

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
MISTURAS EXPLOSIVAS A BASE DE
NITRATO DE AMÔNIO E ÓLEO COMBUSTÍVEL**

ENRIQUE MUNARETTI

Tese para obtenção do título
de Doutor em Engenharia

PORTO ALEGRE
2002

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
MISTURAS EXPLOSIVAS A BASE DE
NITRATO DE AMÔNIO E ÓLEO COMBUSTÍVEL**

ENRIQUE MUNARETTI
Engenheiro de Minas

Tese apresentada ao programa de Pós - Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa / Tecnologia Mineral

PORTO ALEGRE
2002

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador

**Prof. Dr. Jair Carlos Koppe
UFRGS - Brasil**

Co - Orientador

**Prof. Dr. Paul Nicholas Worsey
UMR- USA**

Banca Examinadora

**Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston
USP-Brasil**

**Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa
UFRGS - Brasil**

**Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima
UFPB - Brasil**

**Prof. Dr. Jair Carlos Koppe
Coordenador PPGEM**

Aos meus Pais

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Jair Carlos Koppe, pelo apoio total, pelo estímulo constante, espírito crítico, pela orientação e por ter acreditado na idéia desse trabalho, além de sempre ter sido um bom amigo.

Ao Professor João Felipe Coimbra Leite Costa pelo incentivo, paciência, dedicação, questionamento e rigor científico e também, a convivência e amizade.

Ao pessoal do Rock Mechanics and Explosives Research Center - RMERC e University Missouri-Rolla - UMR, Mark Schmidt, Jason Baird, Adam Dorrell, John Bowles, Eric Allain, Barbara Robertson, Terri Boswell e especialmente ao Professor Paul Nicholas Worsley que sempre esteve disponível para explicar todos os detalhes da arte e da ciência dos explosivos, por abrir portas nos USA, pelas críticas e pelos elogios. A Gill Worsley, pela revisão do texto na versão inicial (inglês).

Ao colega Leandro Oliveira (LPM), ao Professor Carlos A. K. Thomas e seus alunos Andre Cervieri e Guilherme Schimidt do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, pela dedicação e ajuda no desenvolvimento do sistema de medição de velocidade VAR.

Aos colegas do LPM que ajudaram diretamente nos testes, Paul Cézanne Pinto, Gianfrancesco O. Cerutti, Alex F. Ferrari, Evandro Santos, Diogo Tasca, Anderson Weiss e Anderson Oliveira da Silva. Ao Professor Paulo Salvadoretti e ao colega José A. Kurcewicz, pelas idéias e sugestões fundamentais para este trabalho, bem como Sergio L. Klein, Izaac Kopezinsky, Roger Stangler, Keli Goulart e Professor André Zingano.

As secretárias Carla Fraga e Adriane Elguy do LPM, Beatriz Ferraz (PPGEM) e Lorací I. da Silva (Fundação Luiz Englert).

A todos os funcionários da Copelmi Mineração Ltda., principalmente ao engenheiro responsável pela lavra da empresa que criou todas as condições necessárias para realizar essa tese, João Francisco Linck Feijó, aos supervisores diretamente envolvidos nos testes, Luis Antônio Abadi e Silva e seu colega Mauricio Casara, a laboratorista Daniela Medeiros e ao Gerente Industrial, Cezar Armando Medina Pinto.

Ao pessoal da MREL, principalmente Dr. William Crosby e Dr. William Bauer pelos esclarecimentos relacionados à medição de velocidade de detonação.

A equipe Pilar Fértil Ltda. pela disponibilidade e boa vontade no esclarecimento de questões relativas a nitrato de amônio, principalmente o Diretor Sergio Gabriel Comprido e o Consultor Ronaldo Gomide.

Ao CNPq, entidade federal que financiou esse trabalho.

A Marcia Taffe pelo carinho, incentivo e paciência.

Agradeço aos professores do PPGEM e a todos os colegas do Laboratório de Planejamento e Pesquisa Mineral - LPM, onde os professores Jair C Koppe e João F C L Costa tem conseguido criar e manter a estrutura perfeita para que se possam realizar trabalhos como esse. Esta tese é um grande trabalho de equipe do laboratório, onde todos ajudaram e acreditaram na idéia inicial. Muito obrigado a todos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XIXI
RESUMO	XXI
ABSTRACT	XXIII
1. Introdução	1
1.1 Escopo da Tese	2
1.2 Metodologia	3
1.3 Importância do Estudo	4
1.4 Estrutura da Tese	5
2. Revisão dos Conceitos Básicos de Nitrato de Amônio e ANFO	6
2.1 Historia do ANFO	6
2.2 Fabricação de Nitrato de Amônio	13
2.2.1 Produtos de Nitrato de Amônio	15
2.3 Combustível	16
2.3.1 Petróleo	17
2.3.2 Propriedades dos combustíveis a base de Petróleo	18
2.3.3 Propriedades dos Óleos Lubrificantes	18
2.4 Combustão	19
2.4.1 Aspectos Físicos e Químicos	20
2.4.2 Reação de Redução e Oxidação (Redox)	20
2.5 Teoria de Detonação	21
2.5.1 Detonação Ideal	21
2.5.2 Detonação não ideal	22
2.5.3 Mecanismos de Quebra de Rocha	23
2.6 Propriedades do NA e ANFO	26
2.6.1 Recobrimento	26
2.6.2 Balanço de Oxigênio	27
2.6.3 Influência da Água	31

2.6.4 Absorção de Óleo	32
2.6.5 Razão de Acoplamento	33
2.6.6 Diâmetro de Partícula	33
2.6.7 Confinamento	34
2.6.8 Densidade de Carregamento	36
2.6.9 Diâmetro de Furo Crítico	38
2.6.10 Empedramento (<i>Caking</i>)	39
2.6.11 Temperatura	39
2.6.12 Testes de Sensibilidade	40
2.6.13 Carga Iniciadora (<i>Priming</i>)	41
2.7 Avaliação de Desempenho de ANFO	45
2.7.1 Força de um Explosivo	46
2.7.2 Pressão de Detonação	50
2.7.3 Pressão de Explosão (Gás)	51
2.7.4 Geração de Onda Sísmica (<i>Near Field Vibration</i>)	51
2.7.5 Calorimetria	52
2.7.6 Avaliação de Fragmentação	53
2.7.7 Consumo de Equipamento de Carregamento	53
2.7.8 Crateramento	54
2.7.9 Velocidade de Detonação (VoD)	54
3. Trabalho Experimental	60
3.1 Local de Testes de Campo	61
3.1.1 Geologia	63
3.1.2 Método de Lavra	65
3.1.3 Desmonte com Explosivos	65
3.2 Caracterização do Maciço Rochoso	67
3.2.1 Critério de RQD	68
3.2.2 Resistência à Compressão	69
3.2.3 Densidade	70
3.3 Caracterização do Óleo Combustível	72
3.3.1 Composição Química	74
3.3.2 Ponto de Fulgor	76

3.3.3 Densidade	77
3.3.4 Viscosidade	78
3.3.5 Ponto de Escorrimento (Pour Point)	80
3.3.6 Conteúdo de Água	80
3.4 Caracterização de Nitrato de Amônio	81
3.4.1 Porosidade	82
3.4.2 Cobertura	83
3.4.3 Absorção de Óleo	84
3.4.4 Segregação / Retenção	88
3.4.5 Densidade	89
3.4.6 Tamanho de Partícula	89
3.4.7 Estrutura Cristalina	90
4. Os Agentes Explosivos	92
4.1 Formulação	92
4.2 Aditivos	93
4.2.1 Sensibilizante	93
4.2.2 Modificadores de Densidade	94
4.3 Resistência à água	96
4.4 Sensibilidade a Espoleta	98
4.5 Iniciação (<i>Priming</i>)	100
4.5.1 Acoplamento Total (a granel)	101
4.5.2 Semi Coupling - Liners	101
4.5.3 Espaço Anelar	102
4.6 Avaliação de Desempenho por Velocidade de Detonação (VoD)	105
4.6.1 Desenvolvimento de Sistema de Medida de VoD Ponto-a-Ponto (VAR)	105
4.6.2 Comparação com Outros Sistemas de VoD	111
5. Análise dos Dados	115
5.1 Misturas de Nitrato de Amônio e Óleo Combustível	119
5.2 Carga Iniciadora Mínima (Minimum Primer)	122
5.2.1 Comparação Entre Cargas Iniciadoras Zero e 1040 g	123
5.2.2 Comparação Entre Cargas Iniciadoras 520 e 1040 g	125
5.3 Redução de Densidade de Carregamento	126

5.3.1 Comparação entre densidades de mistura para grão (<i>prill</i>) tipo industrial	126
5.3.2 Comparação entre densidades de mistura para grão (<i>prill</i>) tipo agrícola.	128
6. Análise de Custos	130
7. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	133
BIBLIOGRAFIA	136
ANEXO I	145
ANEXO II	151
ANEXO III	247

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. O crescente consumo de nitrato de amônio para uso na mineração no mercado dos USA das cinco ultimas décadas.	11
Figura 2. Processo de sinterização do nitrato de amônio para obtenção do liquor.	13
Figura 3. Diagrama esquemático dos processos de <i>prilling</i> para confecção de NA tipo agrícola e industrial.	15
Figura 4. Processo de detonação ideal (Adaptado de Sarma, 1994; Hopler 1999).	22
Figura 5. Processo de detonação não ideal (Adaptado de Sarma, 1994; Hopler 1999).	23
Figura 6. Processo de fragmentação em detonação de bancada (Adaptado de Morhard et al., 1987).	25
Figura 7. Efeito do recobrimento com argila diatomácea em furo de 76 mm de ANFO (Adaptado de Sutton & Pugsley, 1964).	27
Figura 8. Liberação de calor por átomo de oxigênio em ANFO (Adaptado de Dick, 1972).	28
Figura 9. O efeito do balanço de oxigênio no desempenho do ANFO (Adaptado de Hopler, 1999).	31
Figura 10. Efeito da água na velocidade de detonação e iniciação de ANFO em tubos de ferro de 76 mm (Adaptado de Monsanto, 1972).	32
Figura 11. Ao lado direito, grão (<i>prill</i>) agrícola distribuído por Manah S/A. Ao lado esquerdo, grão (<i>prill</i>) industrial distribuído por Orica nos USA (aproximação de 500 X).	33
Figura 12. Efeito do diâmetro de partícula do NA no ANFO na velocidade de detonação (Adaptado de Monsanto, 1972).	34
Figura 13. O efeito do confinamento na velocidade de detonação de um ANFO (Adaptado de Dick, 1972).	35
Figura 14. O efeito do confinamento na sensibilidade.	35

Figura 15. O efeito da densidade de carregamento na velocidade de detonação de ANFO em furo de 152 mm (Adaptado de Dick, 1972).	37
Figura 16. O efeito da densidade de carregamento na sensibilidade a iniciação de ANFO em furo de 152 mm (Adaptado de Dick, 1972).	37
Figura 17. O efeito da densidade de carregamento no diâmetro crítico de mistura ANFO em ambiente confinado e não confinado (Adaptado de Monsanto, 1972).	38
Figura 18. Estados cristalinos e densidades aproximadas para grão (<i>prill</i>) de nitrato de amônio (Adaptado de Clark, 1987).	39
Figura 19. Teste 5(a) de sensibilidade à espoleta 8 (Munaretti et al, 1999).	40
Figura 20. Efeito da pressão de detonação nas velocidades de detonação iniciais de ANFO em furos de 76 mm (Adaptado de Konya, 1995).	42
Figura 21. Efeito do diâmetro de carga iniciadora na velocidade inicial de detonação de ANFO a 76 mm usando nitropenta (240 Kbar) como carga iniciadora (Adaptado de Crosby, 1998).	44
Figura 22. Teste do Morteiro Balístico (Adaptado de Mason & Aiken, 1972).	47
Figura 23. Teste do Bloco de Traulz.	49
Figura 24. O método D'Autriche (Adaptado de Morhard et al., 1987).	55
Figura 25. Localização do Município de Butiá.	62
Figura 26. Coluna estratigráfica resumida para a Mina do Recreio.	63
Figura 27. Plano de fogo típico para Mina do Recreio.	65
Figura 28. Procedimento de cálculo para RQD (Adaptado de Deere, 1989).	67
Figura 29. Índice de compressão pontual	69
Figura 30. Efeito da densidade de combustível na liberação de energia	76
Figura 31. Planta piloto de mistura (esquerda) e atual instalação (direita) para mistura de ANFO e ANWO.	80
Figura 32. Grão (<i>prill</i>) tipo agrícola e poros indicados com flechas para aumento de 25 e 500 vezes.	82
Figura 33. Grão (<i>prill</i>) tipo industrial e poros indicados com flechas para aumento de 25 e 500 vezes.	82
Figura 34. Superfície de <i>prill</i> agrícola com baixa absorção de óleo diesel indicado pelas flecha em (ANFO) ampliado 500 X.	84

Figura 35. Superfície de <i>prill</i> industrial de alta absorção de óleo diesel em (ANFOb) ampliado 500 X.	84
Figura 36. Superfície de <i>prill</i> agrícola e baixa absorção de WO em (ANWOf) ampliado 500 X.	85
Figura 37 Grão (<i>prill</i>) agrícola e óleo de soja (ANSoyf) ampliado 500 X.	85
Figura 38. Grão (<i>prill</i>) industrial e óleo de soja (ANSoyb) ampliado 500 X.	86
Figura 39. Teste de segregação ou retenção usando o cone de Inhof.	87
Figura 40. Formações de micro cristais (500 X).	90
Figura 41. Casca de arroz em aumento de 16,4 vezes (esquerda) e sua borda aumentada 600 vezes.	94
Figura 42. Sistema de fechamento de cartucho com grampo e graxa e enchimento (direita).	97
Figura 43. Configuração do Teste de Sensibilidade a Espoleta (Adaptado de U.N. ,1990).	98
Figura 44. Espaço anelar.	99
Figura 45 Carregamento com embalagem de tubo plástico (liner).	101
Figura 46. Cartucho intacto de ANFO em teste com confinamento “baixo” em tubo de PVC.	102
Figura 47 Cordel detonante de 10 g/m PETN como indicador de detonação no último (5) cartucho.	102
Figura 48. Sistema de aquisição e gravação de medição de velocidade de detonação VAR.	105
Figura 49. Diagrama esquemático do circuito elétrico do sistema VAR.	107
Figura 50. Diagrama esquemático de preparação de teste para leitura de velocidade de detonação utilizando o sistema VAR.	107
Figura 51. Queda da voltagem por intervalo de tempo registrado (traço de VoD).	108
Figura 52. Picos “espúrios” de arquivo VAR processado no software HP-Vee indicados por flecha vermelha.	109
Figura 53. Curto circuito na área ionizada da frente de detonação.	109

Figura 54. Comparação múltipla das médias de leitura de VoD para diferentes aparelhos e condições de furo.	113
Figura 55. Carregamento a granel de furo com agente explosivo.	119
Figura 56. Comparação múltipla de médias de velocidade de detonação para tipo de nitrato de amônio e óleo combustível.	121
Figura 57. Comparação múltipla de médias para velocidade de detonação entre cargas iniciadoras zero e 1040 g.	123
Figura 58. Comparação múltipla de médias para velocidade de detonação entre cargas iniciadoras de 520 e 1040 g.	124
Figura 59. Comparação múltipla de médias de velocidade de detonação entre densidade regular e modificada para misturas de nitrato de amônio tipo industrial.	126
Figura 60. Comparação múltipla de médias de velocidade de detonação entre densidades regular e reduzidas para misturas de nitrato de amônio tipo agrícola.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Consumo total aparente de NA no Brasil (t) de NA tipo industrial e agrícola no ano de 2001 e período de Janeiro a Julho de 2002.	12
Tabela 2. Estimativa de consumo de NA no Brasil para uso em desmonte	12
Tabela 3. Especificações comuns de grão (<i>prill</i>) de nitrato de amônio para ANFO (Crosby, 1998).	16
Tabela 4. Composição de combustíveis no USA* e Brasil** (Singer, 1991; DNC 31/97; National Renewable Energy Laboratory, 2001)	18
Tabela 5. Calor de formação do ANFO.	29
Tabela 6. Pressões de detonação de explosivos e agentes explosivos (Adaptado de Morhard et al., 1987).	43
Tabela 7. Brisância de alguns materiais explosivos (Feodoroff & Sheffield, 1962).	47
Tabela 8. Teste do Bloco de Traulz para alguns materiais explosivos (Persson et al., 1994).	49
Tabela 9. Velocidade de detonação em SSV de ANFO confinado a granel segundo diâmetro de furo (Morhard et al., 1987).	55
Tabela 10. Parâmetros típicos de plano de fogo da Mina do Recreio.	65
Tabela 11. Valores de RQD para a Mina do Recreio (Corrêa, 2000).	68
Tabela 12. Densidades das rochas da Mina do Recreio (Abadi, 1999).	70
Tabela 13. Características do óleo diesel no Brasil (DNC, 1997).	71
Tabela 14. Espectro de análise de óleo lubrificante usado (WO).	74
Tabela 15. Limites do MSHA em ppm para mineradoras norte americanas e concentração máxima no WO e diesel (FO) da Mina do Recreio.	75
Tabela 16. Ponto de fulgor para óleos na Mina do Recreio.	76
Tabela 17. Densidades de óleos testados na Mina do Recreio.	77
Tabela 18. Viscosidade obtida a 40 C (ASTM D445) para os óleos disponíveis para o agente explosivo na Mina do Recreio e especificação de fabricantes.	78

Tabela 19. Concentração de água nos óleos segundo procedimento recomendado pela norma ASTM D1796.	79
Tabela 20. Recobrimento no nitrato de amônio tipo agrícola e industrial.	83
Tabela 21. Absorção de óleo para NA agrícola e industrial.	86
Tabela 22. Teste de Segregação/Retenção.	87
Tabela 23. Densidade dos nitratos de amônio testados..	88
Tabela 24. Distribuição de partícula para NA agrícola (acumulado).	89
Tabela 25. Distribuição de partícula para NA industrial (acumulado).	89
Tabela 26. Possíveis densidades de carregamento para ANFO e ANWO utilizando NA agrícola e casca de arroz.	93
Tabela 27. Possíveis densidades de carregamento para ANFO e ANWO utilizando NA industrial e casca de arroz.	94
Tabela 28. Teste simples e múltiplo de dissolução na água para misturas de agente explosivo com grão (<i>prill</i>) tipo agrícola.	95
Tabela 29. Teste simples e múltiplo de dissolução na água para misturas de agente explosivo com grão (<i>prill</i>) tipo industrial.	96
Tabela 30. Diferença percentual entre NA tipo agrícola e industrial para os óleos testados.	96
Tabela 31. Classificação de reação segundo critério de diferenciação entre deflagração e detonação - DDT (Adaptado de UN, 1990).	99
Tabela 32. Percentual de material remanescente e classificação de reação por critério DDT.	100
Tabela 33. Classificação de reação segundo critério DDT confinamento rochoso e embalagem de plástico contínuo (<i>liner</i>).	101
Tabela 34. Reação segundo critério DDT em cartuchos de agente explosivo para “baixo” confinamento (PVC).	103
Tabela 35. Reação segundo critério DDT em cartuchos de agente explosivo para confinamento em rocha.	103
Tabela 36. Série de resistores comerciais utilizadas na sonda.	106

Tabela 37. Leituras de VoD utilizando sistema contínuo (InstanTel VOD Mate) contra sistema discreto VAR para emulsão encartuchada IBEGEL (Apendice II).	110
Tabela 38. Algoritmo utilizado para o cálculo do Projeto Fatorial 22 de uma repetição e Análise de Variância (ANOVA).	112
Tabela 39. Banco de dados para Projeto Fatorial utilizando VoD como resposta.	112
Tabela 40 Algoritmo utilizado para o cálculo do Projeto Fatorial 22 de uma repetição e análise por técnica ANOVA para tipo de equipamento e condição de furo.	113
Tabela 41. Banco de dados total de leituras de VoD para todas as misturas.	116
Tabela 42. Algoritmo para Projeto Fatorial 22 com n repetições e Análise da Variância.	118
Tabela 43. Projeto Fatorial 22 para tipo de óleo e nitrato de amônio.	119
Tabela 44 Cálculo de Projeto Fatorial 22 e Análise ANOVA para tipo de óleo e nitrato de amônio.	120
Tabela 45. Médias de leituras de VoD, número de testes com deflagração e desvio padrão para amostras iniciadas com zero, 520 e 1040 g de carga iniciadora emulsão.	122
Tabela 46 Cálculo de Projeto Fatorial 22 e Análise ANOVA para carga iniciadora zero e 1040g.	123
Tabela 47 Cálculo de Projeto Fatorial 22 e Análise ANOVA para carga iniciadora 520 e 1040g.	124
Tabela 48. Média e desvio padrão de leituras de velocidade de detonação para densidades de carregamento regulares ou modificadas.	125
Tabela 49. Cálculo do Projeto Fatorial 22 para densidades de carregamento 0,65 e 0,77 g/cm ³ em misturas de nitrato de amônio tipo industrial e Análise de Variância.	126
Tabela 50. Cálculo do Projeto Fatorial 22 e Análise de Variância para densidades de carregamento 0,75, 0,85 e 0,96 g/cm ³ em misturas de nitrato de amônio tipo agrícola.	127

Tabela 51. Custo dos insumos utilizados nas misturas.	129
Tabela 52. Configurações sugeridas como refinamento do plano de fogo atualmente executado na Mina do Recreio e custo por metro cúbico.	130
Tabela 53. Configurações relativas de NA, óleo e emulsão e comparações de custo em ordem decedente.	131
Tabela 54. Cenários reais e arranjos possíveis para custo de misturas de agentes explosivos e simulações de rocha desmontada na Mina do Recreio.	132

LISTA DE SÍMBOLOS, GRANDEZAS E UNIDADES

ANFO	Ammonium nitrate - fuel oil
Ah	Ampere hora
b	tipo explosivo
B	Afastamento
°C	Grau Celsius
cSt	Cem stokes
cp	Cem poises
Cal	Calorias
CJ	Chapman – Jouguet
DDT	Critério de deflagração/detonação
D	Diâmetro de furo
FO	Óleo diesel
f	tipo fertilizante
GPa	giga Pascal
H	Profundidade
J	Joule
°K	Kelvin
K	Altura de bancada
kcal	kilo calorias
m	Massa
MPa	Mega Pascal
MQN	Média quadrática do fator n
MQNM	Média quadrática da interação de fatores n e m
MQR	Média quadrática do resíduo
NA	Nitrato de amônio
NCN	Nitro-Carbo-Nitrato
NG	Nitroglicerina
# 8	Espoleta tipo 8
Ω	Ohm

%	Porcentagem
PCC	Carbonato de cálcio precipitado
PETN	Pentaerythritol Tetranitrato
PF	Razão de carga
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
Σ	Soma
S	Espaçamento
SQN	Somatório dos quadrados do fator n
SQNM	Somatório dos quadrados da interação de fatores n e m
SQR	Somatório dos quadrados do resíduo
SQTOT	Variabilidade total
SSV	Velocidade de Estado Constante- <i>Steady State Velocity</i>
Sx	Desvio padrão das médias
T	Tampão
TC	Termo de correção
TNT	Tri-nitro-tolueno
UCS	Resistência à Compressão Uniaxial- <i>Uniaxial Compressive Strength</i>
PLSI	Índice de Resistência de Carga Pontual - <i>Point Load Strength Index</i>
V	Voltagem
Vcc	Voltagem – Corrente contínua
VoD	Velocidade de detonação
ρ	Densidade
μm	Micra
U	Sub - perfuração
V	Volume detonado
X	Multiplicação
WO	Óleo combustível reciclado
@	Em

RESUMO

Explosivos a base de nitrato de amônio e óleo combustível tiveram grande importância no desenvolvimento da indústria mineira durante o século XX. Esses materiais são de incalculável valor para a sociedade, já que tem permitido redução dos custos de desmonte, aumento na segurança e desenvolvimento de novas atividades mineiras, as quais talvez não pudessem ter sido viáveis sem essa tecnologia.

No passado, o desmonte de carvão no Rio Grande do Sul utilizava explosivos nitroglicerinados e mais recentemente lamas e emulsões. A busca contínua por redução de custos nas operações mineiras, motivou a pesquisa e otimização da operação de desmonte de rochas na Mina do Recreio. Depois de monitoramento contínuo do desmonte de rochas tradicional da empresa, modificações foram feitas. O objetivo dessa tese é o desenvolvimento de misturas de diferentes tipos de nitrato de amônio e óleo para uso na mina, no intuito de obter-se uma performance adequada, ou seja, uma melhor fragmentação com menor custo por metro cúbico.

Somando-se a isso, foi realizada a investigação dos principais parâmetros que podem afetar a performance de uma mistura explosiva de baixo custo, confiável para a operação de desmonte de rochas na Mina do Recreio. De acordo com a caracterização do maciço rochoso, ficou demonstrado que o material ideal para desmonte de rochas no local poderia ser um agente explosivo a base de nitrato de amônio e óleo combustível. Dentre os óleos combustíveis testados, óleo diesel (FO) é o que apresentou melhor desempenho em termos de velocidade de detonação das misturas explosivas. No entanto, óleo lubrificante reutilizado (WO), por ter custo zero e poder ser consumido na detonação sem se tornar um resíduo poluente deve ser considerado como uma opção. Em relação aos nitratos de amônio utilizados, tipo explosivo ou industrial (b) e fertilizante (f), ficou demonstrado que ambos possuem desempenho semelhante quando utilizados a granel, segundo critério de velocidade de detonação. As misturas explosivas também podem utilizar agentes modificadores de densidade reduzindo em até 22% as densidades de carregamento, diminuindo o custo por metro cúbico sem prejuízo no desempenho. O estudo determinou uma carga iniciadora

(*primer*) mínima de 520 g de emulsão encartuchada com densidade 1,15 g/cm³ para iniciar eficientemente as misturas.

A pesquisa em diferentes misturas de nitrato de amônio e sua performance medida *in situ*, conduziram o desenvolvimento de um equipamento capaz de registrar a velocidade de detonação de agentes explosivos de baixa velocidade em furos de pequeno diâmetro, o que é uma situação típica da Mina do Recreio e da maioria das operações de desmonte à céu aberto de carvão no Brasil. O aparelho apresentou baixo custo de montagem, confiabilidade e pôde ser usado para otimizar as misturas.

Na prática, a introdução na mina das modificações sugeridas pela pesquisa, permitiu uma redução de cerca de 33% no custo de desmonte de rocha, quando comparado ao desmonte somente com emulsão. Desse modo, mudou-se a concepção e técnica de desmonte de rocha na Copelmi Mineração Ltda.

ABSTRACT

The large-scale utilization of ammonium nitrate and fuel oil based explosives has been the most significant development in the explosives industry during the 20th century. These materials have been of incalculable value to our society. Their use has permitted a reduction of blasting costs, improved safety, and the development of new mining activities, which would not have been viable without this technology.

In the past, coal blasting in Rio Grande do Sul has been done using nitroglycerin based explosives, and more recently massive slurry and emulsion. The endless need to decrease costs of mining operations and blasting, encouraged the research, and later blasting optimization at Recreio Mine. After continuous monitoring of the company traditional blasting operation, modifications were carried out on blasting design. The objective of this thesis is to develop different ammonium nitrate grades and oil mixtures in several blasting environments in order to meet the desired performance, in other words, the highest fragmentation at low cost per cubic meter.

In addition, an investigation varying important parameters, which may affect performance of a cost effective and reliable blasting agent for Recreio Mine was carried out. According to the rock mass characterization, the ideal explosive material for blasting in Mina do Recreio could be a blasting agent based on ammonium nitrate and fuel. Diesel (FO) is the fuel that presented better results in terms of velocity of detonation. However, the costless used lubricant oil (WO) can be consumed on the blast, which prevents it to turn in a harmful residue, should be considered as an option. It was demonstrated that the ammonium nitrate grades tested, blasting (b) and fertilizer (f), have the same performance in bulk loading, according to velocity of detonation criteria. Density modifying agents can be added to the explosive mixtures to reduce 20% its loading density and no reduction in performance. The work determined a minimum primer of 520 g of packed emulsion 1,15 g/cm³ for a reliable initiation of the mixtures.

The research for evaluating AN mixtures led to the development of a device capable of measuring velocity of detonation for low velocity blasting agents loaded in

small diameter holes, which is typical at Recreio mine and in most Brazilian surface coal mines. The apparatus was of low construction cost, reliable and used to optimize the NA mixtures.

In practice, the research and introduction of modifications on the mine allowed a 33% decrease in blasting costs compared to commercial emulsion and changed completely the culture and technical work force at Copelmi Mineração Ltda.

1. Introdução

Materiais explosivos vêm sendo usados para fragmentar e escavar rochas desde a introdução da pólvora negra por volta do ano 1600. Apesar do grande progresso no corte de rocha e fragmentação por meios mecânicos, desmonte de rochas com uso de explosivos é ainda o melhor método para escavar e mover esses materiais na maioria das situações.

A escavação de rochas em operações a céu aberto é normalmente um processo complexo que exige perfuração, detonação, carregamento e transporte. Já que os depósitos de minério são únicos e estão se tornando cada vez mais raros e complicados para escavar, altos custos de produção requerem a otimização de cada componente da operação de mineração, de modo a se obter o maior lucro possível. Desmonte com explosivos é, particularmente, uma importante parte da maioria das operações mineiras, representando pelo menos 20% do custo por tonelada de minério produzido. Somando-se a isso, a detonação influencia a operação de mineração como um todo, interferindo nos custos de carregamento, transporte, britagem, moagem e armazenagem dos produtos.

A introdução dos materiais explosivos feitos a base de nitrato de amônio foi considerado o mais importante desenvolvimento da indústria de explosivos no século 20. Esses avanços tem sido de incalculável valor para a sociedade moderna, permitindo a redução de custos de desmonte, a melhoria da segurança das operações com explosivos, e o desenvolvimento de novas jazidas, as quais talvez não fossem acessíveis se apenas pudessem ser explotadas usando-se explosivos nitroglicerinados de alto custo. Deve-se salientar, porém que, agentes explosivos como ANFO (*“ammonium nitrate – fuel oil”*) possuem uma grande restrição, a total falta de resistência ao ataque da água, que torna a mistura pouco sensível, impedindo-a de detonar. Essa propriedade forçou o desenvolvimento e a evolução do ANFO, na forma de misturas à base de nitrato de amônio que não sofrem decomposição pela água, surgindo então o aquagel (*“watergel”*) e a emulsão (Drury, 1980).

A grande maioria das operações internacionais de mineração utiliza ANFO na sua mais tradicional versão, nitrato de amônio e óleo combustível apenas. A crise do petróleo do Oriente Médio nos anos 70, a Guerra do Golfo nos anos 90 e outras situações críticas tem incentivado a constante busca por óleos combustíveis alternativos para substituir o óleo diesel, normalmente utilizado no ANFO, principalmente em países de grande dependência de importações de produtos derivados de petróleo. Em algumas operações mineiras, o uso de óleo lubrificante de motor descartado (óleo queimado), tem sido testado como combustível para o ANFO. Esse procedimento oferece uma maneira econômica de descartar a maior parte dos óleos lubrificantes gerados em uma mina, além de ajudar a proteger o meio ambiente, já que evita que seja produzida mais óleo diesel para ANFO e aproveita óleo lubrificante que estava disponível, porém teria que ser transportado e reprocessado por terceiros para outras finalidades (McDonald e Stern, 1993).

No Brasil, a falta de informação sobre utilização de ANFO pela maior parte de minas e pedreiras ainda é uma realidade, onde poucas companhias de explosivos dividem o mercado de mineração e construção. Essas operações são completamente dependentes dos produtos e preços que a indústria de explosivos dita. Contrariamente, empresas que usam ANFO regularmente tem custos de desmonte reduzidos, porém, dependem da indústria de explosivos para o fornecimento de acessórios de detonação. Além disso, essas empresas estão sempre buscando alternativas de substituição do óleo diesel no ANFO, porém, não conhecem exatamente as vantagens em termos de desempenho na troca por outros combustíveis alternativos.

1.1 Escopo da Tese

A meta dessa tese foi desenvolver misturas diferentes de ANFO com nitrato de amônio tipo fertilizante (agrícola) ou explosivo (industrial) e óleo diesel ou lubrificante reutilizado, que sejam capazes de fornecer uma reação de detonação adequada para a operação de desmonte de rochas.

Para que se atinja a meta desse trabalho, esperando-se que seja iniciado o uso de misturas alternativas de agentes explosivos tipo ANFO em escala de produção em uma mina de carvão a céu aberto, Mina do Recreio (Copelmi Mineração Ltda), o que reduziria custos e a dependência de produtores de explosivos. Somando-se a isso, a reciclagem de óleo lubrificante de motor na mina, ajudaria a preservar o meio ambiente. Os objetivos compreendem: (i) uma caracterização detalhada dos nitratos de amônio, combustíveis e maciços rochosos disponíveis no local, (ii) testes de laboratório, planta piloto e escala de produção, (iii) métodos de avaliação de desempenho que indiquem o potencial de fragmentação das misturas, (iv) desenvolvimento de equipamento para medir desempenho, e (v) uma análise de custos completa.

1.2 Metodologia

Para alcançar os objetivos, foi planejada uma série de tarefas. O trabalho descreve a pesquisa e investigação dos parâmetros mais importantes que afetam a performance para um agente explosivo de baixo custo, seguro e confiável. Essas misturas são baseadas em nitrato de amônio tipo agrícola ou industrial, óleo diesel, óleo mineral reciclado ou sub produtos do refino de óleo vegetal. A pesquisa foi dividida em:

- Diagnóstico da operação de desmonte na Mina do Recreio, custos e plano de fogo;
- Estudo do estado-da-arte com respeito a ANFO, nitrato de amônio, combustíveis, processo de desmonte e avaliação de desempenho de explosivos;
- Pesquisa e testes de avaliação de desempenho com diversas misturas de produtos e subprodutos do refino de óleo vegetal (soja) no Rock Mechanics Research Centre - RMERC da Universidade Missouri – Rolla (UMR), Rolla, MO, USA.
- Caracterização de nitratos de amônio, combustível e maciço rochoso;
- Testes iniciais em laboratório (UFRGS) e planta piloto (Mina do Recreio);
- Seleção de técnica de análise de desempenho e testes. A necessidade de medir desempenho de cada diferente mistura e suas interações entre com o

maciço rochoso permitiu o desenvolvimento de equipamento de medição de velocidade de detonação (VoD) e procedimento de medida;

- Análise de custos e dos resultados obtidos;
- Redação de Tese.

Baseado em resultados promissores depois de uma redução de custos da ordem de 33% no desmonte da Mina do Recreio, diferentes técnicas foram utilizadas para se compreender qual o tipo de óleo combustível seria o mais indicado para misturar com nitrato de amônio tipo agrícola ou industrial de modo a se obter o menor custo por metro cúbico na operação de desmonte. É importante salientar que a Copelmi está atualmente utilizando ANFO em escala de produção para todas as suas minas.

1.3 Importância do Estudo

Como o desmonte com explosivos representa uma parcela importante no custo final de tonelada produzida, essa etapa precisa ser constantemente otimizada. Para maximizar o processo de desmonte, a seleção correta do agente explosivo é vital. Esse trabalho se concentrou na busca de uma mistura explosiva que pudesse fornecer a fragmentação adequada do maciço rochoso pelo menor custo possível por metro cúbico, o que terminou por mudar os procedimentos e cultura de trabalho da Copelmi Mineração Ltda.

De acordo com a revista *Minérios & Minerales* (2002), as empresas brasileiras usuárias de explosivos partilham um mercado composto basicamente por minério de ferro (34,6%), brita (11%), ouro (7,6%), calcário (4%) e carvão (2,8%). A necessidade de uma investigação que pudesse suprir essas mineradoras das melhores técnicas disponíveis para diminuir custo de desmonte e conseqüentemente torná-las mais competitivas é demanda constante do setor. Somando-se a isso, o carvão que é considerado uma tradicional alternativa de fornecimento de energia elétrica com grandes reservas no Brasil, é responsável por apenas 1,1% da geração de energia elétrica no país, enquanto que a média mundial é de 27% (Becker, 1997). Devido as crescentes necessidades de energia e crescimento do Brasil, um aumento na produção de carvão para geração por termoelectricidade e conseqüente aumento

na demanda por materiais explosivos será indispensável em longo prazo, junto de novas tecnologias que sejam capazes de proteger o meio ambiente.

Para aumentar a competitividade, o setor precisa de menor dependência da indústria de explosivos, e uma operação de desmonte de custo reduzido. Essa tese apresenta técnicas e misturas de uso de materiais explosivos de baixo custo, capazes de fragmentar as rochas da Mina do Recreio eficientemente. O trabalho também mostra a possibilidade de substituir óleo diesel por óleo lubrificante de motor, o que além de ajudar a proteger o meio ambiente, reduz ainda mais o custo da operação de desmonte.

Sabendo-se que o explosivo é um meio econômico e poderoso de escavar rochas, métodos capazes de quantificar não só os próprios explosivos (teste de laboratório) são necessários. Com esse intuito, esse trabalho buscou um método de avaliação confiável do desempenho das misturas explosivas e sua interação com o ambiente rochoso, o que conduziu ao desenvolvimento e utilização de um novo equipamento de medida de velocidade de detonação. Devido aos resultados positivos obtidos com o equipamento, nomeado como VAR (Velocidade por Alvos Resistivos), um pedido de patente foi requerido. Esse sistema permite que minas ou pedreiras possam construir seu próprio equipamento de medida de velocidade de detonação de baixo custo e assim poder comparar diferentes explosivos e agentes explosivos.

A correta utilização de nitratos de amônio e combustíveis alternativos para preparar ANFO em minas e pedreiras pode resultar numa significativa redução nos custos de desmonte e preocupações ambientais, o que pode ajudar no desenvolvimento da mineração no país.

1.4 Estrutura da Tese

No Capítulo dois é apresentada uma revisão dos conceitos e propriedades de nitrato de amônio e ANFO, a história, métodos usados na fabricação, características dos combustíveis e os fenômenos observados durante o processo de detonação. Somando-se a isso, os principais métodos de medida de desempenho de materiais explosivos como ANFO e suas limitações são detalhados.

No Capítulo três, é mostrado o trabalho experimental e os testes preliminares que resultaram em uma produção de agente explosivo tipo ANFO em escala de produção para consumo na Mina do Recreio. O local de testes é descrito com suas diferentes camadas, métodos de lavra e desmonte. Descrevem-se os parâmetros geomecânicos das rochas de interesse para o desmonte e a caracterização de combustíveis e nitratos de amônio disponíveis para as misturas. Essa caracterização permitiu testes de campo com diferentes misturas, sendo detalhadas nos capítulos subsequentes.

O Capítulo quatro descreve os agentes explosivos testados tanto em laboratório quanto no campo. Diferentes formulações, aditivos, cargas iniciadoras (*primers*) e pesquisa visando proteger o nitrato de amônio do ataque da água são apresentados. No mesmo capítulo, o método de medida de velocidade de detonação (VoD) para comparar misturas e o desenvolvimento de um sistema de VoD ponto-a-ponto para uso de ANFO em pequenos diâmetros de furo foi investigado.

O Capítulo cinco detalha os resultados dos testes de medida de desempenho por VoD utilizando técnicas estatísticas como Projeto Fatorial para diferentes configurações de nitrato de amônio tipo agrícola ou industrial, combustíveis, cargas iniciadoras (*primers*) e densidades de carregamento das misturas.

Finalmente no Capítulo seis, é mostrada uma análise de custos comparando a evolução na operação de desmonte da Mina do Recreio e sugerindo 13 novas configurações de misturas de nitrato de amônio, óleo, carga iniciadora e densidade de carregamento. Todos esses possíveis cenários são capazes de reduzir os custos na Mina do Recreio se comparados a atual configuração da mina.

Dados de explosivos, materiais e acessórios usados para os testes são fornecidos no ANEXO I. Os testes de velocidade e a análise cromatográfica do nitrato de amônio tipo agrícola são apresentados respectivamente nos ANEXOS II e III.

2. Revisão dos Conceitos Básicos de Nitrato de Amônio e ANFO

2.1 História do ANFO

ANFO é uma abreviatura criada para representar a mistura entre nitrato de amônio (“ammonium nitrate”) e óleo combustível (“fuel oil”). Para se preparar ANFO, é necessário 5,7% em peso de óleo combustível e 94,3% de nitrato de amônio no formato de grão ou (*prill*) do tipo agrícola ou industrial. De acordo com o United States Code of Federal Regulations (USCFR 2001), um agente explosivo é definido como qualquer material ou mistura consistindo de combustível e oxidante para uso em desmonte cujos ingredientes não são classificados como explosivos e que pode ser misturado e empacotado para uso ou transporte sem ser detonado por uma espoleta do tipo 8 em ambiente não confinado. Pela legislação Brasileira (R105, 2000), o ANFO é classificado como “*substância perigosa, subclasse 1.5*” o que significa que é uma substância capaz de produzir gases por reação química gerando danos. A subclasse 1.5, por sua vez, significa que a substância é muito pouco sensível com baixa probabilidade de perigo de detonação quando manuseada e transportada sob condições normais.

Um agente explosivo não pode ser detonado por espoleta tipo 8, aparato projetado para iniciar uma detonação e que contém explosivo primário. A espoleta tipo 8 contém duas gramas de uma mistura de 80% de fulminato de mercúrio e 20% de cloreto de potássio ou PETN (Pentaerythritol Tetranitrate) equivalente a 0,40 to 0,45 g como carga base comprimido em um invólucro de espessura inferior a 0,762 mm e densidade de carregamento 1.4 g/cm^3 (USCFR, 2001).

Nitrato de amônio (NA) foi primeiramente sintetizado em 1659, quando J. R. Glauber combinou ácido nítrico e carbonato de amônio. Durante os séculos XVIII e XIX foi utilizado como medicamento e finalmente como fertilizante no início do século XX. NA tem sido um ingrediente de agentes explosivos desde 1870, quando numerosas patentes mostrando misturas de nitrato de amônio e combustíveis foram registradas (Hopler, 1993).

Em 1867, dois cientistas suecos, C. J. Ohlsson e J. H. Norrbin patentearam um explosivo chamado de *Ammoniakkrut*, o qual consistia de NA misturado com carvão vegetal, serragem, naftaleno, ácido picrítico, nitroglicerina (NG) ou nitrobenzeno. O balanço termodinâmico mostra que grandes quantidades de calor e gás é liberada por uma mistura com esses ingredientes. As proporções dos ingredientes eram selecionadas de modo a converter todo o dióxido de carbono e hidrogênio em água. Algumas das misturas eram difíceis de iniciar. Isso foi resolvido, pela mistura com nitroglicerina e utilizando espoletas à base de fulminado de mercúrio (Davis, 1943).

Devido ao alto custo de produção da nitroglicerina, Alfred Nobel pesquisou diversos candidatos a substituto dessa substância na sua mais bem sucedida invenção, a Dinamite. Nobel então comprou a patente do uso de nitrato de amônio como explosivo no início da década de 1870, e o utilizou como substituto de parte da NG da Dinamite. Entretanto, a natureza higroscópica do sal não permitia que a mistura funcionasse a contento nas mais diversas situações até a invenção da Dinamite Gelatinosa. Em 1879, depois de uma série de testes nos mais diversos materiais, Nobel registrou uma patente sueca para um produto chamado **extra-Dynamite**, consistindo de nitroglicerina 71%, colódio 4%, carvão vegetal 2% e nitrato de amônio, 23%, mistura essa que substituiu parcialmente a utilização de Dinamite pela comunidade mineira europeia (Davis, 1943).

O NA da época não estava no formato de grão (*prill*), cristais de NA eram produzidos em grandes recipientes (“*steam-jacketed raining kettles*”) neutralizando ácido nítrico e amônia. Essa massa densa de NA ($1,7 \text{ g/cm}^3$), capaz de absorver óleo combustível, foi o maior ingrediente dos explosivos comerciais durante muitos anos (Smith, 1982).

No início do Século XX, a Du Pont Company lançou algumas patentes de misturas contendo grandes proporções de NA, como o popular Nitramon. Por sua vez, a antiga União Soviética utilizava mistura semelhante chamada de Dynamon, a base de NA, combustível e serragem (Xuguang, 1994).

Nitrato de amônio não era considerado explosivo se não estivesse misturado a NG ou TNT (Tri-nitro-toluene). Entretanto, alguns desastres chamaram a atenção da opinião pública mundial para o uso do ANFO como importante agente explosivo. No ano de 1916, uma planta de evaporação e cristalização de nitrato de amônio explodiu em Gibbstown, no estado de New Jersey, USA. Em 1921, outra explosão ocorreu, desta vez nas dependências da BASF em Oppau, Alemanha.

Segundo Alberganti e Barthélémy (2001), funcionários da empresa tentaram desagregar com Dinamite uma grande quantidade de blocos cristalizados de nitrato de amônio bloqueadas dentro de um silo. A energia desprendida pela carga de explosivo foi suficiente para iniciar 9000 t de NA estocado, o que destruiu 75 % dos prédios da cidade e matou quinhentos e sessenta e uma pessoas. O mais famoso acidente, porém, ocorreu em 16 de abril de 1947, na cidade de Texas City, Texas, USA, quando o navio Grandcamp carregado com NA recoberto com parafina (“petroleum rosin”) explodiu após o capitão tentar controlar um incêndio a bordo. O navio estava ancorado ao lado de uma planta de poliestireno da Monsanto que foi atingida por fragmentos da explosão, abrindo dutos de benzeno e propano. Algumas horas após a primeira explosão, uma segunda ocorreu em outro navio próximo, o Harvey Keene. A cidade foi parcialmente destruída e aproximadamente 600 pessoas perderam a vida (Worsey, 1997; Monsanto, 2002).

Mesmo sabendo que nitrato de amônio foi utilizado como um importante ingrediente na confecção de explosivos desde 1860, apenas a partir da Segunda Guerra Mundial é que a fabricação e consumo de nitrato de amônio na forma de grão (*prill*) foram largamente utilizados devido à praticidade e possibilidade de relativa proteção ao ataque de água. Durante a guerra, a necessidade de grandes quantidades de NA para fabricar munição, só foi viabilizada com a construção de plantas que usavam o processo de peloteamento (“*prilling*”), devido a sua maior produtividade. No início a indústria produziu apenas grãos (“*prills*”) densos, com recobrimento da ordem de 3 % em peso de material inerte e “anti-empedante” (*anti-caking*).

Em 1953, R. Akre da Maumee Collieries, Indiana, USA, experimentou misturas de 95 % de NA em peso e 5 % de negro do fumo ("carbon black") ou carvão em pó. Esse material foi chamado de "Akremite", embalado em sacos de 104 mm de polyethyleno "expansível", iniciado por uma carga iniciadora (*primer*) de 9 kg. A DuPont obteve a licença da patente e começou a comercializar o Akremite em 1955 (Hopler, 1999 e Sutton e Pugsley, 1964). Rapidamente, produtores de nitrato de amônio, como Spencer Chemical Co, iniciaram a produção do nitrato de amônio em grãos ("Prilled Agricultural Ammonium Nitrate") para uso como explosivo. Adolphson (1983) mostrou que ANFO carregado em um furo a granel, poderia ser eficiente inclusive em pequenos diâmetros (76 mm), porém, não em formato de grão (*prill*), e sim moído.

Óleo combustível foi utilizado como substituto do negro do fumo, um ano após o lançamento do Akremite em uma das minas de ferro da Cleveland Cliffs Company no Minnesota Mesabi Range, USA. A abreviação ANFO se popularizou e logo foi reconhecida a necessidade de um grão (*prill*) especial, com maior porosidade e menor quantidade de material anti-empedrente (*anti-caking*), que pudesse absorver óleo mais rapidamente, surgindo então o grão (*prill*) especial para uso no ANFO, tipo industrial (*blasting grade*).

A produção de NA, tanto tipo industrial quanto tipo agrícola esta concentrada na Europa e na América do Norte. A produção total internacional de nitrato de amônio (exceto países asiáticos) é de pelo menos 12×10^6 t por ano (IFA, 2002). Devido seu custo relativamente baixo e alto desempenho, a utilização de ANFO tem crescido rapidamente em todo o mundo. Nos USA, no ano de 1960, 235.000 t de NA foram consumidas para preparar ANFO, dez anos depois esse valor aumentou para 680×10^6 t (Figura 1). Em 2001, somente nos USA, uma grande quantidade de explosivos foi consumida, $2,38 \times 10^6$ t. Desse valor, 98 % foi relativo a explosivos e agentes explosivos baseados em NA, ou seja $2,34 \times 10^6$ t (Kramer, 2002). Segundo Voss (2002), aproximadamente 80% do total de desmontes nos USA são feitos com ANFO, o que levaria a um valor de pelo menos 1.87×10^6 t por ano naquele país.

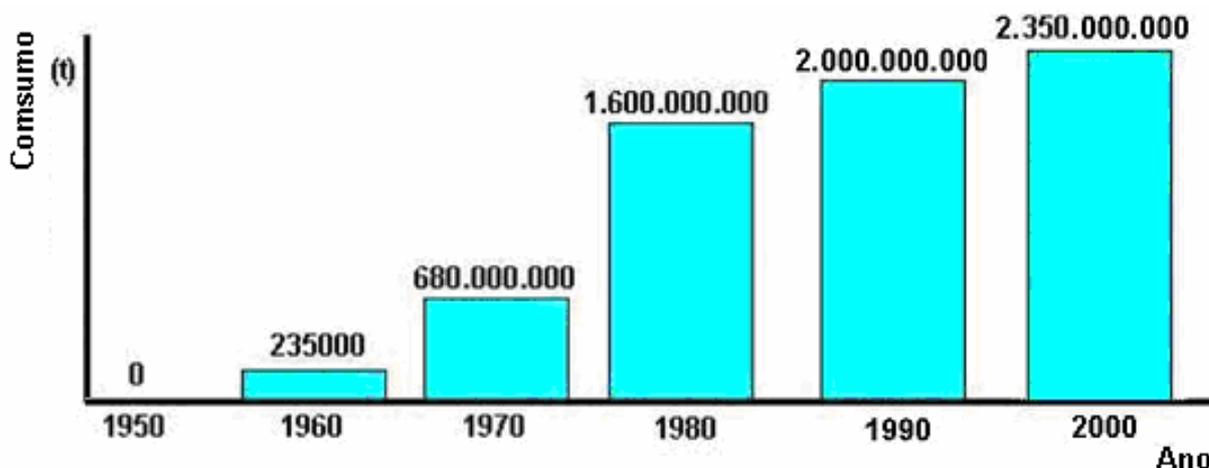


Figura 1. O crescente consumo de nitrato de amônio para uso na mineração no mercado dos USA nas cinco últimas décadas.

As estatísticas de mercado de explosivos na Europa (European Union) não estão completamente disponíveis para consulta, já que existem severas restrições a divulgação desses números por questões de segurança. Segundo o Bulletin TC 321 (CEN/TC321, 2000) o mercado total de explosivos na Europa é de aproximadamente 300×10^3 t, sendo que 150×10^3 t do total são ANFO, 100×10^3 t a base de NA e 50×10^3 t nitroglicerinados.

O crescimento no uso de ANFO como agente explosivo foi primeiramente estimulado pelos baixos valores da operação de desmonte com esse material. ANFO fornece baixo custo por unidade energética e alto desempenho se comparado a explosivos em termos de quantidade de energia. Exemplificando, quando um cartucho de 64 mm é usado em um furo de 76 mm, o explosivo preenche apenas 69 % em média do volume disponível total do furo. Já o ANFO carregado a granel preenche 100 % do furo com custo normalmente inferior, ou seja, maior quantidade de energia por volume de furo (Gordon, 1993).

Misturas à base de nitrato de amônio e óleo combustível apresentam vantagens: custo reduzido, fácil carregamento quando a granel e pouca sensibilidade antes e depois de misturado óleo. Contrariamente, existem duas grandes desvantagens: a total falta de resistência ao ataque da água, que torna completamente insensível qualquer mistura e a densidade de carregamento inferior a 1 g/cm^3 , tornando muito difícil o carregamento de cartuchos de ANFO em um furo preenchido com água.

O Sindicato da Indústria de Adubos e Corretivos Agrícolas no Estado de São Paulo (2002), registrou o consumo de NA do Brasil para fins agrícola e industrial (explosivos, gases) em 770980 t no ano de 2001. Esse valor provavelmente aumentara para mais de 800×10^3 t em 2002, já que no primeiro semestre foram negociadas 443688 t de nitrato de amônio (Potash & Phosphate Institute, 2002). A Tabela 1 mostra a produção e o consumo de NA no Brasil.

Tabela 1. Consumo total aparente de NA no Brasil (t), de NA tipo industrial e agrícola no ano de 2001 e período de Janeiro a Julho de 2002

Ano	Produção	Importação	Exportação	Consumo Aparente
2001	386,621	405,776	21,417	770,980
2002 (1 ^o Semestre)	220,798	237,455	14,565	443,688

Não existem estatísticas oficiais disponíveis no Brasil que mostram o consumo de explosivos. Baseado nas estimativas da indústria Brasileira de explosivos, o consumo de NA exclusivamente para desmonte é da ordem de 91000 t por ano (O Empreiteiro, 2001). Não existe informação oficial sobre nitrato de amônio vendido como fertilizante e sendo usado como ANFO ou na preparação de emulsão (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativa de consumo de NA no Brasil para uso em desmonte

Substância	Uso	Tipo	(t)
NA produção doméstica	ANFO	Tipo industrial	80,000
NA importações	ANFO	Tipo agrícola	11.000
NA explosivos baseados em	Emulsão, etc.	Ambos	31.000
NA TOTAL			122.000

Explosivos a base de nitroglicerina (Dinamites) tendem a reduzir o consumo no Brasil, onde a produção é de 5.000 t por ano de apenas dois produtores nacionais. No Rio Grande do Sul, o consumo total estimado de explosivos é de 4.500 t por ano, com algumas operações utilizando ANFO ou ANFOs pré misturados pela indústria de explosivos, também, conhecidas como granulados ou NCN (nitro-carbo-nitratos).

2.2 Fabricação de Nitrato de Amônio

A preparação de nitrato de amônio requer gás natural, encontrado junto a jazidas de petróleo, carvão e decomposição de lixo orgânico, para fornecer hidrogênio na forma de metano. O nitrogênio necessário é extraído do ar ou de outros gases tidos como subprodutos de refino ou metalurgia (Figura 2). Usando o processo Haber, esses dois elementos reagem em alta temperatura e pressão na presença de um catalizador (ferro) para formar amônia anidra, (NH_3). A amônia anidra é então oxidada a alta temperatura na presença de catalizador a base de platina, e então, se forma ácido nítrico (HNO_3). Esse ácido nítrico é neutralizado com mais amônia anidra de maneira a formar solução de nitrato de amônio (NH_4NO_3). Uma reação exotérmica ocorre no neutralizador para vaporizar água e concentrar a solução de nitrato de amônio (liquor) com 83% a 86% de pureza (Smith, 1982).

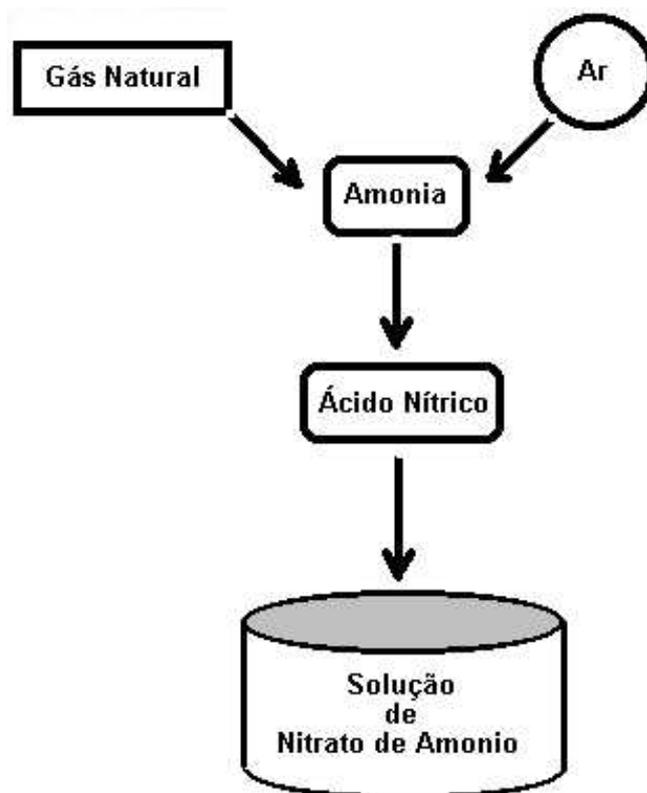


Figura 2. Processo de sintetização do nitrato de amônio para obtenção do liquor.

A Figura 2 representa esquematicamente a sintetização do nitrato de amônio a partir do gás natural para formar o liquor de NA, antes do processo final de transformação em grão (*prill*) sólido, tanto tipo fertilizante quanto industrial. O liquor concentrado de nitrato de amônio é transferido a um evaporador que alimentará o circuito tanto de tipo agrícola quanto industrial. O liquor é então pulverizado (*sprayed*) em pequenas gotas no topo de uma torre (*Prilling Tower*). Nesse ponto o nitrato de amônio deve iniciar a sua queda até ser atingido por uma contra corrente de ar frio, que serve para evaporar a água de modo a concentrar e solidificar o líquido e assim formar um grão (*prill*). Normalmente torres de *prilling* de maior altura são necessárias para se produzir nitrato de amônio do tipo industrial, já que o liquor deve conter mais água (4%) e assim fornecer um grão (*prill*) com maior quantidade de poros e evaporá-la durante a queda (Figura 3). Além disso, a torre de maior altura, fornece uma taxa de resfriamento menor e ar não tão frio como a torre de *prilling* tradicional para grão (*prill*) de alta densidade. Algumas variações dessas técnicas são encontradas dependendo do fabricante. Se o grão (*prill*) retiver muita umidade ou não for resfriado a uma velocidade adequada e temperatura correta esse pode se fragmentar ao atingir o final da torre. Contrariamente, pouca água pode resultar em um grão (*prill*) tão denso e pouco poroso que não será capaz de absorver óleo. No primeiro nível da torre, os grãos (*prills*) são desumidificados, resfriados e peneirados para se obter as faixas granulométricas requeridas. Após essa etapa, a superfície dos grãos (*prills*) pode ser coberta com material inerte a fim de ter sua resistência à água e empedramento (*caking*) elevada (Smith, 1982; Drury, 1980).

O método de *prilling* foi originariamente desenvolvido como uma maneira simples e de baixo custo para se preparar nitrato de amônio de uso agrícola, tendo sido uma adaptação de antigos processos militares para fabricação de munição a base de chumbo. A indústria de explosivos logo percebeu que o formato dos grãos (esférico) combinado com a sua porosidade resultaria em um produto derramável de baixo ângulo de repouso e com potencial de absorver diversos óleos de modo a atingir o correto balanço de oxigênio para uma reação de detonação (Hopler, 1999).

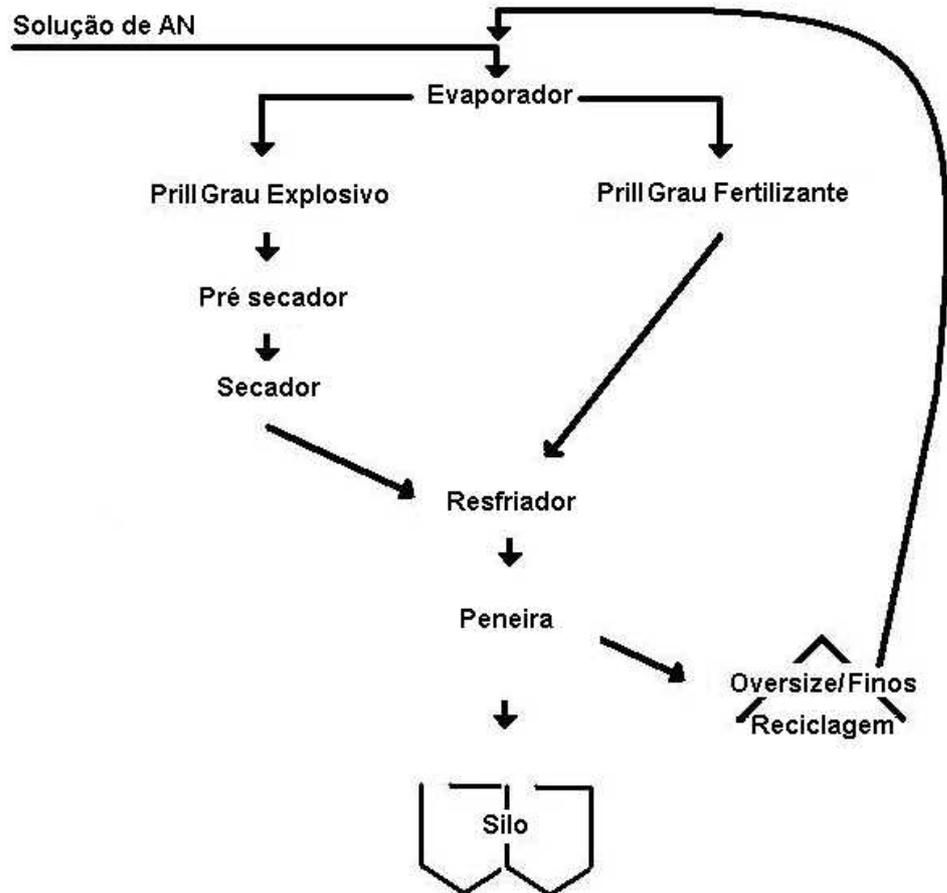


Figura 3. Diagrama esquemático dos processos de *prilling* para confecção de NA tipo agrícola e industrial.

2.2.1 Produtos de Nitrato de Amônio

Nitrato de amônio pode ser encontrado sob diferentes especificações, dependendo da sua finalidade e utilização. A solução de NA (liquor) pode fornecer nitrato de amônio em pó, em grão (*prill*) de alta ou baixa densidade. Normalmente NA em pó é usado na fabricação de dinamites, emulsões e aquageis, NA em forma de grão (*prill*) de alta densidade é utilizado na agricultura e grãos (*prills*) menos densos e de maior porosidade alimentam os usuários de ANFO. Esta não é uma regra fixa, já que diversos produtores de emulsões dissolvem NA de alta densidade em uma solução saturada e diversas mineradoras utilizam esse tipo de nitrato de amônio para o ANFO, já que muitas vezes o NA tipo agrícola tem custo de aquisição inferior ao NA industrial. Segundo Crosby (1998), as características mais requeridas para grão (*prill*) de nitrato de amônio para uso em ANFO na América do Norte é o apresentado na Tabela 3:

Tabela 3. Especificações comuns de grão (*prill*) de nitrato de amônio para ANFO (Crosby, 1998)

Característica		
Recobrimento	(em peso)	Argila (1,6 – 3 %)
Diâmetro de partícula	+ 1,651 mm	22,8%
	+ 1,410 mm	32,0%
	+ 1,168 mm	32,7%
	+ 1,000 mm	8,9%
	+ 0,833 mm	3,4%
	+ 0,417 mm	0,2%
Densidade	0,7 – 0,9 g/cm ³	
Retenção e absorção de óleo	(em peso)	6 % min

2.3 Combustível

Um combustível pode ser classificado como um material que fornece energia (Britannica, 2001). Existem combustíveis fósseis, combustíveis “jovens” como os vegetais ou orgânicos e os nucleares.

Os combustíveis fósseis incluem carvão, gás natural (metano), gás liquefeito de petróleo (propano), petróleo ou óleo cru, folhelho e areia betuminosa. Todos contêm carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e traços de outros elementos, como resultado de processos geológicos que concentraram de alguma forma matéria orgânica da decomposição de animais ou vegetais. Todos esses combustíveis necessitam do oxidante (ar) para entrar em combustão.

Combustíveis vegetais são compostos basicamente de celulose, um composto orgânico de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio em diferentes percentuais. Entretanto, devido à presença de algumas resinas, gomas e outras substâncias, o conteúdo de calor nem sempre é uniforme (Singer, 1991).

Combustíveis orgânicos ou gorduras animais geralmente são ácidos graxos (*Fatty Acids*) consistindo de uma longa cadeia de átomos de carbono com hidrogênio em uma ou mais pontas e o grupo carboxil (-COOH) em outra ponta. Ácidos graxos não são encontrados livremente na natureza, estão normalmente combinados com álcool (*glicerol*) na forma de triglicerídios. A forma mais abundante de ácido graxo é o Oléico, encontrado em vegetais e responsável por 46 % da gordura humana.

Existe hoje uma tendência mundial de se buscar combustíveis alternativos para motores de combustão interna. Uma das alternativas é o chamado Biodiesel, termo geral para óleo vegetal, gordura animal ou graxa. Biodiesel normalmente contém mais de 14 tipos de ácidos graxos que são quimicamente processados em metil estereatos graxos (*fatty acid methyl esters*). Esses combustíveis não contêm nitrogênio ou aromáticos e menos de 15 ppm de enxofre (Tabela 4). A energia contida no Biodiesel é aproximadamente 10% inferior ao diesel, já que fornece 10% a menos de oxigênio em peso (National Renewable Energy Laboratory, 2001).

Combustíveis nucleares variam de acordo com o tipo de reator e do combustível nuclear utilizado. Pode-se utilizar Urânio 235 ou Plutônio 239, reatores do tipo LWR (light-water reactor) ou HWR (heavy water reactor).

2.3.1 Petróleo

Também chamado de óleo cru, por definição é uma mistura complexa de hidrocarbonetos nas formas líquida, gasosa ou sólida. O termo normalmente é utilizado para a forma líquida, entretanto, o termo inclui gás natural e a forma viscosa, quase sólida conhecida como betume. A primeira utilização do petróleo foi como combustível para iluminação de lâmpadas, substituindo o óleo de baleia. O desenvolvimento do automóvel, por sua vez, promoveu a sua utilização como fonte primária de gasolina. Outros materiais derivados de petróleo servem para produzir solventes, tintas, plásticos, borracha sintética e fibras, graxas, parafinas, fertilizantes e explosivos. Combustíveis derivados de petróleo, também, são usados como lubrificantes numa grande variedade de equipamentos.

2.3.2 Propriedades dos combustíveis a base de Petróleo

As propriedades dos combustíveis a base de petróleo podem variar de acordo com as características do depósito (Singer, 1991). Nos USA existem dois tipos básicos de combustíveis (diesel) comercializados, N° 1 e N° 2. Basicamente o diesel N° 1 é obtido removendo a parafina do diesel N° 2, sendo esse mais denso, viscoso e conseqüentemente possuindo quantidade maior de energia disponível. As misturas de ANFO no USA são preferencialmente feitas a partir do diesel N° 2 devido a essas propriedades (WFC 2000). No Brasil o óleo mais utilizado para ANFO é o diesel B. A Tabela 4 mostra densidade, viscosidade, ponto de fulgor, teor de enxofre, água e sedimentos para os combustíveis tipo diesel nos USA e Brasil, comparados com a especificação de Biodiesel nos USA.

Tabela 4. Composição de combustíveis no USA* e Brasil** (Singer, 1991; DNC31/97; National Renewable Energy Laboratory, 2001)

	S (% max)	Ponto de Fulgor C (min)	Viscosidade @ 40 C (cSt max)	Água e Sedimentos (% max)	Densidade (max)
Método de Análise	ASTM D1552	ASTM D92	ASTM D445	ASTM D1796	ASTM D1298
Tipo de Óleo					
US N 1*	0,1	38	-	0,1	0,8451
US N 2*	0,4	38	37,9	0,1	0,8654
Diesel B**	0,5	36	1,6 - 6	0,5	0,8800
Biodiesel*	0,0024	100	-	0,5	0,8500

2.3.3 Propriedades dos Óleos Lubrificantes

Óleos lubrificantes são formulados a partir de base mineral ou sintética misturados a agentes ou aditivos modificadores de viscosidade e desempenho. Óleos naturais refinados são complexas misturas de longas moléculas, enquanto que óleos sintéticos são produtos químicos de maior uniformidade molecular. Devido à variabilidade na composição de um óleo refinado natural, alguns produtos podem ter grandes variações de viscosidade dependendo da fonte ou depósito.

Agentes modificadores de viscosidade, como os Melhoradores de Índice de Viscosidade (*Viscosity Index Improvers*) e os Modificadores de Ponto de Escorrimento (*Pour Point Depressants*) são adicionados ao lubrificante de modo a manter a fluidez em baixas temperaturas e reduzir o “estado de baixa viscosidade” em elevadas temperaturas. Para uso em mineração, existem três tipos principais de óleo combustível, óleo de transmissão, hidráulico e de carter, o que representa 50%, 20%, e 12%, respectivamente na maioria das operações (Suttill, 1989).

Aditivos modificadores de desempenho podem ser detergentes que manchem o óleo limpo, dispersantes para manter resíduos de oxidação e contaminates em suspensão, agentes antioxidantes, álcalis para combater a acidificação causada pelos produtos da combustão, modificadores de fricção, antiespumantes e agentes antidesgastantes.

2.4 Combustão

Segundo Singer (1991), combustão é definida como uma reação química entre oxigênio e combustível que normalmente libera calor e luz, principalmente na porção infravermelha do espectro. Outro fenômeno físico que pode acontecer em uma combustão é a geração de onda de choque. Esses três fenômenos ocorrendo no mesmo evento constituem uma detonação. A combustão é uma das mais importantes reações químicas da natureza, sendo considerada o clímax da oxidação de certos tipos de substâncias.

Se o combustível está no estado líquido e possui uma temperatura de vaporização baixa, compressão adiabática ocorre nos bolsões de gás imersos na substância, liberando rapidamente calor e expandindo esses gases. O combustível passa então ao estado gasoso. Alguns destilados de petróleo requerem pequenas pressões para entrar em ignição e continuar a reação desde que seus pontos de fulgor tenham sido ultrapassados. Segundo Drury e Westmaas (1978) a compressão adiabática do ANFO numa velocidade de 4500 m/s pode produzir temperaturas de 4000°C.

2.4.1 Aspectos Físicos e Químicos

Calor, pressão, luz ou uma faísca normalmente iniciam processos químicos de combustão. Assim que o material combustível alcança sua temperatura de ignição, a reação de combustão inicia, do sentido da fonte até a camada adjacente de mistura gasosa. Cada ponto da camada ao queimar atua como fonte de ignição para a próxima e desse modo uma reação em cadeia é formada. A combustão apenas termina quando o equilíbrio é alcançado entre a energia total dos reagentes e a energia total dos produtos.

Junto dos processos químicos que ocorrem durante a combustão, alguns processos físicos de transferência de massa e energia ocorrem. A difusão dos reagentes e dos produtos da combustão dependem das variações nas suas concentrações, pressões e temperaturas.

2.4.2 Reação de Redução e Oxidação (Redox)

Segundo Feltre e Yoshinaga (1969) uma reação do tipo Redox pode ser definida como um fenômeno no qual o número de oxidação de um elemento químico muda. Redução e oxidação ocorrem com fogo, dissolução de metais, respiração e fotossíntese. Cada átomo consiste de um núcleo positivo, cercado por elétrons negativos, os quais determinam as características das ligações de cada elemento. Para formar ligações químicas, átomos doam, adquirem ou partilham elétrons. É possível marcar cada átomo com um número de oxidação, o qual especifica o número de elétrons que podem ser utilizados para formar ligações com outros átomos. Cada átomo da molécula tem então um padrão de ligações possíveis, sendo chamado de estado de oxidação e expresso pelo número de oxidação. Processos do tipo Redox podem aumentar o número de oxidação de um átomo, correspondendo a uma oxidação, ou contrariamente, diminuir-lo, o que corresponde a uma redução.

2.5 Teoria de Detonação

Explosivos são poderosas ferramentas usadas em construção civil e mineração para fragmentar e mover material. O ser humano vem aprendendo a utilizar energia de diferentes maneiras, buscando sempre melhor qualidade de vida. Energia não pode ser criada ou destruída, entretanto o homem aprendeu logo no início da história da civilização, a transformar energia de uma forma a outra, de acordo com suas necessidades. O mesmo ocorre com explosivos, onde energia de um material explosivo pode ser controlada, e se liberada na quantidade correta, lugar e momento certos, viabiliza a obtenção dos resultados planejados para uma obra ou escavação.

Um material explosivo converte energia química em propagação de ondas de choque, expansão de gás e “subprodutos” tais como calor, luz, vibração na superfície, vibração do ar (som) entre outros. Não existe uma só teoria que possa explicar todos os fenômenos relacionados com detonação para qualquer meio e situação, entretanto a maioria dos autores reconhece que o processo utiliza basicamente ondas de choque (compressão) e rápida expansão de gases.

A explosão pode ser explicada como uma rápida aceleração da reação de combustão, causada por um aumento na temperatura ou pelo progresso de uma reação em cadeia. Quando a reação de combustão acelera progressivamente e a chama avança a uma velocidade supersônica, a compressão da onda de choque causa um aumento na temperatura que resulta em auto ignição. Esse fenômeno, chamado de detonação, não ocorre se a energia desprendida da área de reação exceder um certo limite (Persson *et al.*, 1994).

2.5.1 Detonação Ideal

De acordo com Persson *et al.* (1994) e Drury e Westmaas (1978), numa detonação ideal, um plano de onda de choque se propaga através de um explosivo (carga cilíndrica) causando a reação química que mantém o processo. A velocidade de propagação da onda de choque é chamada de VoD ou velocidade de detonação. A zona de detonação (“*detonation pressure head*”) é seguida pelo plano de Chapman-Jouget (CJ) e precedida pela onda de choque (Figura 4). A onda de

choque é considerada a primeira parte da detonação, de velocidade supersônica e alta pressão e calor. Devido a esses fatores, a onda de choque continuamente inicia explosivo ainda não detonado. Energia gerada pela decomposição das substâncias do explosivo mantém a onda de choque devido à conservação da pressão desencadeada após a passagem dessa. Na detonação ideal, é assumido que toda a energia potencial do explosivo é liberada quase instantaneamente na zona de detonação. Após o plano CJ, são localizados produtos estáveis da detonação, consistindo de gases em alta temperatura e pressão.

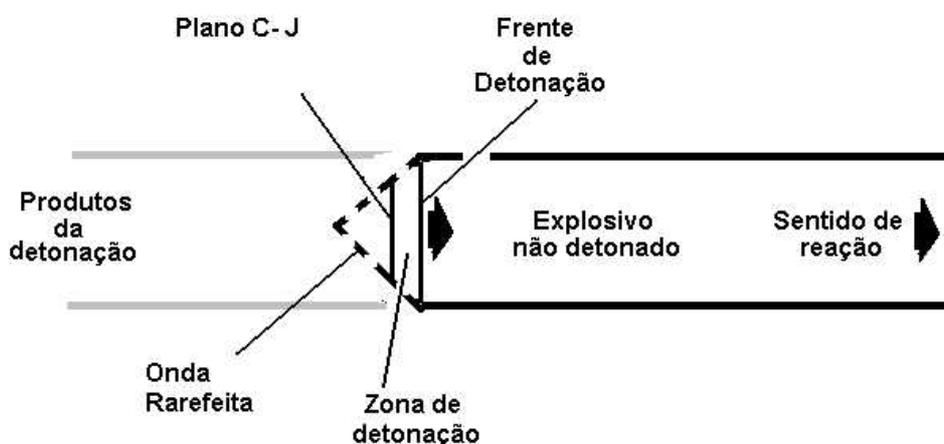


Figura 4. Processo de detonação ideal (Adaptado de Sarma, 1994 e Hopler, 1999).

2.5.2 Detonação Não Ideal

Normalmente agentes explosivos e muitos dos explosivos comerciais apresentam reação de detonação classificada como não ideal, devido a uma parte das reações químicas ocorrerem após o plano CJ. Neste caso, a frente de onda de choque não é planar, mas sim curva devido a menor pressão e velocidade de reação que ocorrem nas bordas do explosivo. A região após o plano CJ não contribui para suportar a propagação da onda de choque como numa detonação ideal, porém participa efetivamente do processo de quebra dos materiais circundantes do explosivo, já que a rápida expansão dos gases de detonação fornece boa parte da energia para o processo final de fragmentação. A Figura 5 ilustra uma detonação não ideal.

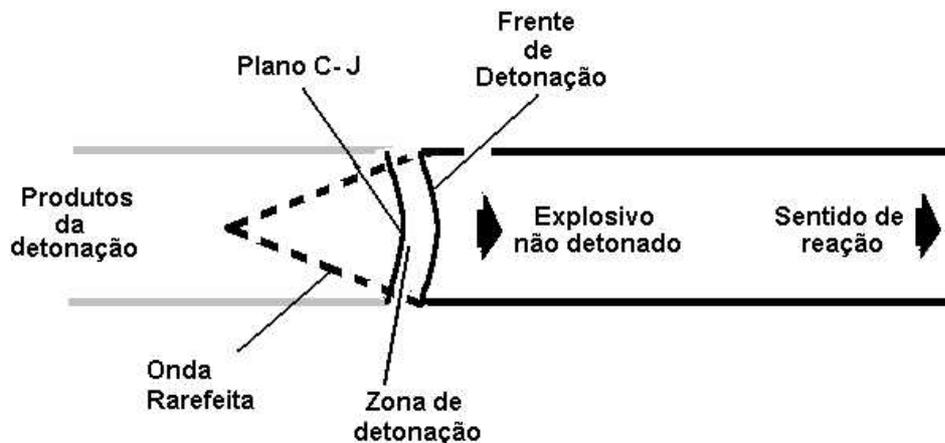


Figura 5. Processo de detonação não ideal (Adaptado de Sarma, 1994 e Hopler, 1999).

Sarma (1994), afirmou que no caso de agente explosivo tipo ANFO uma porção substancial de nitrato de amônio (38% a 55%) não reage na zona de detonação, mas sim após a passagem dessa, algumas frações de milissegundo após a frente de detonação.

2.5.3 Mecanismos de Quebra de Rocha

Existem inúmeras teorias descrevendo processos de quebra de rochas que ocorrem durante e após uma detonação de um explosivo interagindo com um maciço rochoso. Ainda não se encontrou uma única teoria de detonação que pudesse explicar todos os complexos mecanismos de quebra de rochas em qualquer situação de desmonte de uma litologia. Segundo Morhard *et al.* (1987), os seguintes mecanismos de quebra podem ser observados durante uma detonação em bancada por uma carga cilíndrica:

- Esmagamento do entorno da carga;
- Surgimento de fraturamento radial;
- Desplacamento (*spalling*);
- Alívio de tensões;
- Aumento do comprimento de fraturas radiais e naturais pela penetração dos gases do produto da detonação;

- Ruptura flexural;
- Criação de fraturas por cisalhamento;
- Colisão de material em deslocamento inercial.

Brown (1956) descreveu mecanismos de quebra de rocha, dividindo-os em duas categorias, aqueles causados pela energia da onda de choque de um explosivo e aqueles causados pela energia de expansão de gás do explosivo. Segundo Hopler (1999) a energia de choque é dissipada na frente de uma onda P (compressiva) entre a parede do furo e a primeira face livre ou junta aberta encontrada. Já a energia de gás é formada pelo produto químico da reação, ou seja, os gases em expansão que movimentam o material circundante explosivo. Ambos mecanismos criam diferentes quebras na rocha, dependendo principalmente das características do explosivo, geologia e geometria do desmonte.

Segundo Worsey e Chen (1986) tanto detonação quanto deflagração de uma carga criam um pulso dinâmico, o qual dependendo da intensidade pode resultar em uma onda elástica na rocha, expandindo radialmente. Quando a onda prossegue a partir da carga, o furo é pressurizado pela expansão dos gases. Essa pressão induz compressão radial e tensão tangencial no entorno, alongando algumas fraturas criadas pela onda de choque que serão posteriormente preenchidas pelos gases que estão sendo gerados na detonação.

Cameron (1992), por sua vez, mostrou que o processo de quebra relativo à energia de choque de um explosivo equivale a esmagamento, fraturamento radial, deslocamento e alívio de tensão. O impacto de gases em alta pressão nas paredes de um furo cilíndrico cria condições para uma nova onda de choque no meio circundante. Essa onda de choque esmaga a rocha vizinha se a intensidade das tensões forem maiores que a resistência à compressão dinâmica da rocha (*dynamic compressive strength*). O choque induz fraturamento radial devido a esforços tangenciais que não sofrem influência da face livre. Mais tarde, deslocamento ocorre quando a face livre ou junta aberta reflete uma onda compressiva de amplitude suficiente. Essa reflexão de onda compressiva gera tração e cisalhamento.

Os gases em alta pressão dispostos dentro do furo penetram nas fraturas induzidas ou naturais após a transmissão da onda de choque. Esses gases forçam movimento na rocha empurrar paredes opostas das juntas abertas como uma cunha, estendendo fraturas e criando novas. O gás também é responsável por pressionar a parede de uma bancada que pode quebrar por ruptura flexural, além de lançar fragmentos de rocha no espaço que irão se chocar e quebrar novamente. A figura 6 mostra esquematicamente alguns dos processos possíveis de ocorrer em uma detonação.

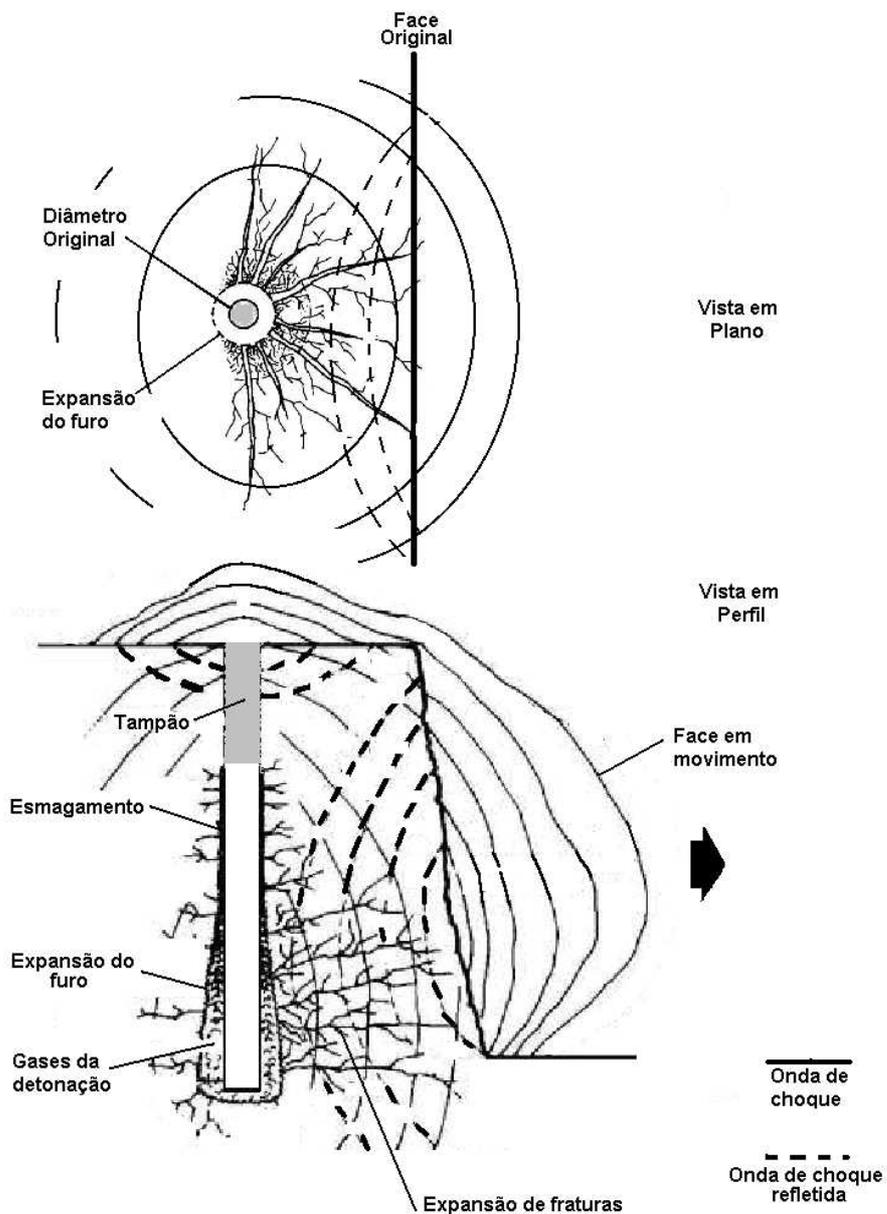


Figura 6. Processo de fragmentação em detonação de bancada (Adaptado de Morhard *et al.*, 1987).

2.6 Propriedades do NA e ANFO

O sal, nitrato de amônio (NA), sob condições normais apresenta estado físico sólido, cor branca, densidade nominal de $1,72 \text{ g/cm}^3$ e ponto de fusão em $169,6^\circ\text{C}$. A sua fórmula é NH_4NO_3 , sendo solúvel em água e ácido nítrico e insolúvel em acetona, etil acetato e etil eter. O calor de formação do NA é de $87,27 \text{ kcal/mole}$.

A reação de explosão de uma mistura nitrato de amônio e óleo combustível (ANFO) é considerada como não ideal. A reação de detonação e seu desempenho em termos de fragmentação de material, é função das propriedades físicas e químicas da mistura assim como do ambiente onde ocorre o fenômeno. Essas propriedades podem ser diâmetro de partícula, recobrimento, densidade, confinamento, diâmetro de carga, condição de água, acoplamento, iniciação, além de diversos outros. Algumas dessas propriedades são explicadas a seguir.

2.6.1 Recobrimento

Existem diversos materiais usados para recobrimento de nitrato de amônio disponíveis no mercado, onde os mais comuns são ácidos graxos ou ésteres de ácidos graxos para carbonatos e óxidos, agentes lubrificantes como ésteres e parafinas para carbonatos e silicatos e complexos de cromo para silicatos (Katz e Milewski, 1987).

Uma das maiores vantagens do recobrimento de superfície por “fillers” é o aumento da resistência ao ataque da água, o solvente universal. Grãos (*prills*) de NA quando em contato com a água dissolvem e tendem a formar uma solução altamente saturada de NA, o que torna esse material com pouca chance de detonar. Materiais inertes e insolúveis em água, tais como argila (terra) diatomácea, caolim, e carbonato de cálcio podem ser usados no recobrimento de grãos (*prills*). Esses materiais são usados para prevenir empedramento (*caking*) e aumentar a resistência ao ataque da água, entretanto, eles, também, baixam a sensibilidade da mistura a iniciação e inibem a absorção de óleo do grão (*prill*) preencher os poros da superfície. A Figura 7 mostra a diminuição da VoD devido aumento da carga de recobrimento em grãos (*prills*) de NA de ANFO (Sutton e Pugsley, 1964).

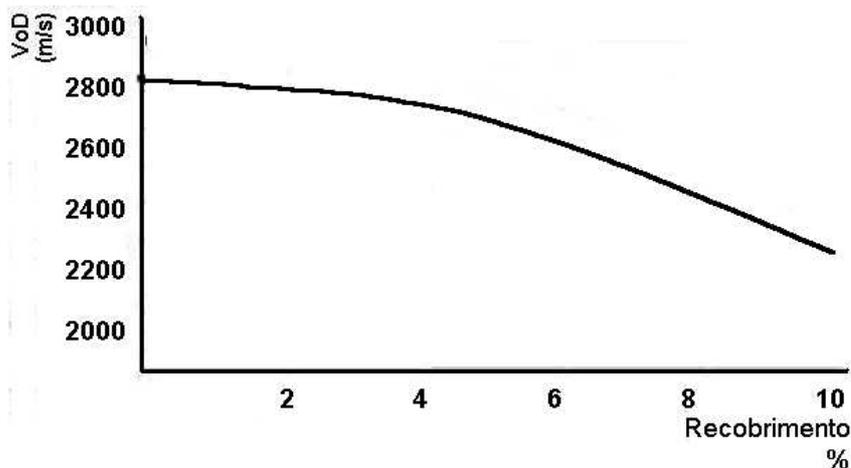


Figura 7. Efeito do recobrimento com argila diatomácea em furo de 76 mm de ANFO (Adaptado de Sutton e Pugsley, 1964).

Nos anos 50, a Oriard Powder Co. adicionou 40% de TNT granulado ao ANFO para aumentar a resistência a água (Adtec, 2002). Depois de algum tempo o TNT foi totalmente substituído e hoje o produto é comercializado como ANFO a prova de água ou WR ANFO (*water resistant ANFO*), entretanto os furos precisam ter a água bombeada (*dewatered*) antes de receber a mistura e os custos do sistema não o tornam competitivo frente às modernas emulsões.

A propriedade do grão (*prill*) de não se quebrar ou baixa friabilidade é outra importante função do agente de cobertura. Um grão (*prill*) muito leve e pouco resistente tende a se partir facilmente em condições normais de manuseio, o que aumenta a chance de pressão limite (*Dead Pressing*) tornando a mistura insensível à carga iniciadora (*primer*). Por outro lado, um grão (*prill*) com densa camada de agente de cobertura não irá absorver óleo suficiente para ser usado no ANFO (Porter, 1984).

2.6.2 Balanço de Oxigênio

Detonação de ANFO pode ser definida como uma alta propagante decomposição exotérmica a uma taxa supersônica, formando produtos estáveis (gases). O calor liberado no processo de detonação produz temperaturas de gás na ordem de 2000 a 4000 K e altíssimas pressões (Dick, 1972).

Os principais oxidantes e combustíveis nos agentes explosivos são compostos de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. O nitrato de amônio é responsável pelo oxigênio (60%), nitrogênio (33%) e hidrogênio (7%), enquanto que o óleo supre a reação com o carbono. Para compostos de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, a liberação de energia é ótima quando o balanço de oxigênio é zero. Balanço zero é definido como o ponto no qual existe oxigênio suficiente para oxidar completamente todos os combustíveis da mistura e não existe excesso de oxigênio disponível para reagir com nitrogênio e desse modo formar óxidos nitrosos ou elementos como CO, NH₃ e CH₄. Os únicos produtos dessa reação devem ser os gases H₂O, CO₂, e N₂. A Figura 8 mostra a energia liberada pelos produtos da detonação completa de uma mistura ANFO.

A oxidação parcial de carbono para monóxido de carbono, o que é resultado de uma deficiência de oxigênio, libera menor calor/energia do que uma oxidação completa que resulta em dióxido de carbono. Já os óxidos de nitrogênio que são produzidos quando há excesso de oxigênio, absorvem calor. Nitrogênio livre não libera e não absorve calor. Gases resultantes desse tipo de reação são ineficientes em termos de energia liberada na forma de calor, além de serem tóxicos (Dick, 1972).

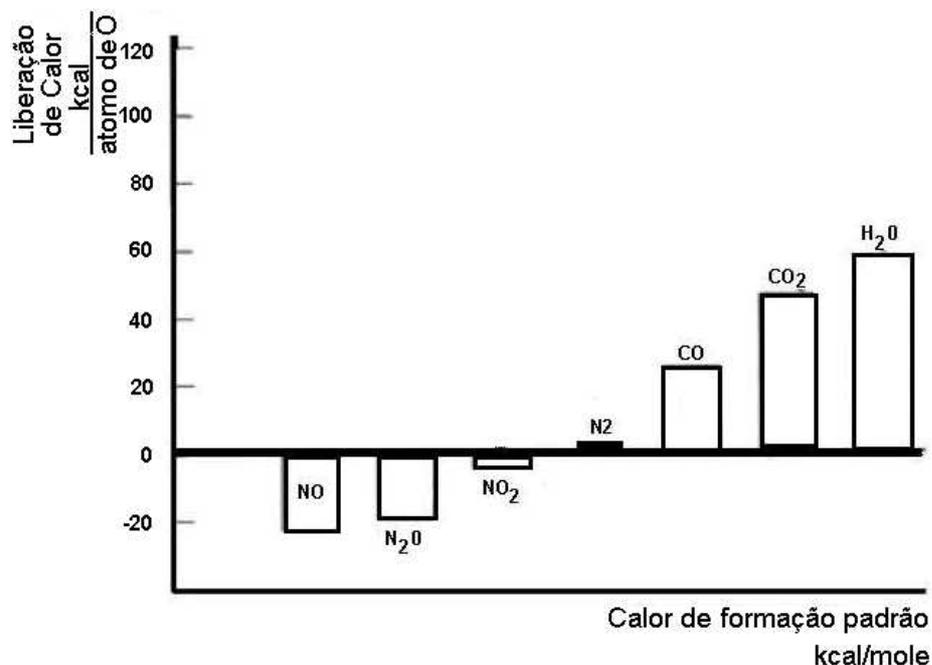


Figura 8. Liberação de calor por átomo de oxigênio em ANFO (Adaptado de Dick, 1972).

Cooper (1996) afirma que o calor de formação de um elemento pode ser considerado um caso especial de calor de reação ou mudança de entalpia, envolvendo a formação de uma determinada molécula que queima até seu estado mais oxidado e quando os elementos e o composto final se estabilizam sob condições padrão de temperatura e pressão, ou seja, 25°C e 1 atmosfera.

Óleo combustível que na verdade é uma mistura complexa de hidrocarbonetos é normalmente aceito como CH₂, de modo a simplificar os cálculos para o balanço de oxigênio (Equação 1). As equações abaixo assumem a reação como ideal, baseada em calor de formação padrão para NA (87.27 kcal/mole). Para 240 g (mole de NA) e 14 g (mole de óleo), 254 g de peso total, 5.7 % de óleo combustível deve ser adicionado em 94.3 % de nitrato de amônio de modo a obter a proporção correta no balanço de oxigênio.



Baseado na equação 1, o calor de formação do ANFO é calculado como mostra a Tabela 5.

Tabela 5. Calor de formação do ANFO

NH ₄ NO ₃ = 87.2 kcal/mol @ 261 kcal/mol
CH ₂ = 7 kcal/mol @ 7 kcal/mol
Total = 267 kcal/mol
H ₂ O = 57.8 kcal/mol @ 404 kcal/mol
CO ₂ = 94.05 kcal/mol @ 94.05 kcal/mol
Total = 498 kcal/mol

O calor de formação final é dado pela diferença entre produtos e reagentes. Baseado nisso, o calor de formação do ANFO é 230 kcal/mol e a energia térmica liberada por grama de ANFO é de 905 calorias. Nesse processo ideal, não existe formação de gases considerados tóxicos ao ser humano.

Se a equação não está balanceada, menos energia será liberada. A Equação 2 representa uma mistura de 92.0 % de NA e 8.0 % de óleo combustível mineral. O excesso de combustível cria uma deficiência de oxigênio na reação que resulta em oxidação do carbono presente no óleo em CO, um gás venenoso quando comparado ao CO₂. Nesse caso, devido ao baixo calor de formação do CO, apenas 818 calorias são liberadas por grama de ANFO.



Na Equação 3, uma mistura de 96,6 % de NA e 3,4 % de óleo combustível mineral mostra uma situação de excesso de oxigênio. Uma parte do nitrogênio do nitrato de amônio combina com esse excesso de oxigênio para formar NO, o qual ainda reage com oxigênio presente na atmosfera e produz o extremamente tóxico NO₂. O calor absorvido pela formação de NO reduz o calor de formação do ANFO para apenas 600 calorias, a qual é bem inferior a mistura com excesso de combustível. Além disso, os gases produzidos pelo excesso de combustível são menos perigosos do que os produzidos pela falta desse elemento. Devido a esses motivos, para se utilizar no dia a dia de uma mineradora, é preferível uma pequena deficiência no oxigênio, ou seja, costuma-se padronizar a mistura em 94 % NA e 6 % óleo combustível.



A Figura 9 mostra os efeitos do balanço de oxigênio no desempenho do ANFO. A energia teórica ideal alcança um pico de 5.7% de óleo combustível e cai mais rapidamente para uma mistura de excesso de oxigênio do que uma mistura com excesso de óleo. Ao lado esquerdo da Figura 9, maior quantidade de oxigênio e menor de combustível é observada, o que faz o ANFO gerar gases de cores alaranjadas. Ao lado direito do gráfico, com o excesso de combustível, gases negros e maiores velocidades de detonação são observados.

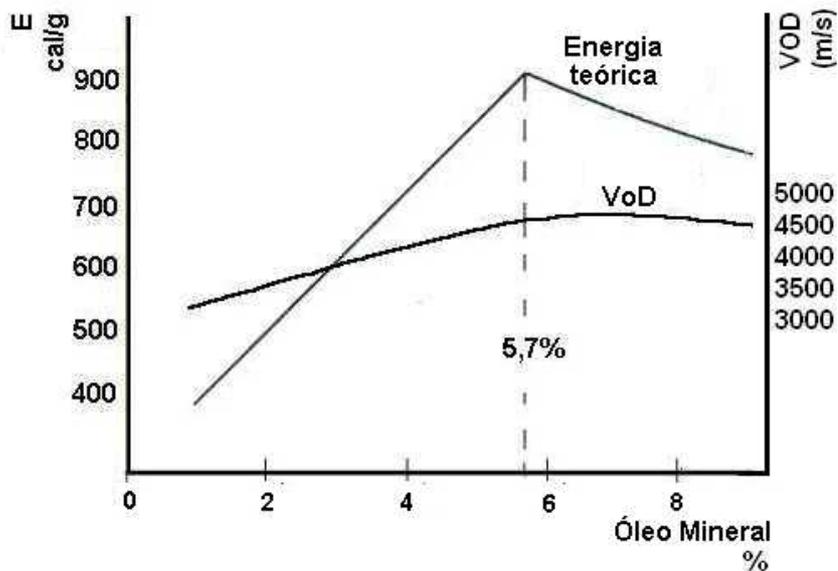


Figura 9. O efeito do balanço de oxigênio no desempenho do ANFO (Adaptado de Hopler, 1999).

2.6.3 Influência da Água

Alto conteúdo de água no grão (*prill*) pode causar empedramento (*caking*) e também inibir a absorção de óleo pelos poros. Um grão (*prill*) que não esfriou adequadamente ou possui muita unidade, normalmente se quebra atingindo o fundo da torre de *prilling*, enquanto que um grão (*prill*) de densidade muito alta é mais resistente, porém apresenta baixa capacidade de absorção de óleo (Porter, 1984).

Conteúdo alto na mistura NA e óleo reduz a sensibilidade. Água, por ser um líquido incompressível, quando adicionada a uma mistura tipo ANFO tem a capacidade de substituir os espaços vazios (ar) do nitrato de amônio. Se a solução tender a saturar, pode-se esperar densidades de até $1,4 \text{ g/cm}^3$, o que a torna incompressível (Drury e Westmaas, 1978).

O aumento da umidade contida no nitrato de amônio diminui a velocidade de detonação (VoD) e uma falha completa na propagação da detonação pode ocorrer na mistura ANFO para 8 % de conteúdo de água (Sutton e Pugsley, 1964). A Figura 10 ilustra o efeito da água no ANFO depois de uma hora de imersão usando ambiente de confinamento do tipo tubo de ferro de 76 mm. Quanto mais tempo o NA ficar em contato com água, tanto pior o seu estado de deterioração, ou seja, tende a se tornar uma solução saturada sal – água.

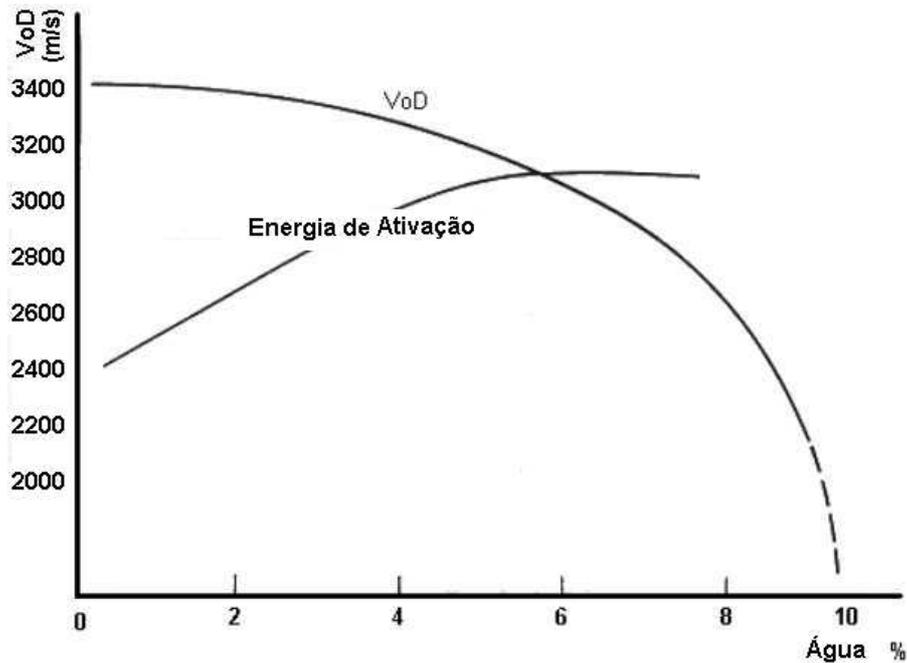


Figura 10. Efeito da água na velocidade de detonação e iniciação de ANFO em tubos de ferro de 76 mm (Adaptado de Monsanto, 1972).

2.6.4 Absorção de Óleo

O grão (*prill*) de nitrato de amônio deve absorver um mínimo de 6% de óleo combustível para garantir o balanço de oxigênio adequado (5,7% óleo). Nitrato de amônio é um material poroso e deve absorver combustível líquido se esse tiver viscosidade adequada e tempo suficiente para penetrar no grão. Para se examinar a capacidade de absorção do grão (*prill*), existe um teste onde se mergulha o NA em óleo por um determinado período de tempo, drena-se o excesso de óleo por gravidade, toma-se o peso, centrifuga-se o óleo restante e então se mede a diferença entre antes e depois da centrifugação para se obter o volume de óleo efetivamente absorvido pelo grão (*prill*). O percentual obtido é considerada a capacidade de absorção do grão (*prill*) para o óleo examinado, na temperatura medida (Porter, 1984). A Figura 11 mostra imagens obtidas de um Microscópio Eletrônico de Varredura (*Scanning Electron Microscope*) Phillips XL 20 obtidas de NA agrícola e industrial para aproximação de 500 vezes. Pode-se notar uma grande quantidade de pequenos poros no grão (*prill*) tipo agrícola, enquanto no grão (*prill*) tipo industrial os poros são menos numerosos, porém de tamanho significativamente maior.

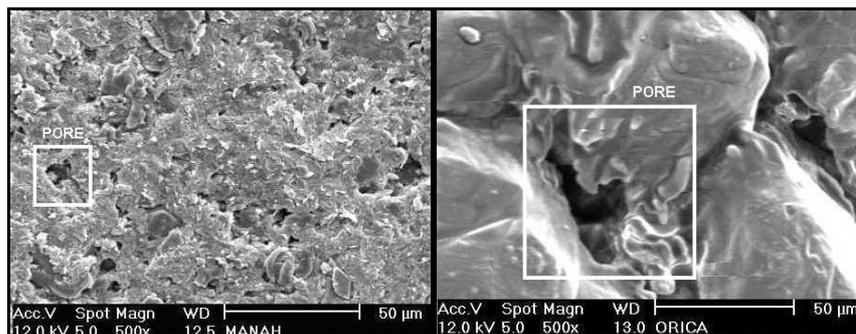


Figura 11. Ao lado direito, grão (*prill*) agrícola distribuído por Manah S.A. Ao lado esquerdo grão (*prill*) industrial distribuído por Orica nos USA (aproximação de 500 X).

2.6.5 Razão de Acoplamento

A Razão de Acoplamento equivale à percentagem do diâmetro de furo preenchida com explosivo. ANFO a granel (derramável) é completamente acoplado, ou seja, preenche todos os espaços dentro do furo, o que aumenta a eficiência à reação de detonação. Explosivos encartuchados são parcialmente acoplados, perdendo parte da energia quando detonam, pois os espaços vazios (ar) dentro do furo são compressíveis. O grau de acoplamento tem importância tão maior quanto menor for o diâmetro do furo, onde qualquer pequena perda de energias pode comprometer o resultado do desmonte (Mohanty, 1988).

Num furo carregado com ANFO encartuchado e baixa taxa de acoplamento, pode-se observar o “efeito canal” (*Channel Effect*). Esse fenômeno é observado na detonação do cartucho de ANFO, quando uma onda de choque no ar se propaga antes da frente de detonação no espaço anelar entre o cartucho e a parede do furo. Essa frente pode comprimir grãos (*prills*) ainda não detonados, o que pode modificar a propagação da onda de choque ou mesmo paralisá-la (Liu *et al*, 1988).

2.6.6 Diâmetro de Partícula

Diâmetro de partícula de nitrato de amônio é fator importante para a detonação eficiente de uma mistura ANFO, sendo responsável pelo Diâmetro de Furo Crítico no qual esse tipo de agente explosivo pode propagar a reação de explosão. O Diâmetro de Furo Crítico é definido como o mínimo diâmetro no qual uma carga explosiva

iniciada adequadamente consegue sustentar uma detonação indefinidamente (Crosby, 1998). Esse parâmetro varia de uma mistura à outra sendo relacionado a frente de detonação da reação de explosão. Ao se comparar dois furos carregados com o mesmo agente explosivo e diferentes diâmetros de furo, para o diâmetro maior à frente de detonação é também maior e a eficiência da detonação melhor, sendo indicada por um aumento na velocidade de detonação. Além disso, assumindo densidade constante, a sensibilidade do ANFO aumenta com a diminuição do diâmetro médio de partícula. Esse fenômeno é devido ao aumento da área superficial de contato partícula – óleo (Sutton e Pugsley, 1964). A Figura 12 mostra a variação na VoD devido à mudança do diâmetro médio de partícula dos grãos (*prills*) NA em ANFO para um furo de 203 mm e densidade 0,85 g/cm³.

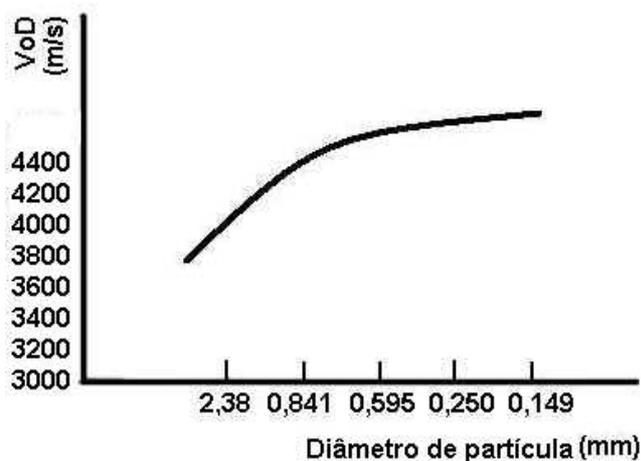


Figura 12. Efeito do diâmetro de partícula do NA no ANFO na velocidade de detonação (Adaptado de Monsanto, 1972).

2.6.7 Confinamento

O tipo de confinamento do agente explosivo no furo influencia o trabalho de expansão dos gases de detonação e a forma como a energia é liberada pelo explosivo. A velocidade de detonação aumenta com o aumento do confinamento (Figura 13), que por sua vez é governado pelas propriedades elásticas da rocha. O mesmo ocorre para sensibilidade, ou seja, quanto maior o confinamento, mais sensível à iniciação se torna a mistura de ANFO (Figura 14).

O grau de confinamento também é importante para manter os gases de explosão e aumentar a eficiência do processo. Quanto mais tempo esses gases ficarem contidos na região do furo, maior energia poderá ser utilizada no trabalho de alongamento de trincas e movimentação de material. O inadequado dimensionamento do Plano de Fogo, subestimando afastamento (*burden*), produz escape de gases prematuramente por juntas abertas e ejeção do tampão, o que diminui a energia disponível para o processo de desmonte (Mohanty, 1988). Em alguns casos nota-se diferenças de velocidade de até 80 % devido a diferenças no confinamento para um mesmo agente explosivo (Dick, 1968).

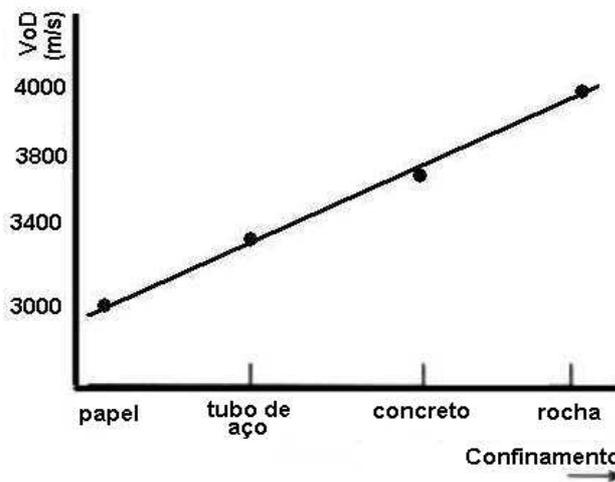


Figura 13. O efeito do confinamento na velocidade de detonação de um ANFO (Adaptado de Dick, 1972).

A Figura 14 mostra a mudança na sensibilidade de uma mistura de ANFO em furo de 76 mm usando detonadores tipo 6 em diferentes tipos de confinamento.

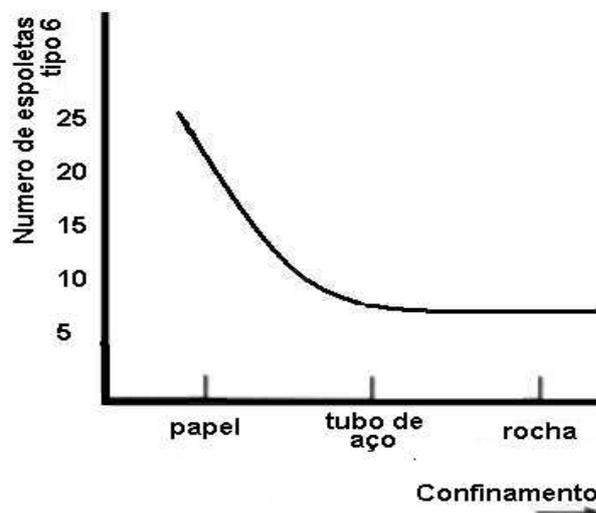


Figura 14. O efeito do confinamento na velocidade de detonação (Adaptado de Monsanto, 1972).

2.6.8 Densidade de Carregamento

A densidade de carregamento de um agente explosivo é uma das mais importantes propriedades para elaborar o Plano de Fogo. A densidade depende da massa, diâmetro de partícula, porosidade e variabilidade dos grãos (*prills*). A maior parte dos grãos (*prills*) de nitrato de amônio apresenta densidades entre 0,7 e 1 g/cm³, entretanto, dependendo do tamanho de partícula, profundidade e diâmetro de furo, essa pode atingir entre 0,5 e 1,2 g/cm³. A sensibilidade da mistura, mais especificamente, o diâmetro de furo mínimo e a mínima carga iniciadora (*primer*) estão relacionados com a densidade de carregamento. Ambos aumentam com o aumento da densidade (Mohanty e Desahies, 1989).

A velocidade de detonação aumenta (Figura 15) e a sensibilidade diminui no ANFO (Figura 16) quando a densidade de carregamento tende a alcançar um valor extremo chamado de pressão limite (*Dead Pressing*), aproximadamente em 1,25 g/cm³. Ao atingir esse valor, não existem mais espaços com gás ou ar (vazios) suficientes para sustentar a propagação da frente de detonação, ou seja, sem condições suficientes para ocorrer compressão adiabática, fenômeno fundamental que mantém a reação de detonação estável em um agente explosivo tipo ANFO. Os espaços “vazios” podem ser compreendidos como centros reativos (*Hot Spots*) que propagam e sustentam a detonação e torna uma mistura explosiva tipo ANFO sensível a uma carga iniciadora (Drury e Westmaas, 1978; Gordon, 1993 e Konya, 1995).

Williams (1992) mostra que os centros reativos aumentam a pressão e a temperatura local quando a onda de choque da detonação encontra um espaço “vazio”, podendo esse ser uma bolha de gás, microesfera de plástico ou vidro. A pressão no entorno do local antes do colapso alcança altíssimos valores quando comparada a outras áreas próximas. Um rápido aumento da temperatura nesses pontos, além de reflexão mecânica ao longo dos poros, amplificam a diferença de pressão causada pela onda de choque. Os processos que geram e mantêm os centros reativos são periodicamente contestados e discutidos por diversos pesquisadores, sendo normalmente definidos como complexos fenômenos mecânicos do tipo não – linear.

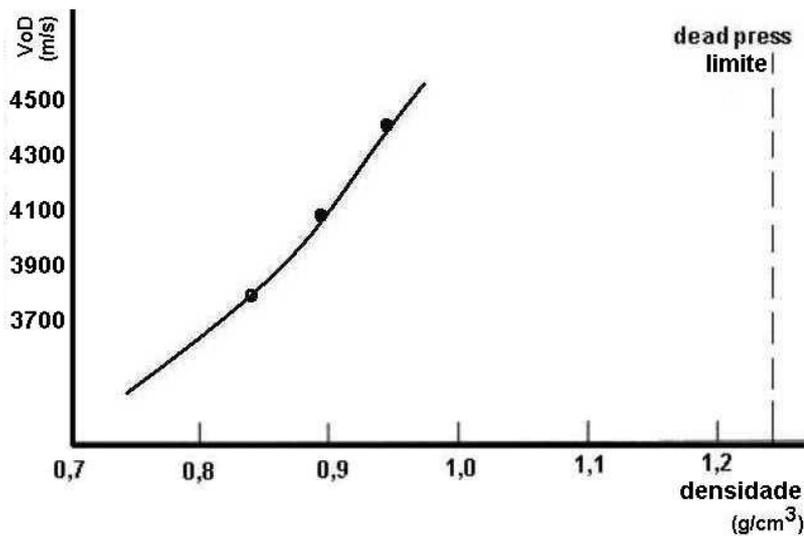


Figura 15. O efeito da densidade de carregamento na velocidade de detonação de ANFO em furo de 152 mm (Adaptado de Dick, 1972).

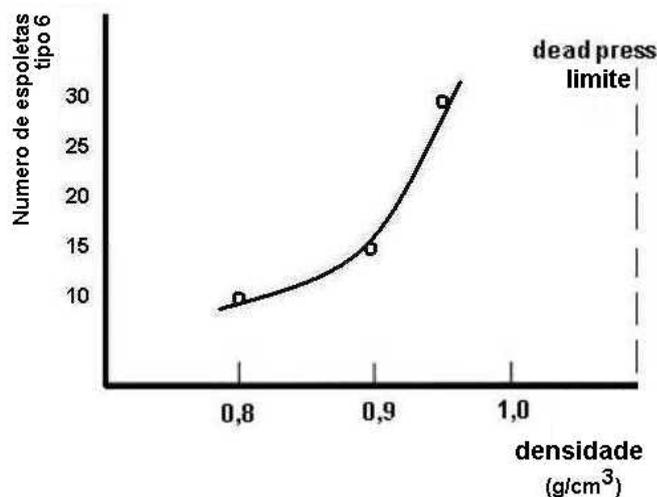


Figura 16. O efeito da densidade de carregamento na sensibilidade a iniciação de ANFO em furo de 152 mm (Adaptado de Dick, 1972).

Normalmente ANFO é recomendado para aplicações que requerem reduzida energia de choque, principalmente formações classificadas como “brandas” onde não se deseja criar novas fraturas, mas sim apenas alongá-las e mover o material. Em algumas situações o ANFO excede em muito a energia de choque necessária para obter resultados adequados em desmontes de rochas “brandas”, tais como carvão e calcário. Nessas situações é possível adicionar materiais inertes de baixa densidade como borracha e resíduos vegetais a mistura tipo ANFO e desse modo diminuir a energia liberada pela detonação (Seção 4.2.2).

2.6.9 Diâmetro de Furo Crítico

O Diâmetro de Furo Crítico, ou o mínimo diâmetro no qual uma carga explosiva sustenta uma detonação indefinidamente depende de confinamento e densidade de carregamento da carga (Monsanto, 1972). A velocidade de detonação do ANFO aumenta com o aumento do diâmetro de furo até um limite onde se estabiliza (Dick, 1972). Para densidades de mistura entre 0,80 e 0,90 g/cm³, ANFO confinado apresenta diâmetro crítico em 25,4 mm. Para ANFO não confinado ou confinamento “baixo”, o diâmetro crítico é próximo a 76 mm. Para ambas situações de confinamento, a velocidade de detonação do ANFO aumenta até um limite de diâmetro de furo de 300 mm, onde a velocidade alcança 4400 m/s, porém, tende a se estabilizar próximo a esse valor para diâmetros maiores. Os efeitos do diâmetro de furo e confinamento para diversas densidades de carregamento de ANFO são apresentadas na Figura 17.

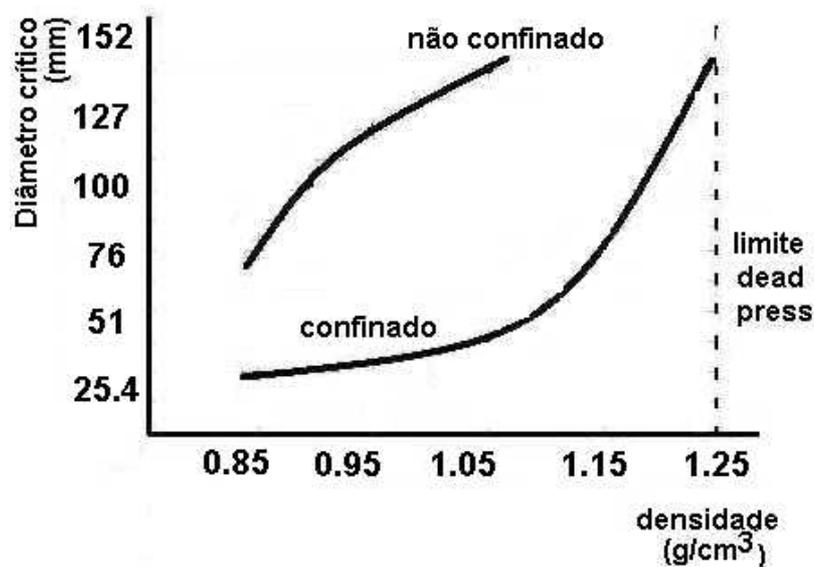


Figura 17. O efeito da densidade de carregamento no diâmetro crítico de mistura ANFO em ambiente confinado e não confinado (Adaptado de Monsanto, 1972).

2.6.10 Empedramento (Caking)

Empedramento (*Caking*) ou (*Cycling*) é a expansão e quebra do sal NA quando esse passa de um estado físico cristalino para outro de acordo com mudanças na temperatura (Figura 18). Mudanças na estrutura cristalina criam padrões complexos e espaços “vazios” durante cada troca de fase, o que pode, em alguns casos até aumentar as áreas para absorção de óleo. Entretanto, esse processo contínuo de quebra tende a diminuir o número de espaços “vazios”, elevando a densidade até alcançar a pressão limite (*Dead Pressing*) e assim tornar o ANFO muito pouco sensível (Dahn e James, 1980).

T °C	Fase Cristalina	Densidade g/cm ³
169,6	Ponto de fusão	
	CÚBICA I	1,38
125	TETRAGONAL II	1,4
84,4	ORTORRÔMBICA III	1,65
32,2	PSEUDOTETRAGONAL IV	1,73
-18	TETRAGONAL V	1,66

Figura 18. Estados cristalinos e densidades aproximadas para grão (*prill*) de nitrato de amônio (Adaptado de Clark, 1987).

2.6.11 Temperatura

Temperatura tem efeito significativo na velocidade de detonação do ANFO. Baixas temperaturas podem reduzir o tamanho dos espaços vazios ou bolhas de gás dentro do grão (*prill*) e assim desensibilizá-lo por completo. O aumento da temperatura, por sua vez pode aumentar a sensibilidade à iniciação de uma mistura tipo ANFO (Crosby, 1998).

2.6.12 Testes de Sensibilidade

Testes de sensibilidade são usados para avaliar segurança ao manusear explosivos e agentes explosivos, iniciação e comportamento da propagação para alcançar uma detonação estável. A sensibilidade do ANFO é uma função da área superficial ou tamanho de partícula, confinamento e temperatura. Quanto maior a área superficial, maior a sensibilidade (Mason e Aiken, 1972; Crosby, 1998).

As Nações Unidas padronizaram um procedimento chamado Test 5(a) (UN, 1990), sendo usado para determinar a sensibilidade de uma mistura explosiva e poder diferenciar um explosivo de um agente explosivo. A técnica utiliza placas testemunhas de aço (Figura 19), onde o estímulo inicial é dado por um detonador padrão tipo 8 (espoleta 8) inserido centralmente no topo da mistura explosiva que é derramada em três estágios dentro de um tubo de papelão. Cada amostra deve ser testada três vezes.

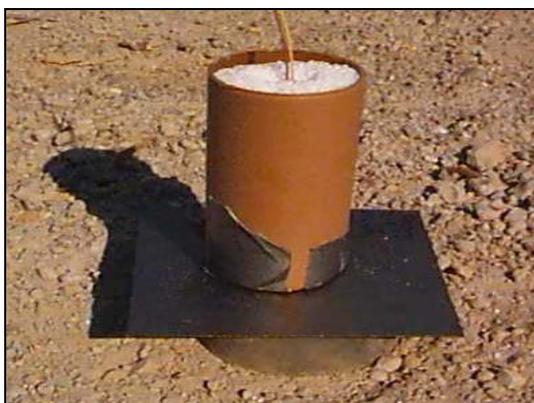


Figura 19. Teste 5 (a) de sensibilidade à espoleta 8 (Munaretti *et al*, 1999).

Segundo Dick (1972) agentes explosivos são extremamente seguros e insensíveis, baseado nos critérios de classificação militar e para dinamites comerciais. Os testes mais comuns são os de impacto (*drop test*), de fricção (*pendulum friction test*), de choque (*rifle bullet impact test*), e calor ou faísca (temperatura).

No caso de encartuchamento, o teste de sensibilidade de espaço vazio (*air-gap*), que verifica a distância máxima entre duas cargas capazes de propagar a reação de detonação, também, é um importante fator para assegurar desempenho da mistura. Quanto maior o diâmetro da carga, mais facilmente ocorrer a propagação por entre espaços vazios. No caso de agentes explosivos, esses testes na maioria das vezes não são usados, visto que esse tipo de mistura somente em condição especial de encartuchamento, diâmetro de furo, confinamento e iniciação mostra propagação por espaços vazios (*air gaps*). Recomenda-se evitar qualquer situação de perda de contato entre duas partes da mistura explosiva (Dick, 1972).

Para se compreender iniciação e propagação de ANFO, deve-se observar que para obter-se desempenho mínimo da mistura, existe um peso mínimo de carga iniciadora (*primer*) adequado que define a suscetibilidade da mistura para detonar e diâmetro de furo crítico, que está relacionado diretamente com sensibilidade.

2.6.13 Carga Iniciadora (Priming)

ANFO é um agente explosivo normalmente insensível e que não pode ser iniciado por meio de um detonador regular, assim um alto explosivo é necessário como carga iniciadora (*primer*). Essa por sua vez, é um explosivo iniciado por um detonador (espoleta) e que inicia um material explosivo menos sensível, como o ANFO. A sensibilidade de iniciação e o desempenho de uma carga iniciadora (*primer*) são dependentes do tamanho de partícula dos seus ingredientes, da densidade, da área de contato da carga iniciadora (*primer*) – agente explosivo e do posicionamento da carga iniciadora (*primer*) em relação à carga principal (agente explosivo).

A velocidade de detonação (VoD) inicia em baixa ordem para ANFO (velocidade abaixo da velocidade de estado constante ou *steady state velocity* (SSV) e avança até estabilizar em SSV. Por outro lado, é possível iniciar o ANFO em alta ordem (velocidade mais alta do que a SSV) e então diminuir e estabilizar em SSV (Morhard *et al.*, 1987). Konya (1995) definiu SSV como a velocidade normal na qual o explosivo detonaria para um determinado diâmetro.

i. Pressão de Detonação

A composição da carga iniciadora afeta significativamente o desempenho nos casos de furos de pequeno diâmetro carregados com ANFO (Konya, 1995). Cargas iniciadoras que geram pressões altas na interface carga iniciadora (*primer*)-material explosivo são as de maior eficiência. O tamanho ou peso de carga iniciadora (*primer*) necessária para iniciar ANFO é função da pressão de detonação que pode ser gerada (Crosby, 1998). A pressão de detonação da carga iniciadora (*primer*), também, influencia a velocidade inicial do agente explosivo e o tempo mínimo necessário para alcançar a sua SSV. O efeito é mostrado na Figura 20 onde o mesmo peso para cargas iniciadoras de diferentes composições e pressões de detonação iniciam um agente explosivo ANFO.

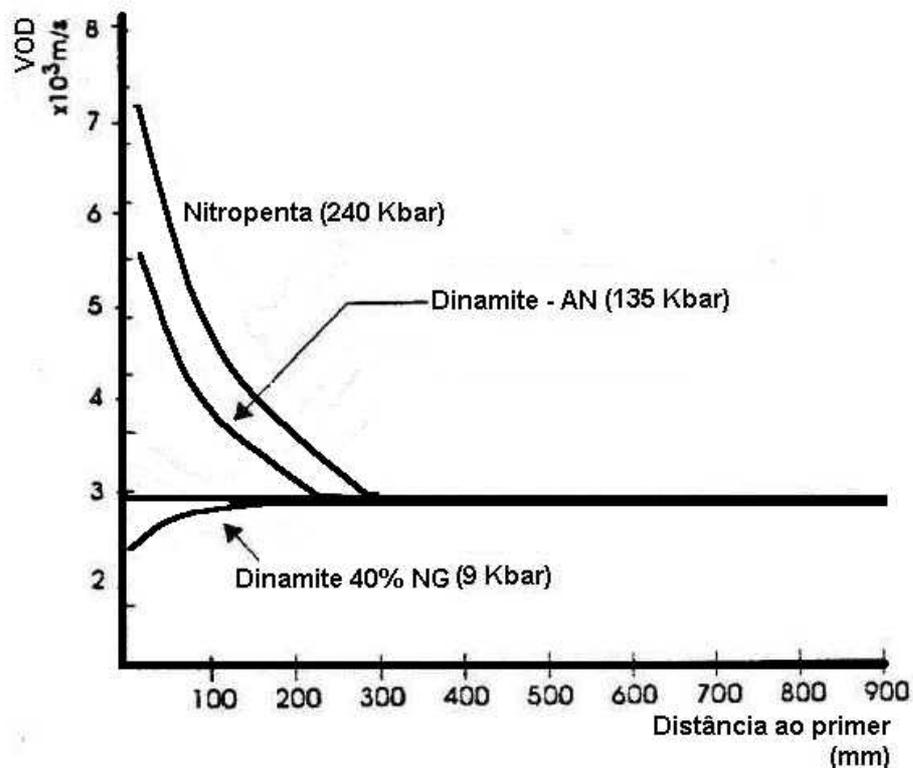


Figura 20. Efeito da pressão de detonação nas velocidades de detonação iniciais de ANFO em furos de 76 mm (Adaptado de Konya, 1995).

As altas pressões de detonação da carga iniciadora (*primer*) promovem velocidades de detonação iniciais mais altas, porém, sempre a SSV é alcançada no período equivalente a quatro diâmetros de furo (dimensão da carga iniciadora igual ao diâmetro da carga). Para furos de grande diâmetro (cargas iniciadoras menores em dimensão ao serem comparados ao furo) são produzidas velocidades iniciais altas com cargas iniciadoras de alta pressão de detonação, porém nesse caso as velocidades iniciais são inferiores a SSV, demorando o equivalente a quatro diâmetros de carga para alcançar o patamar estável. Cargas iniciadoras com baixa pressão de detonação causam uma reação de deflagração na mistura explosiva. Todos as cargas iniciadoras capazes de iniciar a mistura explosiva com velocidade acima da SSV são aceitáveis (Konya, 1995). A Tabela 6 mostra as pressões de detonação normais para agentes explosivos e explosivos são listadas.

Tabela 6. Pressões de detonação de explosivos e agentes explosivos (Adaptado de Morhard *et al.*, 1987)

Produto	Pressão de Detonação (Kbar)
ANFO	41
AI/ANFO	35
Emulsão	93
Nitropenta	225

As melhores cargas iniciadoras para ANFO são produtos de alta-pressão como Nitropenta e Dinamite. Emulsões, também, são cargas iniciadoras eficientes para o ANFO, pois produzem altas pressões de detonação (Crosby, 1998).

ii. Peso da Carga Iniciadora (Primer)

O peso mínimo de carga iniciadora é determinado para um diâmetro de carga não confinada maior que o diâmetro crítico. É função de confinamento, área superficial e dimensão de partícula (Crosby, 1998).

iii. Tamanho de Carga Iniciadora (Primer)

Cargas iniciadoras de pequeno diâmetro não são tão eficientes quanto unidades de diâmetro maiores, ou seja, maior contato com o agente explosivo. A velocidade inicial de detonação de uma coluna de ANFO está relacionada com o diâmetro da carga iniciadora, entretanto a SSV final não varia como mostra a Figura 21. Diversos autores consideram a forma mais eficiente de carga iniciadora, àquela que apresenta comprimento e diâmetro iguais.

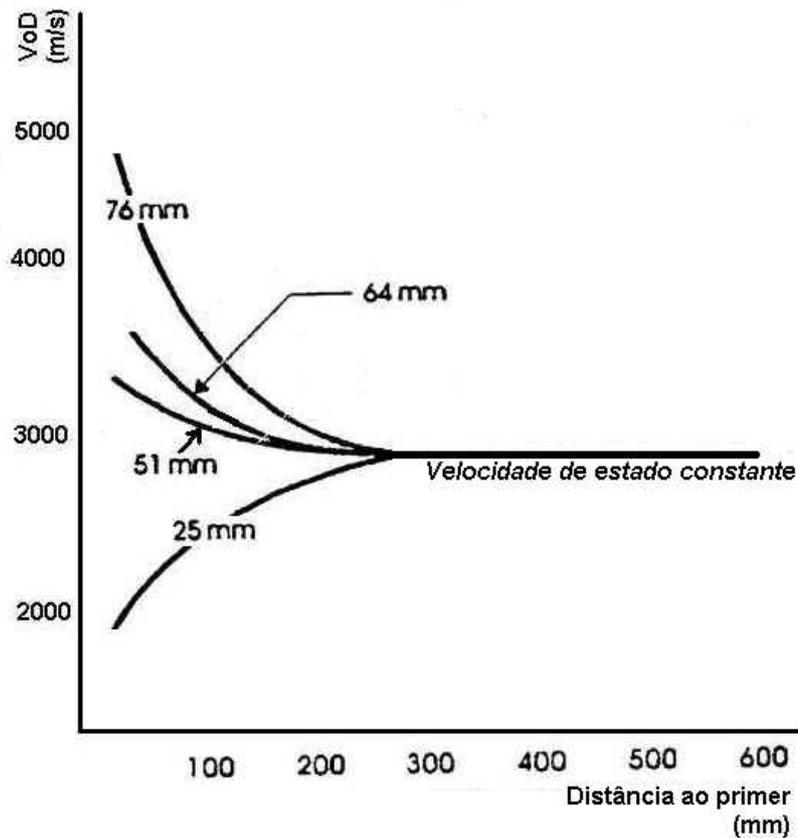


Figura 21. Efeito do diâmetro de carga iniciadora na velocidade inicial de detonação de ANFO a 76 mm usando nitropenta (240 Kbar) como carga iniciadora (Adaptado de Crosby, 1998).

2.7 Avaliação de Desempenho de ANFO

A importância do desmonte é extrema para a mineração. Blocos de tamanho acima do especificado tem custo alto e requerem quebra secundária, além de carregamento secundário. Problemas na praça devido a um resultado não planejado no desmonte que não permitam o rápido carregamento do minério, podem causar danos aos pneus dos equipamentos. Problemas com iniciação, formulação, confinamento, umidade, treinamento dos encarregados de fogo (*blasters*), conhecimento de geologia e outros fatores podem resultar em baixo desempenho do material explosivo, interrupção da operação e escavação, além de gerar vibração, ultralancamento e aumentar os custos em cada fase subsequente do processo.

Devido a esses problemas, desde a introdução das misturas explosivas de Alfred Nobel, foram desenvolvidos vários métodos de teste para medir desempenho de explosivos. Testes de laboratório foram inicialmente desenvolvidos com enfoque em dinamites de diâmetros críticos reduzidos, sendo que alguns desses testes foram adaptados posteriormente para agentes explosivos. Com a utilização crescente dos agentes explosivos, grande parte desses procedimentos foram abandonados devido à falta de eficiência em testar novos materiais. Essa mudança ocorreu quando a própria indústria de explosivos e empresas mineradoras notaram que diferentes explosivos apresentavam diferentes energias de detonação e diferentes quantidades de subprodutos ou gases. Além disso, o uso de explosivos como uma ferramenta poderosa para escavar rochas, requer métodos capazes não só de medir o próprio material explosivo (testes de laboratório), mas, também, sua interação com o ambiente rochoso circunvizinho. Várias técnicas estão disponíveis nos dias de hoje, porém, ainda não há nenhum teste definitivo capaz de calcular o potencial de fragmentação de rocha por um explosivo (Persson *et al.*, 1994).

Segundo Cameron (1992), um teste de desempenho ideal para um material explosivo deve satisfazer os seguintes critérios:

- Custo reduzido e simplicidade;
- Fornecer resultados reproduzíveis;
- Quantificar energia de choque e energia de gás;
- Ser capaz de sustentar uma reação completa de mínimo impacto ambiental;
- Refletir o desempenho do material explosivo em condições de campo.

Sabendo-se que não é possível satisfazer todas as condições usando as técnicas disponíveis atualmente, é possível realizar alguns experimentos controlados que podem ser úteis para estimar o potencial de quebra de um determinado material explosivo. Esses podem ser testes de força, velocidade de detonação e crateramento, entre outros.

2.7.1 Força de um Explosivo

i. Força por Brisância

Brisância consiste na habilidade de um explosivo em fragmentar um objeto sólido quando em contato direto com esse (Persson *et al.*, 1994). É possível classificar força ou Brisância por meio de um “Morteiro Balístico”, aparato que consiste em um morteiro de aço apoiado por uma armação de alumínio suspensa em uma estrutura especial, no formato de um pêndulo. A armação de alumínio e o morteiro contendo uma câmara de disparo e uma câmara para um projétil de aço, são projetados para mover lateralmente (Figura 22). Uma carga de 10g de explosivo é inserida na câmara e detonada, de modo que e o movimento do pêndulo é registrado como medida da energia liberada (Mason e Aiken, 1972)

Brisância (B) é expressa como:

$$\mathbf{B = f d VoD} \quad \mathbf{(4)}$$

Onde VoD é a velocidade de detonação, d é a densidade de carregamento e f é a pressão de gás ideal calculada segundo a expressão definida por:

$$\mathbf{f = d_0 v_0 T / 273} \quad \mathbf{(5)}$$

Onde d_0 é a pressão atmosférica, v_0 é o volume específico dos gases do produto da reação (g/cm^3) em 273 K e T é a temperatura de detonação em grau K. A Tabela 7 mostra valores de brisância para alguns materiais explosivos.

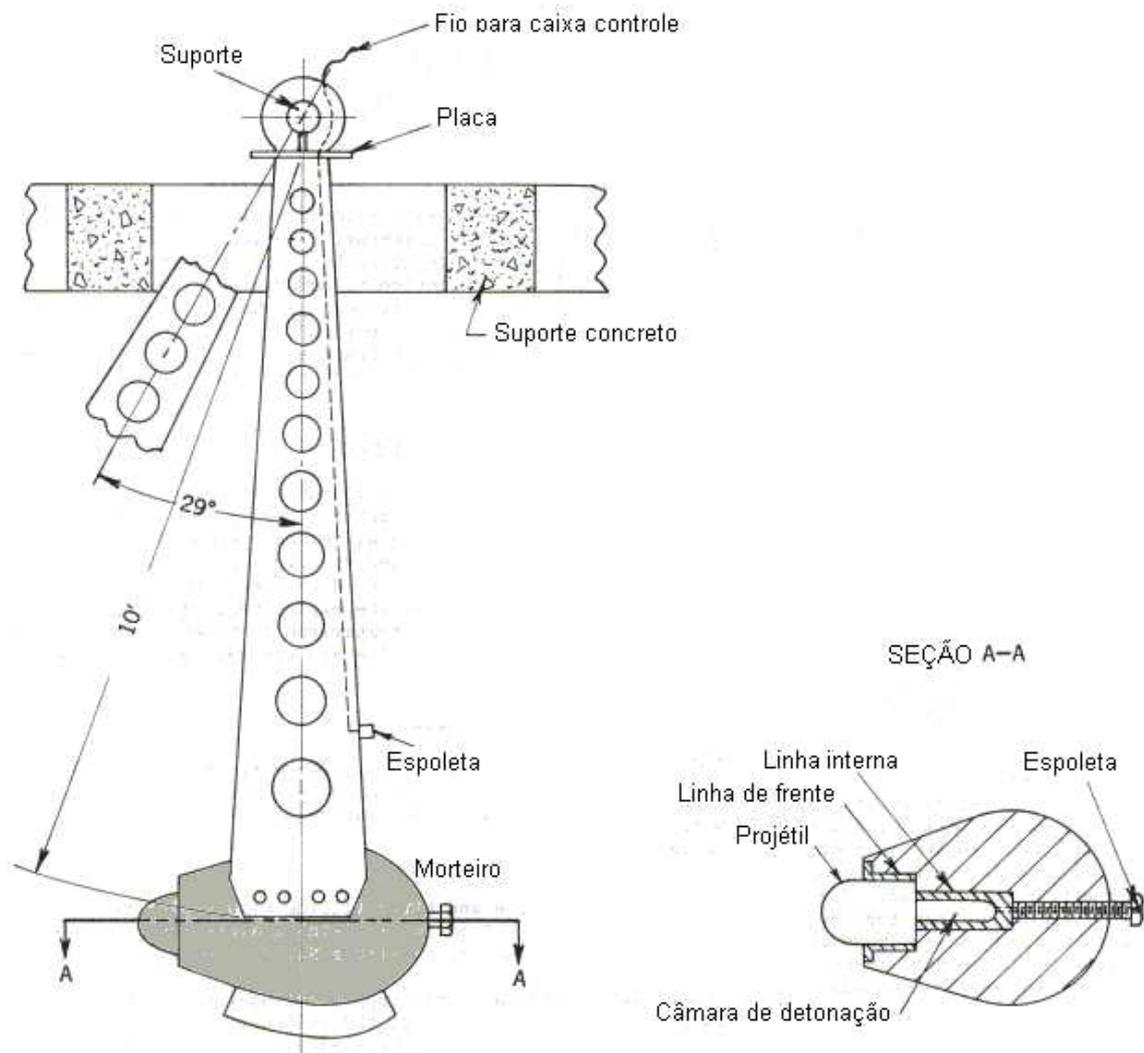


Figura 22. Teste do Morteiro Balístico (Adaptado de Mason e Aiken, 1972).

Tabela 7. Brisância de alguns materiais explosivos (Feodoroff e Sheffield, 1962)

Substância	Brisância 10^6 (Kpm/cm ²)/s	Densidade (g/cm ³)	VoD (m/s)
ANFO	17	1,3	2800
Azida de Chumbo	74,9	1,3	5300
TNT	86,1	1,59	6970
Nitroglicerina	145,9	1,6	7700
Nitropenta	172,8	1,69	8300

Para a maioria dos autores, brisância é um método obsoleto, porém ainda muito utilizado no Brasil. O teste tem vários problemas como a ausência de confinamento e a superestimação da energia de gás, não sendo satisfatório para agentes explosivos devido às reduzidas cargas utilizadas (Sarma, 1994; Crosby, 1998).

ii. Força por Método da Expansão do Cilindro e Bloco Traulz

O método da Expansão de Cilindro é usado para medir a força relativas de um explosivo em termos da habilidade para transferir energia para um cilindro no qual material explosivo está confinado. A velocidade de expansão radial do cilindro pode ser visualizada e medida por meio de uma câmera de alta velocidade do tipo “mirror rotating”, o que permite a calcular a energia cinética baseado na comparação de volumes idênticos de explosivos diferentes (Mason e Aiken, 1972). A velocidade radial (R_v) é expressa em unidades de cm/ms:

$$R_v = M W \tan\theta \quad (6)$$

Onde M é o fator de aumento optico, W é a taxa de gravação da câmera em cm/ms e θ é o anglo da trajetória. A energia por unidade de massa (E/C) é fornecida pela equação 7:

$$E/C = 10^{-7} (M_c R_v^2) / 2C \quad (7)$$

Onde M_c é a massa do cilindro (g) e C a massa da carga (g).

No Bloco de Traulz (Figura 23) 10 g de explosivo são inseridas em um cilindro de chumbo com furo de 2,5 cm de diâmetro, tamponado com areia. O volume da cavidade é medido antes e após a detonação (Persson *et al.*, 1994).

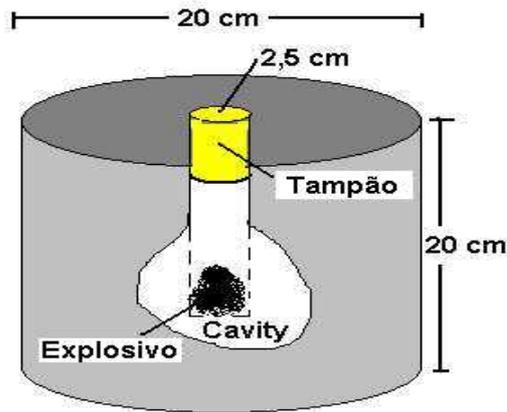


Figura 23. Teste do Bloco de Traulz.

Devido ao diâmetro pequeno, baixa sensibilidade e confinamento, esses testes dificilmente são executados para comparações de ANFO. Além disso, testes de expansão de cilindro apenas provêm uma medida da energia de gás (Sarma, 1994; Person, 1994). A Tabela 8 apresenta alguns valores de força para materiais explosivos no teste do Bloco de Traulz.

Tabela 8. Teste do Bloco de Traulz para alguns materiais explosivos (Persson *et al.*, 1994)

Material	Volume expandido (cm ³)
Nitroglicerina	530
PETN	520
ANFO	316
TNT	300

iii. Força por Teste do Método Subaquático ou Energia de Bolhas (Underwater Method / Bubble Energy Test)

Mason e Aiken (1972) descrevem que a força de uma detonação subaquática pode ser calculada medindo-se a onda de choque e a expansão dos gases produzidos (bolhas). O teste vem sendo usado para ANFO devido à característica de se medir conjuntamente energia de “choque” e energia de “gás”. Dois transdutores piezoelétricos são posicionados dentro da água e conectados a equipamentos que

enviam sinais para osciloscópios, registrando onda de choque e pressão. Esses sinais são gravados em um equipamento digital, onde o intervalo de tempo entre a onda de choque e o colapso da primeira bolha são registrados. Os colapsos das bolhas subseqüentes e seus períodos, também, são registrados. Quando o explosivo é detonado, o choque produzido pela frente de detonação é transmitido à água como uma descontinuidade da pressão seguido por queda exponencial da pressão. À frente de pressão se move radialmente como uma onda de choque na água, até sua velocidade reduzir-se ao valor da velocidade do som. Após a onda de choque, segue uma bolha de gás em expansão, composta de produtos de reação sob alta pressão. Essa bolha de gás se expande a uma velocidade alta até a pressão da bolha alcançar equilíbrio hidrostático.

Como o Método Subaquático é executado em um ambiente homogêneo e de confinamento relativamente “baixo”, ou seja água, serve para indicar o potencial de energia do explosivo, porém, não indica o potencial de fraturamento. Dessa maneira, o método não é adequado para descrever o desempenho de um explosivo na rocha (Sarma, 1994).

2.7.2 Pressão de Detonação

Pressão de detonação é função de velocidade de detonação, densidade e velocidade de partícula do material explosivo à frente da zona de reação. Consiste em uma medida de pressão da onda de detonação, onde a relação entre pressão de detonação e densidade depende dos ingredientes do explosivo (Hopler, 1999). Persson *et al.* (1994) apresenta uma aproximação (8) para estimar a pressão de detonação ideal:

$$P = 0,25 d (VoD)^2 \quad (8)$$

Onde P é a pressão de detonação (GPa), d é a densidade (kg/ m³) e VoD é a velocidade de detonação (m/s).

A pressão de detonação está relacionada ao nível de tensão no material a ser detonado e a fragmentação desejada. São preferíveis explosivos de baixa pressão

de detonação para materiais “brandos” ou porosos. Além disso, a pressão de detonação de carga iniciadora deve exceder a pressão de detonação do agente explosivo de modo a assegurar energia suficiente para iniciar e manter a propagação da reação de detonação (Hopler, 1999).

2.7.3 Pressão de Explosão (Gás)

Pressão de explosão é a medida de pressão dos gases explosivos expandidos a partir do volume inicial do furo, ou seja, a pressão dos produtos da detonação após a reação explosiva a um volume constante. A pressão de explosão é avaliada por intermédio de células de carga e câmaras especiais, porém, boa parte do gás pode ser perdida durante a reação e depois da passagem da onda de choque, onde gás em alta pressão penetra nas fraturas vizinhas ao furo. Outros parâmetros também têm grande influência nas medições, como espaçamento (*burden*), diâmetro de furo e capacidade da câmara. Além disso, diferença de pressão de gás deve ser suficientemente alta para poder ser registrada, o que pode ser difícil em ambiente rochoso com grande número de descontinuidades abertas resultando em um experimento com resultados de alto espalhamento (Scott, 1996).

2.7.4 Geração de Onda Sísmica (Near Field Vibration)

Também conhecido como Medida de Vibração Próxima (*Near Field Vibration*), essa técnica permite medir a habilidade do explosivo em gerar uma onda de choque no maciço rochoso. O teste mede a velocidade de partícula produzida pela detonação de um único furo. Quando o explosivo detona, as ondas de tensão dinâmicas geradas podem induzir tensões que excedem a resistência à compressão dinâmica da rocha, resultando em esmagamento. Como as ondas se propagam para longe do furo inicial, espalhamento geométrico e deformação não elástica do meio rochoso conduzem a uma atenuação da amplitude e energia das ondas. No caso dos gases gerados em alta pressão, as rochas das paredes do furo se expandem até ocorrer equilíbrio e atenuar as tensões induzidas na rocha confinada pela tensão interna. Esses esforços podem ser observados como vibrações das partículas oscilando ao redor de uma posição neutra. A amplitude, frequência e velocidade com que essas ondas se propagam são importantes para o processo de fragmentação (Sarma, 1994).

Scott e Cameron (1988) sugerem uma fórmula para comparar energia de vibração liberada por explosivos diferentes no mesmo ambiente rochoso. A energia sísmica da detonação é teoricamente proporcional à energia de choque do material explosivo. A distância padrão assumida para recolher informação é 1 metro, sendo o primeiro pico de onda P registrado como medida. A estimativa (9) é feita integrando-se o quadrado da velocidade de partícula:

$$E = 0,5 \rho C_p \int v_p^2 dt \quad (9)$$

Onde E é o fluxo total de energia (J/m^2), ρ é a densidade do meio rochoso (kg/m^3), C_p é a velocidade da onda P (m/s) e v_p é a velocidade de partícula (mm/s).

O monitoramento da vibração no entorno da zona de fragmentação fornece resultados de difícil interpretação devido ao meio normalmente não homogêneo e pela presença de juntas abertas. Entretanto, em casos específicos, monitoramento de geração de onda sísmica pode ser utilizada para comparar materiais explosivos similares (Scott, 1996). A variabilidade dos parâmetros que governam a vibração da rocha indica a importância de um estudo detalhado, além da calibração do sistema para cada teste, levando em consideração as propriedades geomecânicas e aspectos geométricos do maciço. Também, é importante que o transdutor fique posicionado a pouca distância do furo que será detonado, situação que dependendo do caso, pode danificar um acelerômetro ou geofone (Scherpenisse *et al.*, 1999).

2.7.5 Calorimetria

A energia liberada em forma de calor de uma detonação pode ser medida por meio de um calorímetro. O meio circulante (normalmente água) fornece um aumento na temperatura que indica a liberação de energia de um determinado explosivo ou agente explosivo. Infelizmente o reduzido tamanho das amostras para calorimetria limita a medição no caso de agentes explosivos de baixa sensibilidade (Crosby, 1998).

2.7.6 Avaliação de Fragmentação

Medida de fragmentação é outra técnica usada para classificar e avaliar desempenho de explosivos. Pode-se peneirar uma pilha de material desmontado ou utilizar técnicas ópticas de análise de imagem para avaliar fragmentação. O primeiro método tem custo alto, requer grandes quantidades de material, equipamento de grande capacidade (peneiras), além de pouco prático. Avaliação óptica não perturba o ciclo de produção, porém algumas limitações são observadas, como a estimativa de finos, devido à resolução da imagem e quantidade adequada de material para a amostra (Paley *et al*, 1991).

Existem vários métodos de avaliação de fragmentação por técnicas ópticas. As imagens são tomadas e comparadas com uma escala, para fotografia ou vídeo continuamente, porém, várias são as dificuldades para amostrar matacos (*oversize*) e finos. No processamento digital de imagem, os contornos dos fragmentos são delineados de modo a quantificar distribuição de tamanho, uniformidade e formato.

2.7.7 Consumo de Equipamento de Carregamento

Alguns autores avaliam fragmentação a partir da energia consumida por equipamento de carga (carregadeira, escavadeira) e de britagem (britador primário). Adhikari (1999), avaliou o desmonte com explosivo baseado na energia consumida por uma escavadeira tipo *shovel* com caçamba de 10 m³ em uma mina de carvão. Os custos finais de escavação foram comparados entre diferentes explosivos e razões de carga para os mesmos parâmetros de plano de fogo.

Vários sistemas comerciais para monitorar equipamentos mecânicos de uma mina estão disponíveis, principalmente para controle em tempo real (*on line*) de tráfego e manutenção. É possível monitorar equipamentos diferentes como escavadeiras, carregadeiras, draglines, caminhões e britadores e comparar os dados de consumo de combustível / energia com a configuração de explosivo utilizada. Atualmente os sistemas de controle computadorizados estão mais eficientes e fáceis de operar, onde facilmente pode-se controlar ciclos de escavação, carregamento e consumo de energia para qualquer operação mineira (Grant, 1995).

Infelizmente, essa técnica ainda é sensível a muitos fatores ruído, tais como geologia, falhas mecânicas, temperatura do ar, pressão de ar e finalmente, a habilidade e treinamento do operador, o que pode gerar dados completamente tendenciosos.

2.7.8 Crateramento

Persson *et al.* (1994), mostra que Crateramento pode ser utilizado para comparar explosivos no mesmo ambiente rochoso. O procedimento consiste em detonar vários furos individualmente em um determinado tipo de confinamento e geologia e posteriormente medir a profundidade e volume de cratera resultante. A técnica apresenta alguns problemas como:

- Dificuldade de encontrar terreno não afetado por desmonte ou escavação mecânica em ambiente de mina;
- Dificuldade de encontrar terreno representativo de toda a geologia em ambiente de mina;
- Requer grande número de amostras;
- Mede o potencial de deslocamento de material para um explosivo e não a sua energia de choque;
- Não considera explosivos para uso em ambiente de duas faces livres, apenas uma.

2.7.9 Velocidade de Detonação (VoD)

Velocidade de detonação de um explosivo (VoD) é definida como a velocidade na qual a onda de choque se propaga por uma coluna de explosivo. Dick (1972) sustenta que velocidade de detonação indica a eficiência da reação. Scott (1996) considera VoD como meio confiável de estimar a eficiência de uma detonação e comparar os dados medidos com os dados calculados para um determinado explosivo em um determinado ambiente rochoso. Segundo Worsey e Chen (1986) há dois fenômenos principais envolvidos na detonação de uma rocha, tensão dinâmica e pressurização quasi-estática dos gases de detonação. Quando a reação ocorre, essa pode resultar em uma onda de choque na rocha, expandindo

cilindricamente. Após a passagem da onda de choque, o furo é pressurizado pelos gases gerados na combustão do material explosivo, induzindo compressão radial e tensões tangenciais e alongando as fraturas pré-existentes ou produzidas pela onda de choque. A medida de velocidade de detonação é uma ferramenta importante de comparação entre eficiência de explosivos, porém, não é um critério definitivo de eleição.

Velocidade de detonação pode ser medida em ambiente confinado ou não, sendo dada em metro por segundo (m/s). Para ANFO confinado, a VoD pode variar entre 2000 m/s em diâmetros de 38 mm a 4400 m/s em diâmetros de 300 mm. Reduzido desempenho de um explosivo é indicado por baixa VoD, podendo ser causada por dessensitização, umidade, baixa temperatura, degradação do NA, pressão limite (*Dead Pressing*), erro no balanço de oxigênio, confinamento “baixo”, iniciação incorreta, entre outros. A velocidade de detonação de um determinado material explosivo é dependente principalmente da sua densidade, composição química, balanço de oxigênio, tamanho de partícula, diâmetro de furo, umidade, recobrimento do grão (*prill*), acoplamento, temperatura e o grau de confinamento.

Segundo Dick (1968) um explosivo de alta velocidade é preferível para desmontar rocha competente, enquanto que para material considerado “macio”, um explosivo de baixa velocidade é indicado por obter resultados satisfatórios a baixos custos. Alguns materiais, particularmente agentes explosivos como ANFO, são muito sensíveis a mudanças de diâmetro, mostrando diâmetros críticos maiores se comparados a explosivos (Seção 2.6.9). A Tabela 9 apresenta velocidades típicas para ANFO confinado a granel em diferentes diâmetros de furo.

Tabela 9. Velocidade de detonação em SSV de ANFO confinado a granel segundo diâmetro de furo (Morhard *et al.*, 1987)

Diâmetro de furo (mm)	SSV do ANFO (m/s)
54	3078
76	3660
152	4200
228	4400

Existem várias técnicas para medir velocidade de detonação, podendo ser classificadas como: i) Ponto-a-ponto (Discreta) ou ii) Contínua. Os métodos contínuos provêm dados de maior detalhe, como aceleração ou possíveis falhas, porém, são mais complexos e de custo elevado quando comparados aos sistemas discretos. O método selecionado depende da precisão desejada, disponibilidade de equipamento, sistema de armazenamento de dados e custo.

i) Métodos Discretos

Um dos mais tradicionais métodos discretos é conhecido como **D'Autrache**, ainda utilizado por fabricantes de explosivos no Brasil. Funciona a partir do posicionamento das pontas de uma amostra de cordel detonante de velocidade conhecida em cada extremo de um cartucho de explosivo. A partir da iniciação da carga, um extremo do cordel detonante é iniciado primeiramente, encontrando depois de iniciado, uma frente de detonação contrária que será iniciada na outra extremidade, após o cartucho ser totalmente atravessado pela sua própria frente de detonação (Figura 24). A resultante da colisão entre as duas frentes de explosão no cordel detonante, marca uma placa de chumbo posicionada paralelamente. A distância dessa marca ao centro do cordel detonante é a medida do intervalo entre o início da iniciação de cada ponta do cordel, sendo usada para calcular a velocidade de detonação da carga explosiva no cartucho (Mason e Aiken, 1972).

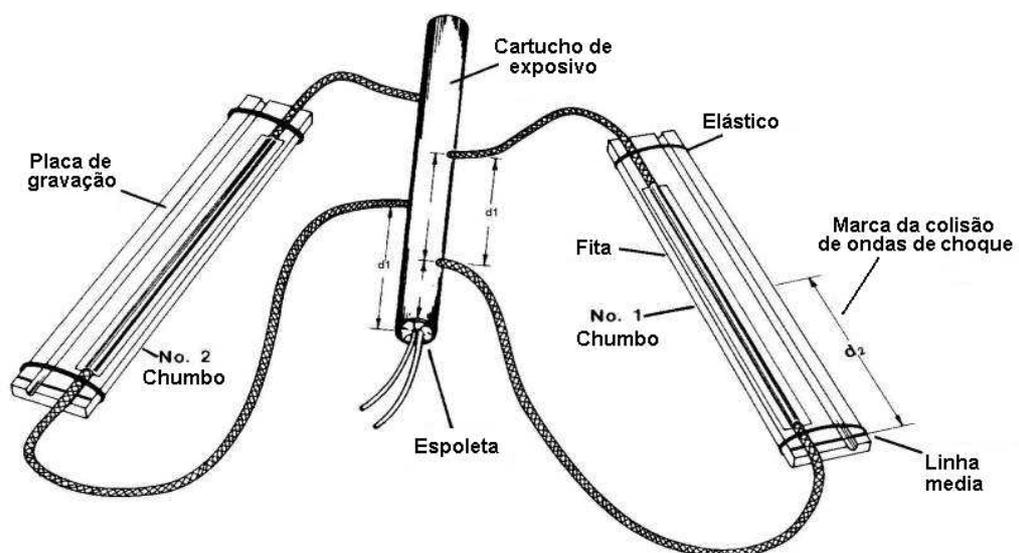


Figura 24. O método D'Autrache (Adaptado de Morhard *et al.*, 1987).

A equação 10 mostra como é feito o cálculo de velocidade de detonação:

$$VoD = (V_{det} \times d_1) / (2 \times d_2) \quad (10)$$

Onde VoD é velocidade de detonação em metros por segundo (m/s), V_{det} é a velocidade de detonação conhecida do cordel detonante (m/s), d_1 é a distância entre a iniciação do cartucho e o cordel detonante (m), d_2 é a distância entre a extremidade da placa e a marca (m).

Como as técnicas discretas examinam a posição da onda de choque na coluna explosiva para uma determinada distância, os sistemas discretos necessitam medir pequenos intervalos de tempo com alta precisão. Isso pode ser feito usando-se um cronógrafo digital, capaz de medir pequenos intervalos entre pontos (alvos).

A onda de choque do explosivo deve atingir alvos, de modo que se obtenha a VoD pelo tempo transcorrido nos contatos dos alvos nas distâncias conhecidas. Métodos Discretos Resistivos, Ópticos e de Plasma indicam a velocidade média de uma coluna de explosivo ou entre pontos de distâncias conhecidas (Hopler, 1999).

Na técnica discreta de **Alvos Resistivos (*Resistive Targets*)**, resistores são posicionados a distâncias conhecidas ao longo da carga de explosivo. Se um resistor é inserido no explosivo, sua resistência tenderá a zero quando for consumido pela frente de onda de detonação. Essa mudança na resistência pode ser usada como gatilho, ou ser registrado como uma mudança proporcional na voltagem durante um determinado período e armazenada. Para se aumentar à resolução do sistema, deve-se adicionar alvos adicionais a sonda (Crosby, 1991).

Na técnica discreta **Óptica**, os alvos são substituídos por cabos de fibra óptica. Quando a detonação alcança um cabo de fibra óptica, a luz emitida pela detonação é transmitida a um módulo de conversão óptico/elétrico que produz uma voltagem proporcional e, então, envia o sinal para registro em um dispositivo de armazenamento. Dois cabos podem ser usados para registrar o tempo de chegada da luz e então determinar a velocidade de detonação entre duas extremidades de cabo posicionadas a uma distância conhecida dentro da coluna de explosivo.

Diversos sistemas elétricos discretos podem ser desenvolvidos. Sarma (1994) e Scott (1996) mostraram um sistema chamado **Sonda de Plasma Contínuo (*Continuous Plasma Probe*)**, usando cabos do tipo “serial” de computador com pares de fios de comprimentos diferentes. Cada par de fios é consumido durante um tempo t , conhecendo-se o comprimento desse par, tem-se a velocidade de detonação entre dois pares de fios. Quando uma frente de detonação alcança o primeiro par, um plasma condutivo elétrico funciona como ponte entre os dois fios abertos (curto circuito) sendo registrado como uma alteração na voltagem. O mesmo processo é realizado para o próximo par aberto de fios, o tempo é registrado e a velocidade entre os dois pontos pode ser calculada.

ii) Métodos Contínuos

Técnicas de **Fotografia e Filmagem de Alta Velocidade** podem ser empregadas para medidas de VoD. O sistema fotográfico está baseado em imagens coletadas durante o processo de detonação por meio de uma máquina fotográfica especial que usa um espelho giratório. Se a velocidade da máquina fotográfica é conhecida, o cálculo da VoD pode ser realizado baseado na seqüência fotografada e o tempo transcorrido. No caso de filmagem em alta velocidade, medições precisas podem ser realizadas com câmeras que filmam até 2×10^6 quadros por segundo (fps). Devido ao alto custo, complexidade do equipamento e dificuldades para iluminar corretamente, ambas as técnicas são preferíveis para uso somente em ambiente de laboratório (blasting chamber) (Crosby *et. al*, 1991).

A técnica **TDR (*Time Domain Reflectometry*)** é utilizada pela indústria de comunicações para localizar discontinuidades inacessíveis à inspeção visual no interior de cabos de fibra óticos. Os norte americanos desenvolveram um sistema chamado **CORRTEX (*Continuous Reflectometry for Radius versus Time Experiments*)**, originalmente projetado para medir VoD de explosões nucleares, tendo sido posteriormente adaptado a explosivos civis (Hopler, 1998). O sistema funciona por pulsos elétricos (*continuous microwave*) enviados por um cabo coaxial comum que é refletido ao encontrar uma anomalia. O sinal refletido é originado de qualquer ponto no cabo onde há uma anomalia de impedância elétrica (curto circuito, circuito aberto ou cabo coaxial esmagado). Conhecendo-se a velocidade de

transmissão do sinal elétrico no cabo e o intervalo de tempo entre o ponto inicial e o ponto refletido, têm-se a velocidade entre os pontos. Se essa distância for a da fonte até o ponto de esmagamento do cabo, tem-se a velocidade de detonação. O cálculo do intervalo de tempo pode ser feito em tempo real quando um fluxo contínuo de pulsos é enviado, indicando a mudança ocorrida no cabo coaxial que está sendo destruído por uma detonação. A limitação da técnica está no número de cálculos necessários durante a destruição do cabo para permitir resolução suficiente. O sistema, também, é sensível a erros gerados devido ao esmagamento incompleto do cabo coaxial (Crosby, 1991).

A técnica de **Ressonância (*Resonance Technique*)** utiliza a variação de frequência em um cabo coaxial alimentado por corrente contínua (Vcc) quando esmagado por uma frente de detonação ao longo de uma coluna de explosivo. O sistema foi desenvolvido originalmente para medir a velocidade da onda de choque de uma explosão nuclear, sendo nomeado **SLIFER (*Shorted Location Indication by Frequency of Electrical Resonance System*)**. Para obter a leitura de VoD, utiliza-se um circuito elétrico oscilante cuja frequência é dependente da sua capacitância e indutância por unidade de distância de cabo coaxial. O comprimento do cabo muda dinamicamente com a detonação da coluna de explosivos, modificando a frequência do sistema. A mudança na frequência é convertida a uma mudança proporcional em voltagem, registrada e comparada ao tempo transcorrido de modo a se obter a velocidade de detonação (Scott, 1996; Hopler, 1998).

A técnica de **Sonda Resistiva Contínua (*Continuous Resistive Probe*)** mede a velocidade da frente de detonação semelhante ao método discreto de Alvos Resistivos, exceto pelo fato que uma sonda substitui os alvos. A sonda consiste em um tubo de alumínio ou cobre com fio isolado no seu interior, ou um cabo coaxial especial posicionado ao longo da coluna explosiva. Quando à frente de detonação destrói a sonda, uma redução na resistência é observada. Essa redução é convertida em uma mudança proporcional na voltagem (Vcc) ao longo do circuito, sendo posteriormente registrado e armazenado junto do tempo transcorrido. Esse sistema está sendo muito comercializado por indústrias canadenses, devido ao seu relativo baixo custo de aquisição, simplicidade e portabilidade.

3. Trabalho Experimental

Um dos fatores que motivou a realização desse estudo foi a contínua necessidade de diminuir os custos das operações unitárias na Copelmi Mineração, o que resultou em melhorias na operação de desmonte da Mina de Recreio. Depois de monitorar continuamente o desmonte tradicional da companhia, foi planejada uma série de testes buscando a máxima eficiência para a operação (menor custo e melhor desempenho) usando nitrato de amônio e óleos combustíveis de diferentes tipos.

A partir de junho de 1998, misturas tipo ANFO foram testadas para substituir primeiramente os NCNs (nitro-carbo-nitratos) "NITRON", utilizados na Mina do Recreio. Após essa etapa, dois tipos de nitrato de amônio começaram a ser testados, tipo industrial (*blasting grade*), "b" e tipo agrícola (*fertilizer grade*), "f". Esses nitratos foram misturados a óleo diesel, "FO", ou óleo lubrificante reutilizado (queimado), "WO". Como os testes preliminares alcançaram resultados encorajadores, foi construída uma planta piloto. Atualmente, misturas de agentes explosivos tipo ANFO são utilizadas em escala de produção na Mina do Recreio e em outras operações vizinhas da Copelmi.

A possibilidade de utilização de óleo lubrificante reutilizado em ANFO é enfatizada nesse trabalho, podendo diminuir custos e problemas ambientais. Normalmente, esses óleos são coletados e transportados para tratamento, sendo então reciclados com custos que podem ser significantes. Se óleo lubrificante reciclado é capaz de substituir óleo diesel, não há nenhuma necessidade de se adquirir óleo diesel especialmente para a operação de desmonte.

Uma série de testes foram realizados nas dependências do Laboratório de Pesquisa e Planejamento Mineiro - LPM, no Laboratório de Tecnologia Mineral - LTM, e no Laboratório de Medições Mecânicas - LMM da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Além desses, o próprio laboratório da planta de beneficiamento da Mina do Recreio foi utilizada de modo a investigar a viabilidade de uso do ANFO. A caracterização do maciço rochoso, dos combustíveis e nitratos de amônio disponíveis foram realizadas de modo a investigar

a influência desses elementos no desmonte com ANFO. As misturas foram posteriormente testadas e comparadas por meio da medição da velocidade de detonação para diferentes tipos de grão (*prill*) de nitrato de amônio, óleos, densidades e cargas iniciadoras. Também foram estudadas técnicas de encartuchamento que permitissem o uso de ANFO pela empresa em condições não ideais, como por exemplo, alta umidade.

A pesquisa permitiu uma diminuição de 33% no custo de desmonte da Mina do Recreio quando comparado à situação anterior de 1997 (emulsão e NCN). O processo de implementação do ANFO iniciou em outubro de 1998, testando nitratos de amônio do tipo industrial e agrícola, óleo diesel (FO), óleo lubrificante reutilizado (WO) e óleo de soja (SOY). Desde então, misturas tipo ANFO, ANWO e ANSOY foram testadas até alcançar a atual escala de produção, onde existe mão de obra treinada e adaptada para as técnicas necessárias ao uso de agentes explosivos desse tipo. O estudo permitiu, também, o desenvolvimento de um equipamento capaz de avaliar velocidade de detonação das misturas e poder compará-las. Essas medições permitiram aperfeiçoar cargas iniciadoras (*primers*) e densidades e selecionar as misturas de maior VoD e menor custo por metro cúbico de acordo com o nitrato de amônio e óleo utilizados.

3.1 Local de Testes de Campo

Três companhias dividem o mercado de carvão para geração de eletricidade no Rio Grande do Sul, a empresa estatal Companhia Riograndense de Mineração – CRM com pelo menos duas operações, a mineradora Carbonífera Palermo Ltda com uma mina a céu aberto e a Copelmi Mineração Ltda. Os testes de campo foram executados na Mina do Recreio onde a maior parte das operações da Copelmi estava centrada. A Mina do Recreio é uma operação a céu aberto, localizada no Município de Butiá, a 90 km oeste da capital do estado, Porto Alegre, conforme mostrado na Figura 26. Essa mina produz $1,7 \times 10^6$ t/a de carvão térmico (3100 – 5300 kcal / kg).

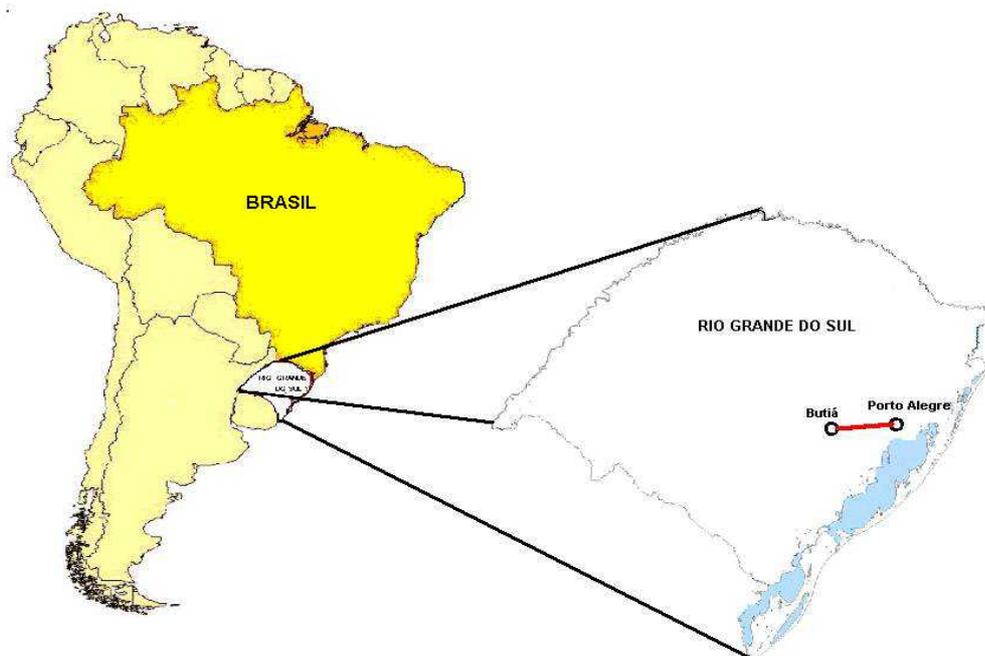


Figura 25. Localização do Município de Butiá.

3.1.1 Geologia

Os depósitos de carvão do estado se encontram na Bacia do Paraná, a qual devido a movimentos tectônicos gerou camadas de pouca espessura. As camadas de carvão são parte da Formação Rio Bonito (Permo-carbonífero), onde podem ser encontrados, folhelho, siltito, arenito, calcário e paraconglomerados (Corrêa, 2000).

A área denominada de Butia-Leão é dividida em blocos (sub-bacias) separados por falhas regionais, como a Falha Leão (N 40° E) e Vigia-Roque. Essas foram formadas sobre um embasamento cristalino irregular onde ambientes pantanosos puderam se desenvolver. O Bloco Butiá (a leste da falha) possui 90 m de estéril (*overburden*), enquanto o outro lado (Bloco Leão) pode alcançar 450 m de profundidade (Tomedi, 1998).

As profundidades das camadas de carvão variam de 20 a 60 m, sendo exploradas pela Copelmi as de espessuras que excedem 0,25 m. Examinando a coluna estratigráfica do local, podem ser observadas duas principais camadas, S (S1, S2, S3) e M (M1, M2) de espessura máxima aproximada em 1 metro. Contrária a camada M, a camada S apresenta regularidade e grandes concreções piritosas. Podem ser observadas estreitas camadas vizinhas a S e M, como A1, A2, B, C, L, I1 ou I2 intercaladas por siltito, folhelho, lamito e arenitos (Figura 26).

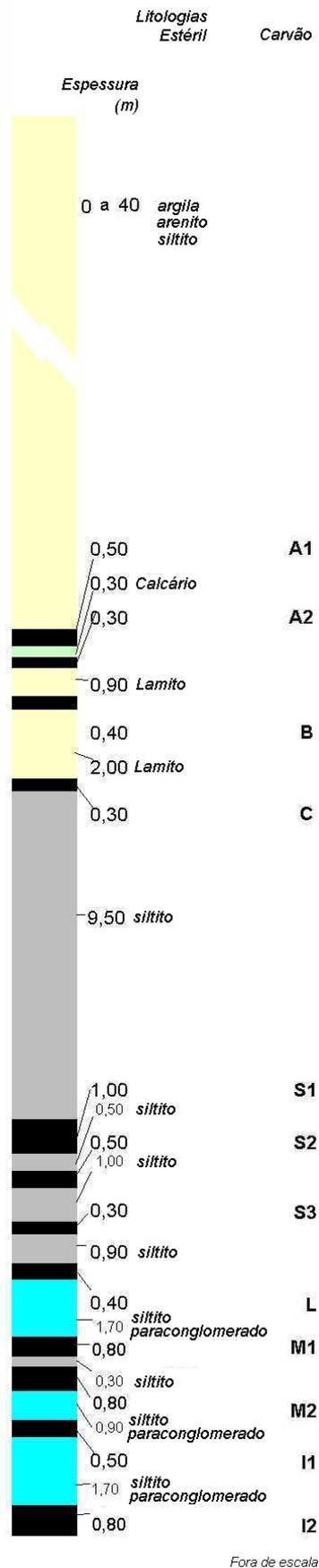


Figura 26. Coluna estratigráfica resumida para a Mina do Recreio.

3.1.2 Método de Lavra

O método de lavra utilizado na Mina do Recreio é “*striping mining*”, produzindo 2×10^6 t por ano de ROM (*run of mine*), poder calorífico 2,300 a 3,900 kcal/kg e relação estéril minério 7:1 (m^3/t). Para extrair o carvão, 13×10^6 t de estéril devem ser removidas anualmente. O carvão e o estéril são detonados separadamente quando necessário, de modo a facilitar a escavação em bancadas descendentes. O carregamento do material é feito por escavadeiras de caçamba $4 m^3$ e o transporte por caminhões fora de estrada de 30 t (estéril) e rodoviários de 15 t (carvão). O corte típico apresenta 120 m de largura por 3000 m de comprimento, profundidade máxima de 70 m, bancadas de 6 m de altura, bermas de 5 m e inclinação de banco de 45° .

3.1.3 Desmonte com Explosivos

A Mina do Recreio utiliza aproximadamente 260 t de ANFO por ano. As condições geológicas e climáticas permitem o uso de pelo menos 75% de ANFO e o restante é carregado com emulsão ou ANFO encartuchados.

O objetivo principal do desmonte de rochas na Mina do Recreio é “desagregar” o material rochoso de modo a facilitar a escavação principalmente do estéril (siltito e arenito). O plano de fogo é planejado de modo a apenas “soltar” o material e não move-lo, mantendo baixa diluição.

A frota de perfuratrizes consiste em equipamentos pneumáticos para perfurar diâmetros de 76 ou 89 mm, onde os furos podem alcançar 9 m de profundidade. A razão de carga é diferente para cada tipo de rocha, entretanto essa relação varia entre $90 g/m^3$ e $200 g/m^3$ para tampão típico de 2 m preenchido com pó de furação (Figura 27).

As detonações são monitoradas por sismógrafos em pontos base, sendo controlada a carga máxima por espera e minimizadas as vibrações decorrentes do uso de explosivos. A iniciação é puntual por tubo de plasma BRINEL (não-elétrica),

permitindo iniciar diversos furos por detonação e manter baixa vibração do terreno, ultralancamento, ruído e falhas. A Tabela 10 mostra os principais parâmetros do plano de fogo utilizado na Copelmi.

Tabela 10. Parâmetros típicos de plano de fogo da Mina do Recreio

Símbolo	Parâmetro	
D	Diâmetro	76 - 89 mm
K	Altura de Bancada	6 m
H	Profundidade	5 m
U	Sub ou sobre furação	Depende da localização do carvão
B	Afastamento	3,5 m
S	Espaçamento	3,5 m
T	Tampão	2 m mínimo, pó de furação
PF	Razão de carga	90-200 g/m ³ (ANFO – 5% emulsão)
V	Volume detonado por furo	61,25 m ³

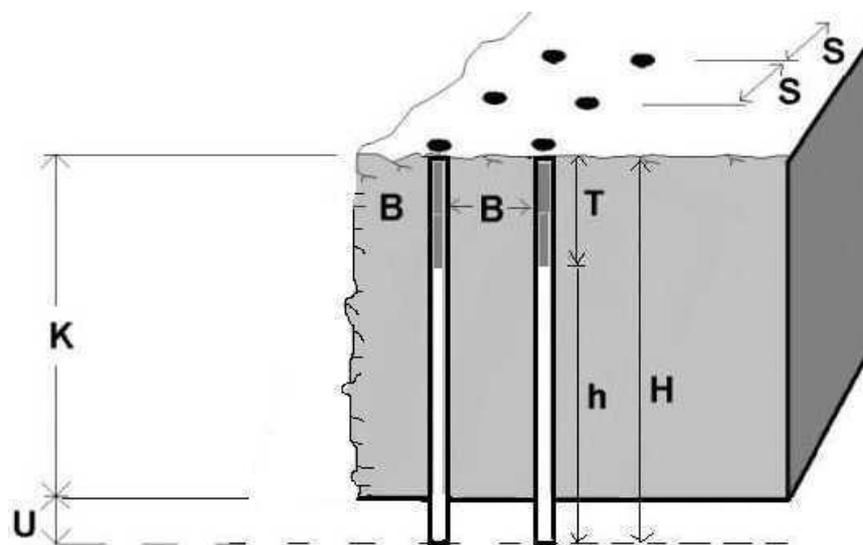


Figura 27. Plano de fogo típico para Mina do Recreio.

3.2 Caracterização do Maciço Rochoso

No processo de detonação, as propriedades físicas e mecânicas do ambiente rochoso influenciam na formação de fraturas no entorno do furo. Gases em alta pressão são liberados alguns instantes após a onda de choque, estendendo as fraturas e transferindo energia (cinética) para o material rochoso circundante. Essa fase é governada pelas propriedades do explosivo e principalmente sua interação com o maciço rochoso, particularmente com a presença de descontinuidades ou vazios (Scott, 1996).

As propriedades geomecânicas do maciço rochoso facilitam a previsão de sua resposta ao processo de detonação. Índices de qualidade como Q (Barton *et al.*, 1974), RQD (Deere, 1966, 1989) ou RMR (Bienawski, 1974, 1989) podem ser adaptados para definir domínios e áreas de diferente “desmontabilidade” (“blastability”), ou seja, capacidade de fragmentar e mover material no tamanho e local desejados. Diversos autores, entre eles, Lilly (1986) relacionam eficiência de um desmonte de rochas com densidade de juntas abertas ou fraturas, sua orientação, densidade e dureza.

Esses índices de qualidade são úteis para prever o potencial tamanho de bloco *in situ* pós-detonação, a atenuação provável da onda de choque e a migração dos gases explosivos pelo maciço rochoso. As forças dinâmicas, entre elas a resistência à compressão da rocha, governam a geração de novas fraturas e a extensão de fraturas pré-existentes. O comportamento das tensões em uma rocha é refletido na sua capacidade de transmitir energia. A densidade de um material rochoso afeta tanto a energia exigida para deslocar os fragmentos da detonação, quanto as características de transmissão de energia na rocha. Outras propriedades físicas como porosidade e conteúdo de água, também, influenciam as características mecânicas da rocha e sua resposta ao processo de desmonte. No caso de material muito poroso, existe uma tendência de alta deformabilidade, o mesmo ocorrendo para rochas já oxidadas em adiantado processo de intemperização (Chantale *et al.*, 1994).

3.2.1 Critério de RQD

A presença de um grande volume de fraturas diminui a energia requerida para obter fragmentação suficiente, porém a ausência de descontinuidades requer o uso de alta energia de choque e alta densidade de explosivo para se obter resultado adequado.

Corrêa (2000) descreve geomecanicamente as camadas observadas na Mina do Recreio, onde valores de RQD entre 21,4 e 63,1% podem ser obtidos (Tabela 11). Esses valores indicam material considerado “brando”, sem a necessidade de uma reação explosiva de alta energia de choque para obter a fragmentação desejada. Essa informação indica que agente explosivo tipo ANFO pode ser utilizado no desmonte de rochas do local. O procedimento de cálculo de RQD é mostrado esquematicamente na Figura 28.

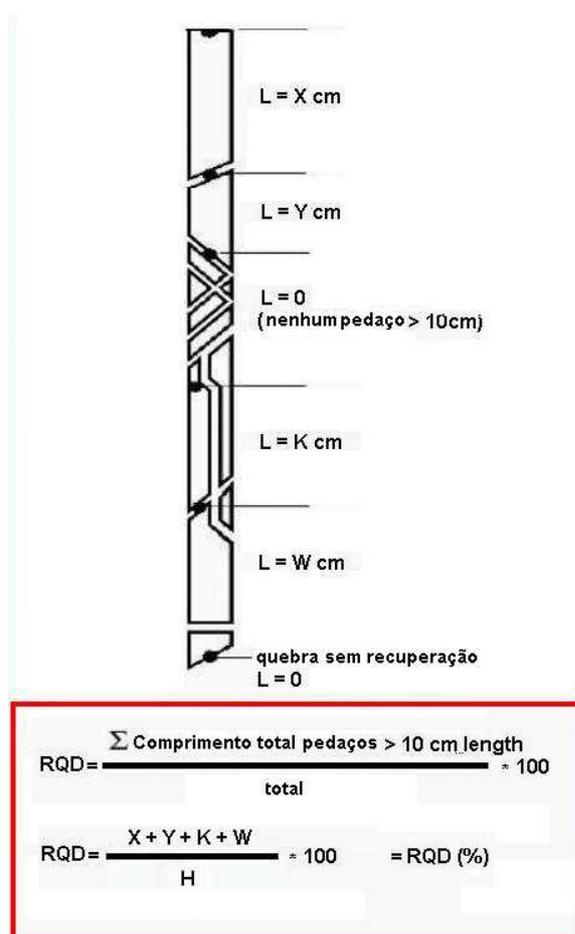


Figura 28. Procedimento de cálculo para RQD (Adaptado de Deere, 1989).

Tabela 11. Valores de RQD para a Mina do Recreio (Corrêa, 2000)

Camada	RQD médio
Siltito A	41
Camada A	21,4
Siltito B	46,7
Camada B	49
Siltito C	29,3
Camada C	45,2
Siltito S12	23,2
Camada S	45
Estéril S3	22,4
Camada S3	35,1
Estéril L	31,7
Camada L	63,1
Estéril M	27
Camada M	24
Estéril I	47

3.2.2 Resistência a Compressão

A resistência à compressão de um material controla a geração de novas fraturas e a extensão de fraturas pré-existentes para ambas as fases da detonação, onda de choque e expansão de gás (Scott, 1996). O teste de resistência à compressão mede a quantidade máxima de carga que um material suporta antes de se fraturar ou fragmentar (Bienawski, 1989).

Sabendo-se que o comportamento das tensões de um maciço rochoso influencia na sua capacidade de transmitir energia, a seleção correta de um explosivo ou agente explosivo depende da tenacidade ou coesão do material que se pretende fragmentar. Planos de acamadamento, descontinuidade, planos de fraqueza e presença de água, também, colaboram para a distribuição da energia explosiva. Uma rocha normalmente intemperizada ou trabalhada por processos

geológicos, apresenta alta porosidade e densidade de fraturas, sendo conseqüentemente, facilmente deformável. Baseado nisso, a avaliação da resistência a compressão é critério indispensável para selecionar o material explosivo adequado para a situação.

Compressão Uniaxial ou UCS (*Uniaxial Compressive Strength*) e Índice de Compressão Puntual ou PLSI (*Point Load Strength Index*) podem ser utilizados respectivamente para determinação e estimativa de resistência à compressão de um material. Resistência à compressão uniaxial é tradicionalmente utilizada para prever resistência de rochas, entretanto, transporte e armazenamento de amostras normalmente mudam a resistência do material testado. O teste PLSI, pode ser utilizado no local de desmorte aplicado axialmente a amostras irregulares de material, fornecendo uma aproximação confiável da UCS da rocha (Soni e Ashwani, 1994).

Corrêa (2000) determinou a UCS de 138 amostras na Mina do Recreio, variando de 26,35 a 124,08 MPa por ambos os métodos. Broch e Franklin (1972) proveram uma relação entre os dois procedimentos (Equação 12), sendo utilizada por Soni e Ashwani (1994) na análise de maciços rochosos antes do desmorte.

$$\text{UCS} = 24 \text{ PLSI} \quad (11)$$

Onde UCS é a UCS em MPa para amostras de rocha com relação diâmetro/comprimento de 1:2 e PLSI é o Índice de Compressão Puntual em MPa.

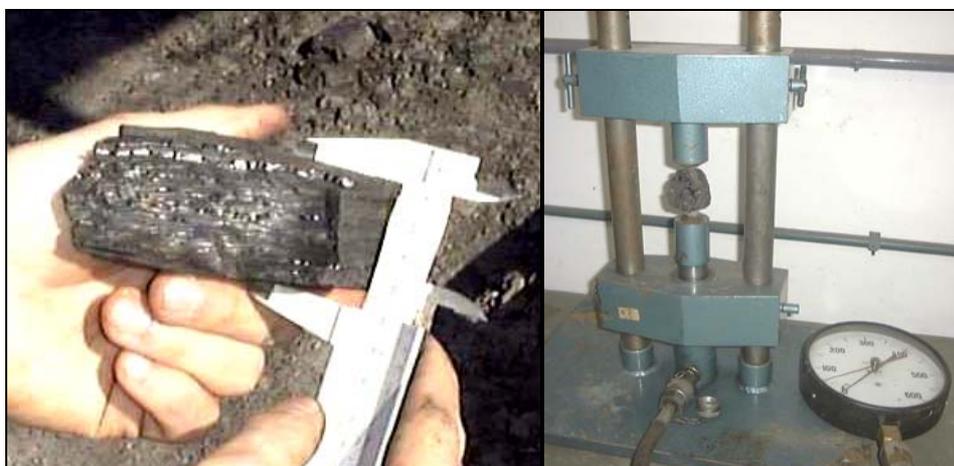


Figura 29. Índice de Compressão Puntual - PLSI.

Baseado nos valores de resistência à compressão, as rochas da Mina do Recreio podem ser classificadas como “brandas”, sendo indicado o uso de ANFO (Sen, 1995; Scott, 1996; Adhikari, 2001).

3.2.3 Densidade

A densidade da rocha afeta a energia necessária para mover o material desmontado e a propagação pelo maciço rochoso (Chantale *et al.*, 1994). Rochas de baixa-densidade são facilmente fragmentadas com agentes explosivos, enquanto que materiais densos são relativamente difíceis de fragmentar. A densidade da rocha é diretamente relacionada com a fragmentação e lançamento do material (Adhikari, 2001).

Explosivos de baixa VoD são mais efetivos em materiais “macios” devido ao volume alto de espaços vazios, tempo de exposição maior aos gases de detonação e baixa energia de choque. A quantidade maior de gás gerada por explosivos de baixa VoD reduz a perda de energia consumida no "esmagamento" ou pulverização próxima ao furo, o que reduz a chance de criar finos de carvão, reduz danos aos taludes próximos e melhora o lançamento quando requerido para o desmonte (Johnson, 1996). Todas as rochas na Mina do Recreio apresentam baixas densidades como mostrado na Tabela 12.

Tabela 12. Densidades das rochas da Mina do Recreio (Abadi, 1999)

Camada	Densidade (g/cm³)
Arenito	2,24
Siltito	2,34
Carvão	1,67
Lamito	2,61

3.3 Caracterização do Óleo Combustível

Vários óleos combustíveis foram disponibilizados para uso no ANFO durante os testes, entre eles óleo lubrificante de motor reutilizado, óleo diesel e subprodutos do refino do óleo de soja (Biodiesel).

No Brasil, 85% do óleo diesel é produzido internamente pela estatal Petrobrás. O restante do mercado nacional é abastecido com óleo diesel importado. Existem cinco tipos de óleo diesel comercializados no Brasil, A, B, C, D e Marítimo. Segundo o Departamento Nacional de Combustíveis (DNC, 1997), todos os tipos de óleo diesel apresentam os mesmos níveis de contaminação de água, densidade e viscosidade, como mostrado na Tabela 13. O óleo tipo A foi o utilizado para os testes na Mina de Recreio. A determinação da densidade ou densidade relativa de óleo diesel é realizada pelo Método ASTM D92 para temperaturas entre 15 e 35°C e viscosidade abaixo de 15,000 cSt (mm /s).

Tabela 13. Características do óleo diesel no Brasil (DNC, 1997)

Óleo diesel	Água e Sedimentos	Densidade	Viscosidade @ 40°C
	(%) max.	(g/cm ³)	(cSt)
Método de ASTM	D 1796	D 4052	D 445
Um, B, C, D, Maritimo,	0,5	0,8200 / 0,8800	1600 – 6000

O óleo lubrificante de motor reutilizado (WO) para os testes foi obtido na frota de caminhões fora-de-estrada e escavadeiras da mina. A qualidade do WO usada no ANFO é importante para assegurar desempenho adequado na detonação, a segurança e saúde dos trabalhadores, além de proteger o meio-ambiente. WO é coletado durante a manutenção feita nos equipamentos da mina, transferido a um tanque de armazenamento por mangueiras conectadas no reservatório de óleo do equipamento de modo a evitar contato com água. Deve-se salientar que óleo de motor normalmente apresenta maior resistência à oxidação e carbonização do que o diesel, pois está preparado para evitar deposição de agentes agressivos, prejudiciais para a vida útil e desempenho do motor. Existem ainda outras possíveis vantagens da substituição de diesel por WO em agentes explosivos: redução de custos, pois

não necessita adquirir diesel, elimina a necessidade do descarte e manipulação desse material e diminui a dependência de importações de óleo.

Existem diversas mineradoras utilizando WO ou misturas de WO e diesel em ANFO. Zadra (1996) descreve um processo utilizado na Echo Bay Minerals-McCoy/Cove Mine nos USA. Segundo Mining Engineer (2001) e Mining Magazine (2001) algumas minas da Austrália reciclam WO da Shell no ANFO, onde esse resíduo de hidrocarboneto potencialmente tóxico é totalmente destruído pelas altas temperaturas da explosão. No Brasil não existe nenhuma legislação para uso de WO no ANFO, assim como para a maioria dos países. Nos USA, várias agências governamentais estão envolvidas na aprovação de WO para ANFO, como o Bureau of Land Management, a Environmental Protection Agency, o Occupational Safety and Health Administration e o Mine Safety and Health Administration segundo descrito no Title 30, Sec. 56.6309 - Fuel Oil Requirements for ANFO: “óleo lubrificante usado, incluindo de carter, não deve ser utilizado no preparo de misturas de nitrato de amônio – óleo combustível, exceto nos casos onde o usuário indica o benefício de mudar o regulamento e garante que a segurança e os riscos ambientais não são aumentados por meio de uma Petição para Modificação encaminhada ao MSHA (USCFR, 2001; Ruhe e Bajpayee, 1998).

Biodiesel ou ésteres de óleo de soja são usados como substitutos do diesel em várias situações. Os óleos mais comuns utilizados para preparar os metil-ésteres são óleo de girassol, coco, soja, arroz, milho e gordura animal (WFC, 2000). Dois diferentes metil ésteres de soja fornecidos pela Olivebra Industrial S/A e Sulina Comércio de Óleos Ltda foram testados. Esses óleos são subprodutos da destilação da soja, um produto de alta viscosidade “ácido graxo de soja” e um óleo “leve” chamado de “destilado de soja”. As vantagens aparentes do uso de Biodiesel são a diminuição na dependência de produtos de petróleo a diminuição nas emissões de CO₂ e NO_x dos gases de detonação. Infelizmente, o primeiro teste (resistência de água) não alcançou diferenças significativas quando comparado com WO e diesel, de modo que a pesquisa não avançou (Seção 4.3). Além disso, esses óleos não estavam disponíveis para testes em escala de produção e apresentavam custos muito elevados quando comparados a WO e diesel.

3.3.1 Composição Química

Óleo lubrificante reutilizado normalmente contém contaminantes que podem modificar a sensibilidade do ANFO. Partículas de quartzo, metais pesados com propriedades catalíticas ou gasolina podem tornar o agente explosivo sensível a detonador tipo 8, principalmente sob elevadas temperaturas, o que nesse caso mudaria a classificação do material para explosivo. Alto conteúdo de água pode reduzir a sensibilidade, especialmente a baixa temperatura ambiente. Contaminação excessiva na forma de metais pesados, solventes clorados ou outros materiais sintéticos, podem causar problemas de saúde e ambientais (Ruhe e Bajpayee, 1996).

As informações sobre a qualidade do WO utilizada nos testes foi obtida com base nas análises geradas pelo departamento de manutenção da mina, além de laboratórios externos. Esses relatórios forneceram uma indicação dos componentes do óleo, no qual hidrocarbonetos, metais pesados e outros elementos foram observados. Os intervalos de troca de óleo dos equipamentos foram em média 235 horas para os caminhões fora-de-estrada Randon RK 430, e escavadeiras Liebherr e CAT 425-435. Mobil Delvac 1400 e CAT CG-4 são os óleos lubrificante usados pela Mina do Recreio, específicos para carter e temperaturas entre -10 e 50 °C, (15W40 viscosidade SAE) e manufaturados a partir de óleos minerais parafínicos, detergentes e dispersantes.

Óleo de motor normalmente se deteriora assim que os produtos da combustão contaminam a mistura, como partículas microscópicas metálicas e poeiras depositadas, espessando e reduzindo as características de proteção antidesgaste. Além disso, contaminação por água e combustível pode ocorrer, o que torna as propriedades do óleo diferentes das planejadas para uso no motor. Essas partículas podem ser observadas utilizando-se um Espectrofotômetro de Absorção Atômica (*Atomic Absorption Spectrophotometer*), o qual analisa os metais e os aditivos presentes no óleo registrando em partes por milhão (ppm). A espectroanálise fornece informações sobre o desgaste do motor, na forma de cobre, chumbo, estanho e sílica. No caso de partículas no óleo maiores de $5 \mu\text{m}$, incluindo sílica, carbono, fibras e insetos, entre outros, utiliza-se métodos ópticos a laser ou

convencionais. Esses métodos informam a quantidade, tamanho, distribuição de partículas e a identificação (Suttill, 1989).

Segundo Ruhe e Bajpayee (1998) contaminantes como zinco podem ser perigosos para armazenamento de ANFO. A mistura pode se tornar auto-reativa alcançando o seu ponto de ignição com subsequente detonação. Os contaminantes podem ser achados no nitrato ou no óleo combustível (detergentes e outros elementos aditivos) ou algum contato durante o manuseio e armazenamento com superfícies de metal. Amostras de óleo lubrificante contendo carbono, alumínio, ferro aquecidas a temperaturas de 60° a 80°C por mais de 72 horas não apresentam auto-ignição. Entretanto amostras de óleo mineral com concentrações de zinco maiores que 15 % mostram tendência para reagir quando aquecidos a 80°C. Segundo Xuguang (1994), nitrato de amônio pode reagir com alguns metais como cádmio, cobre, zinco e chumbo quando em estado de fusão. Essa interação produz nitrato de amônio instável onde sob condições especiais possibilitam auto-combustão.

A Tabela 14 mostra a composição dos óleos lubrificante MOBIL DELVAC 1400 e CAT CG4 após utilização pelos equipamentos da Mina do Recreio de acordo com a norma ASTM D5185.

Tabela 14. Espectroanálise de óleo lubrificante usado (WO)

Elemento	WO				
	Amostras	Média (ppm)	Desvio Padrão	Max.	Min.
Ferro	65	36,68	30,13	132,6	9,3
Cobre	66	3,78	5,05	26	0,1
Alumínio	65	6,91	12,68	83	0,5
Zinco	5	0,91	0,14	1,1	0,75
Arsênico	5	1,46	1,09	2,92	0
Cádmio	5	0,27	0,28	0,66	0
Chumbo	41	5,10	8,05	41	0
Cromo	39	2,79	3,17	17	0
Sílica	64	11,68	20,73	134	0,2
Sódio	39	1,95	1,66	7	0
Estanho	39	1,38	2,10	11	0

Sabendo-se que valores elevados de metais pesados (contaminantes) podem tornar as misturas reativas em determinadas condições, além do risco a saúde, foi feita uma comparação entre os valores máximos observados e os limites da legislação norte americana do MSHA - Mine Safety and Health Administration (USCFR, 2001), já que não há legislação semelhante no Brasil. As amostras testadas de WO apresentaram quantidades de metais pesados superiores ao óleo lubrificante novo devido ao desgaste natural dos motores. Nenhum dos contaminantes apresentou quantidade suficiente para representar risco de auto combustão quando misturado ao NA e armazenado no paiól de explosivos, mesmo nos meses de verão quando a temperatura interna do depósito alcança 40° C. Entretanto, quando comparado à legislação do MSHA (Tabela 15), nota-se que o valor de pico encontrado para cromo (17 ppm) é superior ao limite de 10 ppm. Deve-se salientar que a recomendação de todos os fabricantes e distribuidores de óleos minerais é da obrigatoriedade do manuseio com uso de luvas impermeáveis para se evitar contato com a pele.

Tabela 15. Limites do MSHA em ppm para mineradoras norte americanas e concentração máxima no WO e diesel (FO) da Mina do Recreio

Elemento	FO Concentração	WO Concentração	MSHA Limites
Ferro	1,1	132,6	-
Cobre	1,6	26	-
Alumínio	-	83	-
Zinco	1,1	1,1	-
Arsênico	-	2,92	5
Cádmio	-	0,66	2
Chumbo	-	41	100
Cromo	2,0	17	10

* Análise de 3º laboratório.

3.3.2 Ponto de Fulgor (Flash Point)

O Ponto de Fulgor é a menor temperatura à qual existe vapor suficiente no material a ponto desse iniciar ignição. Óleos minerais apresentam ponto de fulgor conhecidos quando recém produzidos em uma refinaria, porém, em algumas situações esse valor pode mudar quando contaminantes tais como solvente, combustíveis, ou outras substâncias inflamáveis estão presentes na mistura, caso

provável para WO. A norma da ASTM D92 utiliza o ponto de fulgor de óleo “fresco” como um valor padrão para comparar WO usando um aparato do tipo “Cleveland Open Cup”. O procedimento é aplicável a todos os produtos de petróleo com pontos de fulgor entre 79 °C e 400 °C. O procedimento normatizado pela ASTM D93, também pode ser utilizado, para temperaturas que variem entre 40 e 360° C por meio de um equipamento do tipo “Pensky-Martens Closed Cup”. Os valores de ponto de fulgor para FO segundo especificação do fabricante e WO segundo testes do distribuidor são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16. Ponto de fulgor dos óleos utilizados na Mina do Recreio

Óleo	Método ASTM	Ponto de Fulgor (°C min)
FO	D93	60
WO	D92	178

Óleo lubrificante reutilizado (WO) apresenta ponto de fulgor superior ao diesel, o que pode ser considerado como vantajoso do ponto de vista de segurança na preparação e armazenagem de agente explosivo ANWO com esse tipo de óleo.

3.3.3 Densidade

A densidade do combustível escolhido é importante para o processo de detonação, visto que baixas densidades de óleo combustível significam menores energias disponíveis (Figura 30). O processo de combustão quando avaliado em motores mostra que normalmente menores densidades fornecem menos energia e liberam menores quantidades de gases (WFC, 2000).

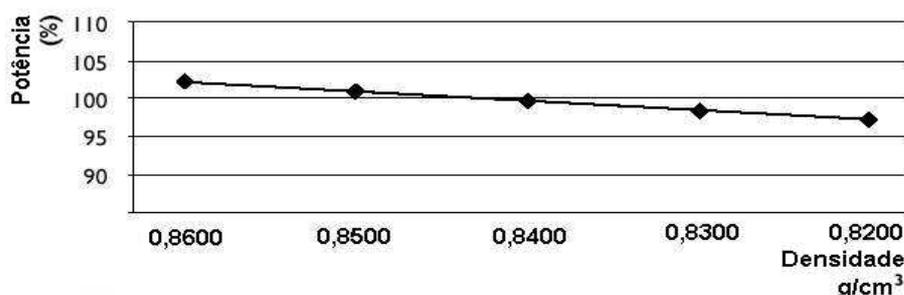


Figura 30. Efeito da densidade do combustível na liberação de energia em um motor a combustão interna (Adaptado de WFC, 2000)

A determinação da densidade ou densidade relativa de combustível e óleo lubrificante normalmente utiliza os procedimentos das normas ASTM D5002 e D4052 para temperaturas de teste entre 15 e 35°C, pressões de vapor abaixo de 600 mm Hg (80 kPa) e viscosidade abaixo de 15000 cSt (mm/s) submergindo um hidrômetro na amostra e observando a escala até o ponto em que o instrumento mergulha no óleo. Os valores obtidos em cinco amostras de óleo lubrificante reutilizado e diesel são mostradas na Tabela 17. Óleo diesel apresenta valores inferiores quando comparado às especificações da ANP (DNC, 1997).

Tabela 17. Densidades dos óleos testados na Mina do Recreio

Óleo	Densidade (g/cm ³)
WO	0,8640
FO	0,8154

Segundo os valores de densidade encontrados, a energia gerada pela combustão do WO seria teoricamente superior do ponto de vista de energia liberada quando comparada ao diesel.

3.3.4 Viscosidade

A Viscosidade Absoluta ou fricção interna de um óleo compreende a resistência a uma mudança em forma, ou movimento de porções vizinhas relativas uma a outra, ou seja, a medida da resistência de um material para fluir (Brookfield Engineering Laboratories, 1986). A viscosidade é a propriedade de resistência de algo a fluir, variando com a temperatura e composição do óleo. O método sugerido pela norma ASTM D445 Método de Teste Padrão para Viscosidade Cinética de Líquidos Transparentes e Opacos (Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids) mede a viscosidade cinética de produtos de petróleo líquidos pelo tempo transcorrido para um volume de líquido fluir por gravidade dentro de um tubo de vidro calibrado (viscômetro) a uma temperatura controlada. A faixa coberta por esse método varia de 0,2 a 300,000 mm²/sec em qualquer temperatura. O resultado é dependente do comportamento da amostra, visando aplicação em líquidos de comportamento Newtoniano.

A unidade de medida de viscosidade absoluta é o *poise*, o qual é definido como a força em *dynes* requerida para mover uma superfície de um centímetro quadrado em área sobre uma superfície paralela a uma velocidade de um centímetro por segundo, com as superfícies separadas por um filme de fluido de um centímetro de espessura. A unidade de medida de viscosidade cinemática é o *stoke*, expresso em centímetros quadrados por segundo, o qual pode ser relacionado à viscosidade absoluta pela equação:

$$cSt = cp \div \text{densidade do fluido} \quad (12)$$

Esse teste serve para determinar a condição do óleo, ou seja, a influência no grau de absorção e segregação do grão (*prill*) de nitrato de amônio. Foram examinadas sessenta e três amostras de WO em um período de 5 anos usando um viscosímetro do tipo ADV IV em temperatura de 40° C controlada por termômetro digital. Além disso, o mesmo teste foi executado para óleo diesel (5 amostras), mostrando viscosidade menor quando comparada ao WO (Tabela 18).

Tabela 18. Viscosidade obtida a 40° C (ASTM D445) para os óleos disponíveis para o agente explosivo na Mina do Recreio e especificação de fabricantes

Óleo	Número de Amostras	Viscosidade (cSt)
MOBIL DELVAC 1400 (fresco)	*	105
CAT CG4 (fresco)	*	116.8
WO	63	106.58
FO	5	2.7

• Segundo catálogos dos fabricantes

Devido à viscosidade do WO ser 39 vezes superior ao FO, as misturas com nitrato de amônio se comportam diferentemente quanto à absorção. Por sua reduzida viscosidade, o FO é provavelmente absorvido com maior velocidade pelo grão (*prill*), entretanto quando exposto a alta temperatura pode evaporar, além de segregar facilmente. Como fluidos viscosos requerem ambientes porosos para serem absorvidos, essa é uma propriedade importante quando se utiliza grãos (*prills*) do tipo industrial (*blasting grade*). O comportamento de absorção e segregação dos grãos (*prills*) estão detalhados nas seções 3.4.4 e 3.4.5.

3.3.5 Ponto de Escorrimento (*Pour Point*)

O Ponto de Escorrimento (*Pour Point*) de um óleo é definido como a temperatura onde esse material tem sua movimentação limitada. Para se medir esse parâmetro, a temperatura do óleo é reduzida em passos de 3°C (ASTM D97) abaixo da temperatura de “cloud point”, ou seja, temperatura de solidificação dos componentes parafínicos dentro do óleo. Isso ocorre até a total falta de fluidez no óleo, chamado de ponto de escoamento. Esse fator não foi considerado uma preocupação para os testes, entretanto no caso de baixas temperaturas ambientes e dificuldade de mover o óleo para realizar as misturas, aditivos que reduzem o ponto de escoamento podem ser utilizados de modo a evitar que o combustível se torne uma substância sólida.

3.3.6 Conteúdo de Água

Água pode ser encontrada dissolvida (em solução), livre e dispersa ou livre e concentrada no fundo do tanque ou recipiente que armazena óleos combustíveis minerais. A maior parte dos combustíveis apresenta traços de água em qualquer temperatura, diminuindo essa concentração com a redução da temperatura. Qualquer combustível em contato com a umidade do ar absorve pequenas concentrações de água (Caterpillar, 1999). Para a determinação da água nos óleos combustíveis, é utilizada a norma ASTM D1796, método de centrifugação que acusa concentrações de água nas faixas entre 0 e 30% do volume. A Tabela 19 mostra os resultados obtidos na determinação da concentração de água nos óleos combustíveis comparados nesse trabalho.

Tabela 19. Concentração de água nos óleos segundo procedimento recomendado pela norma ASTM D1796

Tipo de Óleo	Água (%)
WO	0,29
FO	0,08

Por apresentar uma quantidade de água 3 vezes superior quando comparada ao diesel, o óleo lubrificante reutilizado (WO) provavelmente dissolve uma parte do NA quando misturado (ANWO), deteriorando e reduzindo a sensibilidade da mistura principalmente em baixas temperaturas. Esse problema pode ser minimizado no caso de se adotar um rígido controle de qualidade do óleo, tanto nos cuidados ao retirar dos motores quanto no armazenamento evitando contato com água. Os resultados obtidos nas medidas de velocidade de detonação das misturas mostram o desempenho inferior ao se utilizar WO (Capítulo 5).

3.4 Caracterização de Nitrato de Amônio

A formulação inicial utilizada na Mina de Recreio consistia de emulsão e ANFO industrial, ou seja, “ANFO pré-misturado” ou NCN (nitro-carbono-nitrato). Mais tarde de acordo com o andamento desse trabalho, foram incluídos agentes explosivos com grão (*prill*) industrial e agrícola para testes. O procedimento operacional de desmonte original foi convertido para usar misturas de 94% de nitrato de amônio PILAR tipo agrícola fornecido pela Pilar Quimica Ltda e 6% de óleo diesel ou WO. Esses testes preliminares permitiram a continuação da pesquisa usando uma planta piloto apropriada (Figura 31) que, posteriormente, foi convertida em uma pequena planta de mistura de ANFO para suprir a mina em escala de produção. O próximo estágio consistiu na repetição dos testes utilizando nitrato de amônio ULTRAPRILL tipo industrial (blasting grade) fornecido pela Ultrafértil S.A. misturado com FO ou WO. Biodiesel foi testado em escala industrial, porém devido aos resultados pouco encorajadores e custo elevado a pesquisa não seguiu adiante (Seção 4.3).



Figura 31. Planta piloto de mistura (esquerda) e atual instalação (direita) para mistura de ANFO e ANWO.

Devido aos resultados e testes preliminares que viabilizaram esse trabalho, a Mina do Recreio tem utilizado WO regularmente em todas as suas operações de desmonte, fato que se estendeu para as outras minas da Copelmi Mineração Ltda. Combustíveis alternativos como WO vem sendo pesquisados e testados por vários autores como Ruhe e Bajpayee (1996) e Zadra (1996). Geralmente, devido ao fornecimento irregular e variação na qualidade desses resíduos, muitas empresas voltaram a utilizar óleo diesel. Entretanto, com a crescente preocupação em proteger o meio ambiente, diversas operações mineiras tem custos elevados para descartar corretamente óleo “queimado”, que deve ser recolhido, armazenado, transportado e reciclado ou tratado para reutilização menos nobre. Devido a todo esse procedimento, ANWO tem potencial para oferecer uma reutilização total do WO descartado por uma mineradora (Gordon, 1993).

3.4.1 Porosidade

Porosidade consiste em um importante fator, permitindo que o grão (*prill*) absorva combustível suficiente, além de ser crítico para o efeito de centros reativos (*Hot Spots*), aumentando a sensibilidade e VoD de um agente explosivo (Villaume, 1993). Os poros não preenchidos com combustível agem como micro espaços “vazios” onde a compressão adiabática mantém a propagação da onda de choque durante a detonação do agente explosivo.

Utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (*Scanning Electron Microscope*) Phillips XL 20 e software AutoCAD R14, foi possível avaliar o diâmetro (eixo mais longo) e tamanho de poros para grão (*prill*) tipo agrícola e industrial. As Figuras 32 e 33 mostram os grãos (*prills*) utilizados nos testes com ampliação de 25 a 500 vezes. O grão (*prill*) de fertilizante apresenta em média 2,46 mm e poros de 7,90 μm , enquanto grãos (*prills*) industriais apresentaram 2,06 mm no maior eixo e poros de 7.82 μm nas suas respectivas superfícies. Os grãos (*prills*) examinados eram semelhantes em forma (esférica), sendo o grão (*prill*) industrial o qual apresenta superfície de maior rugosidade, por ter menor recobertura e grande quantidade de poros abertos, o que facilita a absorção de óleo e água.

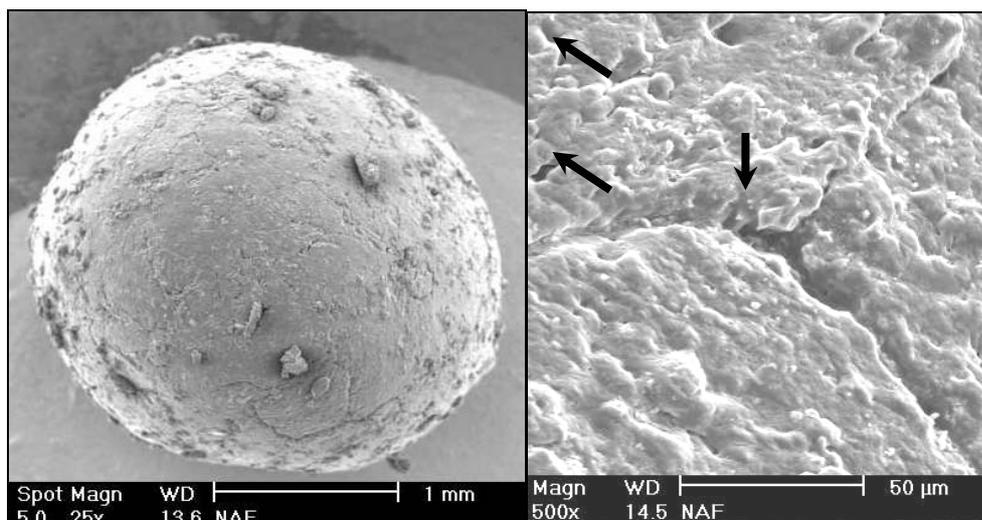


Figura 32. Grão (*prill*) tipo agrícola e poros (indicados com flechas) em aumento de 25 e 500 vezes.

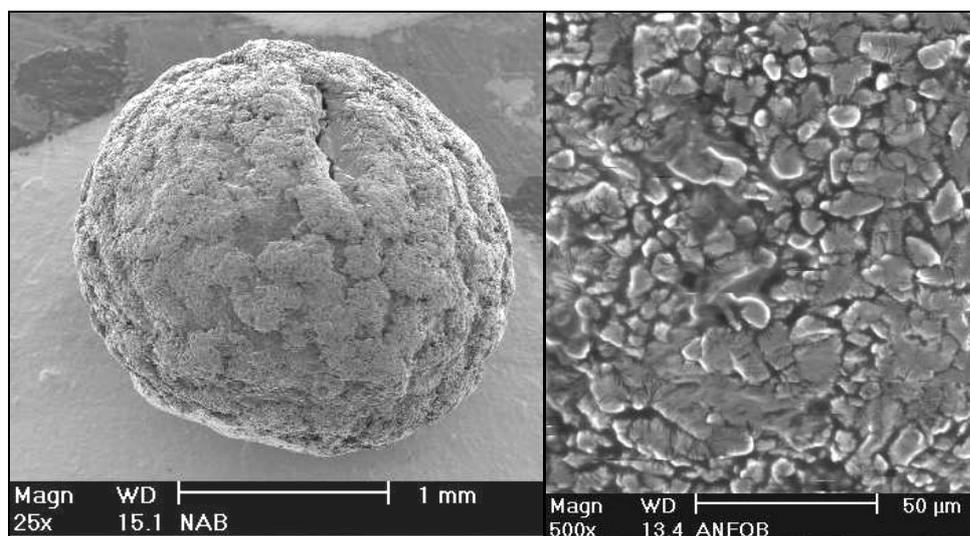


Figura 33. Grão (*prill*) tipo industrial e poros em aumento de 25 e 500 vezes.

3.4.2 Cobertura

Ambos os nitratos de amônio testados utilizam materiais inertes como recobrimento para prevenir empedramento (*cycling*) e aumentar a resistência ao ataque da água. De acordo com Sutton e Pugsley (1964) uma camada espessa de agente de recobrimento diminui a sensibilidade e inibe a absorção de óleo, porém camada pouco espessa pode aumentar a friabilidade do grão (*prill*), facilitando a quebra em partículas menores, aumentando a densidade até pressão limite (*dead pressing*).

O percentual de agente de recobrimento foi medido dissolvendo o NA em água e filtrando a solução em um filtro R42 Whatmann de 85g/m² com abertura 0,025 a 13µm. O material restante foi desidratado em um forno elétrico (45 °C) durante 45 minutos, pesado e examinado por um Microscópio Eletrônico de Varredura (*Scanning Electron Microscope*) Phillips XL 20 visando identificar o tipo de material inerte utilizado. O material encontrado nos grãos (*prills*) tipo agrícola consistia em *filler* PCC (*precipitated calcium carbonate*) de calcário dolomítico, na proporção de 3,10% do peso total. O nitrato tipo industrial, porém, apresentou caolim em uma razão de 2,56% em peso. Segundo Hopler (1998) um grão (*prill*) tipo industrial normalmente apresenta cobertura menor do que 1% em peso, enquanto que para Crosby (1998) a cobertura varia entre 1,6 e 3%. A Tabela 20 apresenta a percentagem de material de recobrimento para dois tipos de NA testados.

Tabela 20. Recobrimento (%) no nitrato de amônio tipo agrícola e industrial

Tipo de NA	Amostras	Recobrimento	Material
Agrícola	3	3,10	CaMg(CO ₃) ₂ (Dolomita)
Industrial	3	2,56	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ (Caolim)

Junto desses agentes de cobertura inertes, foi encontrado uma quantidade pequena de ácidos graxos no NA tipo agrícola, principalmente cadeias de ácido carboxílicos saturados do tipo Myristico (C₁₄), Palmítico (C₁₆), e Estereático (C₁₈), com a fração mais significativa em Palmítico. Esses ácidos graxos saturados normalmente são utilizados como agentes anti-empedramento (*caking*), diminuindo a probabilidade de cristalização com do NA com mudanças na temperatura ambiente (Xuguang, 1994). O método de determinação utilizado foi Cromatografia à Gás (Gás *Chromatograph*) AGILENT 6890 e Detector de Massa Seletivo (*Mass Selective Detector*) AGILENT 5973, a uma razão de a 40°C por 1°C por minuto, e aquecimento numa taxa de 6°C por minuto até 300 °C mantidos durante 15 min. O solvente utilizado foi diclorometano (CH₂Cl₂) (ANEXO III).

3.4.3 Absorção de Óleo

Amostras de nitrato de amônio tipo industrial (b) e agrícola (f) misturados com diesel (FO), óleo lubrificante usado (WO) e Biodiesel (SOY) foram examinados com Microscópio Eletrônico de Varredura. A distribuição de óleo na superfície do grão

(*prill*) pode ser observada, sendo que quanto maior a quantidade de poros abertos, maior absorção.

O grau de absorção do NA é governado pela porosidade do grão (*prill*) e viscosidade do óleo (Givens *et al.*, 1990). A Figura 34 mostra grão (*prill*) tipo agrícola com poros de aproximadamente 9,07 μm e comportamento de baixa absorção, mantendo o excesso de óleo diesel em sua superfície, enquanto que o grão (*prill*) industrial, de grande quantidade de poros de 5 μm absorve óleo com maior eficiência (Figura 35).

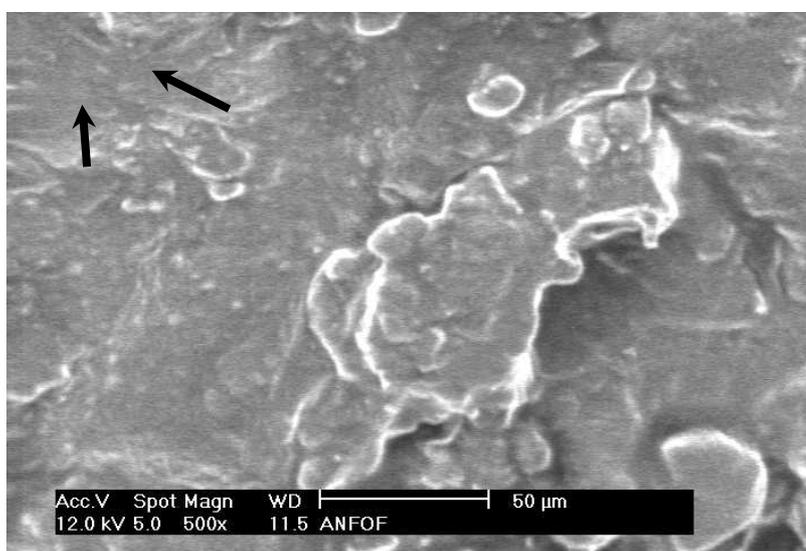


Figura 34. Superfície de *prill* agrícola com baixa absorção de óleo diesel (indicado pelas flechas) em (ANFO_f) ampliado 500 X.

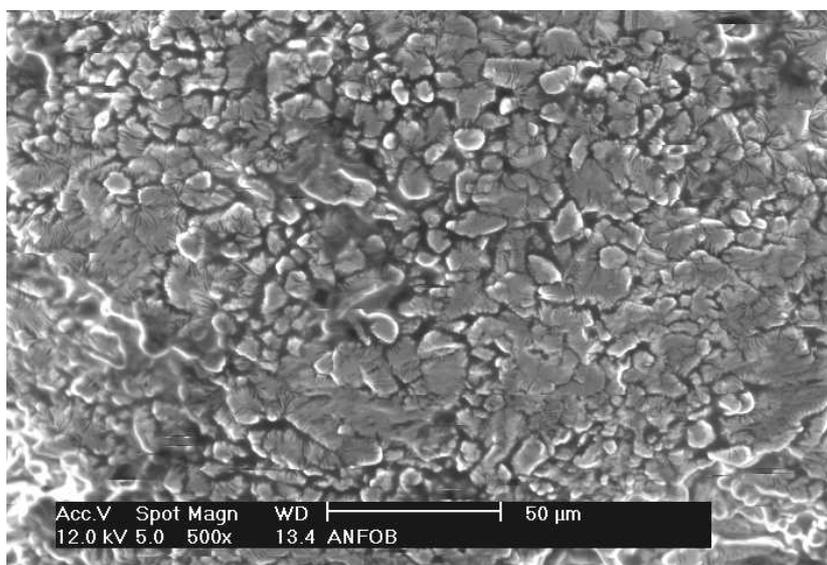


Figura 35. Superfície de *prill* industrial com alta absorção de óleo diesel em (ANFO_b) ampliado 500 X.

O grão (*prill*) tipo agrícola misturado a óleo lubrificante reutilizado (ANWOf) mostrou comportamento de baixa absorção conforme visto na Figura 36. Como essas amostras possuem muito óleo na sua superfície, foi impossível medir o tamanho de poros.

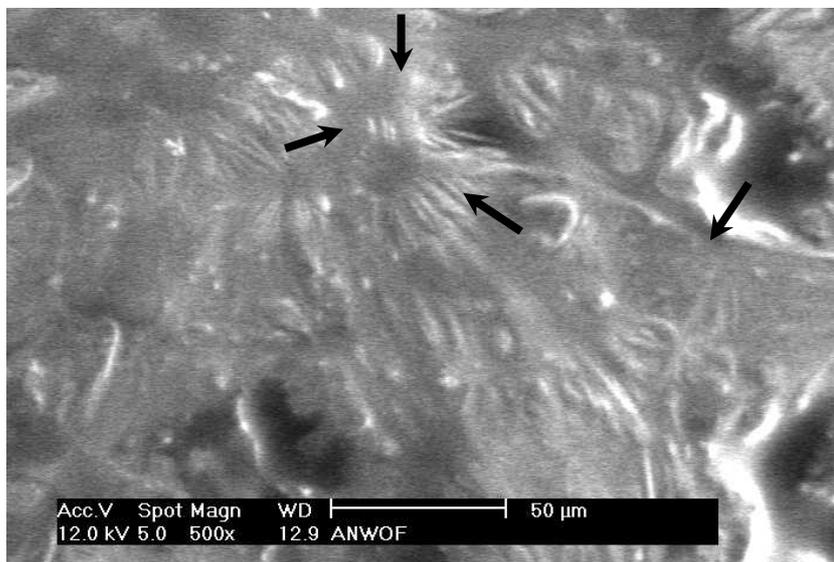


Figura 36. Superfície de grão (*prill*) agrícola e baixa absorção (indicado por flechas) de WO em (ANWOf) ampliado 500X.

O mesmo efeito foi observado com grão (*prill*) tipo agrícola misturado a óleo de soja (ANSOYf), mostrando baixa absorção (Figura 37) e excesso de óleo na superfície, enquanto o grão (*prill*) tipo industrial aparentemente mostrou melhor absorção (Figura 38) para óleo de soja.

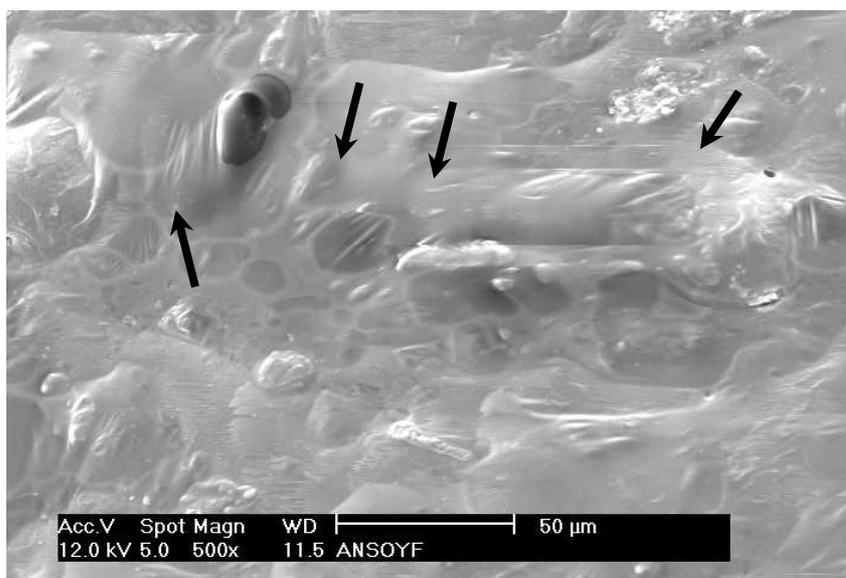


Figura 37 Grão (*prill*) agrícola e óleo de soja (ANSOYf) ampliado 500 X (Baixa absorção indicada pelas flechas).

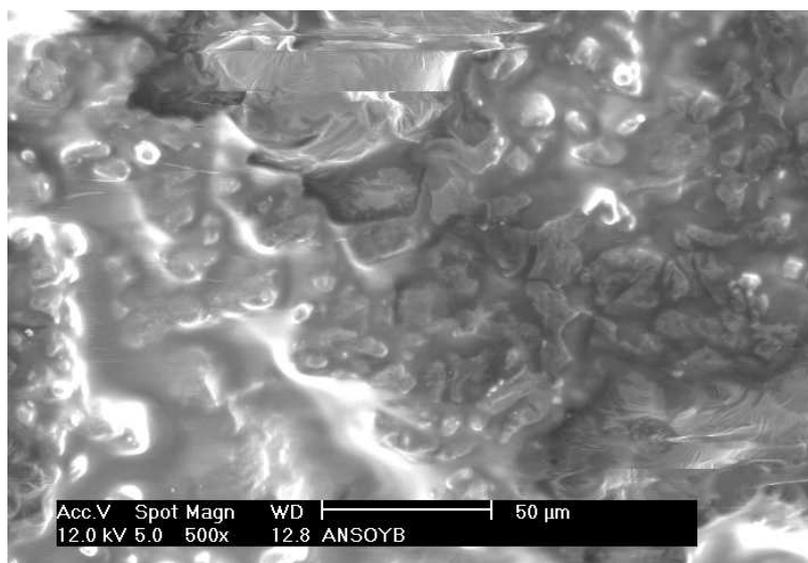


Figura 38. Grão (*prill*) industrial e óleo de soja (ANSoy_b) ampliado 500 X.

De modo a avaliar a capacidade de absorção de NA com os três óleos testados, as amostras de NA foram mergulhadas nos combustíveis durante 48 horas, o óleo em excesso foi drenado por gravidade e pesado. A diferença percentual foi registrada e considerada como capacidade de absorvência do material. Os resultados mostraram, como esperado, que o grão (*prill*) tipo industrial absorve óleo mais eficientemente se comparado ao grão (*prill*) tipo agrícola (Tabela 21).

Tabela 21. Absorção de óleo para NA agrícola e industrial

Tipo de NA	Absorção de Óleo		
	FO	WO	SOY
Agrícola	7.44	6.81	6.15
Industrial	18.31	16.97	15.01

Baseado na equação 2, o balanço de oxigênio ideal para ANFO é uma relação 5,7% de óleo em peso, o que indica que todas as misturas alcançaram a absorvência mínima requerida para uma reação balanceada de combustível – oxigênio.

3.4.4 Segregação / Retenção

A mistura de dois componentes como o grão (*prill*) de NA e óleo normalmente é um processo dificultoso. Essa mistura apresenta tendência natural para segregar dependendo do tempo, temperatura e viscosidade do óleo testado.

A segregação ou grau de retenção da amostra foi avaliado por intermédio de um cone “Inhof” de 1000 ml (Figura 39). Primeiramente o combustível e o nitrato de amônio (250 g) são misturados, após 15 min o material em excesso nas paredes do cone é retirado. O combustível filtrado é medido após 45 min de espera conforme Tabela 22.

Tabela 22. Teste de Segregação/Retenção

Tipo de NA	WO (ml)	FO (ml)	SOY (ml)
Agrícola	0,3	1.1	-
Industrial	-	0,7	-

O resultado indica que ANWO e ANSOy não segregam como ANFO, efeito devido à viscosidade mais alta (Seção 3.3.4). De fato, essa característica que WO e SOY evaporem rapidamente como óleo diesel (FO), é uma propriedade importante para temperaturas altas em clima tropical ou sub tropical.



Figura 39. Teste de segregação ou retenção usando o cone de *Inhof*.

3.4.5 Densidade

Os explosivos de baixa VoD são mais efetivos em ambientes geológicos porosos ou fraturados, onde não é necessário criar fraturas, como na Mina do Recreio. Segundo Johnson (1996) a baixa energia de choque de um explosivo de reduzida densidade, diminui a geração de finos de carvão e reduz a sensibilidade à iniciação, o que são características desejáveis para uma mina que desmonta mais de 300 furos ao dia. Foram testados dois tipos de nitrato de amônio usados na Mina do Recreio para baixas densidades de mistura. Isso foi obtido por meio da adição de material inerte e medindo-se o VoD (Capítulo 5). A Tabela 23 apresenta as densidades regulares do NA usados nos testes.

Tabela 23. Densidade dos nitratos de amônio testados

Tipo	Densidade de carregamento (g/cm³)	Densidade Nominal (g/cm³)
Agrícola	0,96	1,70
Industrial	0,77	1,42

Ambas as densidades medidas nas amostras obedecem à densidade mínima requerida para uma reação de detonação. Segundo a teoria dos centros reativos (*Hot Spots*), densidades entre 0,5 e 0,25 g/cm³ são suficientes para manter a reação de detonação estável (Drury e Westmaas, 1978).

3.4.6 Tamanho de Partícula

Um procedimento convencional de peneiramento foi utilizado para medir diâmetro de partícula de grão (*prill*) e classificar segundo distribuição granulométrica. Os histogramas são apresentados nas Tabelas 24 e 25 onde grão (*prill*) agrícola mostrou tamanho de partícula entre 2 mm e 1,2 mm para NA tipo industrial. Sen (1995) recomenda que para a maioria dos casos o melhor desempenho de detonação será alcançado para diâmetros de grão (*prill*) entre 0,5 e 1,2 mm, pois a performance aumenta com o aumento da área superficial.

Tabela 24. Distribuição de partícula para NA agrícola (acumulado)

Diâmetro de partícula (mm)	Amostra1 (%)	Amostra 2 (%)
4	0,13	1,6
2	70,78	77,3
1.19	27,48	20,4
1	1,20	0,4
0,84	0,22	0,2
0,42	0,23	0,2
TOTAL	100,04	100,02

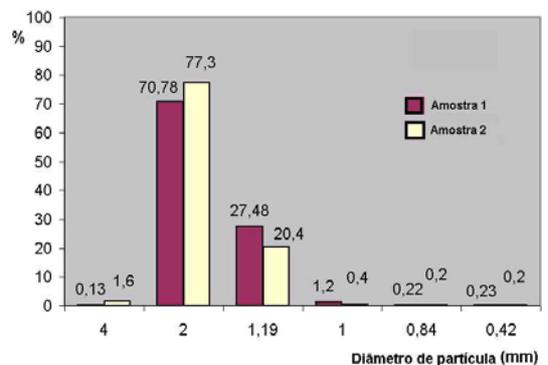
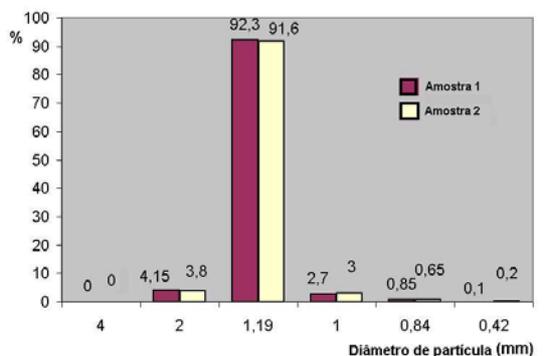


Tabela 25. Distribuição de partícula para NA industrial (acumulado)

Diâmetro de partícula (mm)	Amostra1 (%)	Amostra 2 (%)
4	0	0
2	4,15	3,8
1.19	92,3	91,6
1	2,7	3
0,84	0,85	0,65
0,42	0,1	0,2
TOTAL	100,1	99,25



Por causa de seu tamanho de partícula, o grão (*prill*) industrial possui área de contato superficial maior, parâmetro importante para um contato íntimo do óleo com o nitrato de amônio.

3.4.7 Estrutura Cristalina

Podem ser observadas duas fases cristalinas nos grãos (*prills*) de NA testados, provavelmente devido a variações na temperatura: Fase V, abaixo de 18° C e Fase IV de 18 até 31,1°C. Algumas partes da mesma amostra podem mostrar fases cristalinas diferentes, dependendo de suas condições de solidificação e ambientais (Callister, 2000). Como explicado anteriormente em 2.6.8, empedramento (*cycling*) contínuo e variações da temperatura diminuem a quantidade total de espaços vazios dentro dos grãos (*prills*), aumentando a densidade total e diminuindo a sensibilidade até a pressão limite (*Dead Pressing*), a qual tornará ANFO insensível. A Figura 40 mostra micro-cristais em um grão (*prill*) agrícola e fases cristalinas diferentes.

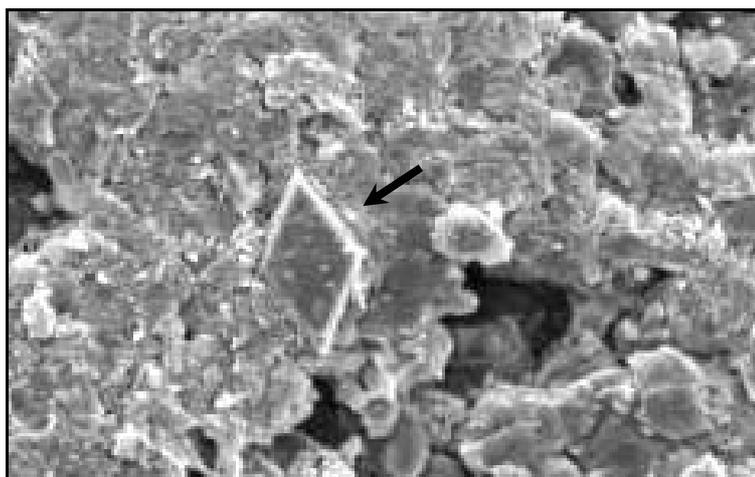


Figura 40. Formações de micro cristais (500 X).

Quando examinadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (*Scanning Electron Microscope*) Phillips XL 20, foi possível observar alguns cristais nas amostras de NA tipo agrícola. O mesmo não foi observado para o NA tipo industrial. A explicação mais plausível para isso leva em conta que o NA tipo agrícola é transportado por mar sem embalagem (a granel), posteriormente descarregado e embalado no Brasil e então transportado via rodoviária por 1500 km até a Mina do Recreio. O NA tipo industrial é produzido e ensacado no Brasil, sendo então transportado por via rodoviária em distância similar, entretanto não recebe uma cobertura que ofereça a mesma resistência ao ataque da água e mudanças de temperatura. Deve-se, também, salientar que a maioria dos testes utilizou NA tipo agrícola com idade superior ao NA tipo industrial em pelo menos 2 meses, segundo informações dos fabricantes.

4 Os Agentes Explosivos

4.1 Formulação

Existem várias maneiras de utilizações alternativas de misturas de nitrato de amônio e combustível. A Segunda Guerra Mundial estimulou o uso de NA como substituto da nitroglicerina nas dinamites, devido à dificuldade de suprir a demanda na época. A primeira utilização conhecida de NA e óleo como um agente explosivo veio de Robert W. Akre, em 1956, que misturou negro de fumo e NA tipo agrícola. Algum tempo depois, Melvin Cooley da Spencer Chemical Co, substituiu o negro do fumo de Akre por óleo diesel N^o. 2 (Adolphson, 1983).

Os australianos desenvolveram misturas de ANFO com agentes especiais (Quilox) para furos de pequeno diâmetro, sul africanos desenvolveram grãos (*prills*) especiais com micro esferas de plástico, e diversas patentes foram requeridas mundialmente. No Brasil, existem algumas misturas ou processos para ANFO, nitrato de amônio e combustível registrados e disponíveis para consulta no Instituto de Patente Industrial Nacional, INPI. Algumas das patentes requeridas para combustível em ANFO são subprodutos do processo de destilação de glycol (PI 9510275), borracha e poliestireno (PI9205622) e alumínio misturado com poliuretano (PI9303467). Todos os autores buscaram de uma forma ou outra, desenvolver um ANFO eficiente, com baixo custo ou com melhor resistência a água. É possível preparar um ANFO de alto desempenho e utilizar subprodutos combustíveis, porém ainda não existe nenhuma mistura de ANFO impermeável, apenas algumas de melhor resistência à água, como WR ANFO, que não fornecem total resistência e desempenho em condição de excesso de água.

Para esse trabalho, todas as formulações testadas utilizaram 94,3% nitrato de amônio e 5.7% de óleo em peso, exceto nos testes em que alumínio foi utilizado (Seção 4.5). A relação assume uma reação de detonação ideal baseada na equação 2, de mais alta eficiência e equilíbrio de oxigênio.

4.2 Aditivos

4.2.1 Sensibilizante

A sensibilidade da iniciação e o desempenho do ANFO são dependentes principalmente do tamanho de partícula ou área superficial do grão (*prill*), da densidade, diâmetro, temperatura ambiente, acoplamento e do diâmetro de furo crítico.

ANWO e ANFO não mostraram nenhuma dificuldade em iniciação quando carregados a granel, porém em um ambiente de alta umidade o NA não apresenta resistência à água, o que pode ser resolvido parcialmente pelo uso de cartuchos de plástico para proteger as misturas. Normalmente grão (*prill*) agrícola acondicionado em pequenos cartuchos apresenta reduzida sensibilidade. Baseado nessa constatação, ANFO e ANWO encartuchados em uma mistura rica em alumínio (sensibilizante) foram testados. Os testes, detalhados na Seção 4.5.3, utilizaram misturas com pó de alumínio 90 % passante em peneira 80 mesh (ASTM B214) e balanço de oxigênio: 88,5% AN, 2,7% WO ou FO, 8,8% alumínio em peso. Misturas usando grão (*prill*) agrícola e óleo diesel ou WO não mostraram nenhuma sensibilidade em cartuchos de 64 mm. Logo foi percebido que o uso de pó de alumínio para sensibilizar grão (*prill*) agrícola e óleo demandaria custos elevados, visto que esse metal estava cotado a R\$ 2,70 por kg, o que representaria R\$ 0,9 por quilograma de mistura. Uma alternativa para sensibilizar as misturas de ANFO e ANWO, consiste da moagem dos grãos (*prills*), aumentando a densidade e a área superficial até valor máximo (Worsey, 1997; Konya, 1995). Baseado nisso, misturas com pó de alumínio foram abandonadas.

Konya (1995) recomenda a quebra dos grãos (*prills*) de modo a aumentar a sensibilidade de misturas como ANFO ou ANWO usado em cartuchos. Esse procedimento utiliza pelo menos 20% de NA moído (100 % passante, mesh 200) na mistura total. A Seção 4.5.3. apresenta os resultados obtidos com a moagem do NA agrícola.

4.2.2 Modificadores de Densidade

Sabendo-se que agentes explosivos de energia de choque reduzida são efetivos em material altamente poroso e rochas fraturadas, um material inerte foi testado para reduzir a densidade de carregamento das misturas. Dependendo da litologia e fragmentação desejadas, uma menor densidade de carregamento de um agente explosivo pode ajudar a reduzir a perda de energia consumida em sobrequebra (*overbreakage*) ou geração de finos ao redor do perímetro do furo, reduzindo o custo do próprio desmonte.

É possível usar poliestireno, serragem, cascas, borracha, sementes e outros materiais inertes de baixa densidade. Esses materiais podem alcançar densidades de $0,13 \text{ g/cm}^3$ dependendo do conteúdo de umidade e distribuição de partícula. Como a maioria deles é material orgânico, não existe consenso entre teorias para definir se agentes orgânicos inertes contribuem com parte da energia total liberada na detonação ou não (Scott, 1996). Casca de arroz (Figura 44) apresenta densidade de carregamento aproximada de $0,13 \text{ g/cm}^3$, e densidade nominal $1,38 \text{ g/cm}^3$. Assumindo a mesma densidade para os óleos, as Tabelas 26 e 27 mostram respectivamente, as diferentes densidades possíveis para misturas de ANFO e ANWO.

Tabela 26. Possíveis densidades de carregamento para ANFO e ANWO utilizando NA agrícola e casca de arroz

Casca de arroz	Mistura
(%)	Densidade de carregamento (g/cm^3)
40	0,64
30	0,72
20	0,81
10	0,89
0	0,96

Tabela 27. Possíveis densidades de carregamento para ANFO e ANWO utilizando NA industrial e casca de arroz

Casca de arroz (%)	Mistura
	Densidade de carregamento (g/cm ³)
40	0,50
30	0,57
20	0,63
10	0,68
0	0,77

Usando um Microscópio Eletrônico de Varredura Phillips XL 20 foi possível examinar a textura fibrosa da casca de arroz e sua superfície oleosa. O filme de óleo não permite as fibras absorver em água do ambiente. Além disso, a alta quantidade de espaços vazios observados entre fibras talvez funcione como centros reativos (*Hot Spots*) durante a reação de detonação do agente explosivo (Figura 41).

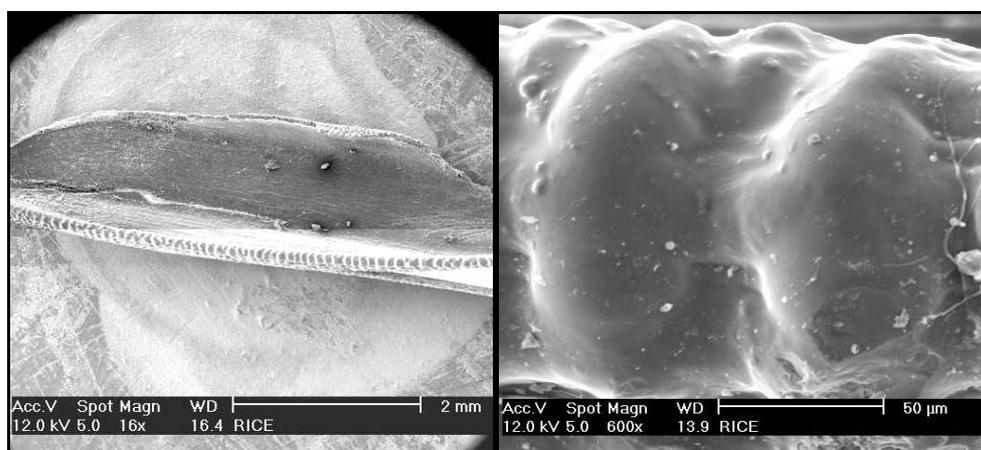


Figura 41. Casca de arroz em aumento de 16,4 vezes (esquerda) e sua borda aumentada 600 vezes.

A Seção 5.3 detalha os testes de velocidade de detonação para misturas de densidade de carregamento reduzidas, utilizando o agente modificador casca de arroz. As misturas partem de densidades de carregamento de 0,96 (original) para 0,85 e 0,75 g/cm³ em ANWO e ANFO e grão (*prill*) agrícola. Da mesma forma, misturas com grão (*prill*) industrial tiveram suas densidades de carregamento reduzidas de 0,77 (original) para 0,65 g/cm³ para ANWO e ANFO.

4.3 Resistência à Água

Se um furo está contaminado com água, essa será absorvida pelo NA, reduzindo o desempenho da mistura ou não permitindo detonação. A razão primordial para esse efeito diz respeito à água que substitui os poros e espaços vazios além de transformar a mistura em uma solução saturada de alta densidade com óleo combustível distribuído sem uniformidade. O resultado esperado é a eliminação parcial ou total de centros reativos potenciais para as compressões adiabáticas, essenciais para sustentar a detonação em agentes explosivos (Konya, 1995; Gordon, 1993).

Devido à limitação do uso na água imposta pela natureza do sal de NA, buscou-se investigar o comportamento de amostras de misturas de nitratos de amônio e óleo combustível quando expostas à água. Foram realizados dois testes de resistência à água utilizando um prato de Petri com água e cronometrados os tempos de dissolução. Os testes consistem na tomada do tempo de dissolução de grão (*prill*) de NA sem óleo e grão (*prill*) de NA com óleo segundo a relação do balanço de oxigênio, até o início da degradação. A água é freqüentemente trocada de modo a reduzir o efeito de saturação e dois métodos são utilizados: medida de um único tempo de dissolução de grão (*prill*) e medida para grupo de grãos (*prills*) (5) simultaneamente. Os testes foram repetidos 5 vezes para cada mistura de FO, WO e SOY. Os óleos de -soja utilizados foram “ácido graxo” (*) e “destilado de soja” (**). Os resultados estão detalhados nas Tabelas 28 e 29.

Tabela 28. Teste simples e múltiplo de dissolução na água para misturas de agente explosivo com grão (*prill*) tipo agrícola

Teste	NA puro (min)	ANFO (min)	ANWO (min)	ANSoy* (min)	ANSoy** (min)
Simple	1.05	1,048	1.147	1,024	0,99
Múltiplo	0,790	0,703	0,586	0,506	0,526
Média	0,92	0,875	0,866	0,765	0,758

Tabela 29. Teste simples e múltiplo de dissolução na água para misturas de agente explosivo com grão (*prill*) tipo industrial

Teste	NA puro	ANFO	ANWO	ANSoy*	ANSoy**
	(min)	(min)	(min)	(min)	(min)
Simple	0,313	0,548	0,498	0,45	0,47
Múltiplo	0,276	0,472	0,476	0,32	0,35
Média	0,294	0,51	0,487	0,39	0,41

Os resultados finais são mostrados em diferença percentual na Tabela 30, onde se pode notar que para qualquer óleo o nitrato de amônio do tipo agrícola é pelo menos 71 % mais resistente ao ataque da água quando comparado ao NA tipo industrial. Essa resistência alcança um valor máximo de 96 % na mistura NA agrícola e ácido graxo de soja, ANSOy. Os resultados confirmaram as expectativas, visto que o grão (*prill*) tipo agrícola possui maior quantidade de material inerte. Portanto, as misturas de ANFO, ANWO e ANSOy quando feitas com NA tipo agrícola resistem por tempo maior ao ataque da água, propriedade desejável na Mina do Recreio onde grandes quantidades de furos são carregados com material explosivo e chegam a ficar em alguns casos até 4 horas aguardando para serem detonados.

Tabela 30. Diferença na dissolução para NA tipo agrícola e industrial em percentual

Tipo	NA	ANFO	ANWO	ANSoy*	ANSoy**
Industrial (minutos)	0,294	0,51	0,487	0,39	0,41
Agrícola (minutos)	0,92	0,875	0,866	0,765	0,758
Diferença percentual	+212	+71	+77	+96	+84

Como nenhuma das misturas pode ser classificada como a prova d'água, mas apenas resistente à água com valores que não ultrapassam 1,15 minutos, optou-se por buscar proteção mecânica para o grão (*prill*) de NA. Visando tornar a mistura impermeável, existem diversos métodos de encartuchamento ou encamisamento com tubo plástico (*liner*) para furos onde a água é retirada temporariamente permitindo o carregamento. No caso de utilização de cartuchos, esses não devem ser carregados em furos com alta quantidade de água, visto que a densidade do ANFO é menor quando comparada a água e assim o conjunto flutuará. Para esses casos alguns autores como Dick (1972) recomendam o uso de materiais inertes como silicato de ferro (FeSi) adicionado à mistura, aumentando o peso final do

cartucho, sem influenciar negativamente a energia do explosivo. Foi percebido que para a quantidade de água superficial e subterrânea comuns na Mina do Recreio não seria necessário esse procedimento, sendo recomendado apenas à remoção temporária da água por injeção de ar comprimido do compressor da perfuratriz e um rápido carregamento dos cartuchos. Diversas configurações de cartuchos e respectivos mecanismos de fechamento foram pesquisados sendo definido grampo e graxa (Figura 43) como o mais adequado. Esse sistema de encartuchamento permite reduzir os custos ao aumentar a utilização de ANFO, de modo que emulsão participa apenas como iniciador e não como material explosivo principal em situações de excesso de água.

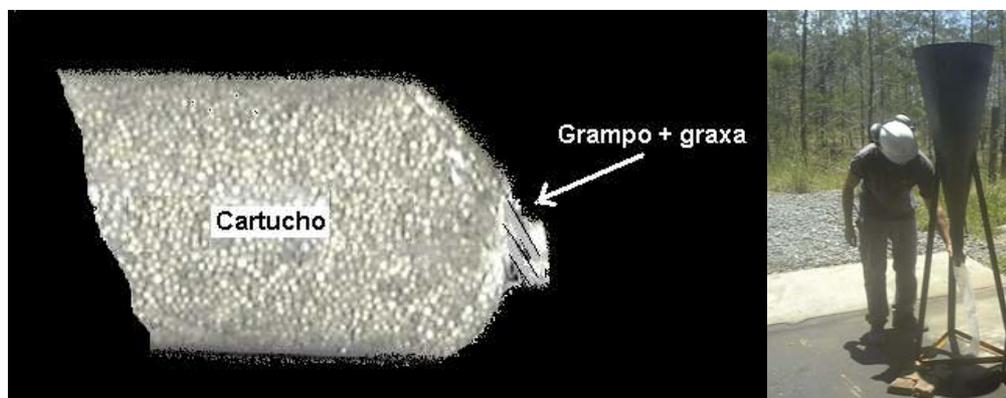


Figura 42. Sistema de fechamento de cartucho com grampo e graxa e enchimento (direita).

Para o caso de utilização de tubo plástico (*liner*) para proteger a mistura, os furos, também, devem ser previamente “limpos” pela injeção de ar e expulsão da água. A Seção 4.5 mostra testes com liners de 75 mm carregados com ANFO e ANWO e nitrato agrícola ou industrial em confinamento rochoso.

4.4 Sensibilidade a Espoleta

O manual das Nações Unidas (U.N., 1990) descreve o teste N° 5 (a) ou Teste de Sensibilidade a Espoleta (Cap Sensitivity Test) como o teste padrão para determinar a sensibilidade de amostras submetidas a intenso estímulo, além de diferenciar explosivos de agentes explosivos. Placas de aço são usadas como testemunho de possíveis detonações, onde cada teste é repetido por três vezes. A configuração do teste consiste em uma espoleta do tipo 8 inserida centralmente no

topo de um tubo de papelão de 80 mm de diâmetro por 160 mm de comprimento e parede de espessura máxima 1,5 mm. Sob o tubo é posicionada a placa testemunho (1 mm x 160 x 160 mm) como mostrado na Figura 44. O resultado é considerado positivo se o testemunho for penetrado pela explosão, o que indica que a espoleta tipo 8 foi capaz de iniciar uma detonação no material e esse é classificado como explosivo.

Os resultados obtidos nesse trabalho, foram negativos para ANFO e ANWO tanto tipo agrícola quanto industrial. As placas testemunho não foram perfuradas, indicando que as misturas podem ser consideradas agentes explosivos, não sensíveis a espoleta tipo 8. Um ANFO pré-misturado ou nitro carbo nitrato (NCN) produzido industrialmente (ANEXO I) foi testado segundo o mesmo critério, apresentando resultado positivo.

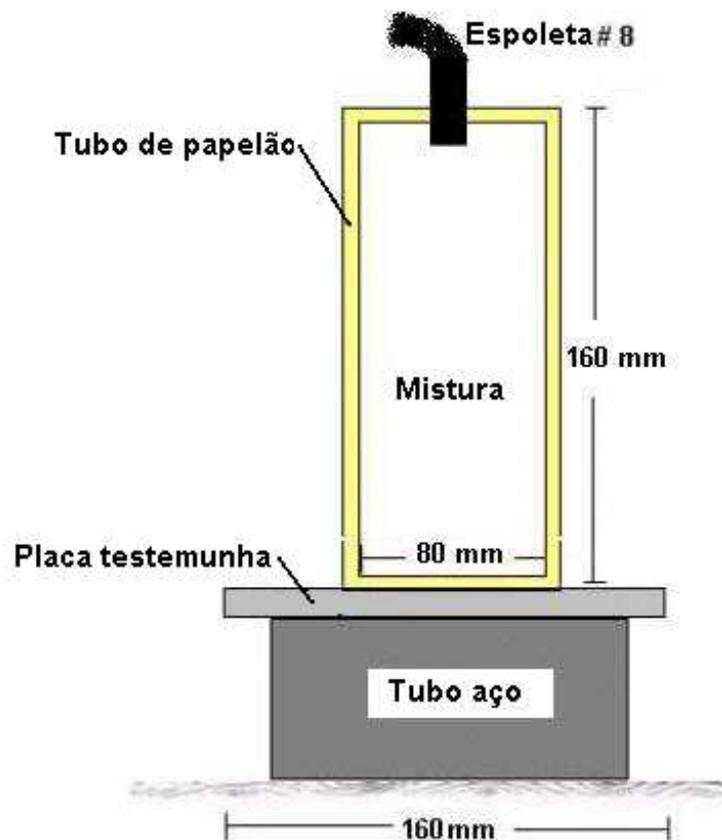


Figura 43. Configuração do Teste de Sensibilidade a Espoleta (Adaptado de U.N. ,1990).

4.5 Iniciação (*Priming*)

Uma série de testes foi realizada com o objetivo de investigar a influência do confinamento e do acoplamento na reação de detonação de ANFO ou ANWO e sua relação com a iniciação (*priming*). Os acoplamentos foram classificados como total (a gravel), semitotal (*liner*) ou desacoplado, ou seja, com 6 mm de espaço anelar entre parede e cartucho como visto na Figura 45. O critério DDT foi utilizado para diferenciação entre detonação e deflagração da reação de combustão dos materiais explosivos, segundo o Teste 5 (b) das Nações Unidas (U.N., 1990). Após os testes preliminares, medidas de VoD foram realizadas para carregamento a gravel de ANFO e ANWO (Seção 5.3). A Tabela 31 resume o critério DDT.

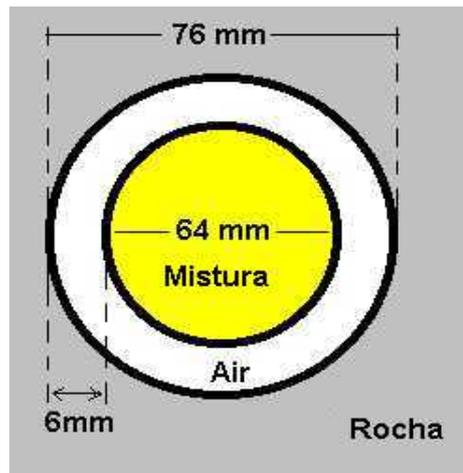


Figura 44. Espaço anelar.

Tabela 31. Classificação de reação segundo critério de diferenciação entre deflagração e detonação - DDT (Adaptado de UN, 1990)

REAÇÃO	DEFINIÇÃO
Ruído de explosão Emissão de fumaça Amostra desaparece completamente	Detonação completa
Nenhum ruído de explosão Emissão de fumaça A maior parte da amostra desaparece	Decomposição ou Deflagração
Nenhum ruído de explosão Nenhuma emissão de fumaça amostra intacta	Nenhuma Reação

4.5.1 Acoplamento total - a granel

Foi examinada propagação de detonação para ANFO e ANWO carregados a granel com grão (*prill*) tipo agrícola e industrial em ambiente de “baixo” confinamento (PVC). Tubos de PVC de 3 m de comprimento por 76 mm de diâmetro foram utilizados como ambiente de confinamento, onde 1040 g de emulsão IBEGEL serviram como carga iniciadora, iniciada pontualmente por meio de tubo de plasma BRINEL (ANEXO I). Cinco quilogramas de mistura foram carregados em cada tubo de PVC e tamponados com papelão. O ruído e a emissão de gases foram observados para cada amostra, o material remanescente foi pesado e quantificada a parte efetivamente consumida na reação. Os critérios de DDT foram aplicados para cada amostra e tabulados. A Tabela 32 apresenta para cada amostra o percentual de material remanescente não detonado (à direita) e o tipo de reação (esquerda).

Tabela 32. Percentual de material remanescente e classificação de reação por critério DDT

Mistura	Tipo industrial		Tipo agrícola	
	(% remanescente/reação)		(% remanescente/reação)	
ANFO	0 / DET	8 / DEF	12 / DEF	13 / DEF
ANWO	10 / DEF	9 / DEF	9 / DEF	8 / DEF

Os resultados mostraram que existem poucas chances de reação de detonação utilizando um confinamento “baixo”. Apenas uma amostra de ANFOb apresentou reação de detonação, enquanto que todas as outras misturas deflagraram, sobrando pelo menos 8% de mistura explosiva intacta.

4.5.2 Semi acoplamento – tubo plástico

Foi examinada a propagação da reação para embalagem de tubo plástico (*liner*) 75 mm (Figura 46) carregado com ANFO/ANWO, nitrato de amônio tipo industrial e agrícola em confinamento rochoso. Os furos possuíam 3 m de profundidade por 76 mm de diâmetro, iniciados por 1040 g de emulsão e tubo de plasma. Cinco quilogramas de mistura explosiva foram carregados por furo. Observação visual mostrou detonação para todas as situações (Tabela 33).

Tabela 33. Classificação de reação segundo critério DDT confinamento rochoso e embalagem de tubo plástico (*liner*)

Mistura	Tipo industrial (reação)		Tipo agrícola (reação)	
	ANFO	DET	DET	DET
ANWO	DET	DET	DET	DET

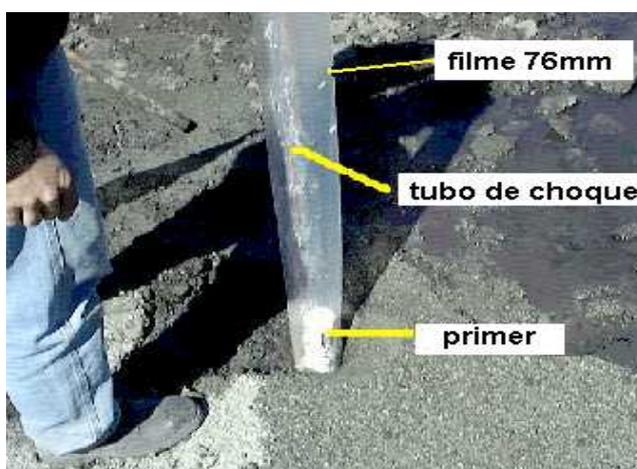


Figura 45 Carregamento com embalagem de tubo plástico (*liner*).

4.5.3 Espaço anelar - cartuchos

A propagação da reação entre cartuchos e a possibilidade de sustentar uma reação de detonação estável em “baixo” confinamento (PVC) e rocha, foi investigado nesse teste. Cartuchos de 1 kg, 64 mm de diâmetro de ANFO e ANWO foram carregados em tubos de PVC de 76 mm de diâmetro. A iniciação consistiu de 1040 g de emulsão IBEGEL como carga iniciadora e iniciada por tubo de plasma BRINEL. As misturas consistiram de grãos (*prills*) de nitrato de amônio tipo industrial com a razão padrão (97,3/5,7) de NA e óleo em peso, enquanto que para o grão (*prill*) tipo agrícola foram utilizados 8,8% de alumínio (10% passante em peneira # 80) ou então mistura preparada com uma fração de NA moída (40% passante - peneira # 200). O balanço de oxigênio para essa mistura foi calculado segundo procedimento sugerido por Crosby (1998), onde NA agrícola participa com 88,5%, o óleo com 2,7% óleo e o alumínio com 8,8%, sendo considerada uma relação correta para assegurar

a reação de detonação. Cinco cartuchos (5 kg total) de mistura foram carregados em cada tubo de PVC ou furo na rocha, tamponados com papelão no caso de confinamento PVC, ou pó de furação para o caso de confinamento em rocha. A reação de detonação ou deflagração (Tabela 34 e 35) foi avaliada por observação visual e medição de material remanescente segundo o critério DDT (Figura 46).



Figura 46. Cartucho intacto de ANFO em teste com confinamento “baixo” em tubo de PVC.

Utilizou-se como artifício para identificar a propagação da reação de detonação: cordel detonante inserido no ultimo cartucho de agente explosivo (Figura 47). Essa técnica permitiu identificar se o cartucho de maior distância da fonte de iniciação seria efetivamente detonado, iniciando o cordel detonante NP 10 (10 g/m PETN) com velocidade suficiente (detonação).

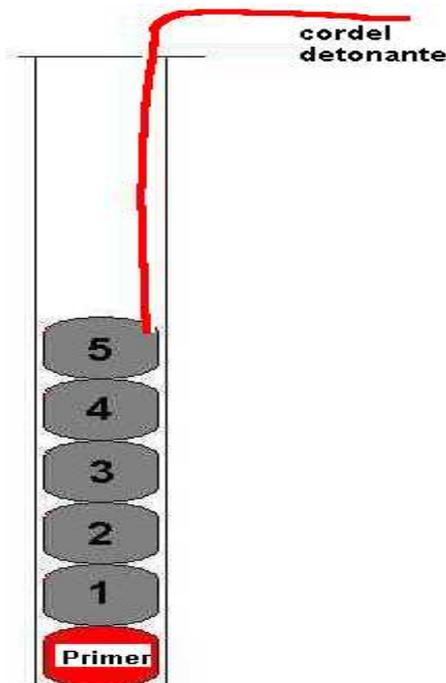


Figura 47 Cordel detonante de 10 g/m PETN como indicador de detonação no último (5) cartucho.

Tabela 34. Reação segundo critério DDT em cartuchos de agente explosivo para “baixo” confinamento (PVC)

Tipo de prill e aditivos	NA industrial	NA agrícola	NA agrícola + Al	NA agrícola moído 40 %
Mistura				
ANFO	DEF	DEF	DEF	DEF
ANWO	DEF	DEF	DEF	DEF

Tabela 35. Reação segundo critério DDT em cartuchos de agente explosivo para confinamento em rocha

Tipo de prill e aditivos	NA industrial		NA agrícola		NA agrícola + Al		NA agrícola moído 40 %	
Mistura								
ANFO	DET	DET	DEF	DEF	DEF	DET	DET	DET
ANWO	DET	DET	DEF	DEF	DEF	DEF	DET	DET

Os resultados não mostraram nenhuma reação de detonação para “baixo confinamento” ou confinamento com PVC em qualquer uma das misturas de ANFO ou ANWO para nitratos de amônio do tipo industrial, agrícola, agrícola com alumínio ou agrícola 40 % moído. No caso de confinamento em rocha, apenas as misturas de nitrato de amônio do tipo industrial para os óleos FO e WO sustentaram a reação de detonação até o quinto cartucho. Por outro lado, as misturas do tipo agrícola, 40 % moído passante em peneira 20 # para óleos FO ou WO, também sustentaram a reação de detonação até o quinto cartucho, iniciando o cordel detonante de 10 g/m de PETN. Para se preparar essas misturas de NA moído, é necessário utilizar um moinho de martelo ou equipamento similar, o que aumenta o tempo de preparo e o custo da mistura pelo serviço adicional requerido.

4.6 Avaliação de Desempenho por Velocidade de Detonação (VoD)

Velocidade de detonação foi selecionada como critério de avaliação para as misturas de agente explosivo, para diferentes densidades de carregamento, tipos de NA, óleo combustível e iniciador (*primer*) mínimo para a Mina do Recreio.

Os testes inicialmente foram planejados para utilizar um sistema de Sonda Resistiva Contínua da Instantel Inc., VOD Module 714A7201 conectado a um processador e gravador digital do tipo MiniMate Series III. A sonda consistiu de cabo coaxial especial tipo VOD 717A0701 de 8.435 Ohms/m e conector BNC. Logo se percebeu que o sistema era ineficiente para medir velocidade de detonação de ANFO em furos de pequeno diâmetro (76 mm). Após várias tentativas obtendo apenas sinais erráticos de alto ruído, apenas para um teste de mistura de nitrato de amônio tipo agrícola e óleo lubrificante reutilizado (ANWO_F) foi possível obter leitura confiável (Arquivo 31, ANEXO II). Cabe salientar que o equipamento operou satisfatoriamente para agente explosivo tipo emulsão em furos de 76 mm.

4.6.1 Desenvolvimento de Sistema de Medida de VoD Ponto-a-Ponto (VAR)

Devido às sucessivas tentativas frustradas de medição de VoD utilizando-se o sistema de medida contínua, decidiu-se construir um equipamento simples, capaz de avaliar a velocidade de detonação para agentes explosivos tipo ANFO nos diâmetros utilizados na Mina do Recreio (a partir de 64 mm). Selecionou-se um método discreto ponto-para-ponto de alvos resistivos.

O equipamento foi nomeado VAR (Velocidade por Alvos Resistivos). Utiliza resistores soldados em paralelo a distâncias equivalentes ao longo de um fio duplo (Munaretti *et al.*, 2002). Um computador portátil (*notebook*) monitora e registra as gravações do sistema para velocidades de detonação tomadas de um furo por vez. O processador deve possuir um mínimo de 48 Mb de memória RAM e 166 MHz de taxa de amostragem mínima. Uma placa de aquisição de dados analógico/digital (Computer Boards PCCARD DAS16/330) de resolução 12 bits, 1 canal de entrada e velocidade 330 kHz é a interface entre o computador e a sonda (Figura 48).

Programas (Softwares) SAD 32 desenvolvido pelo LMM (Laboratório de Medições Mecânicas – UFRGS) ou HP-Vee da Hewlett Packard Inc. são utilizados para interpretar e registrar os dados. A sonda é alimentada por meio de uma fonte de corrente contínua (Vcc) em uma configuração de resistores múltipla soldados em paralelo. O cabo é de telefone de cobre duplo (NAMBEI RASQUINI INT. F160), seção $0,28 \text{ mm}^2$, isolado com capa de PVC. Uma sonda padrão tem custo de fabricação R\$1,40 (janeiro de 2003) apenas para os materiais.



Figura 48. Sistema de aquisição e gravação de medição de velocidade de detonação VAR.

Segundo Crosby (1998) a maior parte dos agentes explosivos alcançam a sua velocidade de estado constante (*steady state velocity*) em distâncias inferiores a cinco vezes o diâmetro do furo onde foi carregado. Baseado nessa constatação, a sonda padrão foi desenvolvida com 1,4 m de comprimento e resistores soldados em paralelo a cada 0,2 m ou 0,1 m. Diversos pontos na coluna explosiva podem ser medidos dependendo da resolução requerida, o que pode ser feito adicionando resistores extras ao circuito. Os resistores são selecionados de modo a fornecer uma adequada queda na voltagem para que o software registre essa variação em um gráfico contra o tempo (Tabela 36). O fornecimento de corrente contínua (bateria) é 12 V e 7 A, onde as condições de circuito iniciais são aproximadamente 8,4 V, 0,9 A e 3,3 ohm para distâncias de 150 m entre computador e sonda.

Tabela 36. Série de resistores comerciais utilizadas na sonda

Tempo	Ordem	Resistência (Ω)	Queda na resistência equivalente (Ω)	Voltagem R_{cte} (V)	Corrente (Ah)	Queda na voltagem (V)	Comprimento da sonda (m)
T ₀	R1	22	3,30	8,37	0,93	-	0
T ₁	R2	27	4,74	7,86	0,87	0,51	0,2
T ₂	R3	27	5,74	7,33	0,81	0,54	0,4
T ₃	R4	47	7,29	6,63	0,74	0,70	0,6
T ₄	R5	47	8,63	6,12	0,68	0,50	0,8
T ₅	R6	56	10,58	5,52	0,61	0,61	1
T ₆	R7	56	13,04	4,90	0,54	0,62	1,2
T ₇	R8	68	17	4,15	0,46	0,75	1,4
T ₈	R9	68	22,67	3,41	0,38	0,74	1,8
	R série	9					

Durante a destruição da sonda pela frente de detonação, a resistência do circuito tende a zero, o mesmo sendo observado na diferença de potencial elétrico em corrente contínua. Um resistor extra R é conectado em série para medir a diferença de potencial elétrico ou voltagem (V) por unidade de tempo (s), como mostrado na Figura 49. A diferença potencial (V) que atravessa um condutor ideal é proporcional a corrente (Lei de Ohm) conforme a Equação 13:

$$I = V / R \quad (13)$$

Onde: V é a diferença de potencial entre dois pontos em Volt (V), I é a corrente em ampère (A) e R é resistência em Ohm (Ω). Quando à frente de detonação encontra o resistor R, esse é destruído e a voltagem tende a diminuir até zero (Figura 49). A velocidade é calculada a partir do desaparecimento dos resistores por unidade de tempo, sendo a velocidade calculada conforme a Equação 14:

$$V = d / t \quad (14)$$

Onde d é a distância em metros (m) e t é o tempo em segundos (s).

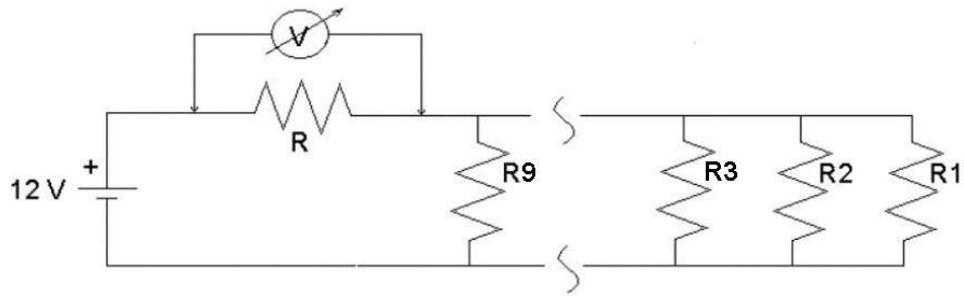


Figura 49. Diagrama esquemático do circuito elétrico do sistema VAR.

O procedimento padrão para medir VoD usando o sistema VAR consiste em carregar um furo com material explosivo, posicionar a carga iniciadora conectado a um tubo de choque ou espoleta elétrica (iniciação puntual) e sonda com resistores ao longo da coluna (Figura 50). A carga iniciadora não pode ser do tipo “lateral”, pelo uso de cordel detonante, visto que essa configuração destruiria a sonda antes dessa ser atingida pela frente de detonação do explosivo.

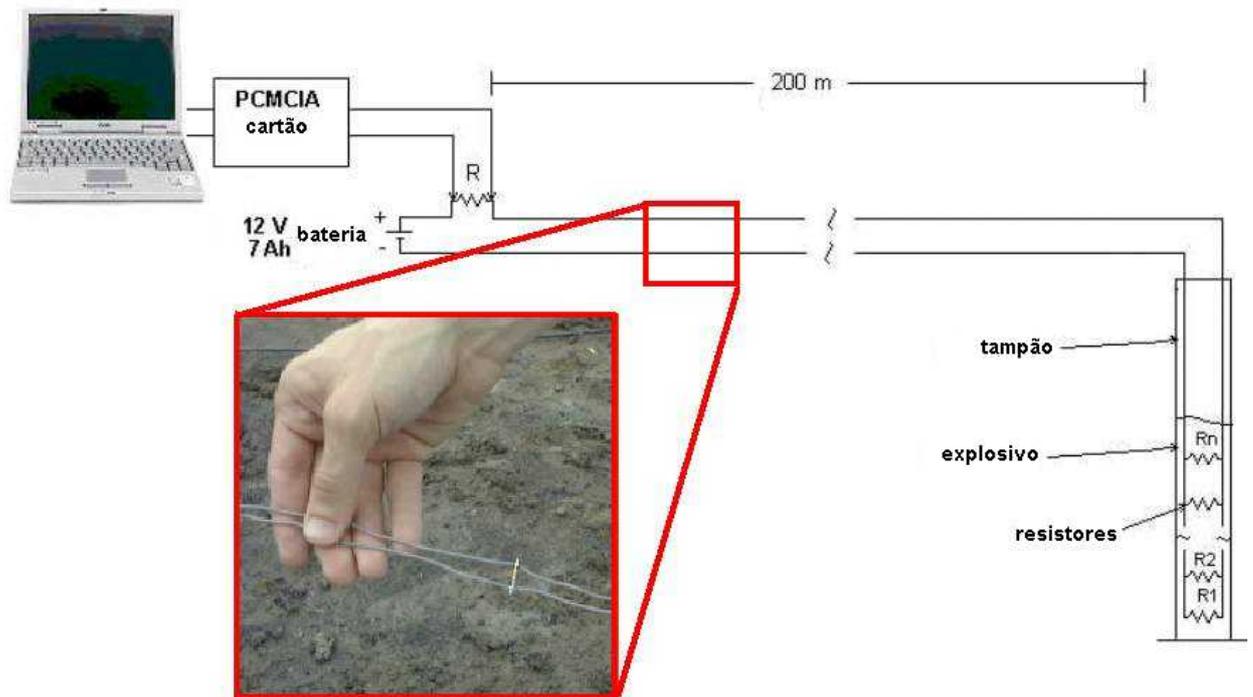


Figura 50. Diagrama esquemático de preparação de teste para leitura de velocidade de detonação utilizando o sistema VAR.

A sonda é conectada a uma fonte de corrente constante, voltagem 12 Vcc, sendo monitorada com placa de aquisição de dados PCMCIA e pelo PC. Esse é posicionado 200 m de distância em local seguro. Após a detonação, os dados registrados são armazenados para processamento futuro, quando a velocidade de detonação será determinada.

É observada uma diminuição na voltagem durante o processo de detonação e subsequente destruição da sonda. A VoD é calculada pela diferença de voltagem contra curva de tempo (AB) para todo o comprimento de sonda ou qualquer intervalo desejado como visto na Figura 51. A velocidade de detonação é calculada segundo a Equação 15:

$$V = d / t = d / (t_b - t_a) \quad (15)$$

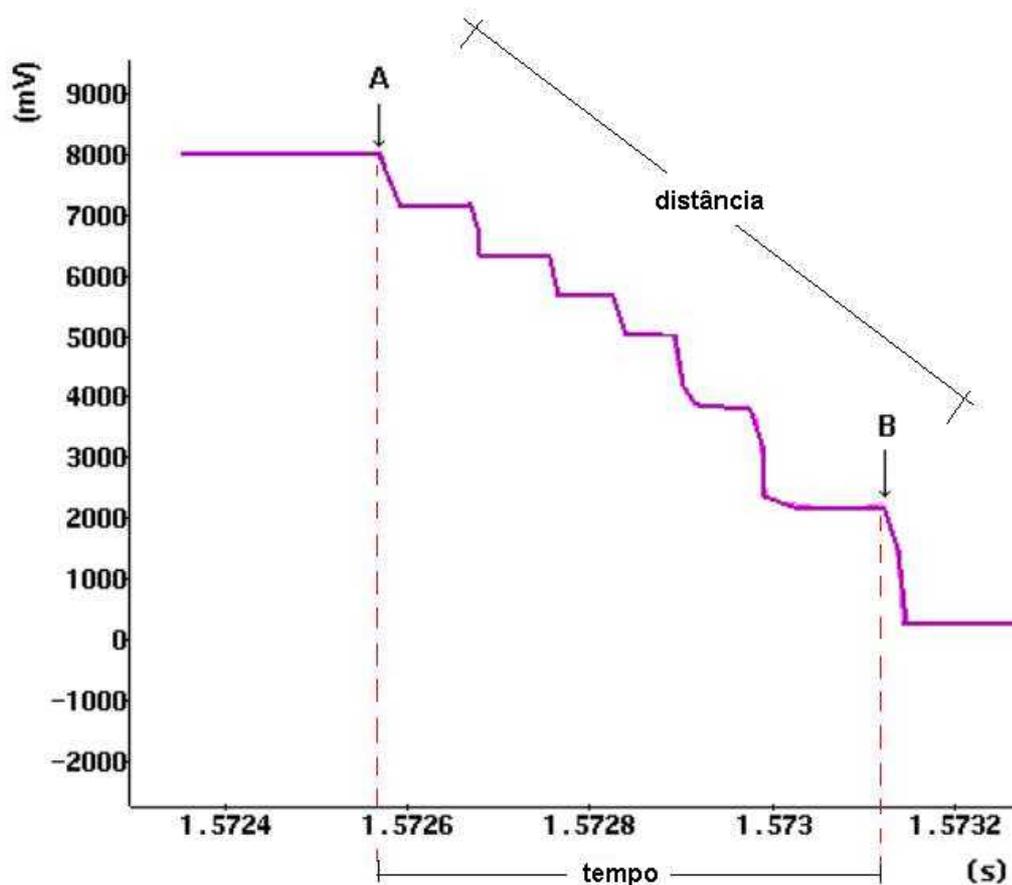


Figura 51. Queda da voltagem por intervalo de tempo registrado (traço de VoD).

Os degraus visualizados na Figura 51 representam sete resistores posicionados a cada 0,2 m ao longo de uma sonda padrão de 1,4 m de comprimento. Alguns picos “espúrios” podem ser observados eventualmente (Figura 52), indicando que a voltagem tende à corrente máxima fornecida pela fonte, 12 V.

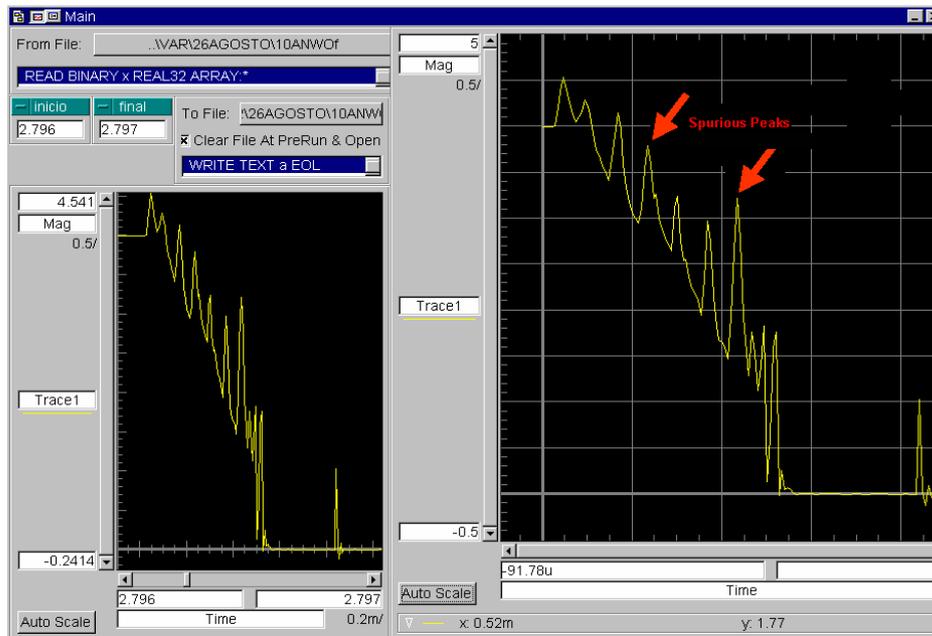


Figura 52. Picos “espúrios” de arquivo VAR processado no software HP-Vee indicados por flecha vermelha.

Esses sinais são provavelmente causados por diminutos curtos circuitos (Figura 53), visto que as condições na área da frente de detonação são suficientemente energéticas para ionizar completamente todas as partículas vizinhas. Quando o plasma ionizado ou frente de detonação ocorrem, o ambiente se torna condutivo e emite grande quantidade de fótons (Hickey, 1990; Xuguang, 1994). Em vários experimentos com fenômenos de detonação em sólidos, líquidos, ou gases, são gerados pulsos na voltagem, relacionados justamente à chegada da frente de detonação a certos pontos da carga explosiva. Essa propriedade de condutividade elétrica na frente de detonação pode ser utilizada como um disparador para circuitos elétricos de equipamentos de medida de VoD (Bowser e Gibson, 1961).

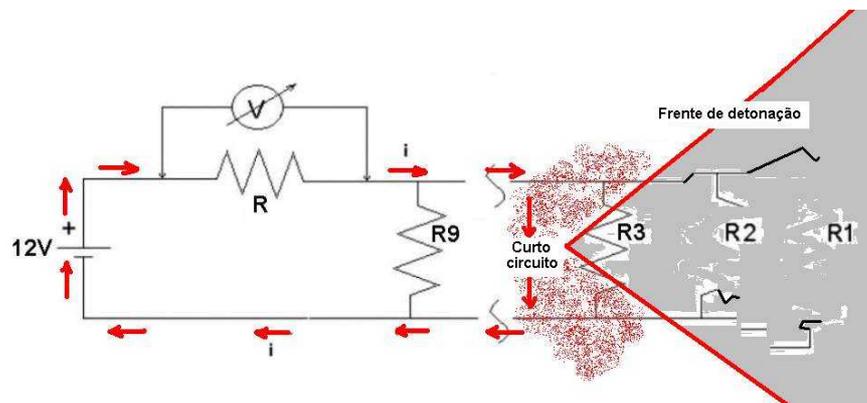


Figura 53. Curto circuito na área ionizada da frente de detonação.

4.6.2 Comparação com Outros Sistemas de VoD

O sistema discreto ponto-a-ponto VAR foi comparado ao sistema contínuo InstanTel VOD Mate. Três furos carregados com 6240 g de emulsão encartuchada IBEGEL (1,15 g/cm³) em furos de 76 mm, foram medidos simultaneamente pelos dois equipamentos analisados. Cada detonação em furos diferentes foi considerada como experimento isolado, visto que é praticamente impossível obter reação idêntica em três furos “equivalentes”, devido a pequenas variações inerentes ao carregamento e umidade interna. O objetivo desse teste foi investigar se os resultados obtidos pelos dois sistemas são similares (Tabela 37).

Tabela 37. Leituras de VoD em m/s utilizando sistema contínuo (InstanTel VOD Mate) contra sistema discreto VAR para emulsão encartuchada IBEGEL (Apendice II)

Amostra	InstanTel VOD Mate®	VAR
Furo 1	5283	5088
Furo 2	5342	5301
Furo 3	4533	4897

Para realizar uma análise estatística das medições, foi selecionado o processo sugerido por Montgomery (2000), que consiste em um procedimento de planejamento denominado de Projeto Fatorial ou de Experimentos “*Design of Experiments*”. Essa metodologia busca produtos robustos, ou seja, resultados que sejam relativamente insensíveis a flutuações ambientais. Experimentos adequadamente planejados e executados geram dados precisos utilizando o menor número possível de repetições e abordagens nos testes. As técnicas estatísticas relativamente simples usadas em Projeto de Experimentos, são diferentes das informações colhidas em observações simples que diversas vezes são difíceis de interpretar ou apresentam detalhes que não são percebidos sem ajuda de técnicas matemáticas. A análise dos dados gerados é realizada pela técnica de Estudo da Variância ou ANOVA, onde se identificam as variâncias de cada fator, suas interações e o limite de decisão, para um erro de 5 % (Tabela 38). Essas técnicas não só permitem determinar os efeitos principais de cada variável, mas também calcular a interação entre os diversos fatores, cálculo impossível de realizar com experimentos do tipo um-fator-por-vez.

As técnicas estatísticas de Projeto Fatorial e posterior Análise de Variância (ANOVA) de um experimento, podem ser aplicadas para dois fatores diferentes: Fator A, com “a” níveis e Fator B, com “b” níveis segundo Equação 16.

$$\gamma_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + E_{ijk} \quad (16)$$

$$i = 1, a; j = 1, b; k = 1, n$$

Onde μ é a média geral;

τ_i é o efeito do nível i no fator A;

β_j é o efeito do nível j no fator B;

$(\tau\beta)_{ij}$ é a interação entre os fatores AB;

E_{ijk} é o erro aleatório.

No caso da comparação entre os dois sistemas de medida de VoD, os testes devem prover dados que permitam identificar diferenças significativas ou não entre as duas técnicas, de modo a validar o equipamento VAR para os testes das misturas, densidades e iniciação mínimas (Capítulo 5). A técnica trata da variação de dois fatores, no caso condição de furo e equipamento, sendo três níveis para fator condição de furo (i, ii, iii) e dois níveis para o fator equipamento (VAR e Instintel VoD Module). A variável resposta é a velocidade de detonação (VoD) em metros por segundo.

A partir do algoritmo proposto por Montgomery (2000), foi possível entender a importância de cada fator e sua interação. Para níveis a e b, sem repetições, total de amostras “N” e “K” grupos de amostras, o procedimento é o que se encontra na Tabela 38. Esse experimento não teve repetições (n=1), portanto a média quadrada da interação dos dois fatores (MQAB) foi utilizada como estimativa do erro. Na Análise de Variância, o limite de decisão é baseado nos valores tabelados da distribuição F para uma confiabilidade de 95%.

Tabela 38. Algoritmo utilizado para o cálculo do Projeto Fatorial 2² de uma repetição e Análise de Variância (ANOVA)

Função	Símbolo	Cálculo
Termo de Correção	TC	$(T_{...})^2/abn$
Soma dos quadrados fator A	SQA	$\sum ((T_{i..})^2 / bn) - TC$
Soma dos quadrados fator B	SQB	$\sum ((T_{.j.})^2 / an) - TC$
Soma dos quadrados interação AB ou Variabilidade Residual	SQAB ou R	$\sum y_{ijk}^2 ((T_{ij.})^2 / n) - TC - SQA - SQB$
Variabilidade total	SQTOT	$\sum y_{ijk}^2 - TC$

Anova Análise de Variância	Grau de liberdade	Média quadrada	Teste F
SQA	a-1	MQA	MQA/MQR
SQB	b-1	MQB	MQB/MQR
SQAB = SQR	(a-1)(b-1)	MQR	
SQTOT	abn-1		

Comparação Múltipla de Médias

Desvio padrão das médias Sx	$(SQR/n)^{1/2}$
Limite de decisão	3 x SD

A Tabela 39 apresenta o banco de dados para o experimento, sendo, Fator A (equipamento), Fator B (condição de furo), e uma leitura ou nível por teste.

Tabela 39. Banco de dados para Projeto Fatorial utilizando VoD como resposta

		Fator B <i>Condição de Furo</i>		
		Furo i	Furo ii	Furo iii
Fator A <i>Aparelho</i>	Instantel VOD Module	5283	5342	4533
	VAR	5080	5301	4897

A Tabela 40 mostra o cálculo de Projeto Fatorial e análise de experimento por ANOVA para os fatores: aparelho utilizado, condição de furo e suas interações.

Tabela 40 Algoritmo utilizado para o cálculo de Projeto Fatorial 2² de uma repetição e análise por técnica ANOVA para tipo de equipamento e condição de furo

Parâmetro	Resultado					
K = 6 ; a = 2; b = 3; n = 1; N = 6						
TC	154472856,00					
SQ A	2730,67					
SQ B	405139,00					
SQ AB ou R	83370,33					
SQ TOTAL	491240,00					
ANOVA	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	
A	2730,67	1	2730,67	0,07	18,51	Fcal<<Ftab
B	405139,00	2	202569,50	4,86	19	Fcal<<Ftab
R	83370,33	2	41685,17			
Total	491240,00	5				
Comparação	Múltipla		de Médias			
Sx	204,17					
Limite de decisão	612,51					

Com um erro máximo estimado em 5 % pode-se dizer que nem o fator tipo de equipamento nem o fator condição de furo foram significativos, ou seja, os resultados de leitura de VoD para os três eventos (três furos) são similares. A figura 54 mostra que para um limite de decisão de 612,51 m/s não existem diferenças significativas entre os resultados para os três eventos (furos detonados).

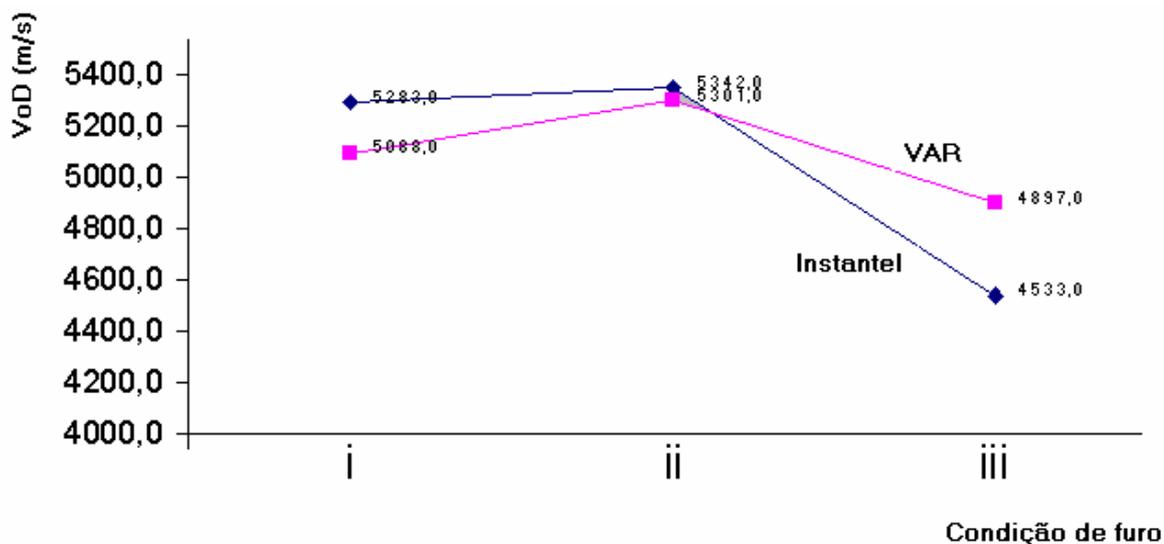


Figura 54. Comparação múltipla das médias de VoD por tipo de equipamento e condição de furo.

5. Análise dos Dados

Como desmonte por explosivo representa uma parte significativa do custo global por tonelada de produto, precisa ser continuamente estudado e aperfeiçoado. A operação de desmonte reflete diretamente no desempenho da escavação, transporte, armazenando, britagem primária e rebitagem, vibração e ruído. Para maximizar o desempenho operacional em condições técnicas e econômicas, a seleção correta do explosivo ou agente explosivo é vital para qualquer operação de mineração.

A procura constante pela melhoria e redução de custo do desmonte na Mina do Recreio permitiu modificações profundas na mão-de-obra e cultura da Copelmi Mineração Ltda. O trabalho foi concentrado principalmente na investigação de misturas explosivas capazes de fornecer a velocidade de detonação mais elevada (indica eficiência) e o mais baixo custo por metro cúbico.

Para determinar o melhor NA e tipo de óleo para a mistura de agente explosivo da Mina do Recreio, misturas com grão (*prill*) tipo industrial (b) grão (*prill*) tipo agrícola (f), óleo diesel (FO) e óleo lubrificante reutilizado (WO) foram testadas. Além disso, diversas densidades de carregamento e carga de iniciador (*primer*) foram testadas. OS testes foram executados em ambiente de confinamento na rocha (Camada S12) 5 kg de mistura total para cada amostra, 2 m de tampão com pó de furação, furos de 76 mm por 5 m de profundidade e iniciação puntual com tubo de plasma BRINEL (1000 m/s) e emulsão IBEGEL 64 mm (1,15 g/cm³) como carga iniciadora (*primer*). O ANEXO I apresenta características técnicas informadas pelo fabricante para os acessórios e emulsão utilizados nos testes.

Mais de 140 testes de VoD foram realizados de modo a identificar as possíveis melhores misturas explosivas para desmonte na Mina do Recreio. Nos testes iniciais usando o sistema VAR, a maior parte dos experimentos não foi registrada devido a problemas nos ajustes do equipamento. Essa fase acabou sendo útil para definir taxas de amostragem, seqüências e resistores para os testes vindouros.

Diversos fatores controláveis e não controláveis influenciaram as medidas de VoD. Os fatores incontroláveis (fatores ruído) foram identificados a partir das experiências iniciais com o equipamento, porém, foi impossível executar todos os testes exatamente nas mesmas condições de temperatura e umidade do ar. Esses parâmetros variaram de 12 a 35 °C e 69 a 91%, respectivamente. Todos os fatores podem ser controláveis se a velocidade de detonação for tomada em ambiente de laboratório e condições atmosféricas controladas, entretanto o objetivo desse trabalho era investigar as misturas explosivas e sua interação com o ambiente rochoso. Sabendo-se que os testes seriam realizados *in situ*, buscou-se minimizar o efeito dos fatores ruído após a sua identificação. Esses fatores podem ser:

- Umidade interna dos furos;
- Temperatura interna dos furos;
- Temperatura e umidade ambiente;
- Grau de fraturamento do maciço / micro fraturamento nas paredes do furo;
- Segregação da mistura.

A configuração padrão para as formulações testadas foi 94.3% em peso de nitrato de amônio e 5.7% de óleo combustível. A relação assume uma reação de detonação ideal (Equação 2) de máxima eficiência e equilíbrio de oxigênio adequado. As amostras foram preparadas com zero (apenas espoleta tipo 8), 520 ou 1040 g de emulsão IBEGEL 1,15 g/cm³. A viabilidade da diminuição da densidade de carregamento das misturas, também, foi testada com adição de agentes redutores de densidade. Os furos foram carregados manualmente a granel em condição seca para ANFO ou ANWO previamente misturado (Figura 55). Os testes de medida de VoD apenas foram realizados para carregamento a granel, visto que seria muito difícil carregar explosivos encartuchados ou embalagem de tubo plástico (*liner*) e manter as mesmas condições. O espaçamento entre furos foi de 5 m, um furo detonado por vez, além de sempre se utilizar a mesma equipe, evitando assim eventuais diferenças no carregamento ou posicionamento de iniciadores e sondas.

As leituras de VoD foram realizadas com sonda padrão de 1,4 m, resolução de 0,2 m, e voltagem inicial aproximada de 10,5 V até zero. O banco de dados dos testes com tipo de NA, óleo, densidades de carregamento e carga iniciadora (*primer*) é exibido na Tabela 41. Maiores detalhamentos são encontrados no ANEXO II.

Tabela 41. Banco de dados total de leituras de VoD para todas as misturas

Teste	Mistura	Densidade (g/cm ³)	Carga iniciadora (g)	VoD média (m/s)
7	ANFOb	0,77	1040	2870
8	ANFOb	0,77	1040	3336
9	ANFOb	0,77	1040	2804
10	ANFOb	0,77	1040	2954
11	ANFOb	0,77	1040	2912
12	ANFOf	0,96	1040	2986
13	ANFOf	0,96	1040	2578
14	ANFOf	0,96	1040	2892
15	ANFOf	0,96	1040	2832
16	ANFOf	0,96	1040	3157
17	ANFOf	0,77	1040	2900
18	ANFOb	0,65	1040	3011
19	ANWOb	0,66	1040	3009
20	ANFOf	0,96	1040	3017
21	ANWOb	0,77	1040	3102
22	ANWOb	0,77	1040	3116
23	ANWOb	0,77	1040	2980
24	ANWOb	0,77	1040	2800
25	ANWOb	0,77	1040	2809
26	ANWOf	0,96	1040	2441
27	ANWOf	0,96	1040	3181
28	ANWOf	0,96	1040	2690
29	ANWOf	0,96	1040	2949
30	ANWOf	0,96	1040	1515
31	ANWOf	0,96	1040	3164
32	ANFOb	0,77	1040	3280
33	ANFOb	0,77	1040	2561
34	ANFOf	0,96	520	2094
35	ANFOf	0,96	520	3088
36	ANFOf	0,96	1040	2918
37	ANFOf	0,96	1040	3281
38	ANWOb	0,77	520	2412
39	ANWOb	0,77	520	2727
40	ANWOb	0,77	1040	2999
41	ANWOb	0,77	1040	2916
42	ANWOf	0,96	520	2442
43	ANWOf	0,96	1040	3087
44	ANWOf	0,96	1040	2877
45	ANFOb	0,77	520	3043
46	ANFOb	0,77	520	2763
47	ANFOb	0,77	0	3179
48	ANFOb	0,77	0	3387
49	ANFOf	0,96	520	3000
50	ANFOf	0,96	0	2626
51	ANWOb	0,77	1040	2763
52	ANWOb	0,77	520	2333
53	ANWOb	0,77	520	2413
54	ANWOb	0,77	520	2763

(Cont. Tabela 41)

Teste	Mistura	Densidade (g/cm ³)	Carga iniciadora (g)	VoD média (m/s)
55	ANWOb	0,77	520	3181
56	ANWOb	0,77	0	302*
57	ANWOb	0,77	0	1794
58	ANWOf	0,96	0	430*
59	ANFO b	0,77	1040	2838
60	ANFO f	0,96	1040	3134
61	ANWO f	0,96	1040	2500
62	ANFOb	0,65	1040	3182
63	ANFOb	0,65	1040	3442
64	ANWOf	0,85	1040	3043
65	ANWOf	0,85	1040	2727
66	ANWOf	0,85	1040	2725
67	ANWOf	0,85	1040	3182
68	ANWOf	0,77	1040	2877
69	ANWOf	0,77	1040	2878
70	ANWOb	0,65	1040	247*
71	ANWOb	0,65	1040	3134
72	ANWOf	0,77	1040	2764
73	ANWOf	0,77	1040	2800
74	ANWOf	0,77	1040	2838
75	ANWOf	0,77	1040	2800
76	ANWOf	0,85	1040	2763
77	ANWOf	0,85	1040	2762
78	ANWOf	0,85	1040	2917
79	ANWOf	0,85	1040	3041
80	ANFO b	0,77	1040	2626
81	ANFO f	0,96	1040	2592
82	ANFO f	0,96	1040	2411
83	ANWO b	0,77	1040	3088
84	ANWO b	0,77	1040	2840
85	ANWO f	0,96	1040	2800
86	ANWO f	0,96	1040	2554
87	ANFOb	0,77	1040	2877
88	ANFOb	0,77	1040	2999
89	ANWOf	0,96	1040	3386
90	ANWOf	0,96	1040	2876
91	ANWOb	0,77	1040	2691
92	ANWOb	0,77	1040	2591
93	ANWOf	0,96	520	2874
94	ANWOf	0,96	520	3000
95	ANWOf	0,96	520	3043
96	ANWOb	0,77	0	0*
97	ANWOb	0,77	0	0*
98	ANFOb	0,77	0	0*
99	ANWOf	0,95	0	0*
100	ANWOf	0,95	0	0*

(*) Deflagração

5.1 Misturas de Nitrato de Amônio e Óleo Combustível

Projeto Fatorial de dois fatores e dois níveis (2^2) foi selecionado para preparar a Análise da Variância (ANOVA) das misturas de nitrato de amônio e óleo combustível. Cada fator foi tratado em dois níveis, agrícola\industrial para tipo de NA e WO\FO para tipo de óleo, a fim de revelar o efeito de cada fator e sua interação. A variável resposta para o teste foi velocidade de detonação média, sendo que depois dessa primeira série de testes, foram analisadas diferentes densidades de mistura e cargas iniciadoras (Seções 5.2 e 5.3).

Para os níveis a e b, e “n” repetições, número total de amostras “N” e “K” grupos o procedimento é o que segue na Tabela 42.

Tabela 42. Algoritmo Projeto Fatorial 2^2 com n repetições e Análise da Variância

Função	Símbolo	Cálculo
Termo de Correção	TC	$(T_{...})^2/abn$
Soma dos quadrados fator A	SQA	$\sum ((T_{i..})^2 / bn) - TC$
Soma dos quadrados fator B	SQB	$\sum ((T_{.j.})^2 / an) - TC$
Soma dos quadrados interação AB	SQAB	$\sum y_{ijk}^2 ((T_{ij.})^2 / n) - TC - SQA - SQB$
Variabilidade Residual	SQR	$\sum y_{ijk}^2 - \sum (T_{ij.})^2 / n$
Variabilidade total	SQTOT	$\sum y_{ijk}^2 - TC$

Anova Análise de Variância	Grau de liberdade	Média quadrada	Teste F
SQA	a-1	MQA	MQA/MQR
SQB	b-1	MQB	MQB/MQR
SQAB	(a-1)(b-1)	MQAB	MQAB/MQR
SQR	ab(n-1)	MQR	
SQTOT	abn-1		

Comparação Multipla de Médias	
Desvio padrão das médias S_x	$(SQR/n)^{1/2}$
Limite de decisão	3 x SD

A Tabela 43 mostra o banco de dados organizado para o experimento segundo a técnica de Projeto Fatorial 2², Fator A (Tipo de Óleo), Fator B (tipo de NA) e as repetições do teste para cada mistura. Nesse teste as densidades são as regulares e a carga iniciadora foi de 1040 g de emulsão IBEGEL para todas as repetições.

Tabela 43. Projeto Fatorial 2² para tipo de óleo e nitrato de amônio

		Fator B (<i>Tipo de NA</i>)	
		Agrícola	Industrial
Fator A (<i>Tipo de Óleo</i>)	FO	2986	2870
		2578	3336
		2892	2804
		3157	2954
		2832	2912
		3134	3280
		3017	2561
		2918	2838
		3281	2626
		2592	2999
	2411	2877	
	3386		
	2876		
	WO	2441	3102
		3181	3116
		2690	2980
		2949	2800
		1515	2809
		3164	2999
		3087	2916
2877		2763	
2500		3088	
2800		2840	
2554	2691		
	2591		



Figura 55. Carregamento a granel de furo com agente explosivo.

A Tabela 44 mostra o cálculo de Projeto Fatorial 2² e Análise da Variância (ANOVA) para tipo de óleo e nitrato de amônio segundo o procedimento recomendado por Montgomery (2000).

Tabela 44 Cálculo de Projeto Fatorial 2² e Análise ANOVA para tipo de óleo e nitrato de amônio

Parâmetro		Resultado				
K = 4 ; a = 2; b = 2; n = 11.75; N = 47						
TC		385299678.72				
SQ A		682572.26				
SQ B		24177.79				
SQ AB		2546459.57				
SQ R		1169809.66				
SQ TOTAL		4423019.28				
ANOVA	SQ	GDL	MQ	F_{cal}	F_{tab}	
A (Oil type)	682572,26	1	682572,26	25,09	4,08	Fcal<<Ftab
B (AN grade)	24177,79	1	24177,79	0,89	4,08	Fcal>Ftab
AB	2546459,57	1	2546459,57	93,60	4,08	Fcal<<Ftab
R	1169809,66	43	27204,88			
Total	4423019,28	46	96152,59			
Comparação	Múltipla		de Médias			
Sx			48,12			
Limite de decisão			144,35			

Considerando um limite entre deflagração e detonação de 400 m/s (Subchefia para Assuntos Jurídicos, 2000) e o critério DDT, todas as amostras de densidades originais para nitrato de amônio tipo agrícola ou industrial; óleo WO ou FO e 1040 g de carga inicial de emulsão, sofrerão reação de detonação. As melhores misturas em termos de desempenho (VoD) são ANFO com qualquer tipo de nitrato de amônio e ANWO com NA tipo industrial, visto que a técnica estatística não mostrou nenhuma diferença significativa entre eles. Por outro lado, a mistura ANWO_f que consiste de NA tipo agrícola e óleo WO, mostrou menor VoD. O fator A (tipo de óleo) e, também, a sua interação com o fator B (tipo de nitrato de amônio) é significativa, enquanto que o fator B isolado não mostrou significância para o teste.

Para um limite de decisão de 144,35 m/s existe efetivamente efeito significativo no tipo de óleo, tendo esse fator influência direta no resultado de velocidade de detonação das misturas. O óleo diesel apresenta desempenho superior ao FO, resultado que demonstra que a maior umidade do WO tem influência negativa no resultado de velocidade de detonação nas misturas feitas com esse óleo. WO

apresenta umidade 3,5 vezes superior ao FO, além de ser mais viscoso, demorando mais tempo para ser absorvido pelo grão (*prill*). Por outro lado, quando tratado o fator tipo de NA isoladamente, esse mostrou pouca influência sobre o resultado da VoD. Ficou demonstrado que o NA tipo agrícola mesmo tendo menor porosidade, menor área superficial e menor absorção e retenção de óleo, não apresenta diferenças significativas nas leituras de velocidade de detonação quando comparado ao NA tipo industrial. A Figura 56 mostra as velocidades médias de todas as misturas e uma comparação entre as respostas em termos de desempenho por velocidade de detonação.

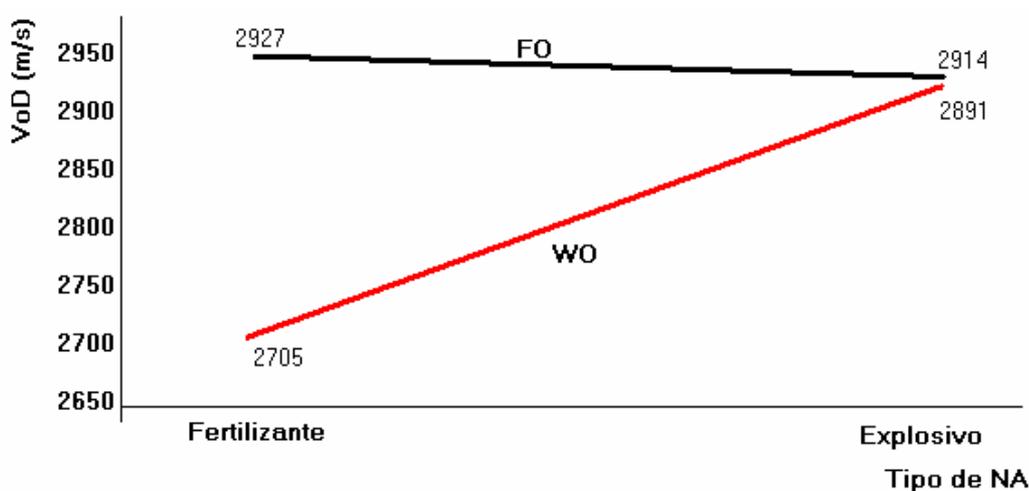


Figura 56. Comparação múltipla de médias de velocidade de detonação para tipo de nitrato de amônio e óleo combustível.

5.2 Carga Iniciadora Mínima (*Minimum Primer*)

Foram testadas cargas mínimas iniciadoras (*primers*) buscando reduzir o custo por metro cúbico em misturas de densidade regulares e assegurar reação eficiente de detonação nas misturas de NA e óleo. As amostras foram preparadas com zero, 520 ou 1040 g de emulsão IBEGEL 1,15 g/cm³. Além do critério DDT, apenas eventos cujas velocidades de detonação obtidas ultrapassaram 400 m/s foram consideradas como indicadoras de reação de detonação, de acordo com Legislação Brasileira (Subchefia para Assuntos Jurídicos, 2000). Qualquer valor abaixo desse limite foi considerado como deflagração.

Como visto na Tabela 38, deflagração foi observada para todas as misturas, principalmente ANWOb e ANWOf quando não foi utilizada nenhuma carga iniciadora (*primer*), mas apenas espoleta tipo 8 na iniciação das misturas. De acordo com os Testes de Sensibilidade a Espoleta (Cap Sensitivity Test), mostrados na Seção 4.4, ambas as misturas com WO e FO para ambos tipos de nitrato de amônio não podem detonar com espoleta tipo 8, entretanto em alguns casos de confinamento em rocha competente, uma detonação pode ocorrer. O evento que registrou VoD 430 m/s para ANWOf, não foi considerado detonação pois não emitiu ruído característico ou luz durante o teste. Devido a esse teste e outros cinco registros que não apresentaram sinal de detonação (ruído ou luz), foi considerado que carga iniciadora “zero” não é confiável e não deve ser utilizada em escala de produção, mesmo que eventualmente uma detonação efetivamente ocorra quando em situação de “alto” confinamento. A Tabela 45 mostra os resultados obtidos para cargas iniciadoras zero, 520 g e 1040 g de emulsão IBEGEL.

Tabela 45. Médias de leituras de VoD, número de testes com deflagração e desvio padrão para amostras iniciadas com zero, 520 e 1040 g de carga iniciadora emulsão

Mistura	Carga Inic. Zero			Carga Inic 520 g		Carga Inic 1040 g	
	VoD média (m/s)	Número Amostras	Deflag .	VoD média (m/s)	Número Amostras	VoD média (m/s)	Número Amostras
ANFOb	2188,67	3	1	2903,00	2	2914,30	11
ANWOb	524,00	4	3	2638,17	6	2891,30	12
ANFOf	1313,00	2	1	2727,33	3	2927,70	13
ANWOf	215,00	2	2	2839,75	4	2705.30	11

5.2.1 Comparação entre Cargas Iniciadoras Zero e 1040 g

Utilizando-se Projeto Fatorial e Análise de Variância (ANOVA) foram comparadas todas as misturas possíveis com iniciação zero, 520 e 1040 g. A Tabela 46 apresenta o procedimento de cálculo utilizado para fatores carga iniciadora (P) e mistura (M), sendo dois níveis para carga iniciadora (zero, 1040 g) e quatro níveis para mistura (ANFOb, ANWOb, ANFOf, ANWOf), sem repetições. A variável reposta utilizada foi velocidade de detonação média.

Tabela 46. Cálculo de Projeto Fatorial 2² e Análise ANOVA para iniciação 0 e 1040g

Parâmetro		Resultado				
k = 8 ; p = 2; m = 4; n = 1; N = 8						
TC		30721041,13				
SQ P		6474601,13				
SQ M		1377273,38				
SQ PM ou R		992829,38				
SQ TOTAL		8844703,88				
ANOVA	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	
P	6474601,13	1	6474601,13	19,56	10,13	F _{cal} >F _{tab}
M	1377273,38	3	459091,13	1,39	9,28	F _{cal} <<F _{tab}
R	992829,38	3	330943,13			
Total	8844703,88	7				
Comparação	Múltipla	de Médias				
Sx						575,28
Limite de decisão						1725,83

Nota-se que existem diferenças significativas entre ausência de carga iniciadora e 1040 g de emulsão para todas as misturas. O procedimento demonstra a pouca confiabilidade de se iniciar misturas explosivas sem carga iniciadora. Para um limite de decisão de 1725,83 m/s, ficou demonstrado que para apenas a mistura ANFOb os resultados podem ser considerados similares (Figura 57). Entretanto, a interpretação estatística não leva em conta que essa mesma mistura deflagrou pelo menos em uma oportunidade, sendo o procedimento não recomendável sob hipótese alguma.

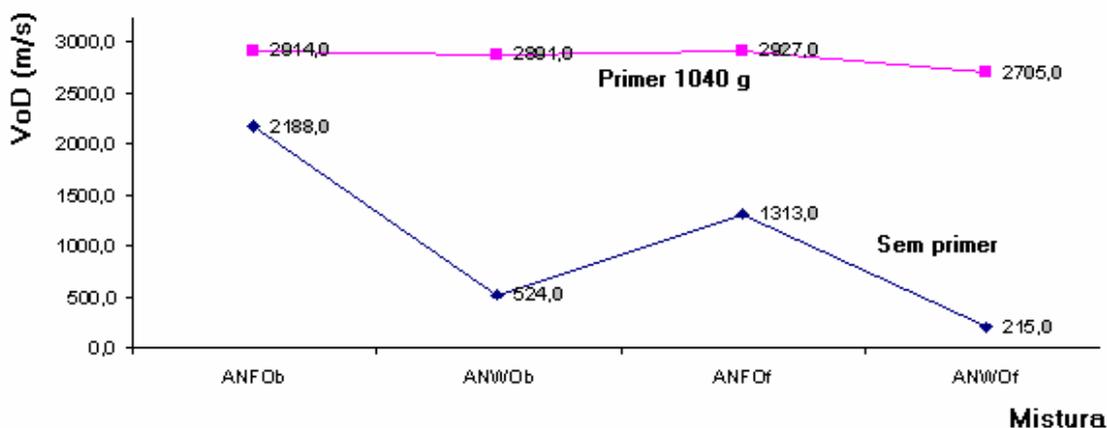


Figura 57. Comparação múltipla de médias para velocidade de detonação entre cargas iniciadoras zero e 1040 g.

5.2.2 Comparação entre Cargas Iniciadoras 520 e 1040 g

Projeto Fatorial foi utilizado na comparação de cargas iniciadoras de 520 e 1040 g (emulsão IBEGEL-1,15 g/cm³). A Tabela 47 apresenta o cálculo para fatores carga iniciadora (P) e mistura (M), dois níveis para carga iniciadora (520, 1040 g) e quatro níveis para mistura (ANFOb, ANWOOb, ANFOf, ANWOOf), sem repetições.

Tabela 47. Projeto Fatorial 2² e Análise ANOVA para carga iniciadora 520 e 1040g

Parâmetro	Resultado					
k = 8 ; p = 2; m = 4; n = 1; N = 8						
TC	63528992,00					
SQ P	13612,50					
SQ M	26499,00					
SQ PM ou R	47430,50					
SQ TOTAL	87542,00					
ANOVA	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	
P	13612,50	1	13612,50	0,86	10,13	F _{cal} <<F _{tab}
M	26499,00	3	8833,00	0,56	9,28	F _{cal} <<F _{tab}
R	47430,50	3	15810,17			
Total	87542,00	7				
Comparação	Multipla	de Médias				
Sx		125,74				
Limite de decisão		377,22				

Ficou demonstrado que não existem diferenças significativas em termos de VoD para cargas iniciadoras de 520 e 1040 g em todas as misturas possíveis de NA e óleo mineral. Utilizando-se o limite de decisão de 377,22 m/s na comparação múltipla de médias, pode-se observar o comportamento das misturas e cargas iniciadoras (*primers*) sem (Figura 58).

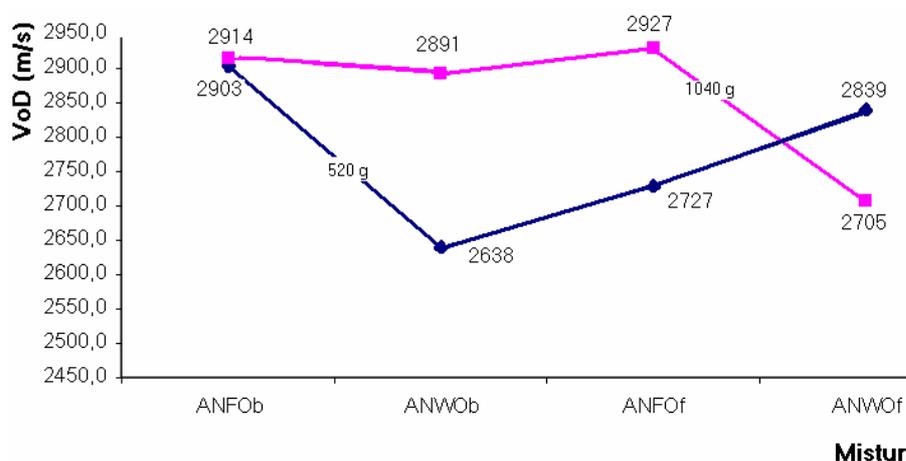


Figura 58. Comparação múltipla de médias para VoD e iniciação.

5.3 Redução de Densidade de Carregamento

Foram realizadas leituras de velocidade de detonação para misturas de reduzida densidade utilizando o agente modificador casca de arroz. As misturas partiram de densidades de carregamento 0,96 (original) para 0,85 e 0,75 g/cm³ em ANWO e ANFO utilizando grão (*prill*) agrícola e de 0,77 (original) para 0,65 g/cm³ para ANWO e ANFO utilizando grão (*prill*) industrial. O objetivo principal foi distribuir a energia explosiva de modo a obter redução de custo por metro cúbico. Todas as amostras foram preparadas com 1040 g de emulsão encartuchada IBEGEL como carga iniciadora, enquanto que casca de arroz foi adicionada a mistura de modo a reduzir a densidade de carregamento. A Tabela 48 mostra a média e desvio padrão das leituras de VoD para as misturas de densidade de carregamento modificada e original.

Tabela 48. Média e desvio padrão de leituras de velocidade de detonação para densidades de carregamento regulares ou modificadas

Tipo de Prill	Mistura	Densidade	VoD média	Número de amostras	
		(g/cm ³)	(m/s)		
Industrial	ANFOb	Modificado	0,65	3211,67	3
	ANWOb	Modificado	0,65	2130,00	3
	ANFOb	Regular	0,77	2914,30	11
	ANWOb	Regular	0,77	2891,30	12
Agrícola	ANFOf	Modificado	0,75	2885,00	3
	ANWOf	Modificado	0,75	2800,50	4
	ANFOf	Modificado	0,85	2919,25	4
	ANWOf	Modificado	0,85	2870,77	4
	ANFOf	Regular	0,96	2927,70	13
	ANWOf	Regular	0,96	2705,30	11

5.3.1 Comparação entre densidades de mistura para grão (*prill*) tipo industrial

No caso de grão (*prill*) do tipo industrial, foi testada a densidade original comparada com a modificada. A Tabela 49 apresenta o procedimento de cálculo utilizado para Projeto Fatorial e a Análise da Variância - ANOVA. Foram utilizados o fator mistura de NA tipo industrial (T) e fator densidade (D), dois níveis para densidade (0,65 e 0,77 g/cm³) e dois níveis para mistura (ANFOb, ANWOb), sem repetições, segundo o algoritmo de Montgomery (2000).

Tabela 49. Cálculo do Projeto Fatorial 2² para densidades de carregamento 0,65 e 0,77 g/cm³ em misturas de nitrato de amônio tipo industrial e Análise de Variância

Parâmetro		Resultado				
k = 4 ; t = 2; d = 2; n = 1; N = 4						
TC		31065407,11				
SQ T		53807,76				
SQ D		305073,95				
SQ TD ou R		280195,54				
SQ TOTAL		639077,26				
ANOVA	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	
T	53807,76	1	53807,76	0,19	161,4	Fcal<<Ftab
D	305073,95	1	305073,95	1,09	161,4	Fcal<<Ftab
R	280195,54	1	280195,54			
Total	639077,26	3				
Comparação Múltipla de Médias						
Sx		529,33				
Limite de decisão		1588,00				

A Análise de Variância mostra que não existem diferenças significativas entre as misturas de nitrato de amônio tipo industrial de densidade regular (0,77 g/cm³) e densidade modificada (0,65 g/cm³). As densidades podem ser reduzidas para até 0,65 g/cm³ sem prejuízo no desempenho em termos de VoD, utilizando-se um limite de decisão de 1588 m/s. No entanto, deve-se observar que ocorreu uma deflagração para ANWOb, indicando que essa mistura com densidade reduzida não é confiável. Deflagrações não foram observadas para ANFOb de densidade modificada. A Figura 59 mostra a comparação múltipla de médias para densidade regular e modificada nas misturas com grão (*prill*) industrial.

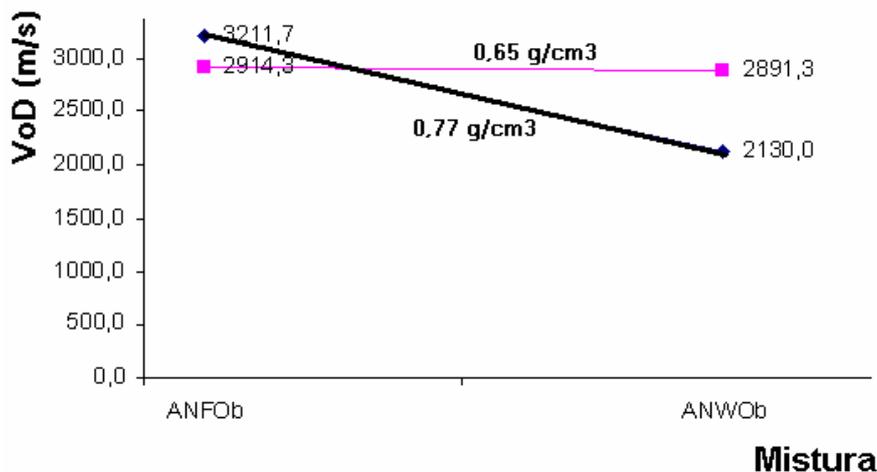


Figura 59. Comparação múltipla de médias de velocidade de detonação entre densidade regular e modificada para misturas de nitrato de amônio tipo industrial.

5.3.2 Comparação entre densidades de mistura para grão (*prill*) tipo agrícola.

A Tabela 50 apresenta o procedimento de cálculo utilizado para Projeto Fatorial e a Análise da Variância – ANOVA. Foram utilizados o fator mistura de NA tipo agrícola (T), dois níveis (ANFOf, ANWOf), e fator densidade (D), três níveis (0,75, 0,85 e 0,96 g/cm³), sem repetições, seguindo a sistemática de cálculo sugerida por Montgomery (2000).

Tabela 50. Cálculo do Projeto Fatorial 2² e Análise de Variância para densidades de carregamento 0,75, 0,85 e 0,96 g/cm³ em misturas de nitrato de amônio tipo agrícola

Parâmetro		Resultado				
k = 6 ; t = 2; d = 3; n = 1; N = 6						
TC		48783576,10				
SQ T		6389,33				
SQ D		21049,16				
SQ TD ou R		8427,00				
SQ TOTAL		35865,49				
ANOVA	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	
T	6389,33	2	3194,66	0,76	19	Fcal<<Ftab
D	21049,16	1	21049,16	5,00	18,51	Fcal<<Ftab
R	8427,00	2	4213,50			
Total	35865,49	5				
Comparação Múltipla de Médias						
Sx		64,91				
Limite de decisão		194,73				

Para grão (*prill*) agrícola, a redução da densidade para 0,75 g/cm³ tanto para misturas com FO como WO, indica a possibilidade de uso e conseqüente redução no custo do desmonte por metro cúbico. O mesmo pode ser observado para mistura de densidade reduzida a 0,85 g/cm³, também apresentando potencial de uso em escala de produção. Segundo o procedimento estatístico adotado, não foram encontradas diferenças significativas nas misturas de NA tipo agrícola e óleo cujas densidades foram reduzidas. Entretanto, na comparação entre ANFOf e ANWOf de densidades de carregamento regulares, a comparação múltipla de médias com limite de decisão 194 m/s mostrou que a mistura ANFOf obteve velocidades médias de detonação superiores a ANWOf (Figura 60). Esse resultado é comentado na Seção 5.1.

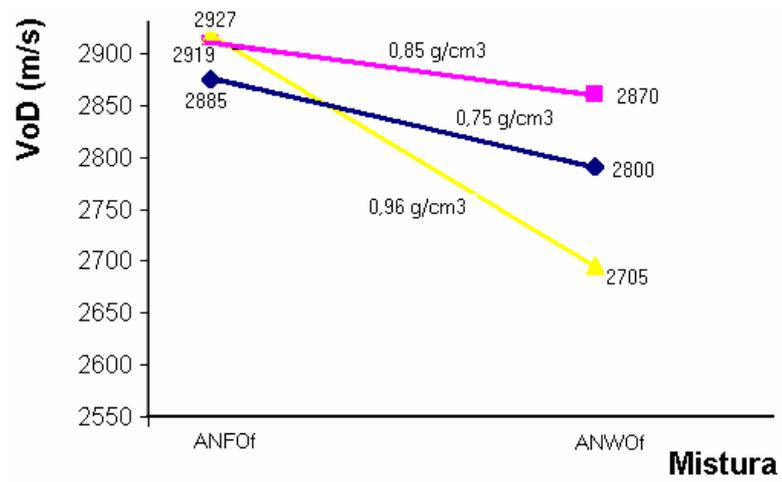


Figura 60. Comparação múltipla de médias de velocidade de detonação entre densidades regulares e reduzidas para misturas de nitrato de amônio tipo agrícola.

6. Análise de Custos

Uma análise de custo das configurações de desmonte para condições sem umidade foi preparada. A mistura ANWOb de densidade $0,65 \text{ g/cm}^3$ foi retirada da análise por não apresentar reação de detonação, segundo o critério DDT. A Tabela 51 apresenta os custos dos insumos necessários para as misturas em outubro de 2002 na Mina do Recreio.

Tabela 51. Custo dos insumos utilizados nas misturas

Item	Especificação	Custo (R\$/kg)
Emulsão encartuchada	IBEGEL 2 ^{1/2"} $1,15 \text{ g/cm}^3$	1,81
Nitrato de amônio em tipo agrícola (f)	PILAR	0,64
Nitrato de amônio em tipo industrial (b)	ULTRAPRILL	0,95
Óleo diesel (FO)		0,97
Óleo lubrificante reutilizado (WO)		-
Casca de arroz		-

As configurações testadas (Tabela 52) indicaram potencial para fragmentar as rochas na Mina do Recreio. O menor custo por metro cúbico foi obtido com ANWOf, nitrato de amônio agrícola e óleo lubrificante reutilizado (82,7%), iniciado com carga iniciadora (*primer*) de 17,3% de emulsão encartuchada. A razão de carga (RC) para essa mistura foi de $0,14 \text{ kg/m}^3$, obtida pela adição de agente redutor de densidade (casca de arroz) até $0,75 \text{ g/cm}^3$. O custo por metro cúbico obtido com essa configuração foi de R\$0,117 para uma velocidade de detonação de 2800 m/s (média). Por outro lado, a configuração cujo custo por metro cúbico foi mais elevada, é obtida com ANFOb, nitrato de amônio tipo industrial e óleo diesel (82,7%) iniciados com 17,3% de emulsão encartuchada. A razão de carga (RC) nesse caso foi de $0,14 \text{ kg/m}^3$ para densidade de carregamento regular em $0,77 \text{ g/cm}^3$. O custo por metro cúbico foi de R\$ 0,153, obtendo velocidade de detonação superior de 2914 m/s.

A Mina do Recreio alcançou uma média de utilização de 68% para ANWOb e 32% de emulsão IBEGEL para configuração de desmonte de rochas entre janeiro e setembro de 2002. Problemas relacionados a ataque de água, como tempo chuvoso e defeitos na proteção das embalagens de explosivo (cartuchos ou tubo plástico)

podem diminuir a relação ideal entre ANFO/ANWO e emulsão. As configurações sugeridas na Tabela 52 devem ser assumidas como metas ou refinamentos do plano de fogo atual, sendo apenas uma aproximação que devido a problemas de ordem prática, talvez nunca venha a ser obtida.

Tabela 52. Configurações sugeridas como refinamento do plano de fogo atualmente executado na Mina do Recreio e custo por metro cúbico

Mistura	Densidade (g/cm ³)	Carga Inic. (g)	VoD média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	NA-Óleo Mistura (%)	Emulsão (%)	RC (kg/m ³)	Custo (R\$/m ³)
1 ANFOb	Regular 0,77	520	2903,00	197,99	90,6	9,4	0,140	0,137
2 ANFOb	Regular 0,77	1040	2914,30	282,33	82,7	17,3	0,140	0,153
3 ANFOb	Modified 0,65	1040	3211,67	217,03	82,7	17,3	0,130	0,142
4 ANFOf	Regular 0,96	520	2727,33	550,24	90,6	9,4	0,162	0,122
5 ANFOf	Regular 0,96	1040	2927,70	282,33	82,7	17,3	0,162	0,136
6 ANFOf	Modified 0,85	1040	2919,25	230,25	82,7	17,3	0,150	0,126
7 ANFOf	Modified 0,75	1040	2885,00	13,00	82,7	17,3	0,140	0,117
8 ANWOOb	Regular 0,77	520	2638,17	320,35	90,6	9,4	0,140	0,137
9 ANWOOb	Regular 0,77	1040	2891,30	170,07	82,7	17,3	0,140	0,153
10 ANWOOf	Regular 0,96	520	2839,75	274,69	90,6	9,4	0,162	0,122
11 ANWOOf	Regular 0,96	1040	2705,30	472,46	82,7	17,3	0,162	0,136
12 ANWOOf	Modified 0,85	1040	2870,77	134,86	82,7	17,3	0,150	0,126
13 ANWOOf	Modified 0,75	1040	2800,50	30,22	82,7	17,3	0,140	0,117

As treze configurações sugeridas são mostradas em ordem descendente de custo por metro cúbico na Tabela 53. As vantagens e desvantagens do uso de cada possível arranjo e as diferenças relativas ao custo da opção de mais baixo valor, também são apresentadas. O menor custo por metro cúbico foi alcançado pela mistura 13 (ANWOOf), possuindo como vantagens o uso de óleo reciclado, cujo custo é aproximadamente nulo e o alto ponto de fulgor do óleo WO, que teoricamente aumentaria a segurança no preparo da mistura. Entretanto, ANWOOf necessita de maior tempo para ser preparada devido à adição de agente redutor de densidade.

De acordo com a Mineradora Copelmi Ltda, uma média de 3×10^6 m³ de rochas são desmontadas anualmente na Mina do Recreio. Baseado nessa constatação, uma comparação entre o primeiro cenário (1997) e o plano de fogo com os refinamentos sugeridos, é apresentada na Tabela 54. No ano de 1997, a Mina do Recreio utilizou apenas emulsão encartuchada para sua operação de desmonte de rochas. Em setembro de 2002, a operação da mina alcançou 68% de uso de ANWOOb, com um custo por metro cúbico de R\$ 0,169, redução de 33%. Esse trabalho sugere uma redução ainda maior no custo de desmonte por metro cúbico se forem utilizadas pelo menos uma das treze configurações sugeridas.

Quando comparados os agentes explosivos sugeridos em termos de óleo combustível, sempre foi preferido WO sobre óleo diesel. Em termos de desempenho, as misturas que utilizaram óleo diesel mostraram velocidades de detonação mais elevadas, porém a reciclagem de óleo lubrificante para utilização em ANWO_b ou ANWO_f e, também, a economia da sua utilização devem ser assinaladas. A economia na substituição de óleo diesel por WO nas misturas necessárias para desmontar 3x10⁶ m³ de rocha anualmente na Mina do Recreio pode ser de R\$ 15.000,00.

Tabela 54. Cenários reais e arranjos possíveis para custo de misturas de agentes explosivos e simulações para 3x10⁶ m³ de rocha desmontada na Mina do Recreio

Cenário	Descrição	Custo (R\$/m ³)	Custo 3x10 ⁶ m ³ (R\$)	Dif. (%)	Economia 1 ano (R\$)	Economia 5 anos (R\$)
13	82,7% ANWO _f ; 17,3% Emulsão; R,C, 0,14 Kg/m ³ ; Dens, 0,75 g/cm ³	0,117	351.000	- 53,8	409.200	2.046,000
2	82,7% ANFO _b ; 17,3% Emulsão; R,C, 0,14 Kg/m ³ ; Dens, 0,77 g/cm ³	0,153	459.000	- 39,6	301.200	1.506,000
2002*	68 % ANWO _b ; 32% Emulsão R,C, 0,14 Kg/m ³ ; Dens, 0,77 g/cm ³	0,169	507.000	-33	253.200	1.266,000
1997	100% Emulsão R,C, 0,14 Kg/m ³ ; Dens 1,15 g/cm ³	0,253	760.200	-	-	-

* *Media Janeiro - Setembro 2002*

Todas as 13 hipóteses mostradas na Tabela 53 são capazes de fragmentar adequadamente as rochas da Mina do Recreio. Existe uma diferença de 30,7% entre o arranjo mais otimista (ANWO_f, 13) e o pessimista (ANFO_b, 2) onde o custo por metro cúbico é mais alto. No cenário 13 sugerido (82,7% ANWO_f / 17,3% Emulsão / RC 0,14 Kg/m³ / 0,75 g/cm³) seriam necessários R\$ 351.000,00 para fragmentar um volume equivalente a 3x10⁶ m³ de rochas. Isso representa uma economia de R\$ 409.200,00 (53,8%) se comparado a 1997, e R\$ 156.000,00 se comparado a atual configuração em 2002.

Se o refinamento de custo mais elevado (ANFO_b, 2) fosse escolhido, seriam necessários R\$ 459.000,00 para desmontar um volume equivalente a 3x10⁶ m³ de rochas. Esse valor representa uma economia de R\$ 301.200,00 (39,6%) se comparado a 1997, e R\$ 48.000,00 se comparado à configuração atual em 2002.

7. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Essa tese possibilitou o desenvolvimento de diferentes tipos de agentes explosivos a base de nitrato de amônio e óleo combustível. De acordo com medidas de velocidade de detonação, tanto nitrato de amônio do tipo agrícola quanto do tipo industrial, podem ser utilizados nas misturas com resultados de desempenho similares. Somando-se a isso, óleo lubrificante reutilizado pode ser uma alternativa ao óleo diesel, reduzindo custos e promovendo a conservação do meio ambiente, mesmo que apresentando desempenho inferior em termos de velocidade de detonação. Se o setor mineiro reciclasse o óleo lubrificante de motor dos seus equipamentos para a reutilização em desmonte de rochas, provavelmente eliminaria a necessidade de disposição e manipulação perigosa de óleos usados, diminuindo, também, a dependência da compra de óleo diesel.

As formulações e configurações estudadas promoveram a viabilidade de uso dos agentes explosivos ANFO e ANWO. Esses materiais explosivos podem ser utilizados eficientemente se observadas as técnicas sugeridas nesse estudo.

Segundo a caracterização do maciço rochoso, a seleção de agente explosivo a base de nitrato de amônio e óleo combustível para a Mina do Recreio é adequada para os valores de RQD, compressão uniaxial e densidade de rocha encontrados.

Ficou demonstrado que o óleo diesel (FO), apresenta desempenho superior ao óleo lubrificante reutilizado (WO), principalmente devido à condição de maior quantidade de água encontrada nesse último. Entretanto, deve-se observar que o óleo diesel possui custo de aquisição superior ao óleo lubrificante reutilizado, além de ponto de fulgor menor, menor energia teórica e maior potencial de segregação, quando misturado a nitrato de amônio.

Em relação aos nitratos de amônio, percebeu-se que as qualidades consideradas superiores do nitrato de amônio tipo industrial (b) não foram suficientes para sobrepor significativamente o desempenho do nitrato de amônio agrícola (f) em relação à velocidade de detonação para carregamento a granel. O nitrato de amônio industrial, mesmo oferecendo maior porosidade, maior absorção de óleo, maior capacidade de retenção de óleo e maior área superficial apresentou desempenho

semelhante ao nitrato de amônio agrícola quando em carregamento a granel. Esse como vantagem, apresentou menor resistência ao ataque da água, devido ao seu recobrimento, o que seria vantajoso do ponto de vista de transporte por longas distâncias e armazenamento por longos períodos.

A carga mínima para iniciar adequadamente as misturas desse trabalho foi de 520 g, valor que fornece desempenho similar quando comparado à carga iniciadora (primer) de 1040 g. As misturas de nitrato de amônio tipo industrial e óleo diesel (ANFOb), nitrato de amônio agrícola e óleo diesel (ANFOf), nitrato de amônio industrial e óleo lubrificante reutilizado (ANWOb) apresentaram resultados similares. O mesmo não ocorreu para nitrato de amônio agrícola e óleo lubrificante reutilizado (ANWOf), que apresentou desempenho em termos de VoD inferior.

Todas as misturas podem obter redução na densidade de carregamento quando utilizou agentes modificadores do tipo casca de arroz. No caso de nitrato de amônio tipo industrial, entretanto, a densidade da mistura pode ser reduzida para $0,65 \text{ g/cm}^3$ somente para ANFOb, não sendo essa modificação recomendada para ANWOb devido à alta chance de deflagração. Para o nitrato de amônio tipo agrícola, porém, é possível reduzir a densidade de carregamento das misturas a $0,85 \text{ g/cm}^3$ ou $0,75 \text{ g/cm}^3$ sem prejuízo no desempenho da velocidade de detonação.

Em relação ao ataque da água e a resistência das misturas, ficou demonstrado que o nitrato tipo agrícola é superior ao tipo industrial, porém, não o suficiente para garantir um carregamento a granel sem destruição dos centros reativos (*Hot Spots*). No estudo da viabilidade do uso de encartuchamento para garantir essa resistência, o nitrato de amônio tipo industrial obteve bons resultados, entretanto o nitrato de amônio tipo agrícola necessitou de 40 % de sua massa reduzida abaixo de peneira # 200 para obter uma detonação estável.

Esse estudo permitiu, também, o desenvolvimento de procedimentos e de um equipamento de medição de velocidade de detonação confiável e de custo reduzido (VAR) para avaliar o desempenho de diversas misturas de agentes explosivos. O sistema foi útil para identificar cargas iniciadoras adequadas, densidades e selecionar nitrato de amônio e óleo combustível. A patente para equipamento e procedimento foi requerida.

Uma redução de 33% do custo de desmonte de rochas na Mina do Recreio foi alcançada com a introdução das misturas ANFO e ANWO em escala de produção. A equipe responsável pelo desmonte com explosivo foi treinada e adaptada às técnicas necessárias para o uso correto dos novos materiais explosivos. Baseado nos resultados iniciais positivos, a Mineração Copelmi Ltda. estendeu o conhecimento e a tecnologia gerados para suas outras operações, reduzindo a dependência de fornecedores de explosivos. A economia obtida pela introdução dos agentes explosivos tipo ANFO/WO é maior se comparada aos números mostrados nesse trabalho, visto que em setembro de 2002 o registro de utilização de ANWO em todas as operações da Copelmi foi de 73,15%.

Os experimentos mostraram que é possível aperfeiçoar o custo do desmonte com explosivos na Mina do Recreio com a utilização de uma das 13 configurações sugeridas. Esses arranjos de misturas de ANFO ou ANWO devem ser tratados como metas, onde uma redução de 30,7% máxima em custo pode ser obtida se comparada a configuração atual. Uma mistura adequada para este propósito, parece ser uma mistura de nitrato de amônio tipo agrícola e óleo lubrificante reutilizado na proporção 82,7% de ANWO com densidade $0,75 \text{ g/cm}^3$ e 17,3% de emulsão encartuchada para iniciação do conjunto.

As sugestões para futuros trabalhos na área dessa tese são:

- Aprofundar a investigação na utilização de Biodiesel, o qual pode ser ambientalmente adequado e útil para menor geração de gases nocivos em mineração subterrânea, principalmente pela sua inerente baixa geração de gases nitrosos quando em combustão.
- Aperfeiçoar o sistema VAR para utilização futura simplificada em pedreiras, mineração a céu aberto e subterrânea.

BIBLIOGRAFIA

- ABADI, L. A., "Relatório de Estágio Supervisionado Mina do Recreio." Copelmi Mineração Ltda, Butiá, Brasil, 23 p. 1999.
- ADHIKARI, G. R., "Blast Design Methodology for Surface Mines: an Integrated Approach to Optimization–Part 1." ISEE Journal, Cleveland, USA, v.18, n.4, 2001.
- ADOLPHSON, R. P. E., "The Pioneer Use of ANFO in Small Boreholes." Proceedings of the 9th General ISEE Annual Conference, Dallas, TX, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 12 p. 2000.
- ADTEC, "WR Blasting Method." <http://www.adtec.biz.html>, Marshal, USA, 2002.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. "Regulamento Técnico 129/99, PORTARIA ANP nº 129 de 29/08/99", Diário Oficial da União, Brasília, Setembro, 30, 8p. 1999.
- ALBERGANTI M., BARTHÉLÉMY, P., "Les chimistes ne s'expliquent pas les causes de la catastrophe de Toulouse." <http://www.lemonde.fr/article/0,5987,3226--223276-,00.html>, Le Monde Newspaper, September, 27, Paris, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS "Test Method B214 Standard TEST Method for Sieve Analysis of Metal Powders." Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, USA, 8p. 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method D1796 Standard TEST Method for Water and Sediment in Fuel Oils by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure)." Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, USA, 9p. 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method D3828 Standard TEST Methods for Flashpoint by Small Scale Closed TEST." Annual Book of ASTM Standards, Petroleum Products and lubricants, Philadelphia, PA, USA, 6p. 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method D445 Standard TEST Method for Kinematics Viscosity of Transparent and Opaque Liquids." Annual Book of ASTM Standards, Petroleum Products and lubricants, West Conshohocken, PA, USA, 12p. 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method D4052 Standard TEST Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter." Annual Book of ASTM Standards, Petroleum Products and lubricants, Philadelphia, PA, USA, 5p. 1996.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method D5002 Standard TEST Method for Density and Relative Density of Crude Oils by Digital Density Analyzer." Annual Book of ASTM Standards, Petroleum Products and lubricants, Philadelphia, PA, USA, 7p. 1999.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method D4055 Standard TEST Method for Pentane Insoluble by Membrane Filtration." Annual Book of ASTM Standards, Petroleum products and lubricants, West Conshohocken, PA, USA, 6p. 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method D1796 Standard TEST Method for Water and Sediment in Fuel Oils by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure)." Annual Book of ASTM Standards, Petroleum Products and lubricants, Philadelphia, PA, USA, 6p. 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method D92 Standard TEST Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup." Annual Book of ASTM Standards, Petroleum Products and lubricants, Philadelphia, PA, USA, 5p. 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method D93 Standard TEST Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Test." Annual Book of ASTM Standards, Petroleum Products and lubricants, Philadelphia, PA, USA, 5p. 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Test Method D97-96a Standard TEST Method for Pour Point of Petroleum Products." Annual Book of ASTM Standards, Petroleum Products and lubricants, Philadelphia, PA, USA, 5p. 1996.
- BARTON, N., LIEN, R., LUNDEN, J., "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support." *Rock Mechanics*, v.6, 4p.1974.
- BARTON, N., "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses." *ISRM, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v.15, n.6, 415p. 1978.
- BECKER J. L., "Planejamento no mundo do faz-de-conta." *Zero Hora – Caderno de Economia.*, Porto Alegre, Brasil, 12p. Julho, 6, 1997.
- BIENAWSKI Z. T., "Estimating the strength of rock materials." *South African Institute of Mining and Metallurgy*, v.74, n.8, 483 p. South Africa, 1974.
- BIENAWSKI, Z. T., "Engineering Rock Mass Classifications." John Wiley & Sons, Inc, NY, USA, 251p., 1989.
- BOWSER, M. L., GIBSON, F. C., "Pulse Forming Circuitry for Explosives Research." *Explosives Research Laboratory, U, S, Bureau of Mines Report of Investigation*, RI 5985, Pittsburgh, Pa, USA, 13p. 1961.
- BROCH, E., FRANKLIN, J.R., "Suggested Method for Determining Point Load Strength TEST." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, v.9 p. 669–698, 1972.
- BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES. "More Solutions to Sticky Problems - A Guide to Getting More from your Brookfield Viscometer." Brookfield Engineering Laboratories, Inc, Stoughton, MA, USA, 25p. 1986.

- BROWN, F. W., "Simplified Methods for Computing Performance Parameters of Explosives." 2nd, Annual Symposium on Mining, Technical Series, n.97, 12p. 1956.
- CAMERON, A. R., "Developments of Techniques for Evaluating the Performance of Bulk Commercial Explosives." PhD Thesis, University of Queensland, 435p. 1992.
- CALLISTER, W. D., "Materials Science and Engineering: an Introduction.", 5 ed. John Wiley & Sons, Inc, NY, USA, 871p. 2000.
- COOPER, P. W., "Explosives Engineering." VCH Publishers, NY, USA, 460p. 1996.
- CORRÊA, K.C.R., "Caracterização Geotécnica e Geomecânica de uma Lavra a Céu Aberto Aplicada a Problemas Mineiros" Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 163p. 2000.
- CHANTALE, D., LIZOTTE Y., PAVENTI, M., SCOBLE, M., "Structural Control Over Fragmentation Characterization and Case Studies." Proceedings of the 22th General ISEE Annual Conference, Austin, TX, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 6 p. 1998.
- CLARK, B., "Principles of Rock Fragmentation." John Wiley & Sons Inc, NY, USA, 610 p. 1987.
- CROSBY, W., "Drilling and Blasting in Open Pit and Quarries." Book 1, MREL, Kingston, Canada, 480p. 1998.
- CROSBY, W. A., BAUER, A. W., WARKENTIN, J. P. F., "State-of-the-art Explosive VoD Measurement System." Proceedings of the 17th General ISEE, Annual Conference, Las Vegas, USA, p. 23 – 34, 1991.
- DAHAN, C. J., JAMES, R. W., "Cycled Prill, A New Generation of High Performance High Density ANFO Explosives." Proceedings of the 6th General ISEE Annual Conference, Tampa, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 12 p. 2000.
- DAVIS, T. L., "The Chemistry of Powder and Explosives." v.2, John Wiley & Sons Inc., London, 500p. 1943.
- DEERE, D. U., MILLER, R. P., "Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock.", Air Force Weapons Laboratory Technical Report AFNLTR-65-116 Albuquerque, NM, USA, 111p. 1966.
- DEERE, D. U., "Rock Quality Designation (RQD) after 20 years.", US Army Corps Engineers Contract Report GL 89 1, Vicksburg, USA, 42p., 1989.
- DNC - DEPARTAMENTO NACIONAL DO PETRÓLEO. "Regulamento Técnico DNC 02/97 "Diário Oficial da União, Portaria DNC n,º 32/97, Brasília, 7p. 1997.

- DICK, R. A., "Factors in Selecting And Applying Commercial Explosives and Blasting Agents." U.S. Bureau of Mines Information Circular IC 8405, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 26 p. 2000.
- DICK, R. A., "The Impact of Blasting Agents and Slurries on Explosives Technology." US Bureau of Mines Information Circular, IC 8560, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 40 p. 2000.
- DRURY F. C., WESTMAAS, D. J., "Considerations Affecting the Selection and Use of Modern Chemical Explosives." Proceedings of the 4th General ISEE Annual Conference, New Orleans, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 23 p. 2000.
- DRURY, F. C., "Ammonium Nitrate Blasting Agents from Manufacture to Field Use", Proceedings of the 6th General ISEE, Annual Conference, Tampa, FL, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 13 p. 2000.
- ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA ON LINE. <http://search.britannica.com/search?>, Encyclopaedia Britannica Inc, Chicago, USA, 2001
- FEDOROFF, B. T., SHEFFIELD, O. E., "Encyclopaedia of Explosives and Related Items." v.2, Picatinny Arsenal, Dover, NJ, USA, 278p. 1962.
- FELTRE, R., YOSHINAGA, S., "Química Geral." V.1, Moderna Ltda, São Paulo, Brasil, 533p. 1969.
- GIVENS R. McDORMAN D. L., WILLIAMS, G. S., "The Effect of Prill Specifications on ANFO Emulsion Blends." Proceedings of the 16th General ISEE Annual Conference, Orlando, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 12 p. 2000.
- GRANT, J. R., LITTLE T. N., BETTESS, D., "Blast Driven Mine Optimization.", EXPLOR 95 Proceedings, AusIMM & ISEE, Brisbane, Australia, 3 p. 1995.
- GROUHEL, P., KLEINE, T. H., "Designer: a Spreadsheet for Determining the Most Cost Effective for an Open Cut Blast." 3rd Large Open Pit Mining Conference Proceedings, MacKay, Australia, 1992.
- GORDON, P., "Practical Application of Used Oils in the Manufacture of Bulk Explosives." Proceedings of the 19th General ISEE Annual Conference, San Diego, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 10 p. 2000.
- HOPLER, R. B., "History of the Development and Use of Bulk Loaded Explosives, from Black Powder to Emulsions." Proceedings of the 19th General ISEE Annual Conference, San Diego, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 14 p. 2000.
- HOPLER, R. B., (Ed.), "ISEE Blaster's Handbook.", International Society of Explosives Engineers Inc, Cleveland, USA, 742p. 1999.

- HICKEY, S. M., "Blast Monitoring: From Detonation to Impact.", Proceedings of the FRAGBLAST 90, Brisbane, Australia, 1990.
- INTERNATIONAL FERTILISER INDUSTRY ASSOCIATION, "Fertiliser Indicators." Paris, <http://www.fertiliser.org/ifa/statistics/STATSIND/trade.asp>, 2002.
- JOHNSON, R. J., "SANFO: The Missing Link in Explosives Technology.", Proceedings of the 22nd General ISEE Annual Conference, Orlando, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 11 p. 2000.
- JORNAL GAZETA MERCANTIL, "Óleo de Soja, Cotação.", Investnews S,A, Santo Amaro, SP, Brasil, Setembro, 27, 2002.
- KATZ, H. S., MILEWSKI, J. V., "Handbook of Fillers for Plastics." Von Nostrand Reinhold, New York, 512p. 1987.
- KRAMER, D. A., Mineral Industry Surveys (2002): "Apparent Consumption of Industrial Explosives and Blasting Agents in the United States." United States Geological Survey Minerals Yearbook, U. S. Government Publication, 5p. 2002.
- KONYA, C. J., "Blast design." Intercontinental Development, Montville, USA, 230p. 1995.
- KONYA, C. J., "Priming blasting agents." Engineering and Mining Journal, Chicago, USA, v.196, n.11, p, 41-42, 1996.
- LILLY, P. A., "An empirical method of assessing rock mass blastability.", Large Open Pit Mining Conference, The AusIMM/IE Aust Newman Combined Group, Australia, p, 89 – 92, 1986.
- LIU, Q., BAUER A., HEATER, R., "The Channel Effect for ANFO Slurries and Emulsion." Proceedings of the 14th General ISEE Annual Conference, Anaheim, CA, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 5 p. 1998.
- MACDONALD, G. P., STERN M. S, "Practical Application of Used Oils in the Manufacture of Bulk Explosives. " Proceedings of the 19th General ISEE Annual Conference, San Diego, CA, USA, p. 89 – 99, 1993.
- MAGNUM EXPLOSIVOS Ltda., "Catálogo de Produtos", Itaúna, Brasil, 19p. 2000.
- MASON, C. M., AIKEN, E. G., "Methods for Evaluating Explosives and Hazardous Materials." U, S, Bureau of Mines Information Circular IC 8541, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 42 p. 2000.
- MINÉRIOS & MINERALES, "XIV Universo da Mineração Brasileira." Univers, São Paulo, Brasil, v.265, 74p. 2002.
- MINING ENGINEERING, "Waste Oil Used with ANFO for Blasting." Littleton, CO, USA , v.53, n.10, 39p. 2001.

- MINING MAGAZINE, "Shell's Green Option Blasts Off!", London, UK, v.185, n.6, p.268 - 269, 2001.
- MOHANTY, B., "Parameters Affecting Explosive Energy Release – A Case for Realistic Rating of Commercial Explosives." Proceedings, Proceedings of the 14th General ISEE Annual Conference, San Diego, CA, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 11 p. 2000.
- MOHANTY, B., DESHAIES, R. "Pressure Effects on Density of Small Diameter Explosives." Proceedings of the 15th General ISEE Annual Conference, New Orleans, LA, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 11 p. 1998.
- MONTGOMERY, D. C. "Design and Analysis of Experiments" 5 ed. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 704p. 2000.
- MONSANTO COMPANY, "ANFO Manual: Its Explosives Properties and Field Performance Characteristics." Monsanto Blasting Products, Saint Louis, USA, 37p. 1972.
- MONSANTO COMPANY, "Company Timeline History." <http://www.monsanto.com/Monsanto/layout/careers/timeline/timeline3.asp>, Monsanto Company, Saint Louis, MO, USA, 2002.
- MORHARD, R. C., CHIAPPETTA F. R., BORG, D. G., STERNER, V. A, (Ed), "Explosives and Rock Blasting." Maple Press, Atlas Powder Company Field Technical Operations, Atlas Powder Company Inc, Dallas, USA, 662p. 1987.
- MOXON, N. T., RICHARDSON, S. B. ARMSTRONG, L. W., "The Effects of Confinement on Fragmentation and Movement." Proceedings of the 19th General ISEE Annual Conference, San Diego, CA, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 11 p. 1998.
- MUNARETTI, E., DOREL, A., BOWLES, J., "ANSOy – Internal Report December 1999." Rock Mechanics and Explosives Research Laboratory, RMERC, UMR, Rolla, MO, USA, 32p. 1999.
- MUNARETTI, E. KOPPE, J. C., COSTA, J. F. C. L, THOMAS, C, K, "Desenvolvimento de Equipamento para Medidas de VoD na Mina do Recreio, Butiá RS.", Anais do II Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e II Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea, Belo Horizonte, Brasil, 8p. 2002.
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, "Biodiesel: Handling and Use Guideline." Midwest Research Institute-Battelle-Bechtel, U,S, Department of Energy, Golden, CO, USA, 18p. 2001.
- O EMPREITEIRO. "Nitrato de Amônio, Experiência Norteia Trabalhos." Revista O Empreiteiro, Editora Univers, São Paulo, Brasil, Outubro, 2001.
- PALEY, N., LYMAN, G. J., KAVETSKY, A., "Optical Blast Fragmentation Assessment." 3rd, Conference on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 90 Brisbane, Australia, 13p. 1991.

- PERSSON, P. A., HOLMBERG, J. L., LEE, J., "Rock Blasting and Explosives Engineering." CRC Press Inc, Boca Raton, FL, USA, 540p. 1994.
- PORTER, P. H., "Ammonium Nitrate Blasting Agents Quality Testing for Maximum Benefit." Proceedings of the 10th General ISEE Annual Conference, Lake Buena Vista, FL, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 10 p. 2000.
- POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE "BRAZIL, Consumo Aparente de Fertilizantes" [http://www.ppi-far.org/ppiweb/brazil.Nsf/\\$webindex/7B5F5AD5871DDB7B83256B1200620BBA?opendocument&navigator=profile](http://www.ppi-far.org/ppiweb/brazil.Nsf/$webindex/7B5F5AD5871DDB7B83256B1200620BBA?opendocument&navigator=profile), Norcross, Georgia, USA, 2002.
- RUHE, C., BAJPAYEE, T. S., "Low Temperature Limits for Mixing Recycled Oil, Diesel Fuel and Ammonium Nitrate to Make ANFO Type Blasting Agents." U S Bureau of Mines, Pittsburgh Research Centre, Pittsburgh, USA, 18p. 1996.
- RUHE, C., BAJPAYEE, T. S., "Thermal Stability of ANFO Made With Recycled Oil.", NIOSH, Pittsburgh Research Center, Pittsburgh, USA, <http://www.cdc.gov/niosh>, 1998.
- SUBCHEFIA PARA ASSUNTOS JURÍDICOS, "Regulamento para a Fiscalização de Produtos Controlados, ANEXO R-105.", Decreto Nº 3,665, de 20 de Novembro de 2000, Diário Oficial da União, 128p. Brasília, 2000.
- SARMA, K. S., "Models for Assessing the Blasting Performance of Explosives." Ph.D, thesis, University of Queensland, Brisbane, Australia, 285p. 1994.
- SCOTT, A., (Ed.), "Open pit blast design: analysis and optimization." The University of Queensland, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC), Brisbane, Australia, 338p. 1996.
- SCOTT, A., CAMERON, A. "The Field Evaluation of Explosives Performance." The AusIMM, Explosives in Mining Workshop Proceedings, Melbourne, Australia, 5p. 1988.
- SCHERPENISSE, C. R., ADAMSON, W. R., DIAZ, J. C., "The Use of Blast Monitoring/Modeling Technology for the Optimization of Development Blasting." EXPLO 99 Proceedings, Kalgoorlie, Australia, 14p. 1999.
- SEN, G., "Blasting Technology for Mining and Civil Engineers." UNSW Press Ltd, Sydney, Australia, 146p. 1995.
- SINGER, J. G., "Combustion Fossil Power." Combustion Engineering Inc, 4.ed. Windsor, USA, 530p. 1991.
- SINDICATO DA INDUSTRIA DE ADUBOS E CORRETIVOS AGRÍCOLAS NO ESTADO DE SÃO PAULO. "Consumo Aparente de Fertilizantes." Comitê de Estatística AMA/ANDA/SIACAN/SIARGS/SINPRIFERT/SIACESP/MF, Circular 010/02 – SP 31 01 2002, São Paulo, Brasil, 2002.

- SMITH, J. J. F., "Pneumatic Loading of ANFO Underground." Proceedings of the 8th General ISEE Annual Conference, New Orleans, LA, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 11 p. 2000.
- SONI, D.K., ASHWANI, J., "In Situ Rock Strength Determination for Blasting Purposes." Proceedings of the 20th General ISEE Annual Conference, Austin, TX, USA, 1994.
- SUTTON, A. R. S. M., PUGSLEY, T,F, "Ammonium Nitrate – Fuel Oil Blasting Agents.", Mining Magazine, March, p 156-159, London, UK, 1964.
- SUTTILL, K. R., "Wrong Lubricant Can Prove Costly." Rock Products, Primidia Business Magazines & Media Inc, v. 92,n.3, Chicago, UK, 1989.
- TECHNICAL STANDARDS COMMITTEE FOR MINING AND EXPLOSIVES CEN/TC 321 "Explosives for civil use, Market, environment and objectives." http://www.cenorm.be/standardization/tech_bodies/cen_bp/resources/a321.pdf, 2002.
- TOMEDI, P., "Relatório Geológico Corte Coréia." Copelmi Mineração Ltda, 26p. Butiá, Brasil, 1988.
- UNITED NATIONS "Recommendations on the Transport of Dangerous Goods; Manual of Tests and Criteria -Orange Book." 2.ed. Labelmaster, Chicago, USA, 1990.
- USCFR – "United States Code of Federal Regulations - Title 29, Part 1910, explosives and blasting agents and Title 27, Part 55, Commerce in explosives. and Title 30, Safety Guidelines for Companies Authorized by the Mine Safety and Health Administration to Utilize Used Vehicle Engine Oil in ANFO." The US Government Printing Office, Washington, DC, 2001.
- VOSS, B., "Contract Perspectives." World Mining Equipment, Metal Bulletin, v.26, n.1, p.32-34, New York, 2002.
- VUILLAUME P. M., BOUVET, J. M., "Explosive Performance and Blasting Advantages of Microporous and Low Density Ammonium Nitrate Based ANFO." Proceedings of the 19th General ISEE Annual Conference, San Diego, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 16 p. 1998.
- XUGUANG, W., " Emulsion Explosives." Metallurgical Industry Press, Beijing, China, 388p. 1994.
- WILLIAMS, P. A., " A Mechanical Sensitization Model of Composite Explosives. " Proceedings of the 18th General ISEE Annual Conference, Orlando, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 4 p. 1998.

- WFC - WORLDWIDE FUEL CHART "Recommended Guidelines." <http://www.engine-manufacturers.org>, European Automobile Manufacturers Association, Alliance of Automobile Manufacturers, Engine Manufacturers Association and Japan Manufacturers Automobile Association, April, 2000.
- WORSEY, P. N., CHEN, Q., "The Effect of Rock Strength on Perimeter Blasting and Blastability of Massive Rock. " Proceedings of the 12th General ISEE Annual Conference, Atlanta, GA, USA, 118 – 131, 1986.
- WORSEY, P., WEEKS, B., KOSMAN, K., ANDERSHOCK, D., "Soybean Oil, No Longer Just for Cooking." Proceedings of the 23th General ISEE Annual Conference, Las Vegas, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 8 p. 2000.
- WORSEY, P. N., WEEKS, B., "Dispelling Some Myths About Ammonium Nitrate." ISEE Journal, Cleveland, USA, v.14, n.6, 3 p. 1997.
- ZADRA, S. L., "Blasting with Used Oil / Diesel Blend at Echo Bay Minerals – McCoy / Cove Mine." Proceedings of the 22th General ISEE Annual Conference, Orlando, FL, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 10 p. 2000.