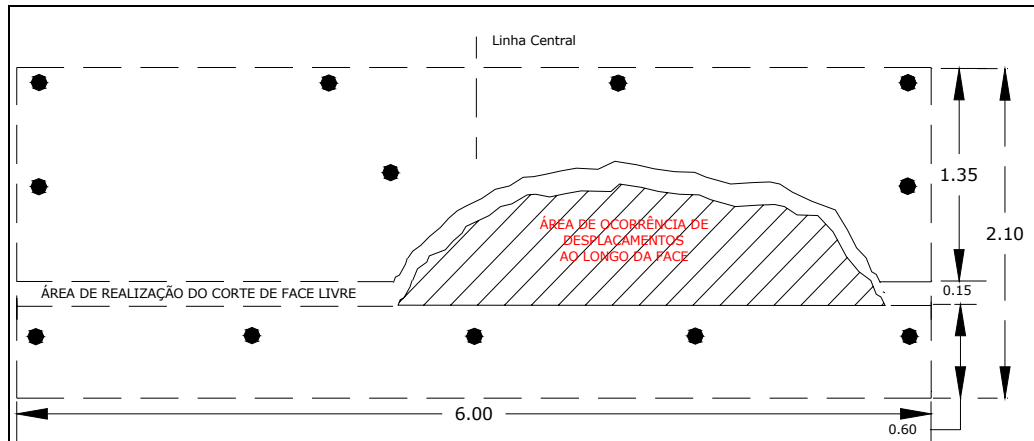


Figura 3.46 Ilustração mostrando a localização de deslocamentos na face após a realização do corte.

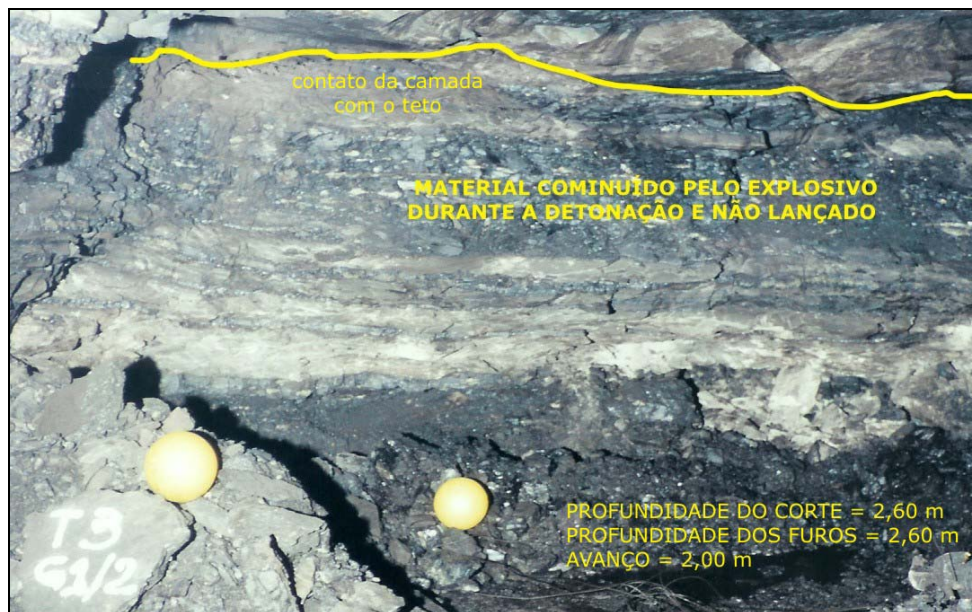


Figura 3.47 Ilustração do fenômeno de ocorrência da "Rafa Prensada".

A partir do modelo teórico de previsão e dos testes para a obtenção do modelo de pulso de onda, conforme as Figuras 3.34 a 3.37, foi possível correlacionar qualitativamente os níveis de vibração fornecidos pelos sismogramas gerados pelos testes com os obtidos nos desmontes de produção. A partir desta correlação, foi possível identificar problemas com as cargas detonadas, principalmente as localizadas nos furos do Banco, Quadração e Forro. Em alguns dos desmontes monitorados, verificou-se a ausência do pulso de onda de algumas cargas relacionadas a determinados tempos de retardos. Exemplo da

presença de pulsos de onda de acordo com o previsto pode ser visualizado na Figura 3.38 e referente ao evento 18. É o que melhor representa esta situação quanto são confrontados os níveis de vibração previstos e obtidos. O evento 18 foi o que apresentou o melhor desempenho do avanço do desmonte. Para o corte de face livre e perfuração com 2,60 metros de comprimento, o avanço obtido foi de 2,60 metros.

Na Figura 3.39, o sismograma referente ao evento 03 revela que os níveis de vibração estão acima do esperado em todos os tempos de retardo quando se analisa a amplitude relativa no eixo vertical. O oposto é observado na Figura 3.40 referente ao evento 20, onde os níveis são de baixa amplitude. Os avanços obtidos nestes desmontes foram 2,50 e 2,25 para profundidade de corte e comprimento dos furos de 2,60 metros.

No sismograma mostrado pela Figura 3.41 (evento 4), nota-se a ausência dos pulsos de onda referente aos retardos de 225 e 650 ms e as amplitudes relativas aos demais tempos de retardo apresentam níveis de vibração ora muito baixos, ora muito altos de acordo com o previsto no modelo teórico e confirmado pelo evento 18. O avanço obtido neste desmonte foi de 2,00 m para uma profundidade de corte e comprimento dos furos de 2,60 metros.

As causas prováveis destas falhas estão relacionadas principalmente à geometria do desmonte. A falta de qualidade na execução da perfuração conforme levantamento de desvios de emboque e, associado a dificuldades no carregamento dos furos do banco devido à obstrução causada pelo acúmulo de material da perfuração com a água, faz com que haja uma distribuição inadequada da carga ao longo do furo.

A ausência do pulso de onda em alguns tempos de retardo também pode estar relacionado à ultraquebra ("roubo de furos") durante a detonação. Esta situação pode ser bem visualizada na Figura 3.41 onde é praticamente impossível identificar os pulsos referentes aos retardos de 225 e 650 ms. Isso pode ser identificado pelos problemas de fragmentação no banco, onde não foram identificadas falhas relacionadas ao mau funcionamento das cargas de explosivos na maioria dos eventos em que foi realizado o acompanhamento da limpeza e transporte do material.

Problemas com falha do explosivo relacionado à dessensibilização por pressão dinâmica ou efeito canal não estão presentes já que o explosivo utilizado nesses desmontes é do tipo gelatina. Este tipo de explosivo, devido as suas

características, é praticamente imune a estes efeitos, mas não está imune a detonação simpatética. Este último fenômeno é causado principalmente pela proximidade das cargas devido ao mau dimensionamento da malha, às descontinuidades interconectando os furos ou a desvios na perfuração.

Falhas relacionadas ao sistema de iniciação com tubo de choque não foram identificadas, pois não foram encontradas espoletas falhadas na pilha de desmontado. Nas amostras de restos de tubo de choque coletado em alguns eventos, não foram identificadas falhas de iniciação. Falhas deste tipo podem ser determinadas a partir da presença ou não do material reativo nas paredes do tubo de choque com aplicação de um simples sopro de ar aplicado a uma das pontas e a outra direcionada a uma folha de papel, de preferência branco. Caso tenha ocorrido uma falha por corte do tubo de choque, neste teste o material explosivo será expulso pelo ar durante o sopro e depositar-se-á sobre o papel.

Praticamente em todos os desmontes, os níveis de vibração do tempo de retardo nº 4 (350 ms), localizado no centro da quadração, é maior que o relacionado ao tempo nº 5 (500 ms) posicionado nas laterais da quadração. Estes níveis de vibração mostram um confinamento da carga maior que o desejado, resultando em perdas de energia em fragmentação e maior geração de vibração e ruído. Estes níveis altos de vibração na quadração também podem ser prejudiciais pela possibilidade de aumento do dano aos pilares causado pelo desmonte e está relacionado, principalmente, à malha de perfuração.

A análise da iniciação dos desmontes, a partir dos testes de controle de tempo dos retardos, não permitiu visualizar falhas que poderiam afetar o desempenho do desmonte. A não observação de falhas deve-se ao grande intervalo de tempo entre os retardos, fato este que praticamente elimina o cenário de sobreposição ou inversão dos tempos de iniciação das cargas por grandes variações nos tempos de queima. A iniciação do sistema com tubo de choque é feita com cordel de 5 g/m e, neste caso recomenda-se que sejam conectados feixes com no máximo oito peças de iniciadores (Worsey *et al.*, 2000). Devem ser tomadas precauções ao conectar a espoleta de iniciação do cordel detonante, para que a mesma não venha a iniciar uma ou mais peças dos tubos de choque antes do cordel. Este último detalhe deve-se ao fato de a espoleta e o cordel detonarem com diferentes velocidades de detonação, sendo que a da espoleta é maior que a do cordel principalmente no caso deste estudo onde são utilizadas espoletas com a carga moldada.

Capítulo 4

ANFO no desmonte em lavra subterrânea de carvão

Este capítulo apresenta os estudos desenvolvidos visando a utilização de agente explosivo à base de nitrato de amônio no desmonte em lavra subterrânea de carvão. Inicialmente, são apresentados os aspectos mais relevantes que devem ser observados na adequação de explosivo tipo ANFO (*Ammonium Nitrate and Fuel Oil*) em um sistema de desmonte. Na seqüência são apresentadas as metodologias adotadas no desenvolvimento e coleta de dados dos testes e os equipamentos utilizados. Concluindo, são apresentados os resultados seguidos de análise. A infra-estrutura necessária, materiais e mão-de-obra de apoio para o desenvolvimento dos trabalhos foram disponibilizados pela Carbonífera Metropolitana S.A.

4.1 Aspectos relevantes no emprego de explosivos baseados em ANFO no desmonte de rocha

Estudos para a seleção e adequação de explosivos a um sistema de desmonte em subsolo é um empreendimento que pode resultar numa redução de custos significativa se um bom planejamento for realizado. O processo de seleção de um explosivo será eficiente se existir um bom conhecimento sobre as propriedades do produto, quais as alternativas disponíveis no mercado, qual a

resposta a ser obtida deste explosivo frente a diferentes litologias. Deve ser estabelecido um objetivo claro a respeito dos resultados esperados a fim de melhorar padrões do processo de produção (Adamson & Lund, 2001).

O processo de seleção e adequação de um explosivo para produzir um custo mais baixo por tonelada de rocha desmontada e assegurar ao mesmo tempo em que as condições ideais de fragmentação e lançamento sejam alcançadas, passa obrigatoriamente por testes com ANFO. Desde 1862, quando foi patenteado na Suécia, o nitrato de amônio vem sendo um componente de todos os explosivos comerciais. Tornou-se a peça chave na fabricação de todos os explosivos comerciais a partir do século 20 (Drury, 1980).

O emprego deste agente explosivo em substituição a explosivos convencionais pode produzir os mesmos resultados em fragmentação e lançamento reduzindo o consumo específico e o total de explosivo consumido com a mesma confiabilidade, maior segurança no manuseio e transporte até mesmo em furos de pequeno diâmetro em desmorte subterrâneo (Vuillaume & Bouvet, 1993). O nitrato de amônio (NH_4NO_3) é um componente essencial na elaboração de quase todos os explosivos incluindo a dinamite, aquagéis e emulsões.

Na sua forma pura, o nitrato de amônio é composto por 60% de oxigênio, 33 % de nitrogênio e 7% de hidrogênio (Morhard, 1987). Na mistura com a adição de 5,7 % de óleo diesel para 94,3 % de nitrato de amônio (NH_4NO_3) em peso, a reação estequiométrica para um balanço positivo em oxigênio é representada por:



Explosivos baseados em ANFO têm causado grandes transformações na área de desmorte de rocha e quando atinge um balanço adequado com o oxigênio, torna-se a fonte mais barata de energia disponível na forma de explosivo (Hartman, 1987).

O ANFO é considerado um agente explosivo. Um agente explosivo é classificado como sendo um composto químico do qual não fazem parte componentes que possam torná-lo um explosivo autoiniciante e ser sensível à iniciação por uma espoleta nº 8 em ambiente sem confinamento (Hustrulid, 1999). A sua utilização predominante é na forma de pequenos grânulos porosos denominados de *prill* misturados com óleo diesel.

O ANFO tem seu uso limitado pela pouca resistência à água e à baixa

densidade, fatores que devem ser bem conhecidos antes da sua introdução em um sistema de desmonte. Existem outros parâmetros que exercem uma grande influência nas características de detonação do ANFO, como: o tamanho dos *prills* e a sua distribuição granulométrica, a velocidade de detonação, densidade, tipo de iniciação, percentagem de óleo diesel, diâmetro e confinamento da carga, a umidade, a geração de gases tóxicos, reatividade com a pirita, etc (Hopler, 1998; Morhard, 1987).

4.2 Propriedades do ANFO

4.2.1 Velocidade de detonação

A velocidade de detonação depende do diâmetro do furo e do grau de confinamento. O comportamento da velocidade de detonação do ANFO em função do diâmetro do furo, densidade e grau de confinamento é mostrada na Figura 4.1.

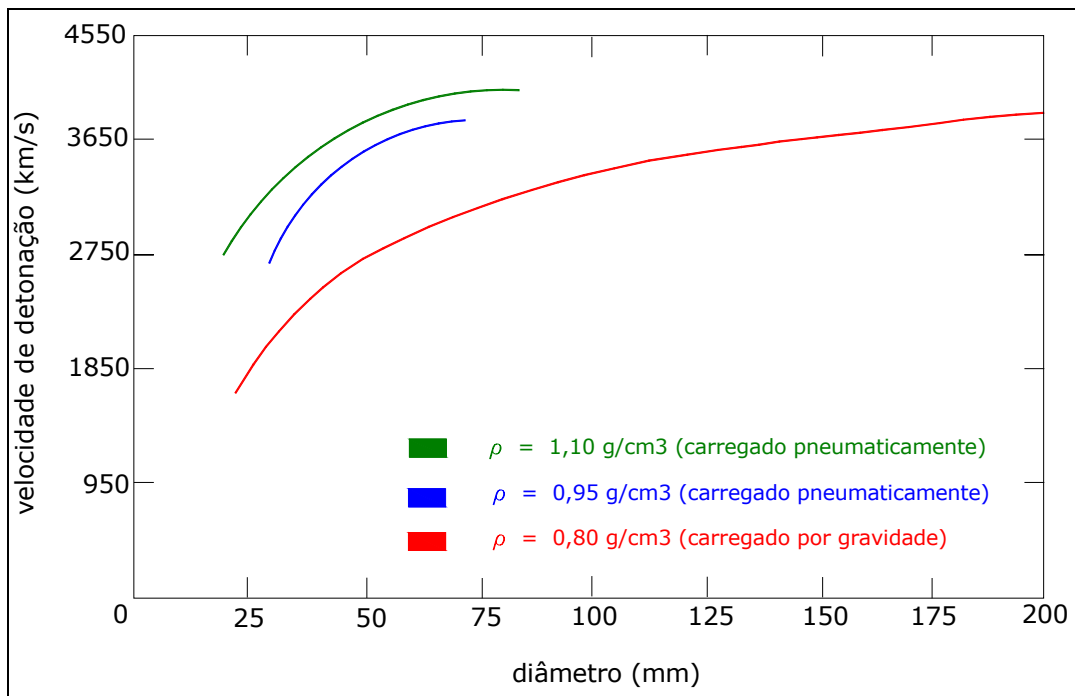


Figura 4.1 Influência do diâmetro, densidade e confinamento na velocidade de detonação do ANFO (Adaptado de Smith, 1982).

Quanto ao diâmetro crítico, para furos onde se obtém um melhor confinamento com o carregamento pneumático do ANFO, este diâmetro é de 25,4 mm e em situações onde carregamento é feito por gravidade (com baixo ou sem confinamento), o valor para o diâmetro crítico está em torno de 76 mm (Munaretti, 2002).

4.2.2 Densidade e distribuição granulométrica

A densidade final do ANFO depende do tamanho e da densidade do *prill* (*blasting grade*) usado na preparação da mistura. O ANFO derramado apresenta densidades entre 0,77 a 0,85 g/cm³. Quando carregado pneumaticamente ou embalado mecanicamente a densidade pode aumentar significativamente podendo atingir 1,10 g/cm³ (Figura 4.1). A partir de densidade de 1,20 g/cm³, a sensibilidade decresce rapidamente. Quanto ao tamanho médio do *prill*, um produto com boa qualidade deve apresentar uma distribuição granulométrica conforme a Tabela 4.1 (Crosby, 1998):

Tabela 4.1 Distribuição granulométrica recomendada para o *prill* poroso de nitrato de amônio.

Ø (mm)	%
-3,327 + 1,651	22,8
-1,651 + 1,410	32,0
-1,410 + 1,168	32,7
-1,168 + 1,000	8,9
-1,000 + 1,833	3,4
-0,833 + 0,417	0,2

Fonte: (Adaptado de Crosby, 1998).

4.2.3 Percentagem de óleo diesel

O percentual de óleo diesel empregado na mistura interfere nos parâmetros de geração de energia durante a reação, na velocidade, na sensibilidade e na produção de gases tóxicos. A Figura 4.2 mostra a variação na

liberação de energia, na velocidade e na geração de gases tóxicos em função do percentual de óleo diesel. Uma mistura com um percentual baixo de óleo é mais prejudicial em termos de liberação de energia do que com óleo em excesso, mas o ANFO é mais sensível na faixa entre 2 a 6 % de óleo diesel, diminuindo para percentuais situados fora dessa faixa.

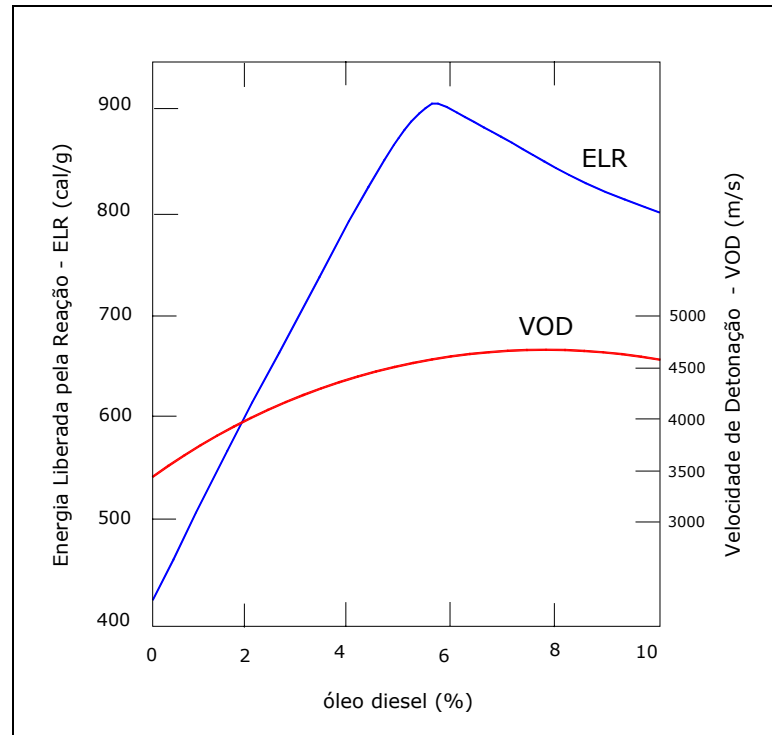


Figura 4.2 Energia liberada pela reação e velocidade de detonação em função do percentual de óleo diesel no ANFO (Adaptado de Hopler, 1998).

4.2.4 Umidade

Umidade em excesso pode levar o *prill* a solidificar-se (“empedramento”) inibindo a absorção de óleo e afetando o desempenho. A umidade, as formas de armazenamento associadas à temperatura podem alterar a estrutura cristalina do nitrato de amônio (Figuras 4.3) e alterar o desempenho do mesmo (Munaretti, 2002). A Figura 4.4 relaciona o desempenho do ANFO com a densidade e percentual de água presente na mistura.

	Cristalização	Densidade nominal (g/cm ³)
169,6	CÚBICA I	1,38
125,0	TETRAGONAL II	1,40
84,4	ORTORRÔMBICA III	1,65
32,2	PSEUDOTETRAGONAL IV	1,73
-18,0	TETRAGONAL V	1,66

Figura 4.3 Influência da temperatura na alteração da estrutura cristalina e da densidade do nitrato de amônio (Adaptado de Munaretti, 2002).

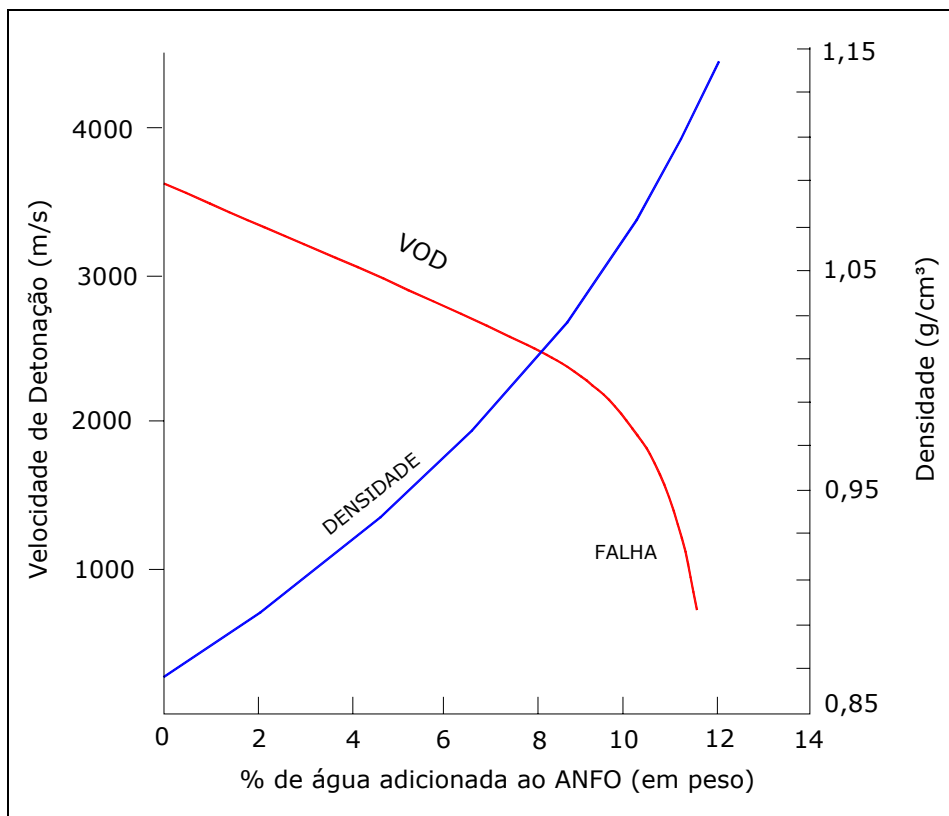


Figura 4.4 Influência da umidade na velocidade de detonação do ANFO (Adaptado de Crosby, 1998).

Ensaio de resistência à água com ANFO embalado em cartuchos de poliéster e polietileno e simulando as condições dos furos no subsolo mostraram que ocorre a infiltração de água, dessensibilizando o ANFO a partir do primeiro minuto pela dissolução dos sais de nitrato de amônio (Kurcewicz *et al.*, 2002). A Figura 4.5 mostra testes de resistência à água do ANFO acondicionado em cartuchos confeccionados em poliéster e polietileno. A coloração verde obtida com a adição de corante à água, mostra a extensão do cartucho afetada pela infiltração.

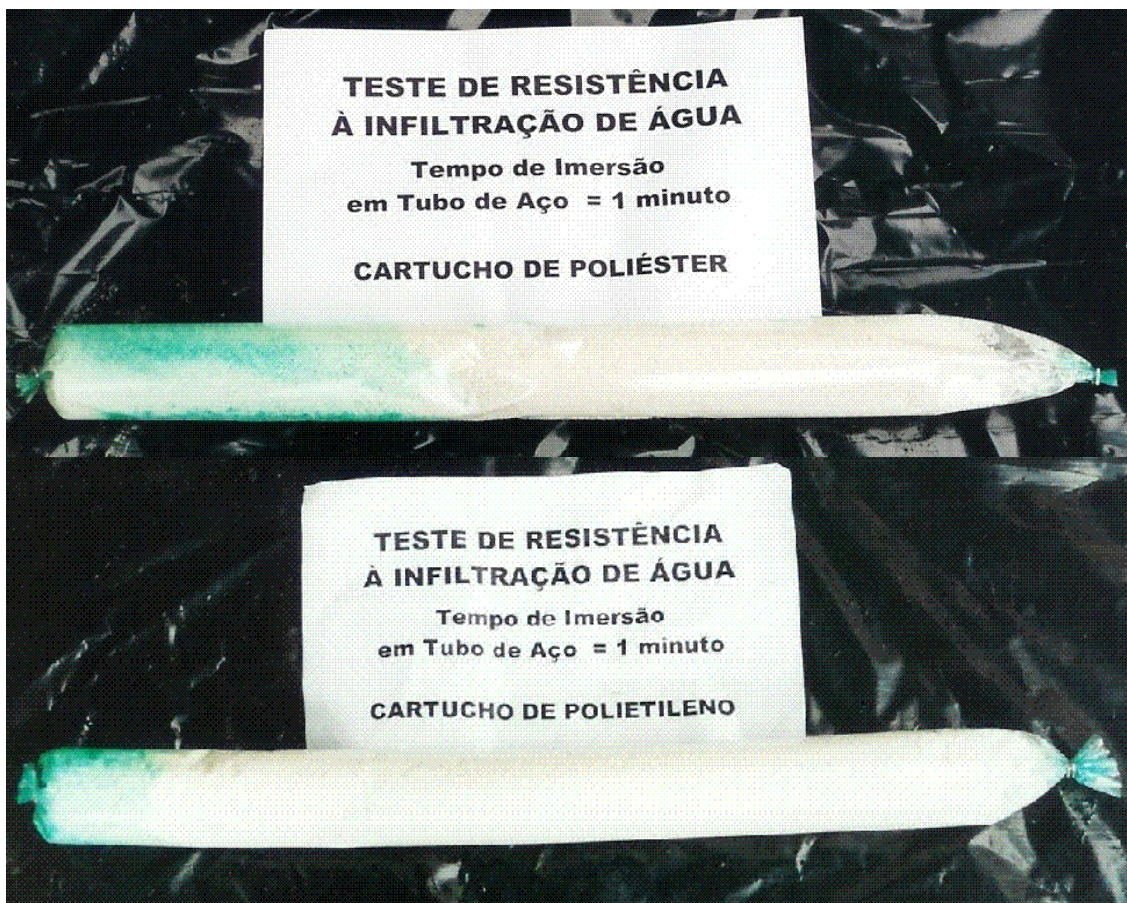


Figura 4.5 Testes de resistência à água do ANFO acondicionado em cartuchos de poliéster e polietileno (Kurcewicz *et al.*, 2002).

Rosseti & Preisz (1963), em estudos desenvolvidos na implantação e adaptabilidade de misturas de nitrato de amônio e óleo diesel em desmonte subterrâneo, além de enumerar as vantagens e desvantagens do emprego de ANFO, destacam a importância da adoção de alguns procedimentos operacionais. Os autores destacam a importância da limpeza dos furos com água e ar comprimido, da prática de um bom tamponamento e do uso de pulverizadores

alimentados com ar-água para atuar na dispersão dos fumos gerados pela detonação e no controle da emissão de poeira.

4.2.5 Iniciação – Pressão de detonação

O iniciador é uma carga de explosivos que pode ser iniciada por cordel detonante ou espoleta, que por sua vez é empregado para iniciar cargas de explosivos menos sensíveis, principalmente ANFO (Crosby, 1998). O termo reforçador (*booster*) também é empregado como sinônimo ou diferenciado em função da posição em que é colocado dentro do furo.

Segundo Hustrulid (1999), o iniciador deve ter a energia necessária para iniciar a reação de detonação da carga principal e fornecendo o suficiente de energia para manter esta reação auto-sustentável. O iniciador está relacionado com a carga que inicia a coluna e o reforçador para amplificar e/ou manter a velocidade da carga principal. As principais propriedades de um bom iniciador estão relacionadas com a pressão de detonação, resistência física e à água, o tamanho e a posição do mesmo dentro do furo (Morhard, 1987).

A pressão de detonação está relacionada diretamente com a velocidade de detonação do explosivo podendo ser determinada a partir de (Hustrulid, 1999):

$$P_{det} = 0,25 * \rho * (VOD)^2 \quad (4.2)$$

onde:

P_{det} = pressão de detonação em Mpa;

ρ = densidade do explosivo como *primer* em kg/m³;

VOD = velocidade de detonação em km/s.

Segundo estudos desenvolvidos por Morhard (1987), um iniciador com bom desempenho deve atingir uma pressão de mínima de 8 *GPa*. Na iniciação do ANFO, para que o seu desempenho não seja afetado, o ideal é empregar um iniciador com uma velocidade mínima de 5.200 m/s, fazendo o ANFO ser iniciado acima da sua velocidade estável de detonação (*steady state velocity*).

Esta velocidade faz com que o explosivo produza na frente de reação, a energia necessária para a sua própria manutenção. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram a velocidade do ANFO em função tipo de iniciador. A Figura 4.8 mostra a influência da pressão de detonação na velocidade de iniciação do ANFO.

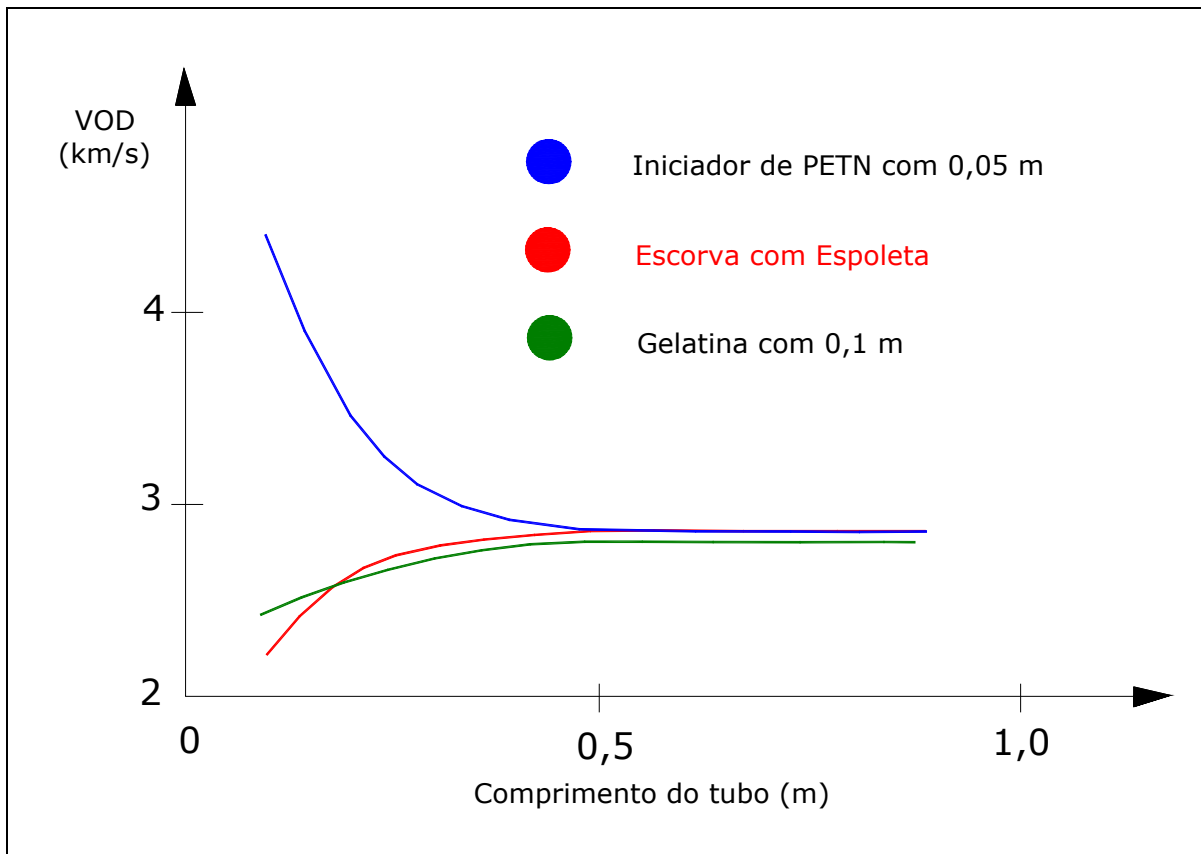


Figura 4.6 Velocidade de detonação do ANFO (50% *prill*, 50% de *prills* moídos) para diferentes iniciadores. Testes realizados em tubo de aço com 52 mm (Adaptado de Persson *et al.*, 1993).

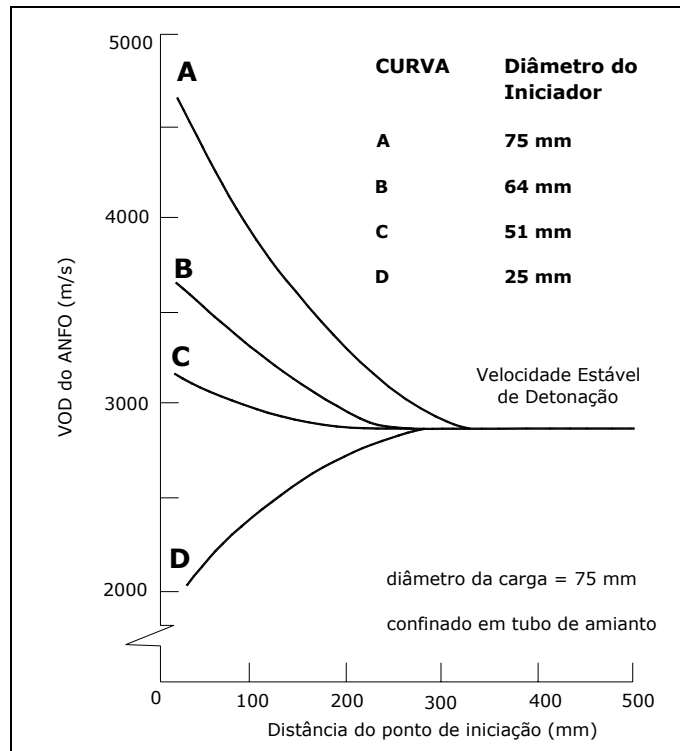


Figura 4.7 Influência do diâmetro do iniciador e da distância do ponto de iniciação na velocidade de detonação do ANFO (Adaptado de Hustrulid, 1999).

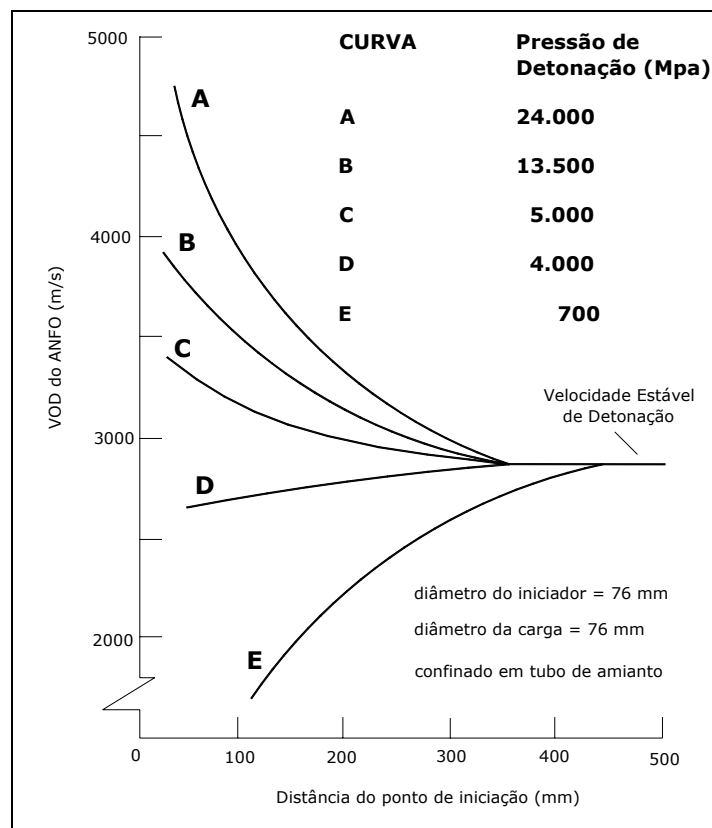


Figura 4.8 Influência da pressão de detonação na velocidade inicial do ANFO (Adaptado de Hustrulid, 1999).

4.2.6 Tamanho do iniciador

O comprimento deve ser suficiente para atingir a sua velocidade estável de detonação antes de iniciar a carga principal. A distância necessária que a reação necessita para alcançar a velocidade estável é denominada de distância de estabilização (*run-up distance*) e esta deve ser menor do que comprimento do iniciador (figura 4.9). Uma regra prática é de que o comprimento do iniciador deve estar em torno de 2 a 4 vezes o seu próprio diâmetro e que este não deve ser menor do que a metade do diâmetro do furo (Persson *et al.*, 1993).

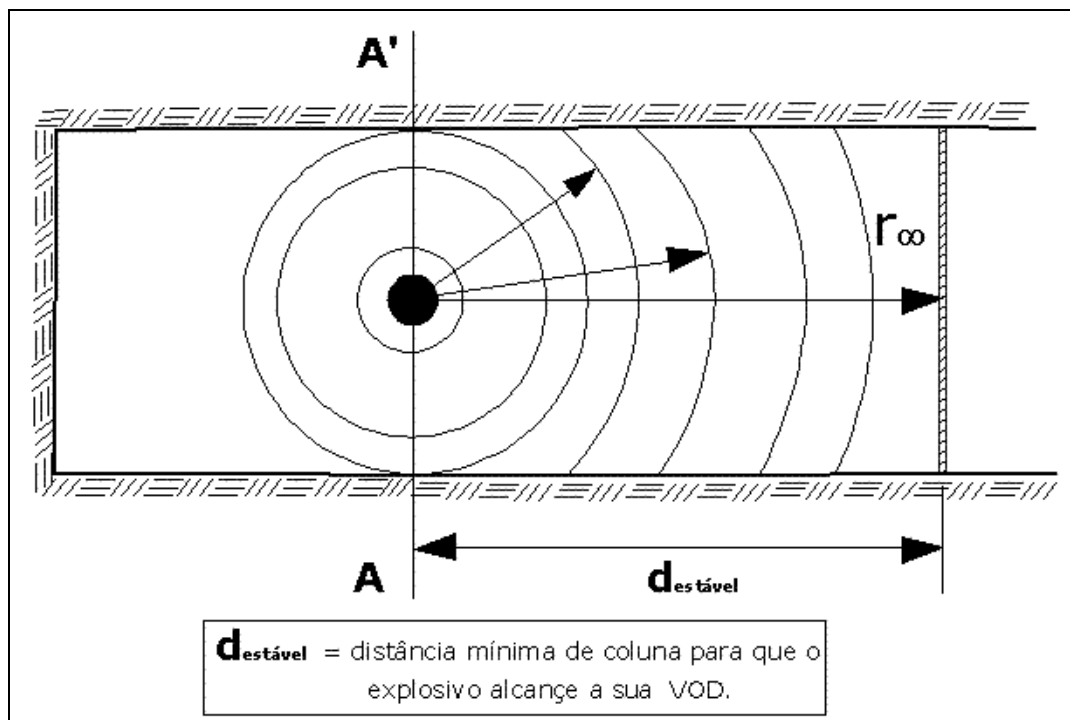


Figura 4.9 Distância necessária em relação ao diâmetro do furo para que um explosivo alcance a sua VOD (Adaptado de Hustrulid, 1999).

Na Figura 4.10, é mostrada a relação entre comprimento do iniciador e diâmetro do furo com a VOD estimada.

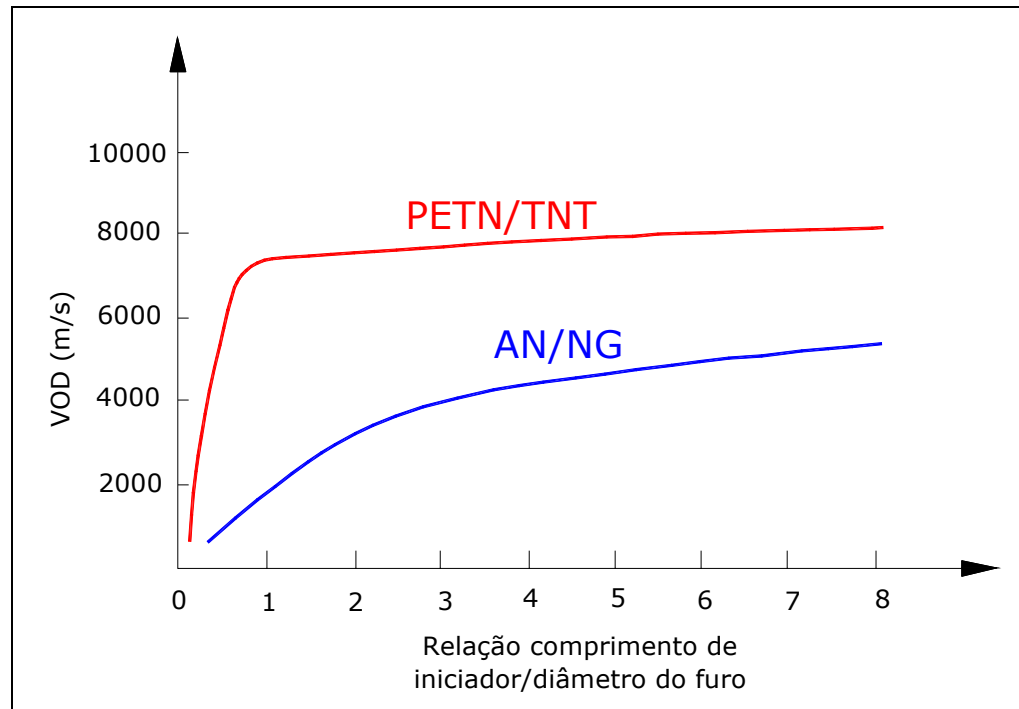


Figura 4.10 Comprimento mínimo do iniciador necessário para dois tipos de explosivos alcançarem a VOD (Adaptado de Sen, 1995).

4.2.7 Iniciação de ANFO acondicionado em cartuchos plásticos

A perspectiva de redução dos custos de desmonte pelo emprego de ANFO e a existência da obrigatoriedade de acondicionar o agente explosivo em cartuchos plásticos para evitar a dessensibilização pela presença de água nos furos, deverão, em contrapartida, o explosivo iniciador e a prática de carregamento, receberem uma atenção especial. De nada adianta a escolha do melhor iniciador quanto à velocidade, densidade e tamanho (massa), se os cuidados necessários na execução do carregamento dos furos com os cartuchos de ANFO não forem previamente estudados e implementados.

A deficiência no acoplamento entre cartuchos de ANFO durante os procedimentos de carregamento causado pela presença de água nos furos ou pela existência de excesso de material inerte pertencente ao cartucho (pontas), refletir-se-á no desempenho do mesmo. Portanto, ótimos explosivos iniciadores e cartuchos bem elaborados, não são indicativos de sucesso garantido quanto à eficiência do agente explosivo em operações de desmonte (Hopler, 1998).

4.2.8 Posição do iniciador no furo

O posicionamento deve ser no ponto onde a iniciação atinja o maior confinamento. Muitas situações, como as encontradas em subsolo, o iniciador deve ser colocado no fundo do furo e iniciado pela espoleta conforme a Figura 4.11. A iniciação dos furos pelo fundo, mantém os gases confinados mais tempo melhorando o desempenho da fragmentação e minimizando a ocorrência de ultralancamento.

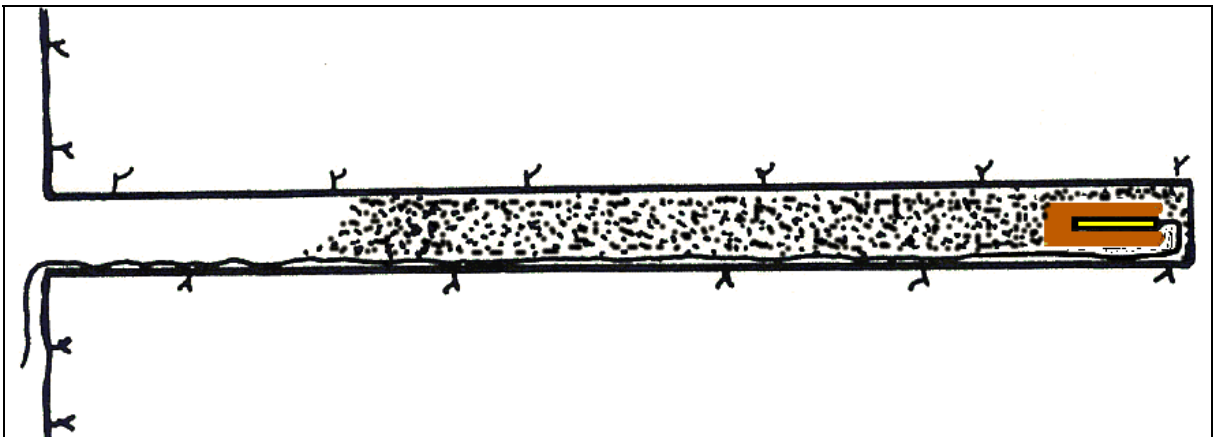


Figura 4.11 Iniciação do ANFO pelo fundo do furo mostrando o correto posicionamento da espoleta no iniciador (Adaptado de Persson *et al.*, 1993).

4.2.9 Geração de gases tóxicos

A geração de gases tóxicos na detonação de ANFO está diretamente ligada à qualidade e ao controle na fase de preparação. A geração de excesso de gases nitrosos (NO_x) e monóxido de carbono (CO) são indícios da falta de óleo diesel na mistura, perda de confinamento, problemas com a iniciação ou presença de água (Hopler, 1998). Na Figura 4.12, podem ser observadas as concentrações de gases nitrosos e monóxido de carbono relacionadas ao percentual de óleo diesel empregado na mistura.

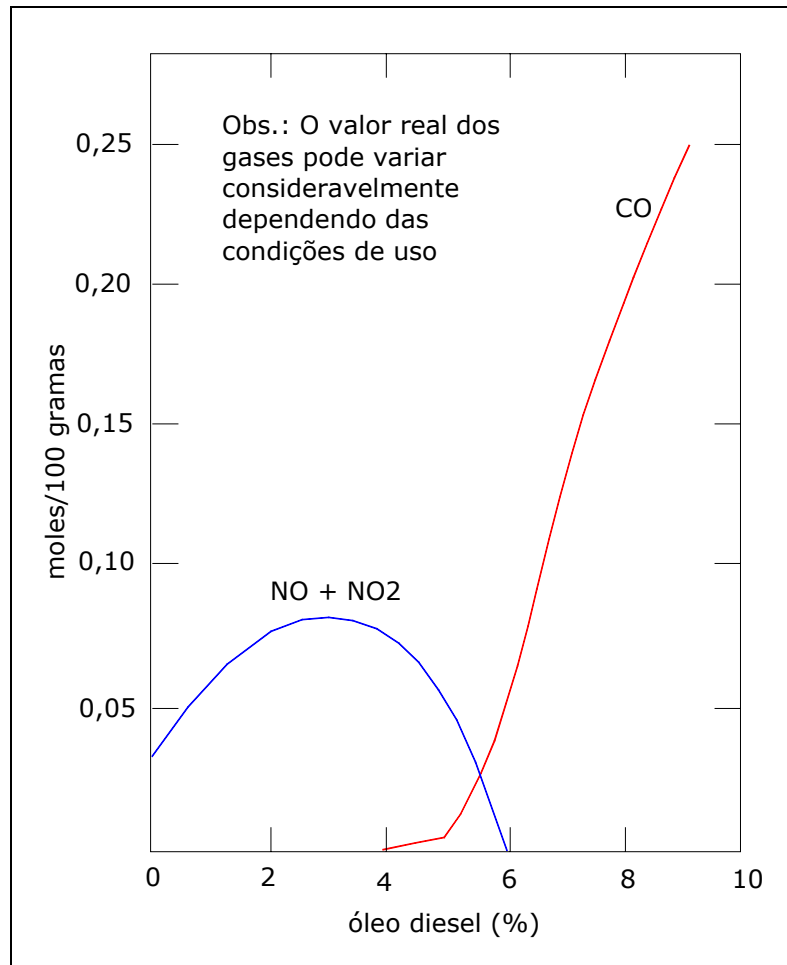


Figura 4.12 Modelo teórico de geração de gases tóxicos em função do percentual de óleo diesel no ANFO (Adaptado de Hopler, 1998).

4.2.10 Reatividade com a pirita

A presença de produtos gerados pela intemperização de pirita (Fe_2S) pode ser prejudicial para o emprego de ANFO. Em minas subterrâneas de minério de cobre, já foi detectado o aquecimento e a decomposição do ANFO em contato com estes produtos, principalmente sulfato ferroso, à temperaturas em torno de 79° . Este tipo de reação também foi observado em minas de carvão a céu aberto e em condições de baixa temperatura. Estas reações podem produzir calor suficiente para fundir reforçadores e o plástico que recobre o cordel detonante podendo gerar uma detonação imprevista de um furo carregado. Acidentes com a detonação de furos carregados devido a altas temperaturas provocadas pela reação química dos componentes devido à combustão espontânea em alguns

tipos de rocha, já ocorreram na Austrália. A adição de substâncias inibidoras que passa por revestimentos dos furos ou pela alteração da formulação química do explosivo para que não ocorra a reação dentro de determinadas faixas de temperatura, podem prevenir este tipo de problema (Hopler, 1998; Bellairs, 1997).

4.3 Metodologia

Com base nos objetivos propostos no Capítulo 1, ítem (iv), de selecionar um novo agente explosivo adequado a uma determinada condição e atentando para os fatores que influenciam nas características de detonação do ANFO, algumas etapas foram previamente definidas e desenvolvidas com base em parâmetros operacionais de desmonte da empresa:

- i. seleção do explosivo a ser empregado como iniciador do ANFO;
- ii. escolha dos fornecedores de ANFO;
- iii. desenvolvimento de cartucho confeccionado em filme plástico para o encartuchamento do ANFO;
- iv. testes de sensibilidade do ANFO em tubo de aço frente a diversos tamanhos de iniciadores e em dois diâmetros de tubo para simular condições de subsolo;
- v. medida indireta de desempenho da coluna explosiva (VOD) e definição de um arranjo ótimo (diâmetro-iniciador-número máximo de cartuchos);
- vi. análise dos resultados de desempenho em superfície;
- vii. testes iniciais em desmonte no subsolo com análise de imagens e monitoramento com sismógrafo;
- viii. estudo comparativo de custos ANFO x desmonte convencional.

O desenvolvimento de cartucho em filme plástico para a utilização do agente explosivo, no presente caso, deve-se à elevada quantidade de água originada principalmente pela perfuração e a impossibilidade da utilização de ar

comprimido na limpeza dos furos dada à inexistência do equipamento na mina.

Para a medida da velocidade de detonação (VOD) do agente explosivo, utilizou-se de cordel detonante como um método empírico para a avaliação de desempenho do explosivo (Figura 4.13 e 4.14). A partir da detonação do cordel detonante provocada pelo ANFO, obteve-se uma indicação de que a velocidade de detonação excedia 2000 m/s. Para evitar a iniciação direta do cordel pelo explosivo empregado como iniciador, fixou-se a ponta do cordel no segundo e último cartuchos. Nos testes com ANFO derramado, a ponta do cordel foi posicionada no final da carga. Este procedimento foi adotado devido à indisponibilidade de equipamento para medir diretamente a velocidade de detonação (VOD) do agente explosivo.



Figura 4.13 Visualização de um tubo carregado com ANFO. A linha azul corresponde ao cordel detonante empregado como medida indireta de velocidade de detonação e a linha amarela refere-se ao tubo de choque do sistema de iniciação.

4.4 Seleção do iniciador

Para a seleção do iniciador, levou-se em consideração as seguintes premissas (Persson *et al.*, 1993):

- i. a pressão de detonação gerada pelo explosivo iniciador deve ser superior à pressão de detonação do explosivo iniciado;
- ii. a necessidade de se gerar uma pressão de detonação superior a 8 *GPa* de acordo com a equação 2.2;
- iii. como regra prática a escolha do comprimento do iniciador deve estar em torno de 2 a 4 vezes o seu próprio diâmetro, e que este não deve ser menor do que a metade do diâmetro do furo;
- iv. a espoleta de acionamento dentro do explosivo iniciador deve estar com a ponta voltada para o explosivo a ser iniciado.

A impossibilidade da realização de medidas diretas de velocidade de detonação do explosivo conduziu a seleção do iniciador através de informações extraídas dos catálogos dos fabricantes de explosivos. A exclusão dos iniciadores existentes no mercado e fabricados à base de *pentolite* deveu-se aos custos envolvidos que inviabilizariam o emprego de ANFO antes da realização de qualquer teste.

Após a análise dos produtos disponíveis e de informações fornecidas diretamente pelos fabricantes, a escolha do iniciador recaiu sobre um explosivo tipo gelatina (a base de nitroglicerina) cujas características principais estão abaixo relacionadas:

- i. velocidade de detonação superior a 4300 m/s para diâmetros acima de 51 mm, teste ao ar livre, encartuchado em tubo de polietileno semi-rígido. Em ensaio confinado em tubo de ferro fundido realizado pelo fabricante, o explosivo apresentou uma velocidade de 7000 m/s para o mesmo diâmetro;
- ii. força = 60%;
- iii. densidade = 1370 kg/cm³;

- iv. acondicionado em cartucho rígidos de polietileno ou em embalado em papel parafinado, facilitando as várias configurações relacionadas ao comprimento do iniciador na realização dos testes.

4.5 Testes de iniciação em superfície

Com base nas premissas estabelecidas no item 4.4, 12 testes iniciais foram desenvolvidos em tubos de aço alterando-se somente os parâmetros relacionados ao iniciador (diâmetro e comprimento).

Os demais parâmetros adotados e relacionados ao carregamento foram:

- i. os diâmetros do iniciador de 28,5 x 200 mm e 51 x 60 mm;
- ii. tubos de aço com comprimento fixo de 3,0 m para simular as condições operacionais do desmonte em subsolo;
- iii. variou-se a massa do iniciador entre 0,117 a 0,417 kg conforme o diâmetro do tubo de aço;
- iv. fixou-se a carga de ANFO em dois de cartuchos com 51 x 500 mm de comprimento e massa de 0,700 kg para tubos com diâmetro de 36 mm e de 1,700 kg em média para tubos com diâmetro de 55 milímetros;
- v. tamponamento com argila úmida em todos os testes conforme executado em subsolo (dois a três cartuchos de 0,20 m).

Medidas de comprimento da carga colocadas nos tubos foram realizadas em todos os testes e após a detonação foram tomadas as medidas de comprimento da sobra de tubo e checagem quanto à detonação ou não do cordel detonante. Várias baterias de testes foram desenvolvidas. Nas primeiras, os testes foram executados com tubos de diâmetros de 36 e 55 mm. A partir dos resultados obtidos, adotou-se o diâmetro padrão de 55 mm e explosivos com diâmetro de 51 milímetros. Os demais parâmetros foram mantidos constantes para avaliação e comparação com os testes desenvolvidos no desmonte em subsolo.

Na Tabela 4.2, estão relacionados os testes realizados em tubo de aço nos dias 6 e 12 de Julho de 2000 onde constam todos os dados referentes ao

iniciador e às cargas empregadas. Nesta tabela, estão representados todos os parâmetros adotados nos testes anteriores e nos que se seguiram após a execução destes.

Tabela 4.2 Parâmetros empregados nos testes de ANFO em tubo de aço.

Nº Teste	diâmetro do tubo (mm)	diâmetro do iniciador (mm)	Iniciador (kg)	ANFO (kg)
01	36	28,5 x 200	0,117	0,699
02	36	28,5 x 200	0,156	0,695
03	36	28,5 x 200	0,195	0,643
04	36	28,5 x 200	Espoleta nº 8	0,692
05	36	28,5 x 200	0,156	2,790 - derramado
06	55	51 x 600	0,417	1,691
07	55	51 x 600	0,278	1,685
08	55	51 x 600	0,139	1,577
09	55	28,5 x 200	Espoleta nº 8	1,671
10	55	28,5 x 200	0,156	1,645
11	55	28,5 x 200	0,117	1,679
12	55	28,5 x 200	0,156	2,568 - derramado

(*) Obs.: Todos os testes com tampão de argila com um comprimento mínimo de 0,40 m.



Figura 4.14 Teste de detonação em tubo de aço onde pode ser visualizada a iniciação do cordel pelo final da carga de ANFO colocada no tubo.

Nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 podem ser visualizados os tubos de aço com as diferentes configurações de iniciador e forma de carregamento com ANFO. A Figura 4.15 mostra um dos primeiros testes realizado com ANFO. Este ensaio foi realizado com o agente explosivo carregado a granel.

Na Figura 4.16, é mostrado um ensaio com quatro diferentes configurações quanto à massa do iniciador (0,195; 0,250; 0,278 e 0,333 kg). Em 4.16a os tubos prontos para o teste e em 4.16b os resultados mostrando a parte restante dos tubos a execução dos testes.

Na Figura 4.17, pode ser visualizado um teste com as massas do iniciador de 0,195; 0,250; 0,278 kg nos três primeiros tubos e o quarto tubo com iniciador de 0,278 kg e ANFO a granel (derramado). Na parte (a) são visualizados os tubos carregados e prontos para o teste de detonação e na parte (b) sobras dos mesmos após a realização dos testes.

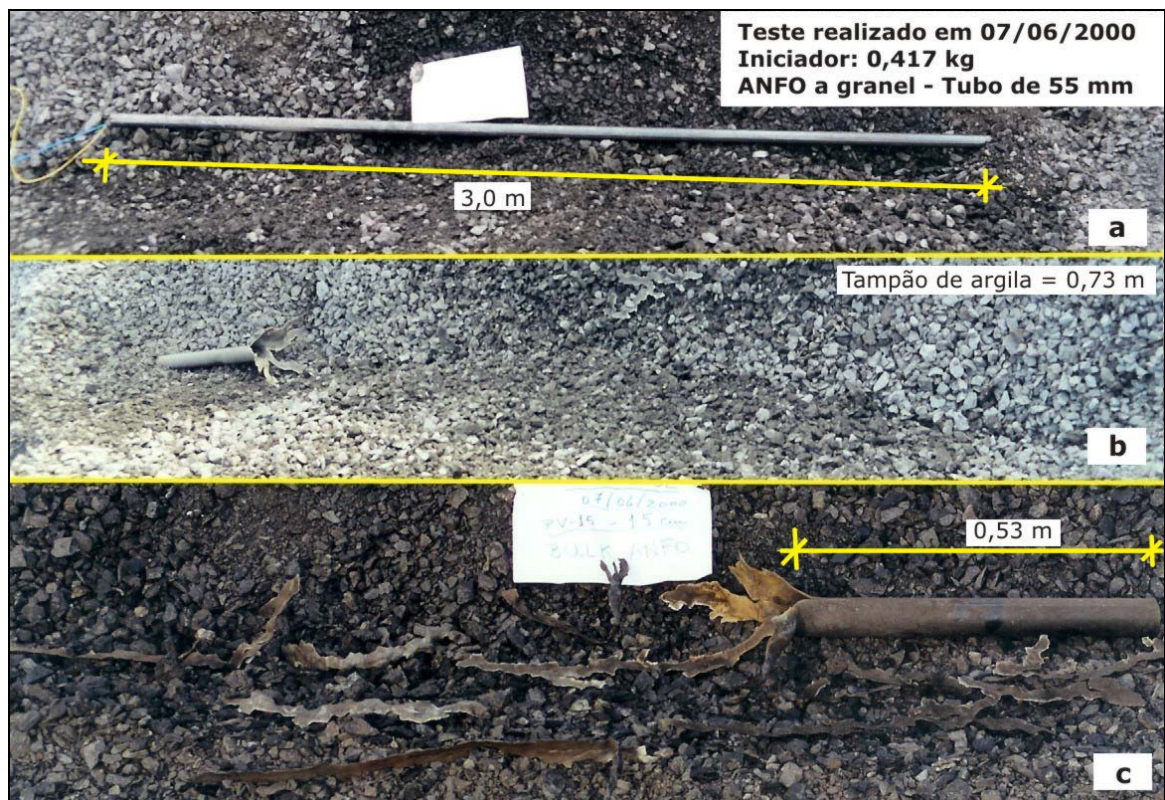


Figura 4.15 Teste em tubo de aço carregado com ANFO derramado. Em (a) tubo com a carga antes da detonação; (b) e (c) sobras do tubo após a detonação onde pode ser visualizada a parte intacta do tubo que corresponde ao tampão.

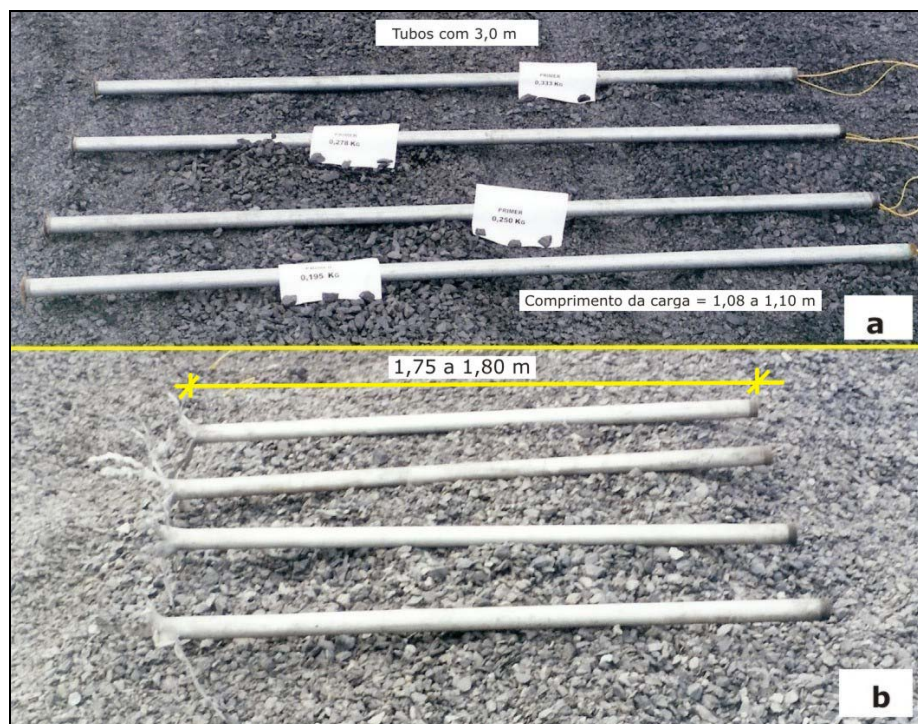


Figura 4.16 Tubos de aço com diâmetro de 55 mm carregados com iniciadores de 0,195; 0,250; 0,278 e 0,333 kg. Em 4.16a tubos preparados para o ensaio e em 4.16b os resultados obtidos.

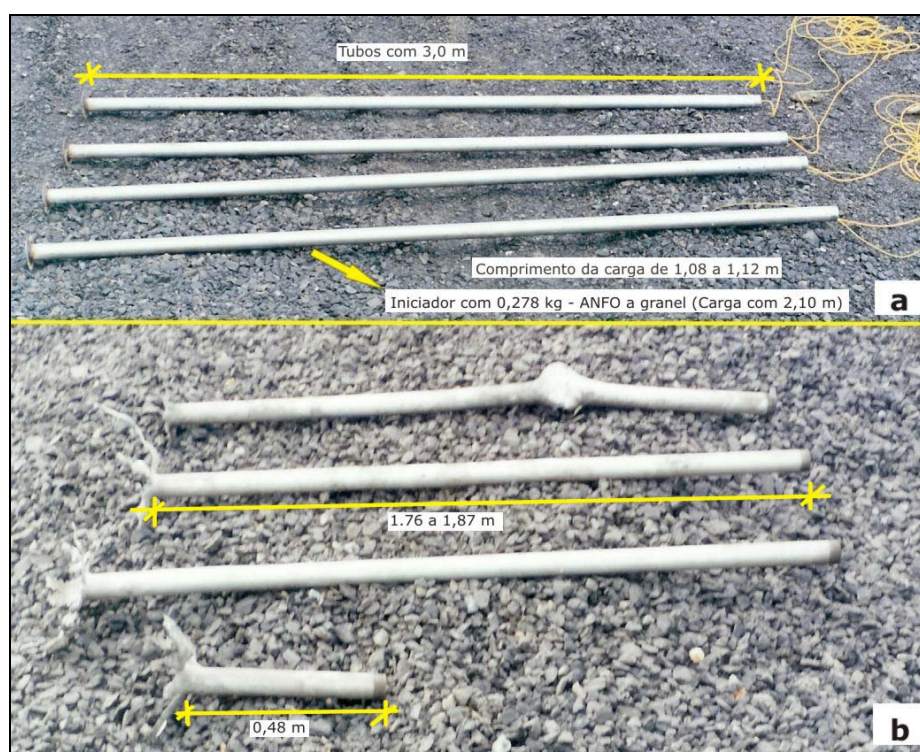


Figura 4.17 Ensaio com tubos de diâmetro de 55 mm e massas de iniciador de 0,195; 0,250 e 0,278 nos três primeiros tubos e o quarto com um iniciador de 0,278 kg e ANFO a granel. Em 4.17a os tubos preparados e em 4.17b os resultados após o ensaio.

4.6 Desenvolvimento de cartucho plástico

A presença de água nos furos e à impossibilidade de sua remoção devido à ausência de equipamento de ar comprimido exigiu que o ANFO fosse acondicionado em cartuchos plásticos. Foram testados cartuchos confeccionados em polietileno e poliéster com as duas pontas grampeadas e uma segunda configuração para o cartucho confeccionado em polietileno na qual uma ponta é soldada e a outra grampeada. Esta configuração não foi testada para o poliéster, pois este material somente pode ser colado ou grampeado (Figuras 4.18a; 4.18b e 4.18c).



Figura 4.18 Configurações de cartuchos testados para acondicionar o ANFO.

Ensaio de resistência à água foram realizados devido ao baixo desempenho do ANFO nos testes iniciais de desmonte em subsolo e à baixa resistência do polietileno e do poliéster utilizado na confecção dos cartuchos.

Foram realizados ensaios com os dois tipos de material em cartuchos grampeados e grampeados/colados. Estes ensaios foram realizados em tubo de aço com diâmetro de 55 mm e 3,00 m de comprimento. Nestes tubos, foi adicionado água com corante para contrastar com a cor da mistura explosiva e simular as condições de um furo em subsolo. Os tempos de residência do cartucho no tubo foram estipulados em um e cinco minutos.

Os ensaios mostraram que ocorre a infiltração de água pelas pontas grampeadas dessensibilizando o ANFO no primeiro minuto pela dissolução dos sais de nitrato. As Figuras 4.19 e 4.20 mostram testes de resistência à água do ANFO acondicionado em cartuchos confeccionados em poliéster e polietileno, respectivamente.

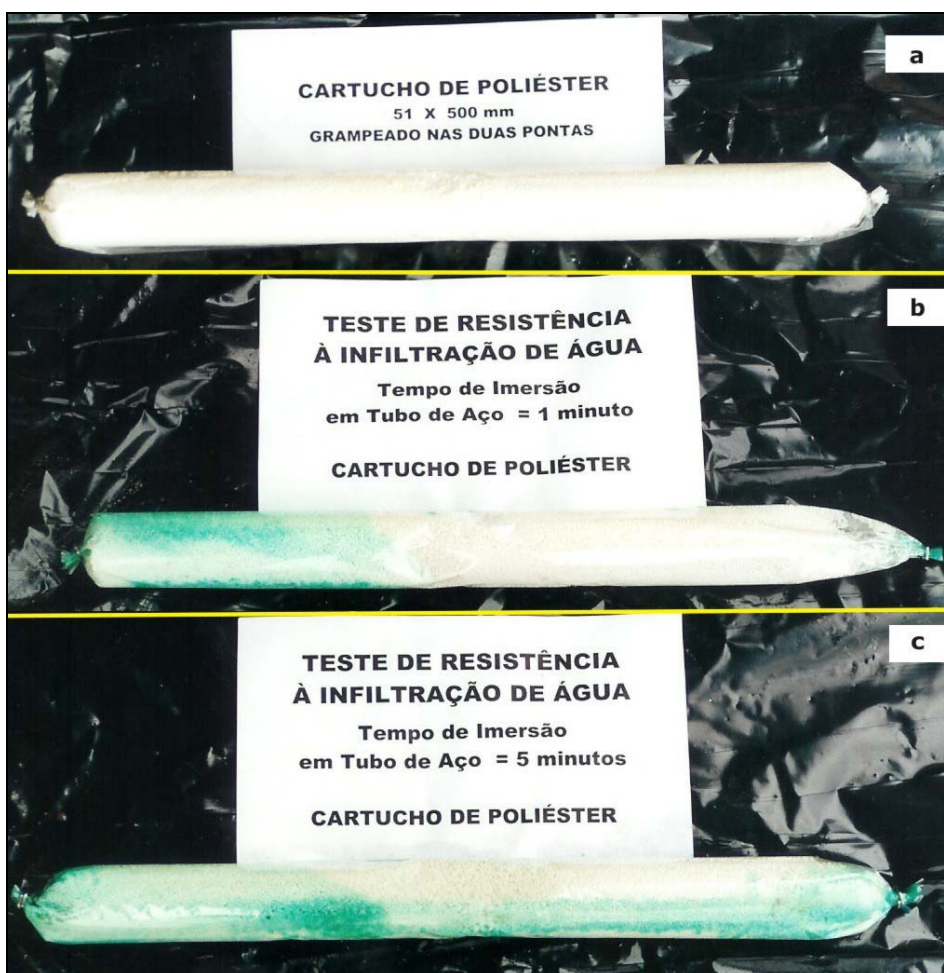


Figura 4.19 Teste de resistência à água com cartucho de poliéster. Em (a) cartucho antes do ensaio; Em (b) após o primeiro minuto de imersão e em (c) após cinco minutos.

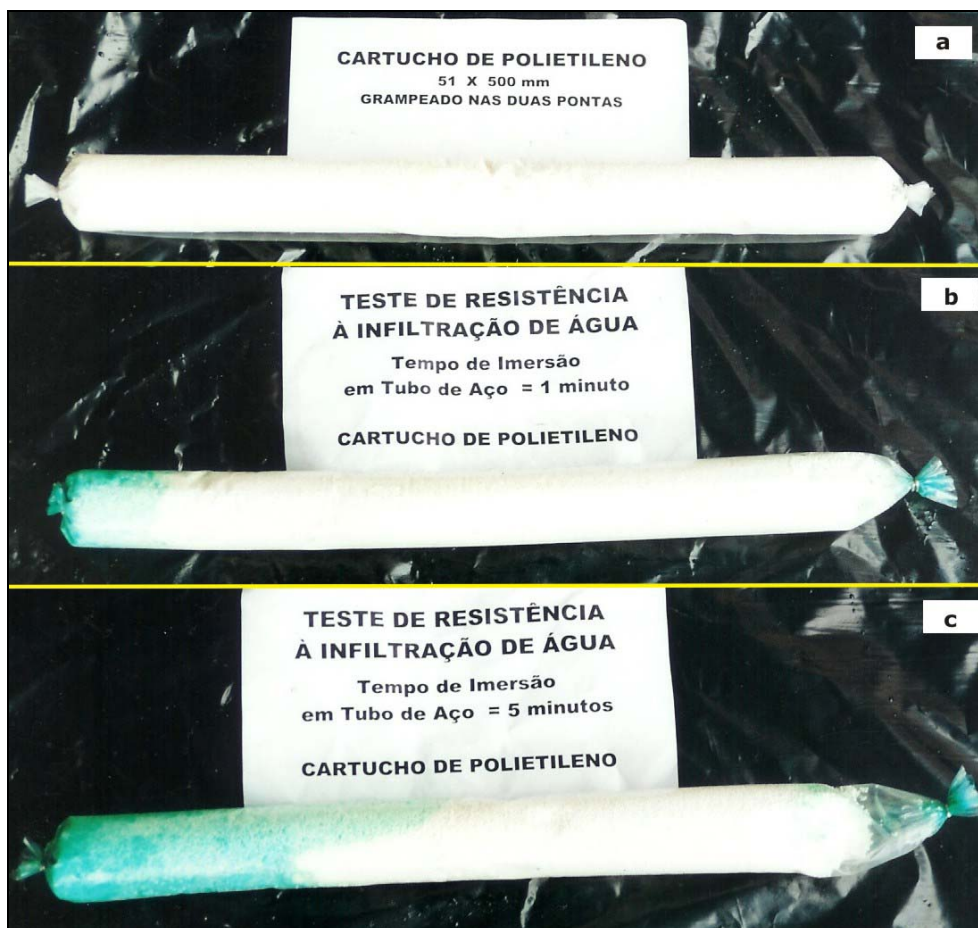


Figura 4.20 Teste de resistência à água com cartucho de polietileno. Em (a) cartucho antes do ensaio; Em (b) após o primeiro minuto de imersão e em (c) após cinco minutos.

4.7 Testes de desempenho em subsolo

A partir dos resultados obtidos com os testes de iniciação, testes paralelos foram realizados em subsolo, nas frentes em produção cujo objetivo era avaliar o desempenho do ANFO nas condições normais de operação. Na Figura 4.21, é apresentado o plano de fogo padrão empregado no sistema de produção e local escolhido para os testes. Na Figura 4.22, é mostrado o plano de fogo inicial adotado para o ANFO onde são indicados os valores teóricos da carga de explosivo empregada. A única diferença no plano de perfuração entre os dois projetos é o acréscimo de mais um furo para os testes com ANFO.

Nos testes finais com ANFO, o plano de perfuração evoluiu para o plano padrão empregado no sistema produtivo.

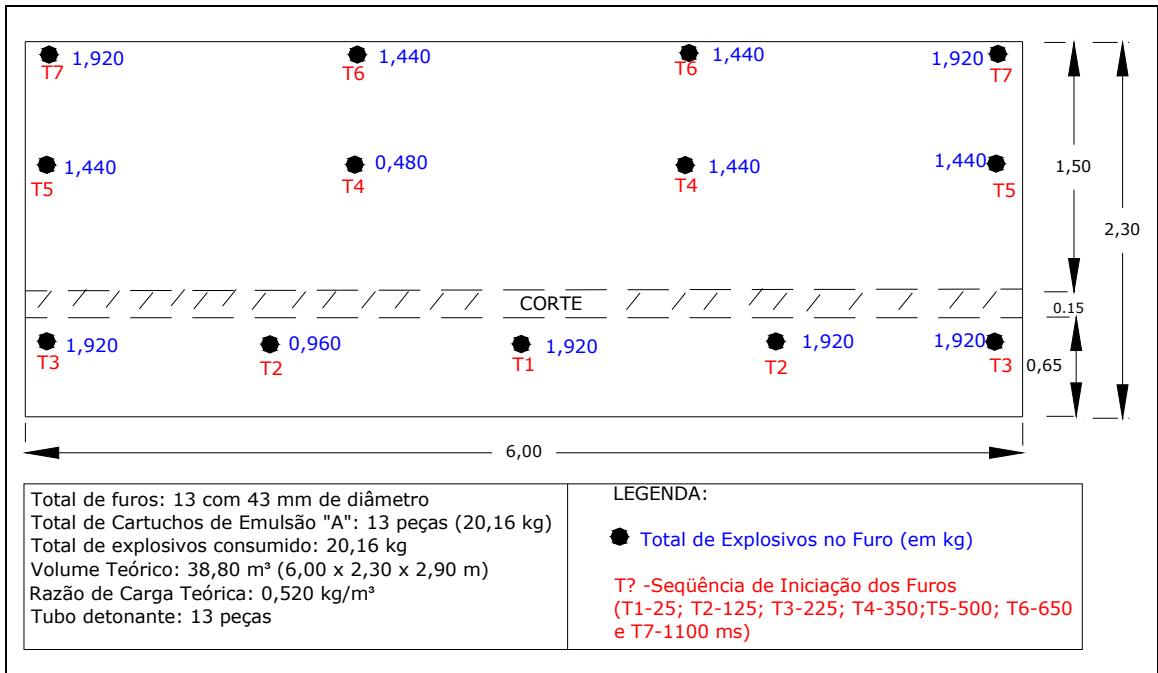


Figura 4.21 Plano de fogo padrão praticado no conjunto mecanizado 5.

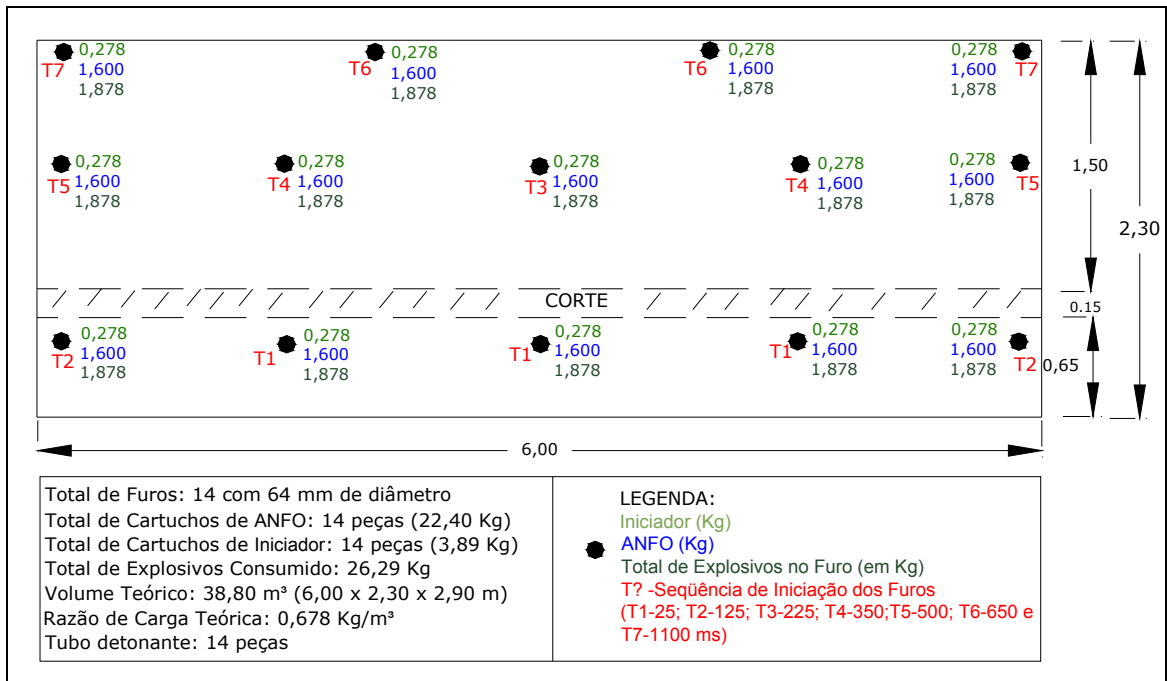


Figura 4.22 Plano de fogo para teste com ANFO com 14 furos testado na mesma área de operação do conjunto mecanizado 05.

Na Tabela 4.3, podem ser visualizados os parâmetros operacionais de um plano de desmonte com ANFO realizado no subsolo.

Tabela 4.3 Planilha de coleta de dados de geometria e carregamento.

PLANILHA DE DESMONTE EM SUBSOLO - ANFO - EVENTO 9				
Data: 26/10/00	Horário: 19:21:54	Método de Lavra: Câmara e Pilares		
Altura(m): 2,30	Largura(m): 5,50			
Profundidade de Corte da Rafa(m): 3,00	Diâmetro Furos (mm): 64			
Nº de Furos: 13	Secos[]	Água [X]	Área (m ²): 12,65	
Comprimento dos Furos (m): 3,00	Metros Perfurados (m): 39,00			
Perfuração Específica (m/m ³): 1,028	Avanço/Fogo (m): 3,00			
Volume Desmontado (m ³): 37,95	Carga Total de Explosivos (kg): 25.16			
Razão de Carga (kg/m ³): 0,663	Tampão(m): um cartucho argila de 20 cm			
EXPLOSIVOS/ SISTEMA DE INICIAÇÃO				
Tipo: Tipo A - Gelatina (0,333 kg por peça)	Diâmetro (pol.ou mm): 2"	Compr. Cartucho (pol.ou mm): ~ 5"		
Densidade (g/cm ³):1,37	Volume de Gás (l/kg):	VoD (m/s): 4.300,0		
Carga Coluna: ANFO (1,602 kg/furo)	Diâmetro (pol.ou mm): 2"	Compr. Cartucho (pol.ou mm): ~ 20"		
Tipo: tubo de choque - Tipo A	Comprimento(m): 6,00 e 9,00			
Tempo dos Retardos (ms): 25/125/225/350/500/650/1100	Cordel Detonante (g/m): 5 g/m (um metro) e uma Espoleta nº 8 c/estopim			
CARREGAMENTO - EVENTO 9				
Furo	Carga por Furo (kg)	Seqüência	Retardos (ms)	Carga por Espera (kg)
1	1,935	T1	25	T1 = 1,935
2	1,935	T2	125	
4	1,935	T2	125	T2 = 3,870
5	1,935	T3	225	
6	1,935	T3	225	T3 = 3,870
7	1,935	T4	350	T4 = 1,935
8	1,935	T5	500	
9	1,935	T5	500	T5 = 3,870
10	1,935	T6	650	
11	1,935	T6	650	T6 = 3,870
12	1,935	T8	1100	
13	1,935	T8	1100	T8 = 3,870
TOTAL	25,16	-	-	-

Todo o plano de perfuração foi devidamente marcado na face e a qualidade da perfuração rigidamente controlada.

4.8 Análise de imagens - fragmentação

O desempenho da fragmentação foi analisado a partir de coleta de imagens com câmera fotográfica com filme de 35 mm. Como parâmetro de comparação se fez uso da metodologia aplicada na avaliação do desmonte conforme descrito no item 3.4.2 do Capítulo 3. Na Tabela 4.4, são apresentados os resultados obtidos com a análise de imagens referente a sete testes de desmonte realizados com ANFO em subsolo.

Tabela 4.4 Índice de blocos de desmontes realizados com ANFO (em %).

Evento	frente	nº de fotos tomadas	% blocos (em área)
1	G4	1	19,71
2	G3	1	25,24
3	G2	1	20,07
4	G1	2	3,35
5	G6	3	2,05
6	T-30	1	18,16
7	G1	1	11,71
m			14,33
σ			8,89

onde m é a média do percentual de blocos e σ é o seu desvio padrão.

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram o desempenho da fragmentação do desmonte com o emprego de ANFO.



Figura 4.23 Fragmentação obtida em desmonte com ANFO.

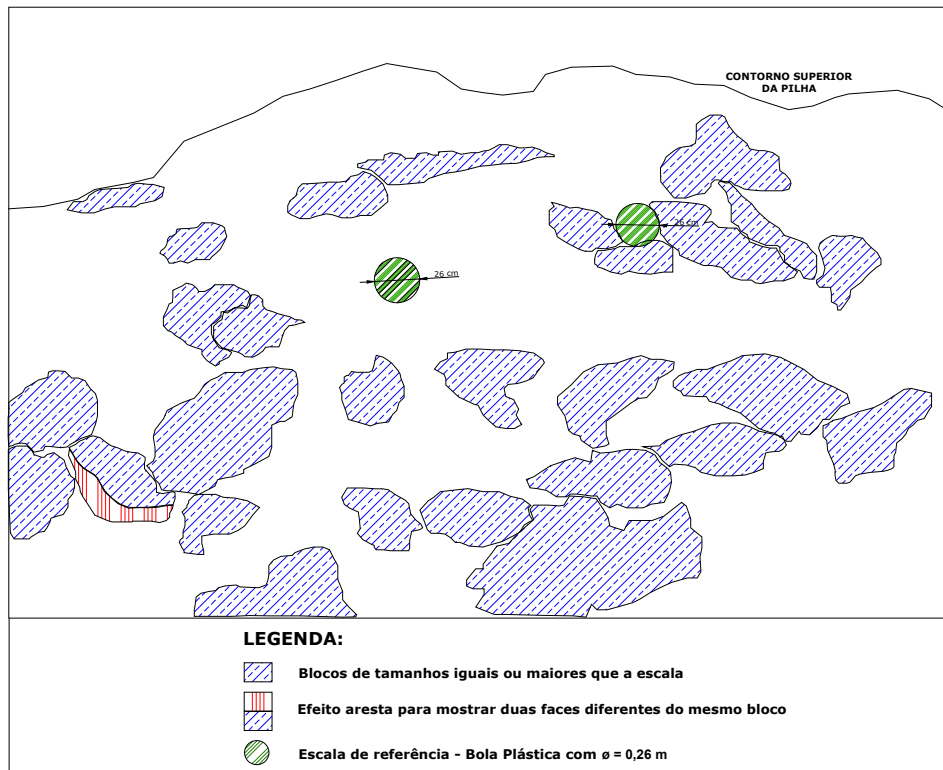


Figura 4.24 Blocos com diâmetro igual ou superior à escala identificados no desmonte com ANFO.

4.9 Monitoramento sismográfico

A coleta de dados de vibração foi realizada com base na metodologia e nos modelos de acordo com o descrito no item 3.4.3 do Capítulo 3, obedecendo a um roteiro pré-estabelecido para a execução dos testes em subsolo foi elaborado conforme os seguintes procedimentos:

- i. definição do local de realização dos testes em subsolo;
- ii. definição do tamanho do iniciador e da carga de ANFO por furo, conforme os testes de sensibilidade desenvolvidos na superfície e de acordo com o plano de desmonte mostrado na Figura 4.22;
- iii. preparação dos iniciadores e encartuchamento do ANFO poucas horas antes da realização do teste em subsolo;

- iv. iniciação do desmonte com os mesmos tempos de retardos empregados no desmonte convencional, diferindo apenas no número de peças por tempo;
- v. ligação de cordel detonante no final do segundo cartucho para medida indireta de desempenho da coluna explosiva (VOD). Conexão do cordel em um furo iniciado com o primeiro tempo de retardo, no caso, $T_1 = 25$ ms e isolado do sistema de iniciação;
- vi. fixação da profundidade de corte e dos furos em 3,0 metros;
- vii. marcação do plano de fogo na face conforme o plano de fogo escolhido conforme pode ser visualizado na Figura 4.22;
- viii. execução da perfuração obedecendo ao paralelismo entre os furos em relação à face livre (corte);
- ix. lavagem e limpeza dos furos no final de cada perfuração;
- x. carregamento e execução do tampão com dois cartuchos de argila com comprimento total de 40 centímetros;
- xi. escolha do local de instalação do sismógrafo para o monitoramento do desmonte;
- xii. tomadas de imagem fotográfica da pilha após a detonação;
- xiii. início dos trabalhos de limpeza e transporte com a tomada de imagens após o transporte de 50% do material desmontado e no final do ciclo de limpeza;
- xiv. observação durante a operação de limpeza sobre eventuais interferências da qualidade da fragmentação no rendimento do equipamento.

Na coleta de dados de vibração nos testes desenvolvidos em subsolo com ANFO, o modelo de sismógrafo empregado apresenta algumas características diferentes do primeiro. Na Figura 4.25 é mostrado o sismógrafo *Instantel Inc.*, o *Minimate™ Plus*. Fisicamente este modelo difere do primeiro por apresentar os geofones em transdutor separado da parte composta pelo controle e aquisição dos dados além de possibilitar o monitoramento de eventos com intervalos maiores de vibração, permitir taxas maiores de amostragem.

As principais especificações técnicas desse modelo de sismógrafo são apresentadas na Tabela 4.5.



Figura 4.25 Sismógrafo Instantel *Minimate™ Plus* empregado no monitoramento dos testes de ANFO.

Tabela 4.5 Especificações técnicas do sismógrafo Instantel-*Minimate™ Plus*.

SÍSMICA	
Faixa de Operação	0 a 254 mm;
Disparador (<i>trigger</i>)	0,127 a 254 mm/s;
Análise de frequência	Frequência de pico, mais análises USBM/OSMRE, BS 6472, French GFEE, New Zealand 4403, Spain Une 22.381 e DIN 4150;
Precisão	Calibrado para 3% (referência: de Bruel & Kjaer em 15 Hertz);
Ruído	
Faixa de Operação	88 a 148 dB (2 a 500 Pa);
Disparador (<i>trigger</i>)	100 a 148 dB (4 a 500 Pa);
Precisão	Calibrado para 0,2 dB (referência: de Bruel & Kjaer em 30 Hertz e 127 dB);
Resposta de frequência	linear, 2 a 300 Hz em todos os canais (-3dB), independente do tempo de gravação;
GERAL	
Taxa de amostragem	1024 amostras por canal por segundo até 16384;
Tempo de registro fixo	1 a 100 segundos em incrementos de um segundo
Modo de registro	Manual, um evento, contínuo ou programado
Canais	4 até 8; longitudinal, vertical, transversal e som;

A análise dos dados de sismografia obtidos nos testes de ANFO no subsolo foi desenvolvida com base na metodologia descrita no ítem 3.7 do Capítulo 3 e embasada nos modelos de pulso de onda obtidos no monitoramento do desmonte convencional em subsolo. A análise qualitativa dos níveis de vibração foi desenvolvida comparando os resultados com o previsto no modelo teórico dos níveis de vibração e visualizado na Figura 3.36 do Capítulo 3.

Nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28, são mostrados três sismogramas obtidos nos testes com ANFO em subsolo e realizados segundo os mesmos parâmetros pré-estabelecidos no plano de desmonte e nos procedimentos acima descritos.

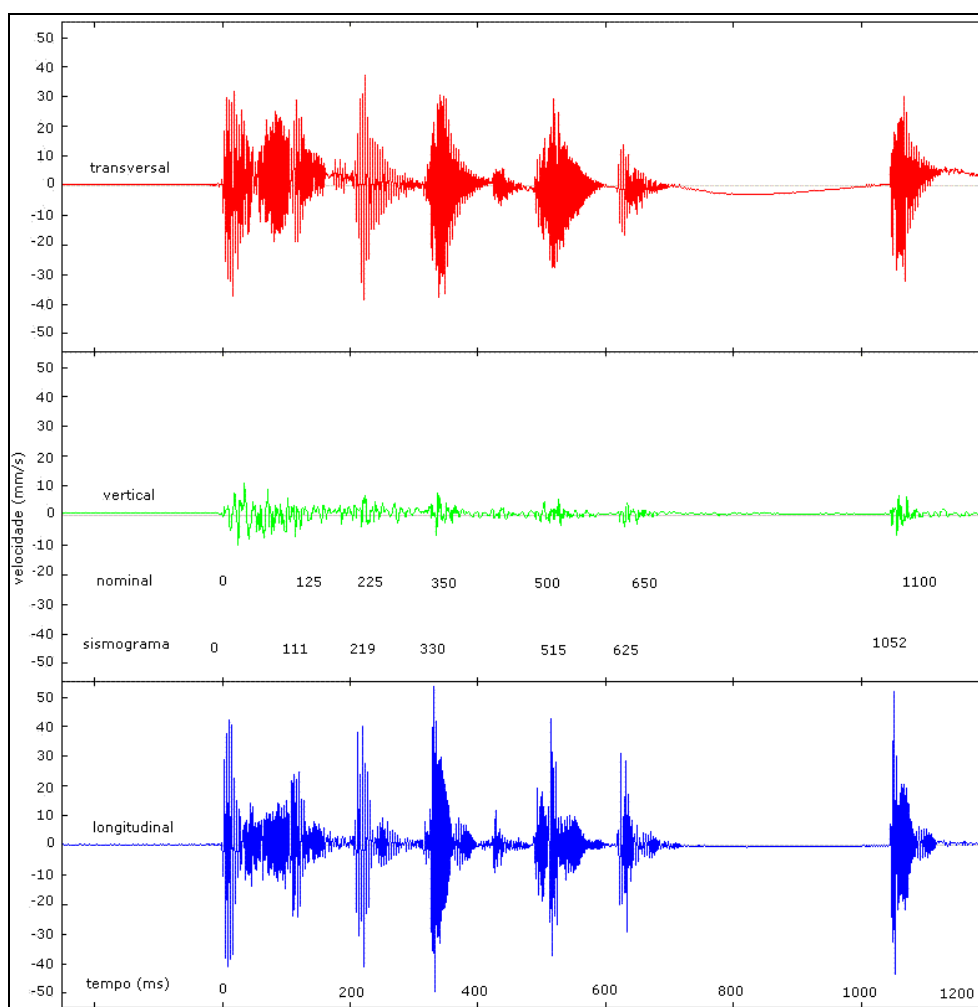


Figura 4.26 Registro típico de vibração de um teste de desmonte com ANFO que apresentou um bom resultado em fragmentação e lançamento.

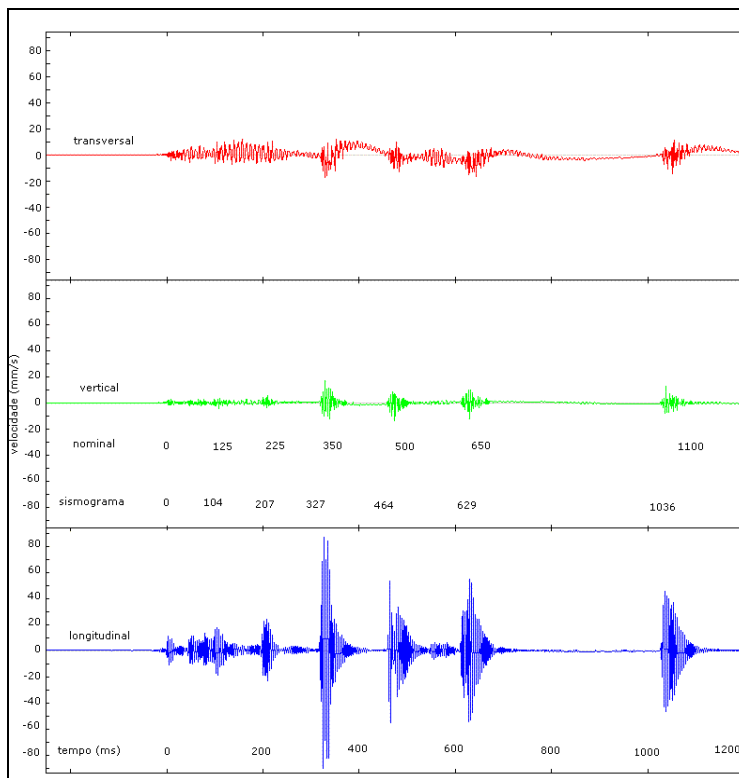


Figura 4.27 Registro de vibração de um desmote mostrando problemas com o funcionamento das cargas referentes aos retardos de 25, 125 e 225 ms.

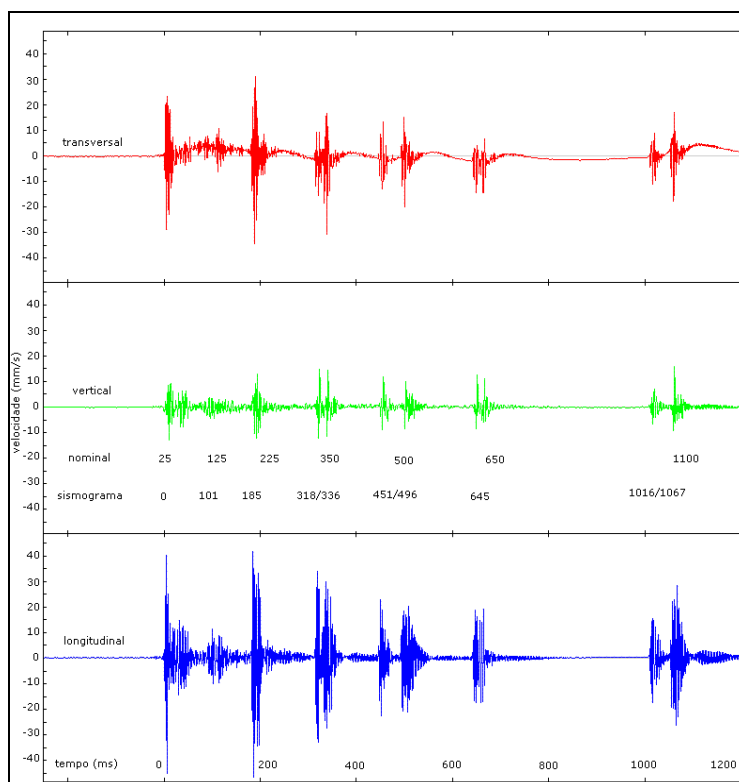


Figura 4.28 Sismograma de um teste de desmote com ANFO que apresentou um bom resultado em fragmentação e lançamento e problema localizado na iniciação da carga relacionada ao retardo de 125 ms.

O sismograma da Figura 4.26 mostra um registro típico de um desmonte onde foi obtido um bom resultado em fragmentação. A análise das amplitudes relativas dos eventos originados em cada tempo de retardo permite concluir que ocorreu a detonação de todas as cargas de ANFO em todos os furos para todos os tempos de retardos. O mesmo não se pode afirmar quanto ao registro obtido com o desmonte que deu origem ao sismograma da Figura 4.27. Neste evento, os níveis de vibração para os tempos de retardos de 25; 125 e 225 (T1, T2 e T3) estão muito abaixo do esperado fazendo crer que somente ocorreu a detonação do iniciador. No sismograma mostrado na Figura 4.28, o mesmo problema pode ser observado no tempo referente ao retardo de 125 ms (T2).

O mau funcionamento destas cargas, principalmente as localizadas na linha mais próxima do banco (parte inferior da face), deve-se à presença de água. Água é o principal elemento que interfere no desempenho do ANFO. Este fato foi confirmado pelos ensaios de resistência dos cartuchos conforme o exposto no item 4.6 deste Capítulo.

4.10 Parâmetro de desempenho e custos obtidos

A partir dos testes de desempenho em subsolo, gerou-se uma planilha de composição de custos, os quais foram comparados aos custos de desmonte praticados pela empresa com outro tipo de explosivo na mesma área de teste. Na Tabela 4.6, são apresentados os parâmetros do plano de desmonte com ANFO, os índices de desempenho e custos obtidos e comparados aos praticados pela empresa.

De acordo com os dados mostrados pela Tabela 4.6, o ANFO demonstrou ser tecnicamente viável a sua adoção no desmonte em lavra subterrânea de carvão. Nos testes finais, os parâmetros de projeto do plano de desmonte com ANFO estão praticamente iguais ao praticado nas operações de lavra pela empresa, exceção feita à razão de carga e ao diâmetro de perfuração.

A razão de carga que se apresenta elevada foi compensada pelo baixo custo do explosivo aliado à sua baixa densidade. O diâmetro de perfuração empregado nos testes com ANFO foi de 64 mm e no desmonte produtivo é de 43 mm.

Tabela 4.6 Índices de desempenho e custos obtidos no desmonte com ANFO.

Data	27/9/00	28/9/00	4/10/00	5/10/00	25/10/00	26/10/00	MÉDIA
Nº Teste	4	5	6	7	8	9	
Nº Furos	14	14	13	13	13	13	
L (m)	5.60	5.70	5.80	5.30	5.70	5.50	5.60
H (m)	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30
Crafa (m)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
CF (m)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
A (m²)	12.88	13.11	13.34	12.19	13.11	12.65	12.88
Av (m)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
V (m³)	38.64	39.33	40.02	36.57	39.33	37.95	38.64
P (t)	79.21	80.63	82.04	74.97	80.63	77.80	79.21
NV	9	9	10	9	9	9	9
Iniciador (kg)	3.89	3.89	4.33	4.33	4.33	4.33	4.18
ANFO (kg)	20.20	21.84	22.98	20.72	20.93	20.83	21.25
CE (kg)	24.09	25.73	27.31	25.05	25.26	25.16	25.43
RC (kg/m³)	0.623	0.654	0.682	0.685	0.642	0.663	0.658
C_{IN} (R\$)	10.74	10.74	11.95	11.95	11.95	11.95	11.55
C_{ANFO} (R\$)	19.80	21.40	22.52	20.31	20.51	20.41	20.83
CTE (R\$)	30.54	32.15	34.47	32.25	32.46	32.36	32.37
CA (R\$)	18.68	18.68	17.36	17.36	17.36	17.36	17.80
CTD_{ANFO}(R\$)	49.22	50.83	51.83	49.61	49.82	49.72	50.17
CTD_{ANFO}(R\$/ROM)	0.62	0.63	0.63	0.66	0.62	0.64	0.63
C_{EML}(R\$/ROM)	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
ANFO x EML (%)	-26.03	-24.96	-24.79	-21.22	-26.44	-23.92	-24.56

Nota: L = Largura da galeria; H = Altura da galeria; C_{rafa} = Comprimento da rafa; CF = Comprimento dos furos; A = Área da frente; Av = Avanço do fogo; V = Volume desmontado; P = tonelagem desmontada; NV = Número de viagens do desmonte; Iniciador = Massa total do explosivo iniciador; ANFO = Massa total de ANFO; CE = Consumo total de explosivo; RC = Razão de carga; C_{IN} = Custo do Iniciador; C_{ANFO} = Custo do ANFO; CTE = Custo total dos explosivos; CA = Custo dos acessórios (tubo de choque); CTD_{ANFO} = Custo total do desmonte; CTD_{ANFO}m³ = Custo unitário do desmonte com ANFO; C_{EML}m³ = Custo unitário do desmonte com emulsão; ANFO x EML = diferença percentual do custo unitário do desmonte.

Os custos médios obtidos nos testes com ANFO estão na ordem de 25% mais baixos que os custos praticados pela empresa na mesma área de teste, para o mesmo plano de fogo com o emprego de explosivo do tipo emulsão. Nos cálculos de custo, não foram computados os possíveis acréscimos relacionados

ao aumento do diâmetro de perfuração de 43 mm (empregado nas operações de produção) para o diâmetro de 64 mm (testes de desmonte com ANFO) e a possibilidade do aumento do tempo de perfuração.

4.11 Análise dos resultados de desempenho do ANFO

Os testes de desempenho em superfície e subsolo atingiram os resultados esperados, possibilitando o desenvolvimento de metodologia para a seleção e adequação do ANFO no desmonte de carvão.

Na análise da fragmentação pelas imagens obtidas nos desmontes realizados em subsolo, o desempenho obtido foi positivo quanto à fragmentação e lançamento.

No acompanhamento da limpeza e transporte, foram detectados problemas com a fragmentação na linha de furos próxima ao piso (Banco) ocasionado pelo mau funcionamento das cargas devido à dessensibilização do ANFO pela infiltração da água nos cartuchos.

O monitoramento sismográfico mostrou-se eficiente como ferramenta de análise detalhada do desmonte.

As principais dificuldades operacionais estão relacionadas com o carregamento do ANFO em cartuchos de polietileno, exigindo qualidade na execução da perfuração e boa limpeza dos furos antes do carregamento.

Os ensaios realizados na superfície confirmaram a perda de sensibilidade do ANFO a partir do primeiro minuto de imersão do cartucho na água. Um sistema mais eficiente de fechamento do cartucho deve ser desenvolvido para impedir a entrada de água ou a adoção de procedimentos operacionais alternativos para a expulsão da água de perfuração do interior dos furos.

Nos últimos testes, obteve-se uma redução média de custos da ordem de 25%, podendo-se chegar a índices superiores com a preparação do ANFO pela própria empresa do que adquirir a mistura de nitrato de amônio e óleo diesel pronta junto aos fornecedores de explosivos existentes no mercado.

Capítulo 5

Variabilidade dos tempos de retardo do sistema de iniciação com tubo de choque

Neste capítulo, são apresentados os ensaios desenvolvidos com a aplicação de metodologia para o controle de qualidade (variabilidade) do sistema de iniciação dos desmontes com tubo de choque. Primeiro, é apresentada a metodologia adotada no desenvolvimento e coleta de dados gerados pelos ensaios e os equipamentos utilizados. Após, é feita uma análise dos dados obtidos e da metodologia aplicada.

A disponibilização da área, amostras para os testes e todo o apoio para o desenvolvimento dos trabalhos foram geridos pela Carbonífera Metropolitana S.A.

5.1 Metodologia

Com base nos objetivos propostos no Capítulo 1, ítem (v), de desenvolver uma metodologia visando determinar a variabilidade dos retardos do sistema de iniciação dos desmontes com tubo de choque com o emprego de um sismógrafo digital, alguns parâmetros foram previamente definidos para a realização dos ensaios:

- i. escolha de um local ao ar livre, imune a ruídos no momento dos ensaios;
- ii. inexistência no local, de paredes ou superfícies que possam refletir ondas sonoras;
- iii. a distância entre o microfone e as espoletas deve ser mantida constante e igual para todas as peças em teste. Este parâmetro deve ser controlado rigidamente, pois uma variação de 0,34 m na distância gera um erro de um milissegundo no tempo, em função da velocidade de propagação do som no ar estar em torno de 340 m/s a uma temperatura de 20 °C (Máximo et al., 1998);
- iv. a distância entre as espoletas deve ser mantida constante para manter iguais as defasagens dos tempos de iniciação. Este controle deve ser rígido, pois o tempo de propagação no tubo de choque é de 2000 m/s e mantendo-se esta distância constante, o valor a ser subtraído dos tempos extraídos do sismograma será sempre o mesmo;
- v. as espoletas devem ser cobertas para evitar que fragmentos metálicos originados pela desintegração da cápsula metálica possam ser projetados em algum ponto à frente e cortar um tubo;
- vi. inexistência de vento e escolha de um valor adequado de disparo para o acionamento automático de monitoramento do equipamento;
- vii. operar o equipamento somente com o canal relativo ao sensor de medida de sobrepressão acústica (microfone) ativado;
- viii. o método considera que em local com pouca variação da temperatura associada aos parâmetros acima e em função das pequenas distâncias, a massa de ar empregada como meio, pode ser considerada homogênea.

O sismógrafo utilizado no monitoramento foi um modelo fabricado pela Instantel Inc., o *Minimate™ Plus* (Figura 5.1). O microfone, que é um dos componentes do equipamento é do tipo *Linear* medindo no intervalo entre 88 a 148 dB (2 Pa a 500 Pa) com uma precisão de 0,2 dB para uma frequência de 30 Hz a 127 dB.



Figura 5.1 Sismógrafo Instantel *Minimate™ Plus* empregado nos ensaios.

A configuração de um ensaio com base nesta metodologia é mostrada na Figura 5.2, onde podem ser visualizados os principais parâmetros envolvidos. Na Figura 5.3a e 5.3b pode ser visualizado um teste de campo montado e em execução.

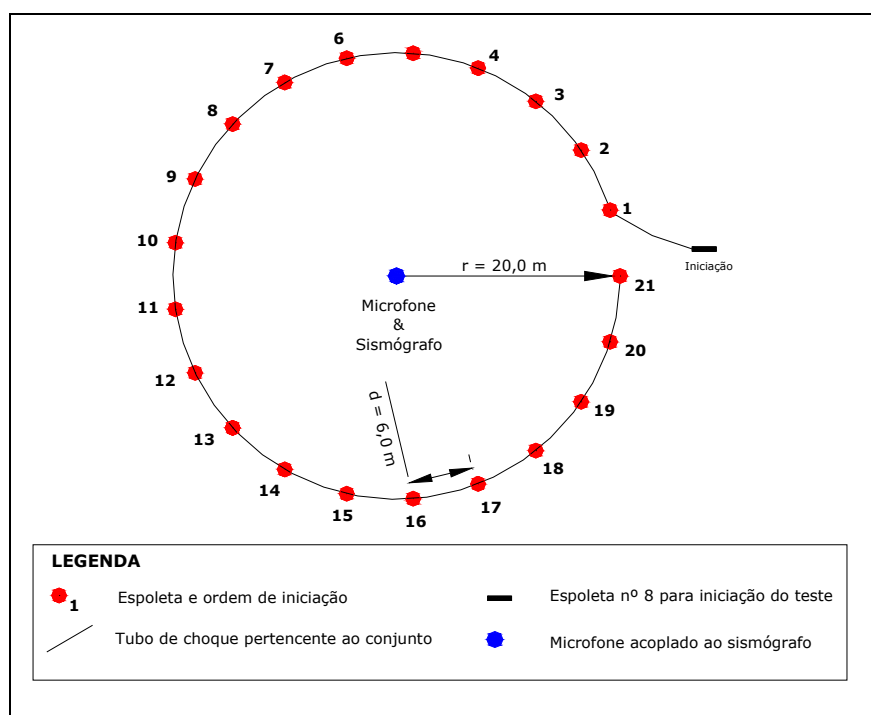


Figura 5.2 Configuração adequada para um ensaio em uma circunferência com raio de 20,0 m e 21 espoletas interconectadas.



Figura 5.3 Ensaio em campo. Em (a) pode ser visualizado um teste montado e em (b) o mesmo teste em execução.

5.2 Coleta e análise de dados

Os dados obtidos pelos ensaios realizados no campo são apresentados na seguinte ordem. Primeiro, são apresentados os parâmetros referentes a configuração de cada teste, seguidos pelos sismogramas gerados em cada um dos experimentos. A partir dos dados fornecidos pelos sismogramas, foram construídas tabelas seguidas de uma análise estatística e, finalizando, são tecidos alguns comentários com relação à metodologia empregada.

5.2.1 Ensaio com retardos de 25 ms

Para a realização dos testes de variabilidade em campo, elaborou-se um modelo teórico com os principais parâmetros para o levantamento quantitativo dos itens envolvidos e como ferramenta de controle de qualidade na execução. Foram realizados três testes em campo com tubos de choque ligados a retardos de 25 ms, conforme pode ser visualizado na Figura 5.4 e de acordo com a relação de materiais abaixo:

- i. 21 amostras de tubo de choque ligados a retardos de 25 ms e 6,0 m de comprimento em cada teste;
- ii. distância de 5,90 m entre espoletas dispostas numa circunferência com raio de 20,0 metros; espoletas a uma distância fixa do microfone postado no centro da circunferência e recobertas com material fino;
- iii. fixação das espoletas no tubo de choque com fita isolante;
- iv. iniciação com uma espoleta nº 8 amolgada a um estopim de 1,0 metro.

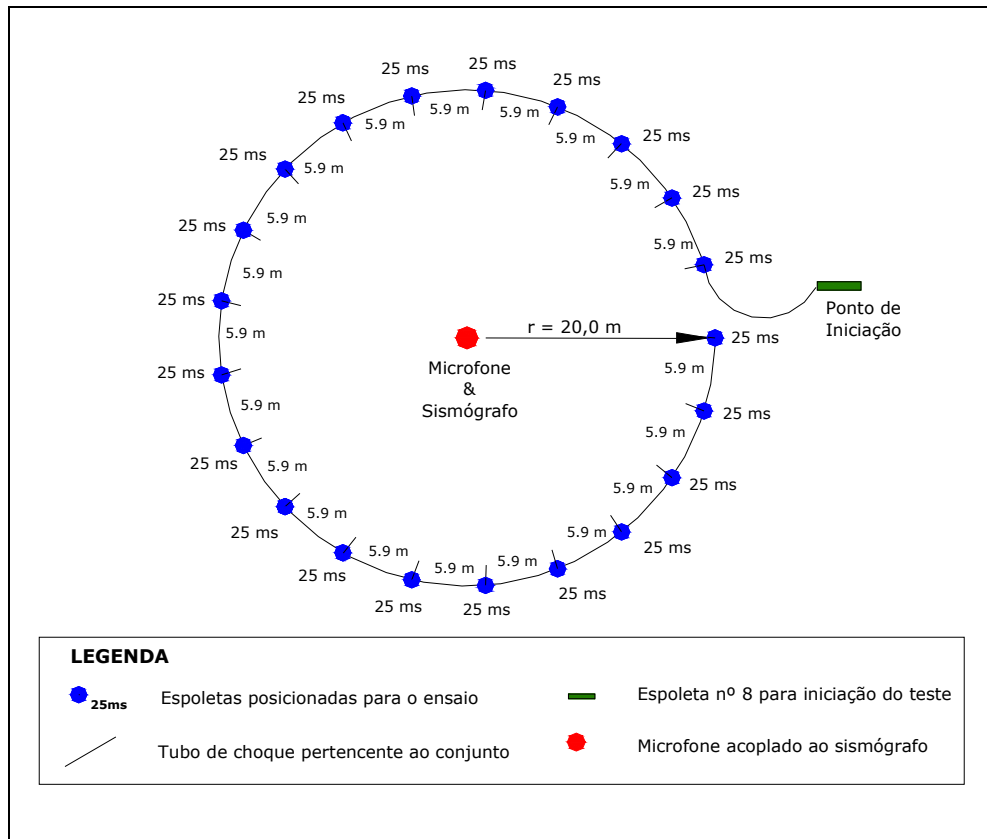


Figura 5.4 Configuração adotada para a realização do teste de variabilidade com retardos de 25 ms.

Nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, são mostrados os registros típicos de ruído obtidos nos três testes de variabilidade realizados com tubo de choque de 6,0 m de comprimento e retardos de 25 ms. Os algarismos de 1 a 21 inseridos no registro de ruído referem-se ao número de ordem de detonação da espoleta em cada teste. O primeiro pulso visualizado não foi computado, pois está relacionado com a espoleta nº 8 que deflagra o processo.

Na Figura 5.5, além dos dados acima foram acrescentados os valores dos tempos relacionados a todas as espoletas detonadas como forma de ilustrar e esclarecer a forma de montagem das tabelas. A visualização destes dados é feita com o auxílio de um módulo pertencente ao *software* que é fornecido pelo fabricante do equipamento.

A diferença de amplitudes entre o registro da Figura 5.5 e os relativos às Figuras 5.6 e 5.7 está relacionada ao tempo da janela de monitoramento. No primeiro evento, o tempo selecionado foi maior fazendo com que o equipamento ajuste o evento ao tempo de registro configurado.

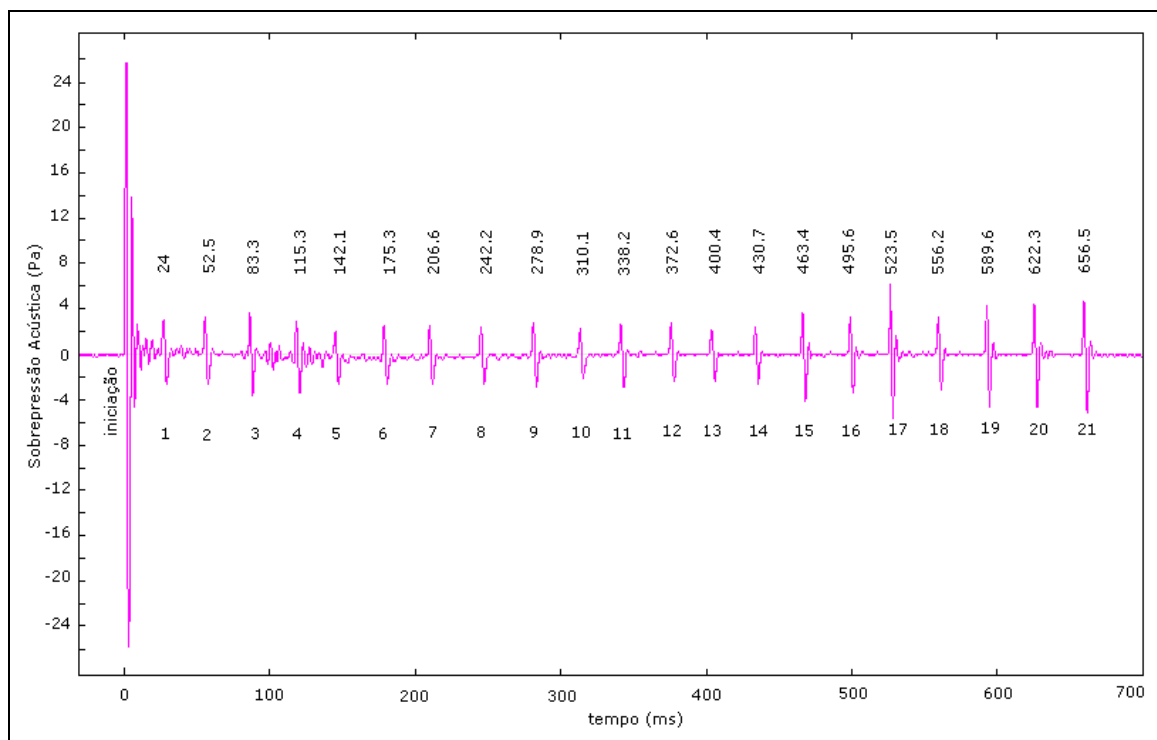


Figura 5.5 Registro de ruído obtido no teste de campo nº 1 com retardos de 25 ms. Os algarismos de 1 a 21 identificam a ordem de detonação e os valores acima do eixo dos tempos registra o momento de chegada do pulso de sobrepressão acústica no microfone.

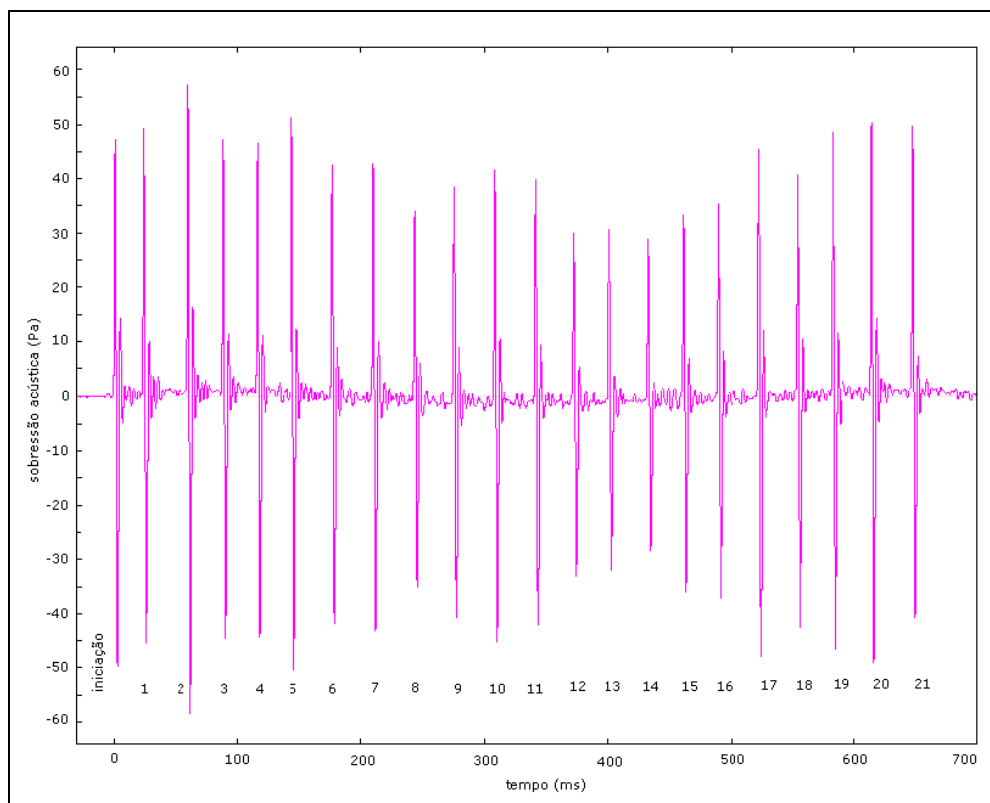


Figura 5.6 Registro de ruído fornecido pelo teste de campo nº 2 realizado com retardos de 25 ms.

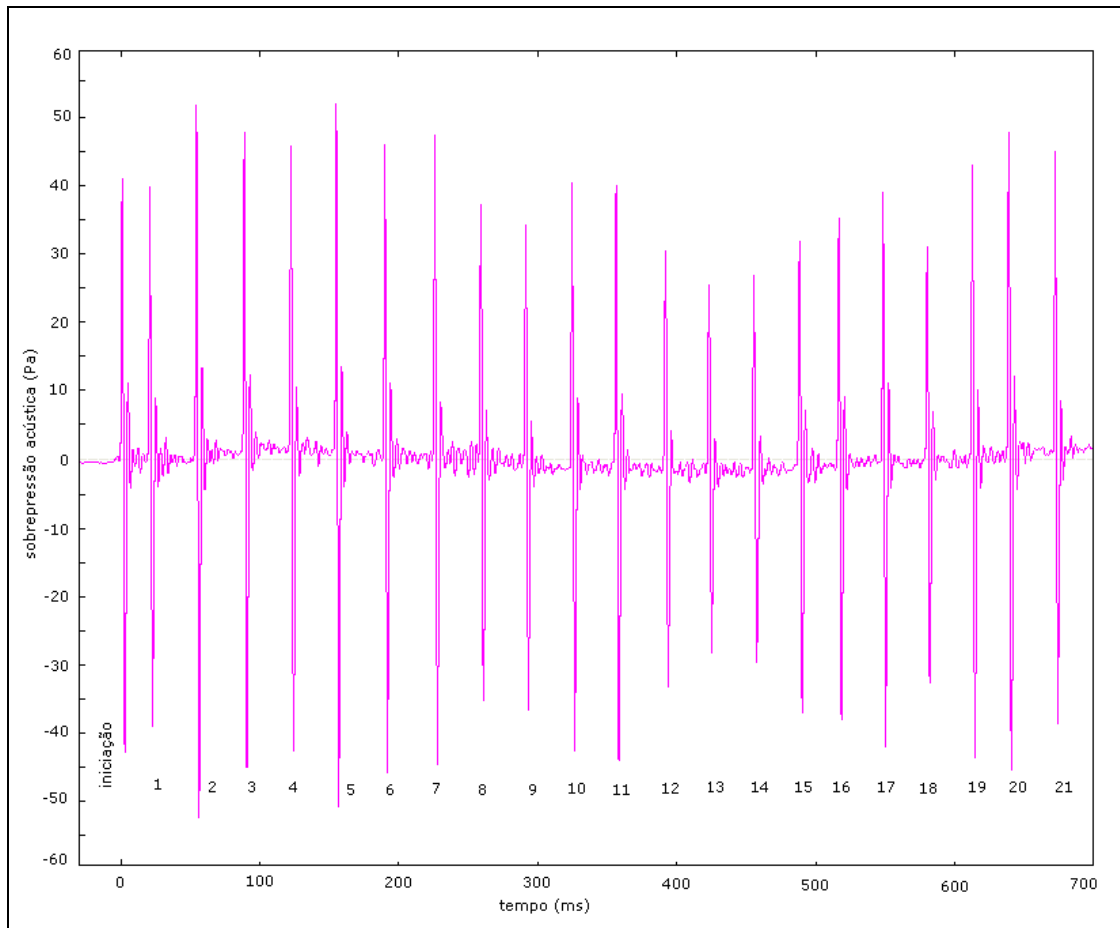


Figura 5.7 Registro de ruído referente ao teste de campo nº 3 realizado com retardos de 25 ms.

Para uma avaliação quantitativa do espalhamento relacionado aos retardos de 25 ms, os dados relativos aos tempos dos pulsos de sobrepressão acústica foram tabulados conforme é mostrado na Tabela 5.1, coluna 2 – Registro. A coluna 3 – Real está relacionada aos tempos reais dos retardos. Estes valores foram obtidos pela exclusão do valor da coluna 2 – Registro, do tempo relativo à propagação da onda de choque no tubo de choque. A velocidade média de propagação no tubo é de 2000 m/s. O ensaio foi todo configurado com 5,90 m de tubo de choque para cada espoleta o que resultou num tempo médio de 2,95 ms. Este valor foi subtraído do valor obtido em cada pulso de sobrepressão fornecido pelo sismograma.

Esta tabela, além de apresentar os dados relativos a chegada dos pulsos de sobrepressão e dos tempos reais dos retardos, mostra o valor médio determinado para este tempo de retardo testado, o seu desvio padrão e o espalhamento nominal.

Com base nos dados da Tabela 5.1 foi gerado o histograma com o *software histplt* da biblioteca *GSLIB* (Deutsch & Journal, 1998). O histograma pode ser visualizado na Figura 5.8, juntamente com um resumo do valor da média encontrado e do desvio padrão para este tempo de retardo.

Tabela 5.1 Tempos obtidos nos ensaios para retardo de 25 ms.

Tempos			Tempos		
Evento	Registro	Real	Evento	Registro	Real
1	0.0200	0.0170			
2	0.0232	0.0203	33	0.0324	0.0295
3	0.0259	0.0230	34	0.0325	0.0295
4	0.0264	0.0235	35	0.0325	0.0296
5	0.0268	0.0239	36	0.0325	0.0296
6	0.0276	0.0247	37	0.0327	0.0298
7	0.0278	0.0249	38	0.0327	0.0298
8	0.0278	0.0249	39	0.0327	0.0298
9	0.0279	0.0250	40	0.0327	0.0298
10	0.0280	0.0251	41	0.0327	0.0298
11	0.0281	0.0252	42	0.0327	0.0298
12	0.0281	0.0252	43	0.0329	0.0300
13	0.0283	0.0253	44	0.0329	0.0300
14	0.0283	0.0254	45	0.0329	0.0300
15	0.0283	0.0254	46	0.0330	0.0301
16	0.0284	0.0255	47	0.0332	0.0303
17	0.0285	0.0256	48	0.0334	0.0305
18	0.0303	0.0274	49	0.0334	0.0305
19	0.0308	0.0279	50	0.0334	0.0305
20	0.0308	0.0279	51	0.0335	0.0306
21	0.0312	0.0283	52	0.0337	0.0307
22	0.0313	0.0284	53	0.0337	0.0308
23	0.0313	0.0284	54	0.0342	0.0313
24	0.0315	0.0286	55	0.0344	0.0315
25	0.0315	0.0286	56	0.0344	0.0315
26	0.0315	0.0286	57	0.0344	0.0315
27	0.0317	0.0288	58	0.0349	0.0319
28	0.0318	0.0288	59	0.0354	0.0325
29	0.0320	0.0291	60	0.0356	0.0327
30	0.0320	0.0291	61	0.0361	0.0332
31	0.0322	0.0293	62	0.0362	0.0333
32	0.0323	0.0294	63	0.0367	0.0338
Média				0.031	0.028
Desvio Padrão					0.003
Espalhamento Nominal					13.60%
Valor Mínimo					0.017
Valor Máximo					0.034

Nota: tempos em milissegundos.

(*) O espalhamento nominal foi determinado comparando a média obtida nos ensaios com o valor real.

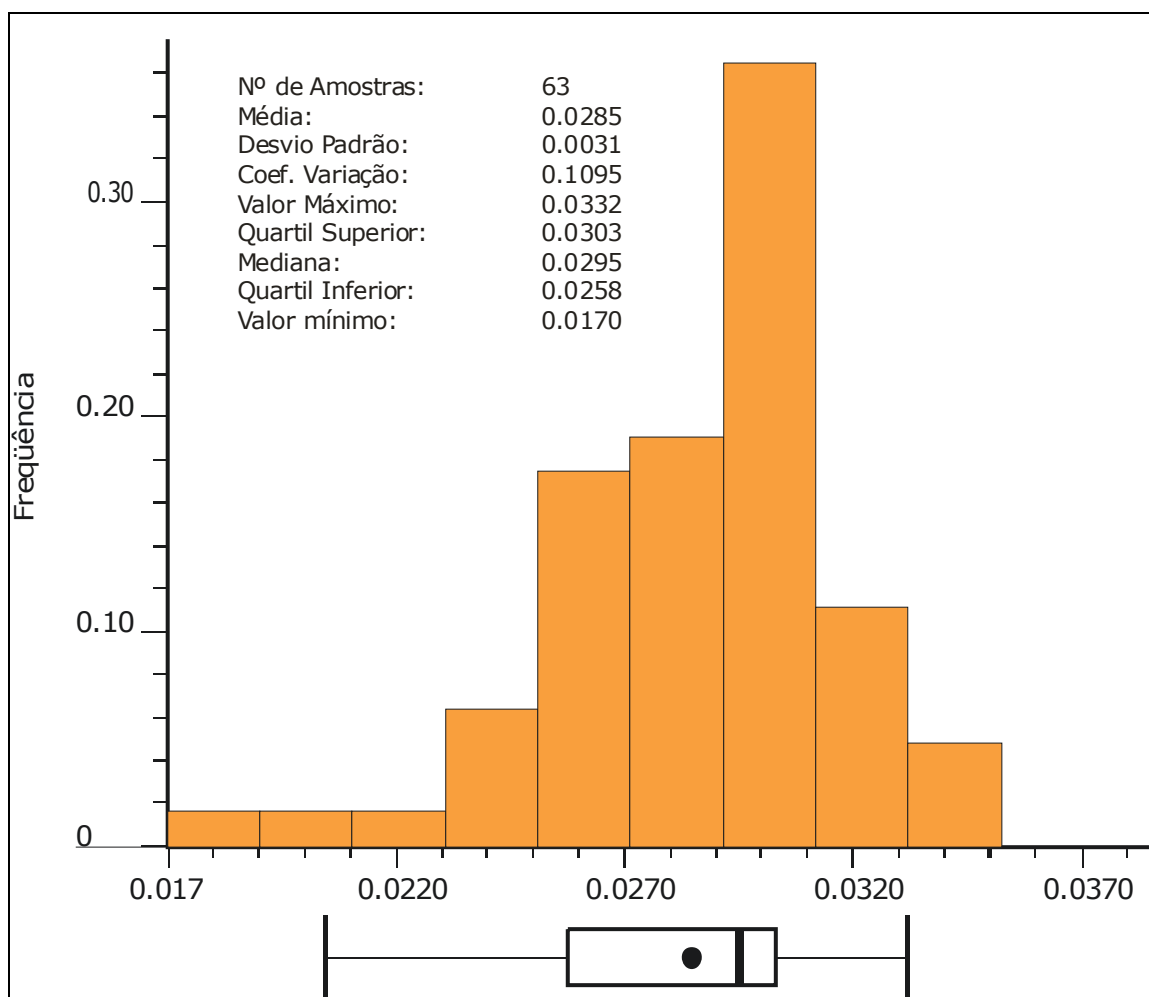


Figura 5.8 Histograma obtido com os dados dos três ensaios de campo realizados com retardos de 25 ms.

5.2.2 Ensaio com retardos de 650 ms

Os testes de campo para determinar a variabilidade de tempo dos retardos de 650 ms foram executados segundo os mesmos critérios adotados para os retardos de 25 ms como exposto no item 5.2.1 deste capítulo. Foram realizados dois testes com os retardos de 650 ms que obedeceram à configuração conforme mostrado na Figura 5.9.

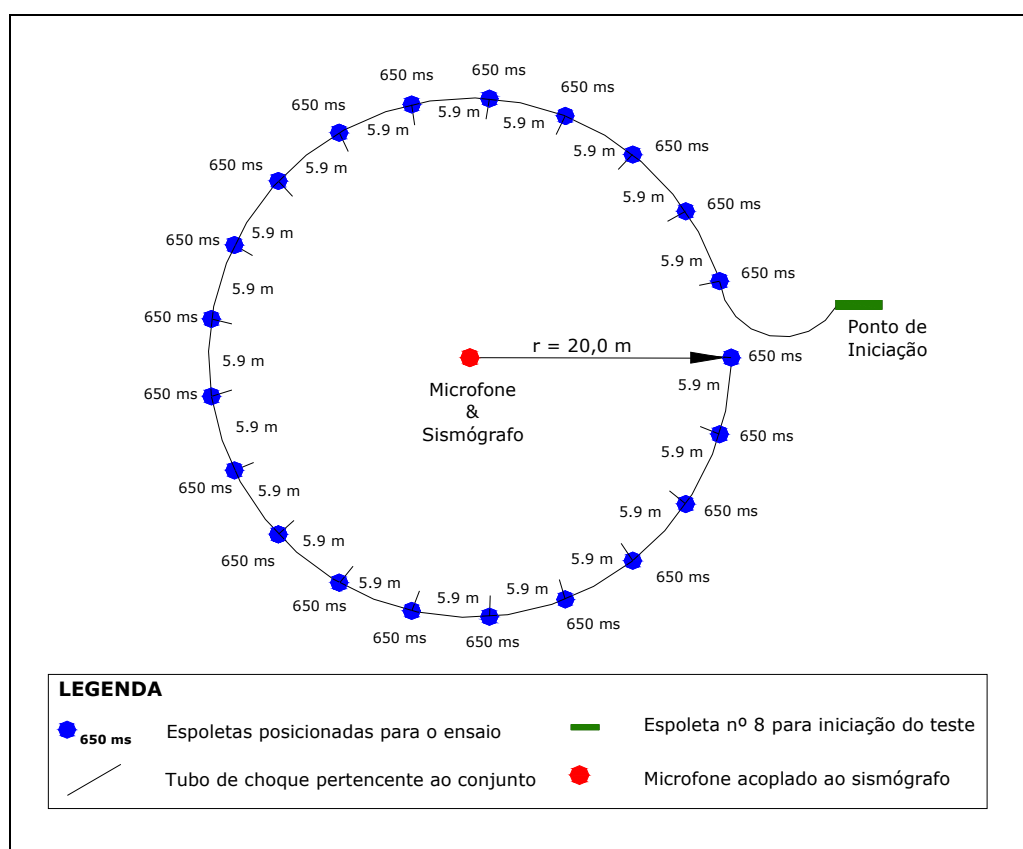


Figura 5.9 Configuração adotada para os testes de campo com retardos de 650 ms.

A partir dos dados obtidos em campo, foram gerados os registros de ruído conforme os procedimentos adotados para os retardos de 25 ms e descrito no item 5.2.1. Nas Figuras 5.10 e 5.11 podem ser visualizados os registros de ruído relativos aos dois ensaios de campo. Para uma análise quantitativa dos dados fornecidos pelos registros de ruído elaborou-se a Tabela 5.2.

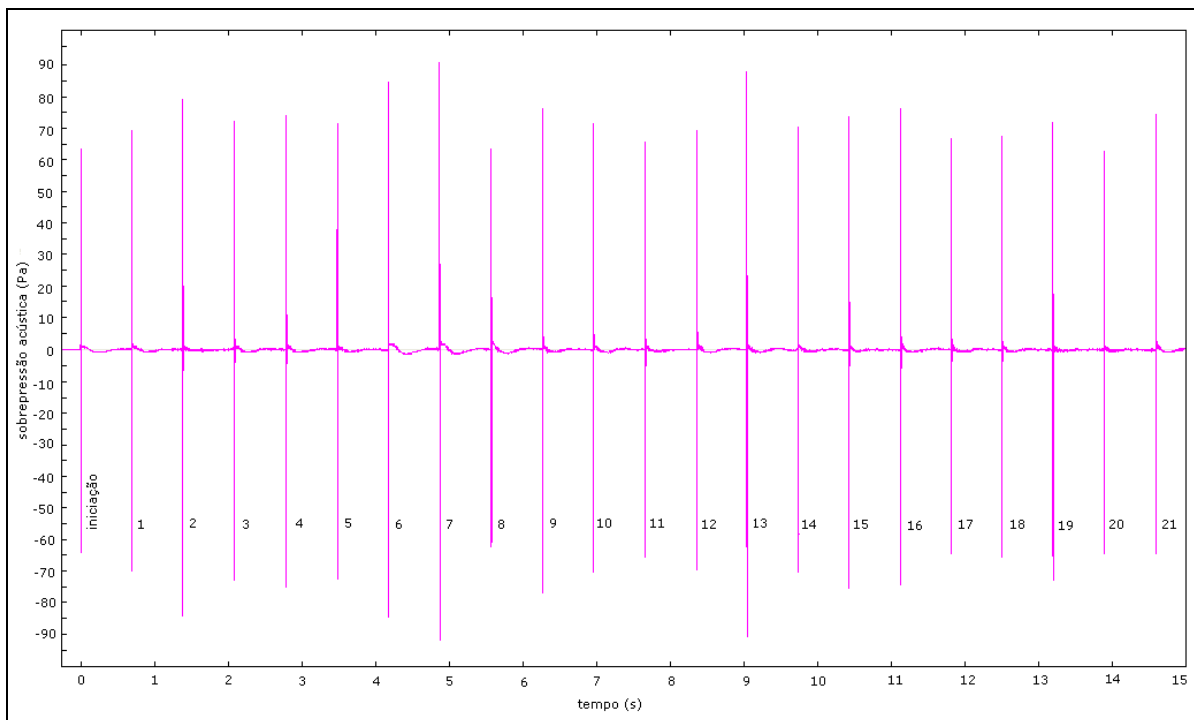


Figura 5.10 Registro de ruído obtido com o teste de campo nº 1 realizado com retardos de 650 ms.

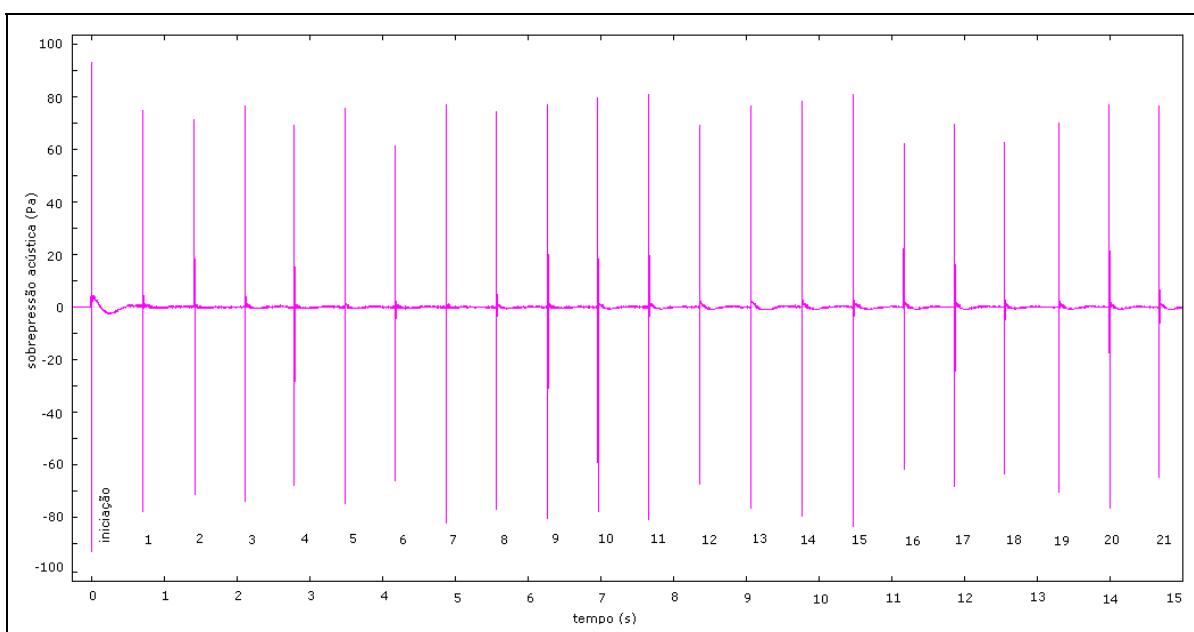


Figura 5.11 Registro de ruído obtido com o teste de campo nº 2 realizado com retardos de 650 ms.

A Tabela 5.2 juntamente com o histograma mostram um resumo com o valor da média e do desvio padrão determinado para o tempo de retardo de 650 ms segundo a metodologia descrita no item 5.1 deste capítulo.

Tabela 5.2 Tempos obtidos nos ensaios para retardo de 650 ms.

Evento	Tempos	Registro	Real
1		0.677	0.674
2		0.677	0.674
3		0.684	0.681
4		0.685	0.682
5		0.687	0.684
6		0.688	0.685
7		0.688	0.685
8		0.689	0.686
9		0.691	0.688
10		0.691	0.688
11		0.692	0.689
12		0.692	0.689
13		0.692	0.689
14		0.693	0.690
15		0.693	0.690
16		0.693	0.690
17		0.693	0.690
18		0.694	0.691
19		0.695	0.692
20		0.695	0.692
21		0.696	0.693
22		0.697	0.694
23		0.697	0.694
24		0.697	0.694
25		0.698	0.695
26		0.698	0.695
27		0.700	0.697
28		0.700	0.697
29		0.702	0.699
30		0.702	0.699
31		0.702	0.699
32		0.702	0.699
33		0.704	0.701
34		0.705	0.702
35		0.705	0.702
36		0.705	0.702
37		0.706	0.703
38		0.707	0.704
39		0.708	0.705
40		0.709	0.706
41		0.711	0.708
42		0.745	0.742
Média		0.697	0.694
Desvio Padrão		0.011	0.011
Espalhamento Nominal (*)			6.77%
Valor Mínimo			0.674
Valor Máximo			0.742

Nota: tempos em milissegundos.

(*) O espalhamento nominal foi determinado comparando a média obtida nos ensaios com o valor real.

De posse dos dados da Tabela 5.2, foi gerado o histograma (Figura 5.12).

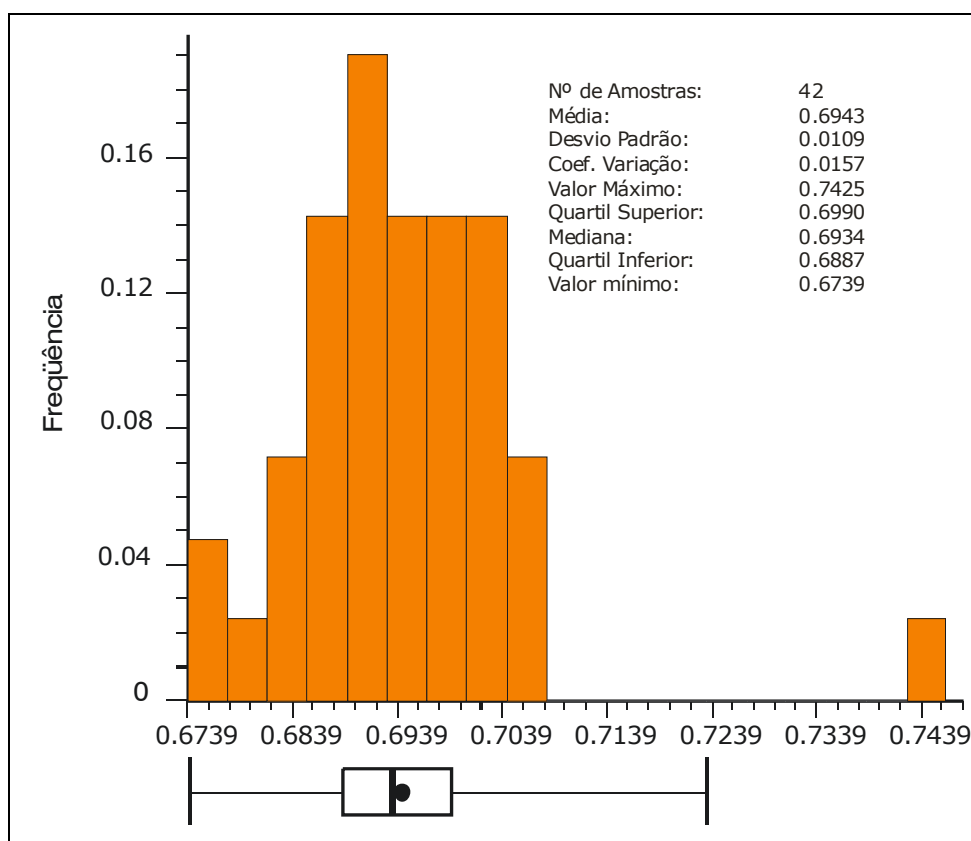


Figura 5.12 Histograma obtido com os dados dos ensaios de campo realizados com retardos de 650 ms.

5.3 Análise da metodologia e dos resultados obtidos

A metodologia aplicada no estudo de variabilidade dos retardos para sistemas de iniciação com tubo de choque demonstrou ser:

- i. uma técnica segura;
- ii. de custo reduzido;
- iii. de rápida execução;
- iv. fornece a precisão necessária para o tipo de aplicação.

A técnica é mais segura por ser possível ser aplicada em uma pequena área ao ar livre e o envolvimento pequeno de mão-de-obra. Os custos envolvidos são baixos por envolverem somente um tipo de equipamento de fácil operação no caso, um sismógrafo digital.

Com um técnico e um auxiliar pode-se executar várias medidas num curto

espaço de tempo. A determinação dos espalhamentos de tempos dos retardos com o emprego de medidas de sobrepressão acústica permitem que o próprio usuário possa determinar com rapidez e confiabilidade, quais as tolerâncias que o seu projeto de desmonte suporta em função das alternativas encontradas no mercado.

Os dados obtidos com os ensaios desenvolvidos não permitem fazer uma análise mais detalhada pois foram realizados testes com somente dois tempos de retardos. O sistema com tubo de choque testado possui espoletas com mistos de retardos desenvolvidos a um custo mais baixo para viabilizar o emprego em desmonte subterrâneo de carvão, podendo apresentar um espalhamento de tempo maior.

Testes com todos os tempos, de cada fabricante, seriam de grande valia. Haveria um ganho de qualidade no desmonte, já que os custos envolvidos nessa operação são elevados e cobririam o investimento a ser realizado neste controle.

Capítulo 6

Conclusões e recomendações

Nessa seção são apresentadas as conclusões finais relacionadas aos trabalhos que originaram esta dissertação com base na meta e nos objetivos propostos no Capítulo 1, item 1.1 e 1.2, respectivamente. Também são sugeridas algumas recomendações para desenvolvimento de trabalhos futuros.

- Os procedimentos adotados para o levantamento de dados de geometria mostraram-se eficientes na geração de um banco de dados para o acompanhamento do desmonte. Os dados gerados a partir da amostragem dos parâmetros relativos à geometria mostram a necessidade de alterações no plano de fogo empregado e na sua execução nas frentes de produção. As baixas eficiências dos avançamentos observados nos desmontes monitorados mostram a necessidade da adoção de um projeto de plano de fogo que venha a contemplar uma prática de perfuração e carregamento dos furos com explosivos de acordo com técnicas modernas correntes e fartamente ilustradas na literatura.
- O emprego da técnica de medida de eficiência da fragmentação com a adoção de um procedimento mais simples, que é o uso de imagens a partir de fotografias da pilha de desmontado, demonstrou ser uma técnica de resposta rápida, eficiente e com custo competitivo se

comparada com *softwares* específicos existentes no mercado. Nas análises de imagens, pode-se observar que a geração de blocos grosseiros que causam problemas nos pontos de transbordo do material desmontado tem origem em deslocamentos de blocos do teto imediatamente após as detonações e, em alguns casos são agravados em função da qualidade do maciço rochoso (tipo e tamanho de descontinuidades, etc.) no local do desmonte.

- A incorporação de medidas de vibrações mostrou-se adequada como ferramenta de diagnóstico do desempenho do desmonte. A análise qualitativa dos sismogramas obtidos com o monitoramento sismográfico dos desmontes possibilitou identificar falhas nos iniciadores/explosivos e correlacioná-las com os dados fornecidos pelos levantamentos de geometria do desmonte. A partir da análise dos sismogramas foi possível visualizar a necessidade de ajustes na malha do plano de fogo. Este fato é revelado pelos níveis mais elevados de vibração apresentados pelos furos presentes na parte central da galeria (quadração).
- A metodologia proposta com vistas a adequar o emprego de ANFO a condições particulares de minas subterrâneas de carvão sul-brasileiras mostrou-se ser satisfatória no desmonte. Os testes de desempenho revelaram resultados de avanço médio comparável à prática atual de desmonte permitindo vislumbrar uma redução inicial de custos em torno de 25% se comparado com os tipos de explosivos empregados no desmonte de produção. Além das melhorias que deverão ser incorporadas ao encartuchamento, uma solução para a retirada da água dos furos, principalmente os executados no Banco, resultaria em uma grande contribuição para um melhor desempenho do agente explosivo.
- A aplicação da metodologia detalhada no Capítulo 5 visando o controle de qualidade (variabilidade) do sistema de iniciação dos desmontes com tubo de choque, demonstrou ser uma técnica segura e eficiente. A determinação dos espalhamentos de tempos dos retardos com o

emprego de medidas de sobrepressão acústica permite que o próprio usuário possa determinar com rapidez e confiabilidade quais as tolerâncias que o seu projeto de desmonte suporta em função das alternativas encontradas no mercado. Os custos envolvidos com equipamentos (sismógrafo) poderão ser rapidamente absorvidos pela qualidade que será incorporada ao desmonte e da preocupação pelos fornecedores de disponibilizar um produto com maior confiabilidade.

Recomendações para Trabalhos Futuros

Com o intuito de dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos nesta dissertação, algumas sugestões para a realização de trabalhos são abaixo sugeridas utilizando a metodologia de análise de eficiência aqui desenvolvida:

- Estudo de desempenho do desmonte frente a alternativas de explosivos existentes no mercado por tipo e por fabricante, gerando cenários alternativos para tomada de decisão mais eficaz do ponto de vista técnico e econômico.
- Medidas de velocidade de detonação com equipamento adequado para uma melhor avaliação do desempenho do explosivo frente às condições exigidas pelo desmonte de produção.
- Desenvolvimento de testes com ANFO em diferentes granulometrias e para misturas baseadas em nitrato de amônio do tipo industrial e agrícola com óleo diesel e outros tipos de óleos.
- Seleção de outros tipos de explosivos para serem empregados como iniciadores de ANFO, ampliando o leque de explosivos viáveis do ponto de vista de desempenho e custo.
- Desenvolver estudos com o carregamento pneumático de ANFO no

desmonte.

- Realização de um estudo de variabilidade dos tempos do sistema de iniciação com tubo de choque incorporando todos os tempos utilizados nos desmontes e ampliar o leque de fabricantes.

Referências Bibliográficas

- ADAMSON, W.R. & BAILEY, J.J. 1999. *Use of Blast Engineering Technology to Optimize Drilling and Blasting Outcomes at the Olympic Dam Underground Mine*, In: Proceedings, 6th International Symposium for Rock Fragmentation by Blasting, Johannesburg, África do Sul, USA, p.273-280.
- ADAMSON, W.R., & LUND A.S. 2001. *On the Use of Mechanistic Blast-Outcome Measurement and Modelling for Optimization of Explosive Selection in Underground Mining*, In: Proceedings, Explo 2001, Hunter Valley, NSW, Australia, p.1-8.
- ADAMSON, W.R., SCHERPENISSE, C.R. & DIAZ, J.C. 1999. *The Use of Blast Monitoring/Modelling Technology for the Optimization of Development Blasting*, In: Proceedings, Explo 1999, Melbourne, Australia, p.35-42.
- ANDERSON, D.A. & REIL, L.W. 1988. *Measuring Fragmentation of a Blast Using Ground Vibration*, In: Research Proceedings, 14th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Anaheim, CA, USA, p.60-71.
- ANON. 1998. *Perfil Empresarial*, Empresas Guglielmi, Criciúma, SC, 12 p.
- BELLAIRS, P.G. 1995. *Optimum Drill and Blast an ever Changing Target*, In: General Proceedings, 21st Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Orlando, Florida, USA, p.46-58.
- BELLAIRS, P.G. 1997. *Explosive Ground Reactivity Indicators and Strategies to Overcome this Phenomena*, In: General Proceedings, 23rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Las Vegas, NV, USA, p.475-487.

- CAMERON, A.R., KLEINE, T.H. & FORSYTH, W.W. 1995. *Computer Assisted Blast Design and Assessment Tools*, In: Research Proceedings, 21st Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Orlando, Florida, USA, p.334-344.
- CASTRO, R.S. & PARRAS, M.M. 1986. *Manual de Ferramentas de Perfuração*, Fagersta Secoroc Ind. e Comércio Ltda., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 225 p.
- CHIAPPETTA, R.F. & REIL, J.W. 1986. *Effects of Accurate MS Delays on Productivity, Energy Consumption at the Primary Crusher, Oversize, Ground Vibrations and Airblast*, In: General Proceedings, 12th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Atlanta, Georgia, USA, p.213-234.
- CROSBY, W.A. 1998. *Drilling and Blasting in Open Pit and Quarries*, Mining Resource Engineering Ltd. - MREL, Kingston, Ontario, Canada, v. 1, 326 p.
- DEACON, C., DUNIAM, P. & JONES, M. 1997. *Improved Blast Control Through the Use of Programmable Delay Detonators*, In: General Proceedings, 23rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Las Vegas, NV, USA, p.55-66.
- DEUTSCH, C.J. & JOURNEL, A.G. 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, New York, 2ª edição, 369 p.
- DICK, R.A. 1973. *Explosives and Borehole Loading*. Subsection 11.7, SME Mining Engineering Handbook, Ed. By A. B. Cummins and A. Given, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., New York, USA, v. 1, p. 11-78-11-99.
- DORDJEVIC, N. 1997. *Minimizing the Environmental Impact of Blast Vibrations*, In: Mining Engineering, Vol. 49, nº 4, p.57-61.
- DOWDING, C.H. 1985. *Blast Vibration Monitoring and Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 297 p.

- DRURY, F. C. 1980. *Ammonium Nitrate Blasting Agents from Manufacture to Field Use*, In: General Proceedings, 6th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Tampa, Florida, USA, p.415-427.
- ELORANTA, J. 1992. *Cap Testing at the Minntac Mine*, In: General Proceedings, 18th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Orlando, FL, USA, p.205-209.
- FABRÍCIO, J. A. C. 1973. *Projeto Carvão de Santa Catarina*, Ministério de Minas e Energia, DNPM/CPRM, Volume 1, 182 p.
- FORSYTH, W.W., KLEINE, T.H. & CAMERON, A.R. 1995. *Inaccurate Blasthole Drilling*, In: General Proceedings, 21st Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Orlando, Florida, USA, p.36-42.
- GADBERRY, A.R. 1981. *Mine Planning – Its Effect on Drilling and Blasting*, In: General Proceedings, 7th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Phoenix, AZ, USA, p.108-112.
- GADBERRY, A.R. 1985. *Management's Effect on Drilling and Blasting*, In: General Proceedings, 11th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, San Diego, CA, USA , p.284-290.
- HARTMAN, H.L. 1987. *Introductory Mining Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 633 p.
- HEILIG, J.H. & MCKENZIE, C.K. 1988. *Delay Variability – The Measurement, Analysis and Implication on Rock Blasting*, In: Explosives in Mining Workshop, Melbourne Victoria, Australia, 6 p.
- HENDRICKS, C., SCOBLE, M., PECK, J. & SZYMANS, J. 1991. *Blasthole Deviation: Measurement, Mechanisms and Impact on Dilution*, In: General Proceedings, 17th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Las Vegas, NV, USA, p.11-20.
- HOPLER, R.B. 1998. *ISEE Blaster's Handbook*, International Society of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, USA, 17th ed., 742 p.

- HUSTRULID, W. 1999. *Blasting Principles for Open Pit Mining*, A. A. Balkema, Rotterdam, Holanda, v. 1, 382 p.
- INSTANTEL INC. 1995. *Minimate Plus Operator Manual*, InstanTEL Inc., Kanata, Canadá, 81 p.
- KATSABANIS, P.D., LIU, L., DOMBROWSKI, D. & STEEVES, K. 1995. *Blast Control Using Accurate Detonators*, In: Research Proceedings, 21st Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Orlando, FL, USA, p.131-144.
- KLEINE, T.H. & CAMERON, A.R. 1997. *A Blast Fragmentation Measurement and Prediction System for Blast Optimization*, In: Research Proceedings, 23rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Las Vegas, NV, USA, p.89-99.
- KONYA, C.J. & DAVIS, J. 1978. *The Effects of Stemming consist on Retention in Blastholes*, In: General Proceedings, 4th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, New Orleans, LA, USA, p.102-111.
- KONYA, C.J., BRITTON, R. & LUKOVIC, S. 1987. *Charge Decoupling and its Effect on Energy Release and Transmission for One Dynamite and Water Gel Explosive*, In: General Proceedings, 13th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Miami, Florida, USA, p.14-22.
- KONYA, C. J. 1989. *High Precision Cap Accuracy – An Independent Study*, In: General Proceedings, 15th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, New Orleans, New Orleans, LA, p.419-428.
- KONYA, C.J. 1995. *Blast Design*, Intercontinental Development Corporation, Montville, Ohio, USA, 230 p.
- KURCEWICZ, J.A., COSTA, J.F.C.L., KOPPE, J.C. & MONTEDO, E.D. 2002. *Implantação de Agente Explosivo à Base de Nitrato de Amônio em Lavra Subterrânea de Carvão*, Em: II Congresso Brasileiro de Mina a

Céu Aberto & II Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, CD-ROM, artigo técnico nº 42.

LANGFORS, U. & KIHSTRÖM, B. 1963. *The Modern Technique of Rock Blasting*, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, and Almqvist & Wiksell, Stockholm, Sweden, 425 p.

LIU, Q., BAUER, A. & HEATER R. 1988. The Channel Effect for ANFO Slurries and Emulsions, In: Research Proceedings, 14th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Anaheim, CA, USA, p.33-44.

MAERZ, N.B., FRANKLIN, J.A. & COURSEN, D.L. 1987. *Fragmentation Measurement for Experimental Blasting in Virginia*, In: Research Proceedings, 13th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Miami, Florida, USA, p.56-68.

MANCINI, R., BORLA, G., & BIANCHINI, S. 1995. *Analysis of Rock Vibration from Decomposed Tunnel Rounds*, In: Research Proceedings, 21st Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Orlando, Florida, USA, p.190-200.

MÁXIMO, A., & ALVARENGA, B. 1998. *Curso de Física*, Editora Scipione Ltda., São Paulo, Brasil, v. 2, 515 p.

MOHANTY, B. & DESHAIES, R. 1992. *Conditions for Sympathetic Initiation of Explosives in Small Diameters*, In: Research Proceedings, 18th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Orlando, Florida, USA, p.1-14.

MOHANTY, B. & YANG, R. 1997. *Blasting Vibrations and Explosive Performance*, In: Research Proceedings, 23rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Las Vegas, NV, USA, p.15-26.

MOHANTY, B. & YANG, R. 1998. *Optimization of Development Drilling and Blasting in an Underground Mine*, In: General Proceedings, 24th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, New Orleans, LA, USA, p.441-449.

- MORHARD, R.C. 1987. *Explosives and Rock Blasting*, Atlas Powder Company, Washington, USA, 662 p.
- MOXON, N.T., ARMSTRONG, L.W. & RICHARDSON, S.B. 1993. *The Effects of Confinement on Fragmentation and Movement*, In: Research Proceedings, 19th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, San Diego, CA, USA, p.119-129.
- MUNARETTI, E. 2002. *Desenvolvimento e Avaliação de Desempenho de Misturas Explosivas a Base de Nitrato de Amônio e Óleo Combustível*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 249 p.
- NIE, S. 1993. *Dead-pressing Phenomenon in Emulsion Explosives*, In: Research Proceedings, 19th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, San Diego, CA, USA, p.1-7.
- NIE, S. 1997. *Pressure Desensitization of a Gassed Emulsion Explosive in Comparison with Micro-balloon Sensitized Emulsion Explosives*, In: Research Proceedings, 23rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Las Vegas, NV, USA, p.161-170.
- NOY, M. & BOOTH, G. 1997. *2D versus 3D Fragmentation Analysis: Preliminary Findings*, In: Research Proceedings, 23rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Las Vegas, NV, USA, p.181-189.
- OLOFSSON, S.O. 1988. *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*, Applex, Ärla, Sweden, 304 p.
- OSEN, L. 1985. *Improved Fragmentation and Safety with Proper Borehole Loading Techniques*, In: General Proceedings, 11th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, San Diego, California, USA, p.306-316.
- OTUONYE, F.O. 1985. *An Assessment of Size Distribution of Rock Fragments from Blasting in an Underground Hardrock Mine*, In: Research Proceedings, 11th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, San Diego, CA,

USA, p.69-78.

- PERSSON, P.A., HOLMBERG R., & LEE, J. 1993. *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press Inc, Boca Raton, USA, 540 p.
- PORTER, P.H. 1984. *Ammonium Nitrate Blasting Agents Quality Testing for Maximum Benefit*, In: General Proceedings, 10th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Lake Buena Vista, Florida, USA, p.287-296.
- REVEY, G.F. 1998. *Effects and Control of Overbreak in Underground Mining*, In: Mining Engineering, Vol. 50, nº 8, p.53-67.
- RHOLL, S.A., GRANNES, S.G. & STAGG, M.S. 1993. *Fragment Size Distribution Assessment Using a Digital Image Based Measurement System*, In: Research Proceedings, 19th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, San Diego, CA, USA, p.241-248.
- ROSSETI, M. & PREISZ, G. 1963. *Small Diameter ANFO Blasting Methods Cut Underground Mining Costs at Aguilar*, In: Engineering & Mining Journal, Vol.164, nº 12, p.94-97.
- ROY, P.R. & SINGH, T.N. 1999. *Effect of Delay Scattering on Blasting Performance*, In: Proceedings, 25th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Nashville, TN, USA, p.1-18.
- SCOBLE, M.J., LIZOTTE, Y. C., SINGH, A., HENDRICKS, C. & MOHANTY, B. 1991. *Fragmentation Interaction with Underground Mining Systems and Productivity*, In: Research Proceedings, 17th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Las Vegas, NV, USA, p.79-90.
- SCOTT, A. 1996. *Open Pit Blast Design – Analysis and Optimization*, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Brisbane, Australia, 341 p.
- SEN, G.C. 1995. *Blasting Technology for Mining and Civil Engineers*, University of South Wales Press, Sidney, Australia, 145 p.
- SINGH, A., SCOBLE, M. & LIZOTTE, Y. 1990. *Blast Fragmentation Size Analysis*

- Techniques and Application Experience*, In: General Proceedings, 16th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Orlando, Florida, USA, p.17-28.
- SINGH, S.P. 1996. *The Influence of Geology on Blasthole Deviation*, In: General Proceedings, 22nd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Orlando, Florida, USA, p.320-330.
- SMITH, J.J.F. 1982. *Pneumatic Loading of ANFO Underground*, In: General Proceedings, 8th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, New, Orleans, USA, p.251-261.
- VUILLAUME, P.M., & BOUVET, J.M. 1993. *Explosive Performance and Blasting Advantages of Microporous and Low Density Ammonium Nitrate – Based ANFO*, In: General Proceedings, 19th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, San Diego, CA, USA, p.19-32.
- WITHEY, M.W. 1995. *Professional Steps in the Blasting Process*, In: General Proceedings, 21st Annual Conference on Explosives & Blasting Technique, Orlando, Florida, USA, p.240-247.
- WORSEY, P., KOPPE, J. & MUNARETTI, E. 2000. *Blasting Technology and New Trends, Course Notes*, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 198 p.
- XUGUANG, W. 1994. *Emulsion Explosives*, Metallurgical Industry Press, Beijing, China, 386 p.

Anexos

(Em CD-ROM)

Anexo A - Dados dos desmontes

Anexo B - Sismogramas

**Anexo C - Fotografias – Análise da
fragmentação**

**Texto completo da dissertação em arquivo
com formato .pdf**

**Apresentação da defesa em arquivo com
formato .pdf**