

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

AVALIAÇÃO DO DESEMP. DE
EXPLOSIVOS COMERCIAIS

Guaratinguetá
1997



*"Avaliação do Desempenho de
Explosivos Comerciais "*

ALAOR GOMES MARTHO JÚNIOR

76



“AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE EXPLOSIVOS COMERCIAIS”

ALAOR GOMES MARTHO JÚNIOR

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

MAZ
Prof. Dr. Mauricio Araujo Zanardi
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Nelson Múrcia
Prof. Dr. NELSON MÚRCIA
Orientador / Unesp-Feg

Demétrio Bastos Netto
Prof. Dr. DEMÉTRIO BASTOS NETTO
Co-orientador / INPE

João Andrade de Carvalho Júnior
Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
Unesp-Feg

351

351

Novembro de 1997



M377d

Martho Júnior, Alaor Gomes

Desenvolvimento e normatização de teste para avaliação do desempenho de explosivos em desmonte de rocha: capacidade de fragmentação e lançamento do material desmontado / Alaor Gomes Martho Júnior. - Guaratinguetá, 1997

16, 102f. : il ; 30 cm

Bibliografia: f.79

Dissertação (mestrado) -- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, 1997

1. Explosivos - Testes de laboratório
2. Explosões de minas. I.Título

CDU 662.215.2
662.23

ALAOR GOMES MARTHO JÚNIOR

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE EXPLOSIVOS COMERCIAIS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
Campus de Guaratinguetá, para a obtenção do título de Mestre
em Ciências (Área de concentração: Energia)

Orientador: Professor Dr. Nelson Múrcia

Co-orientador: Dr. Demétrio Bastos Netto, PhD

GUARATINGUETÁ

1997

DADOS CURRICULARES

ALAOR GOMES MARTHO JÚNIOR

NASCIMENTO 1.3.1957 - ARARAQUARA/SP

FILIAÇÃO Alaor Gomes Martho

Anna Hermínia Jensen Martho

1998/1991 Curso de Graduação

Engenharia Química no IME

1995/1997 Professor em comissão no Departamento de Engenharia

Química do IME

Aos companheiros da Fábrica Presidente Vargas (IMBEL)

Cujo entusiasmo, competência e dedicação profissional inspiraram a realização desse trabalho. Em particular aos Capitães: José Luiz Alves Barbosa, Edson Fernandes e Vicente Pedro de Nasco Rondon e ao Major Vagner Pinheiro Carini.



AGRADECIMENTOS

Manifesto o meu agradecimento a todas as pessoas e instituições que tornaram possível a realização desse trabalho e em particular:

ao Dr. Demétrio Bastos Netto por ter aceitado a orientação deste trabalho e pela maneira amigável, atenciosa e segura que o conduziu;

ao Professor Múrcia pela atenção e apoio dispensados durante toda a realização do Curso de Mestrado;

à Faculdade Estadual de Guaratinguetá e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela aquisição do material utilizado;

à Indústria de Material Bélico do Brasil pela doação dos explosivos;

à Fábrica Presidente Vargas pelo apoio na realização dos testes para determinação do perfil de velocidade de detonação;

ao Arsenal de Guerra do Rio de Janeiro pela confecção esmerada e precisa dos corpos de prova;

ao Campo de Provas da Marambaia pelo apoio em pessoal e em instalações necessárias à realização dos experimentos;

ao Tenente Coronel Rafael Roberto Gomide Chefe do Departamento de Engenharia Química do Instituto Militar de Engenharia pelo incentivo e apoio à realização desse trabalho.



MARTHO JÚNIOR, A. G. *Avaliação do Desempenho de Explosivos Comerciais*. Guaratinguetá, 1997. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

RESUMO

Neste trabalho é feito o estudo de um teste para avaliação do desempenho de explosivos comerciais, com base no artigo publicado por Rao et al no periódico *Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, v.9, p.149-154, 1994. O teste pretende simular a fragmentação de blocos de 1ton de rocha, a partir da fragmentação de blocos de ferro fundido de 24kg. Para a fragmentação dos blocos são utilizadas cargas com 35g de explosivos comerciais. Realiza-se também um teste para determinar o perfil de velocidade dos explosivos utilizados, um estudo do vôo de fragmentos e a verificação da influência do cartucho na detonação dos explosivos. Os valores obtidos nos testes são comparados com os valores calculados por modelos matemáticos. Da análise dos resultados, verifica-se que a fragmentação da rocha apresenta um perfil diferente da fragmentação do ferro e que há necessidade de se aprimorar a técnica de cálculo. Por fim, conclui-se que o teste pode ser utilizado para a comparação qualitativa entre o desempenho dos explosivos.

Palavras-chave: Explosivos; teste de explosivos; propriedades de explosivos comerciais.



MARTHO JÚNIOR, A. G. *Commercial Explosives Performance Evaluation*.
Guaratingetá, 1997. 118 p. Dissertation (MSc Degree of Mechanical Engineering)
- School of Mechanical Engineering, Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

ABSTRACT

In this work a study of a performance evaluation test for commercial explosives was made based on the paper published by Rao et al in *Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, v.9, p.149-154, 1994. The purpose of this test is the blasting simulation of a one-ton rock block through the blasting of a 24 kg cast iron block. The blasting of the cast iron blocks were made with 30g charges of commercial explosives. A study of the flight of the fragments and velocity profile of the explosives was also made. The influence of the cartridge on the explosive charge was analysed. The test results were compared with the calculated values based upon several mathematical models. This analysis showed that the rock fragmentation profile is quite different from the cast iron fragmentation profile suggesting the need of an improvement in the model calculation technique. It is concluded that the test can be used to compare the qualitative performance of explosives in rock blasting.

Keywords: Explosives; test of explosives; characteristic of commercial explosives



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DOS EXPLOSIVOS.....	05
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	31
5 TÉCNICAS EMPREGADAS.....	15
6 MODELAGEM ESTATÍSTICA.....	42
7 RESULTADOS OBTIDOS.....	52
8 CONCLUSÃO.....	76
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
Apêndice A - SUPERFÍCIE ESPECÍFICA DOS FRAGMENTOS DO BLOCO DE FERRO.....	83
Anexo B - HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DOS EXPLOSIVOS COMERCIAIS.....	88
Anexo C - NOTA INTRODUTÓRIA SOBRE A TEORIA DO DESMONTE DE ROCHAS.....	93



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Relação entre o custo dos explosivos, o aumento da fragmentação e o custo total do desmonte.....	02
FIGURA 2.1 - Detonação em um cartucho explosivo.....	07
FIGURA 2.2 - Onda de Detonação.....	08
FIGURA 4.1 - Comparação entre as dimensões dos 16 maiores fragmentos.....	20
FIGURA 4.2 - Esboço do cano de PVC com cotas em mm.....	22
FIGURA 4.3 - Esboço do cano de ferro com cotas em mm.....	23
FIGURA 4.4 - Esboço do sensor.....	23
FIGURA 4.5 - Esboço da ligação do sensor ao cronômetro.....	24
FIGURA 5.1 - Bloco de ferro.....	26
FIGURA 5.2 - Esboço das dimensões dos blocos.....	26
FIGURA 5.3 - Papel de estanho, cilindro de madeira e o cartucho pronto.....	29
FIGURA 5.4 - Casamata.....	31
FIGURA 5.5 - Espoletamento da carga explosiva.....	32
FIGURA 5.6 - Colocação da carga explosiva no bloco.....	33
FIGURA 5.7 - Tamponamento da carga explosiva.....	33
FIGURA 5.8 - Carga explosiva tamponada.....	34
FIGURA 5.9 - Conexão do explosor ao circuito elétrico.....	34
FIGURA 5.10 - Esquema de um bloco pronto para ser detonado.....	35
FIGURA 5.11 - Fragmentos do bloco.....	35



FIGURA 5.12 - Esquema da preparação da carga explosiva.....	40
FIGURA 5.13 - Carga explosiva espoletada e pronta para ser detonada.....	40
FIGURA 5.14 - Cronômetros digitais CRM 1038 fabricados pela Fábrica de Material de Comunicações e Eletrônica da IMBEL.....	41
FIGURA 6.1 - Forças atuantes durante o vôleo do fragmento.....	48
FIGURA 6.2 - Determinação de θ_0 a partir da altura (h) do impacto do fragmento.....	50
FIGURA 7.1 - Bloco fragmentado pela detonação de uma carga com 30g de nitropenta.....	52
FIGURA 7.2 - Bloco fragmentado pela detonação de uma carga com 35g de explosivo nitroglicerinado.....	53
FIGURA 7.3 - Bloco fragmentado pela detonação de uma carga com 35g de lama explosiva.....	53
FIGURA 7.4 - Bloco fragmentado pela detonação de uma carga com 35g de emulsão explosiva.....	54
FIGURA 7.5 - Curva experimental para a nitropenta com intervalo de confiança de 95%.....	54
FIGURA 7.6 - Curva experimental para o explosivo nitroglicerinado com intervalo de confiança de 95%.....	55
FIGURA 7.7 - Curva experimental para a lama explosiva com intervalo de confiança de 95%.....	55
FIGURA 7.8 - Curva experimental para a emulsão explosiva com intervalo de confiança de 95%.....	56



FIGURA 7.9 - Ajuste da curva experimental para a nitropenta.....	57
FIGURA 7.10 - Ajuste da curva experimental para o explosivo nitroglicerinado..	58
FIGURA 7.11 - Ajuste da curva experimental para a lama explosiva.....	58
FIGURA 7.12 - Ajuste da curva experimental para a emulsão explosiva.....	59
FIGURA 7.13 - Retas representativas das curvas de distribuição de frequência ajustadas pelo modelo G-G-S.....	60
FIGURA 7.14 - Valores de m para um explosivo, qualquer, função de sua velocidade de detonação.....	60
FIGURA 7.15 - Valores de m' para um explosivo, qualquer, função de sua velocidade de detonação.....	61
FIGURA 7.16 - Impactos dos fragmentos gerados pelas cargas de PETN.....	68
FIGURA 7.17 - Impactos dos fragmentos gerados pelas cargas do explosivo nitroglicerinado.....	69
FIGURA 7.18 - Impactos dos fragmentos gerados pelas cargas de lama explosiva.....	70
FIGURA 7.19 - Impactos dos fragmentos gerados pelas cargas de emulsão explosiva.....	71
FIGURA 7.20 - Perfil de velocidade do explosivo nitroglicerinado.....	72
FIGURA 7.21 - Perfil de velocidade da lama explosiva.....	73
FIGURA 7.22 - Perfil de velocidade da emulsão explosiva.....	73
FIGURA 7.23 - Resultado das detonação das cargas com (vermelho) e sem (azul) o cartucho de papel parafinado.....	75



FIGURA 7.24 - Resultado das detonação das cargas com (azul) e sem (vermelho) o cartucho de polietileno.....	75
FIGURA A.1 - Curvas de distribuição de frequência das detonações com nitropenta (1), explosivo nitroglicerinado (2), lama explosiva (3), emulsão explosiva (4) e a curva característica para o bloco de ferro (5).....	86
FIGURA A.2 - Curvas típicas de distribuição de frequência para rochas e para o bloco de ferro.....	86
FIGURA C.1 - Geometria da propagação das ondas de choque para carga explosivas com $L / d > 6$	95
FIGURA C.2 - Forma geométrica das ondas de choque geradas na detonação em uma bancada.....	96
FIGURA C.3 - Interação das ondas de choque com as interfaces.....	98
FIGURA C.4 - Perfil de fraturamento do material.....	101



LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Especificações do ferro FC 200 e do ferro utilizado por Rao.....	18
Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados na comparação entre os explosivos.....	20
Tabela 7.1 - Coeficiente de correlação para as curvas experimentais ajustadas.....	56
Tabela 7.2 - Propriedades do bloco de ferro.....	61
Tabela 7.3 - Cálculo do somatório de $1/\alpha_{m,i}$	63
Tabela 7.4 - Propriedades das cargas explosivas.....	64
Tabela 7.5 - Valores de X_{max} calculados pelo balanço de energia.....	64
Tabela 7.6 - Valores de X_{max} calculados pelo modelo G-G-S.....	65
Tabela 7.7 - Valores de X_{50} calculados pelo modelo G-G-S.....	66
Tabela 7.8 - Erro dos resultados de X_{max} e X_{50} calculados.....	67
Tabela A.1 - Valores de α obtidos da figura A.2.....	87



LISTA DE SÍMBOLOS

A = superfície

$\alpha = X/X_{max}$

$\alpha_{m,i} = X_{m,i} / X_{max}$

C = velocidade de propagação do som

C_D = coeficiente de arrasto

C_L = coeficiente de sustentação

d = diâmetro

V_d = velocidade de detonação

D = força de arrasto

ΔH_D = calor de detonação

δ = ângulo de ataque

E = energia de Gurney

E_t = energia total

ε = energia por unidade de massa

ε^* = energia transferida do explosivo para o material

ε_b = energia utilizada no fraturamento

ε_{ss} = energia superficial específica

f = “força” (energia)

F_i = faixa de frequência i , da função de distribuição de frequência de massa acumulada

ϕ_c = diâmetro da carga explosiva

ϕ_f = diâmetro do furo do bloco

g = aceleração da gravidade

h = altura do impacto dos fragmentos na parede do cilindro de aço

η = covolume específico

η_1 = fator de impedância

η_2 = fator de acoplamento

η_3 = fator de fragmentação

I_e = impedância do explosivo

I_r = impedância do material

$I.U.$ = Índice de uniformidade (parâmetro m do modelo Rosin-Rammler-Bennet de distribuição)

k_f = Constante para o bloco de ferro função de ε_{ss} e η_3

$K = X_{100}$ ou X_{max}

L = força de sustentação

l = comprimento

m = coeficiente angular

M = massa

m' = coeficiente linear

n = número de moles

N = número de fragmentos

N_i = número de fragmentos de um intervalo i da função de distribuição de frequência de massa acumulada

p = pressão

P_d = pressão de detonação

q = calor dos produtos da detonação

Q = massa de explosivo

Q_R = energia química do explosivo

θ = ângulo entre a direção de vôo do fragmento e o plano horizontal

θ_0 = ângulo de lançamento do fragmento

$\mathfrak{R}$ = constante universal dos gases

ρ_a = massa específica do ar

ρ_e = massa específica do explosivo

ρ_r = massa específica do material

s = superfície específica dos fragmentos

$S_{0,i}$ = superfície de cada fragmento de um intervalo i da função de distribuição de frequência de massa acumulada

S_i = superfície total dos fragmentos de um intervalo i da função de distribuição de frequência de massa acumulada

S_T = superfície total dos fragmentos

T = temperatura

E_c = energia cinética

v = volume específico

v_i = velocidade

v_p = velocidade de partícula



v_0 = velocidade inicial

V = volume dos gases da detonação

V_r = volume de material

$V_{r,i}$ = volume de material fragmentado de um intervalo i da função de distribuição de frequência de massa acumulada

$V_{o,i}$ = volume de cada fragmento de um intervalo i da função de distribuição de frequência de massa acumulada

W = massa total dos N fragmentos

x = alcance do fragmento

$X' = X_{63,2}$ (dimensão característica abaixo da qual situa-se 63,2% da massa total dos fragmentos)

X_{max} = dimensão característica do fragmento de maior massa

$X_{m,i}$ = dimensão característica média dos fragmentos de um intervalo i da função de distribuição de frequência de massa acumulada

X_{50} = dimensão característica abaixo da qual situa-se 50% da massa total dos fragmentos

Y = fração mássica das partículas com dimensão menor do que X



1 - INTRODUÇÃO

A pesquisa e o desenvolvimento na área de explosivos comerciais é orientada por fatores tais como: custos de produção, segurança quanto ao manuseio, aplicação e desempenho por ocasião de sua utilização.

A previsão do desempenho de um explosivo comercial é de fundamental importância, tanto para as empresas que fabricam e desenvolvem novos explosivos, quanto para as empresas que utilizam explosivos em trabalhos de engenharia.

Quase que a totalidade da produção de explosivos comerciais é utilizada por companhias de mineração e de desmonte de rocha. Para essas empresas, explosivos são fontes de energia e a eficiência com que essa energia é utilizada constitui fator primordial na análise econômica de suas atividades.

Por ser a produção de explosivos comerciais quase que totalmente destinada às companhias de mineração e desmonte de rochas, seu desempenho é avaliado pela capacidade de fragmentação do material no qual o explosivo é utilizado. O grau de fragmentação influencia diretamente a taxa de produtividade na exploração de minérios e rochas.

Um plano de fogos* eficiente, combinado com a escolha adequada do tipo de explosivo a ser utilizado, irá determinar uma fragmentação ótima associada a baixos custos de operação.¹

A influência do custo do explosivo na fragmentação do material

* Plano de fogos: jargão utilizado pela comunidade mineradora para descrever as etapas do processo de desmonte por explosivos.



e no custo total do desmonte pode ser observada na figura 1.

O desempenho, também denominado efeito útil do explosivo, não é função de apenas uma única propriedade do explosivo. O efeito útil é determinado pela quantidade de gases gerados por unidade de massa de explosivo (volume gasoso), pela energia envolvida na detonação (calor de detonação) e pela taxa de decomposição do explosivo (velocidade de detonação)².

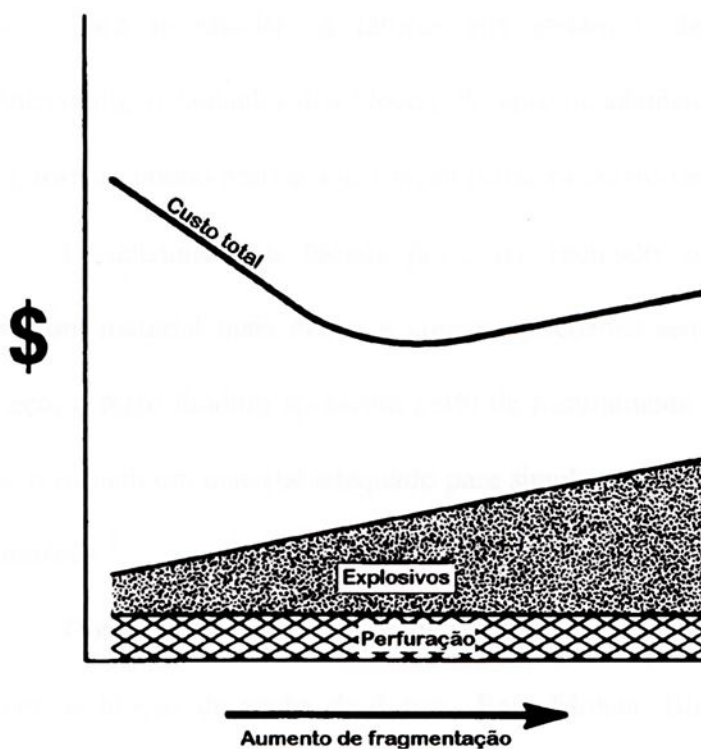


FIGURA 1.1 - Relação entre o custo dos explosivos, o aumento da fragmentação e o custo total do desmonte¹.

De acordo com a literatura, os testes mais utilizados na previsão do desempenho de um explosivo comercial são o teste do bloco de chumbo ou bloco de Trauzl, o teste do morteiro balístico e o teste da detonação subaquática.

Uma evidente desvantagem apresentada por esses testes é o fato de que a detonação da carga explosiva ocorre em meios diferentes do meio no qual o explosivo será utilizado.^{3, 4, 5}

Avaliações mais exatas podem ser obtidas em testes realizados com o próprio material a ser desmontado. Testes realizados com blocos de rocha foram utilizados para se estudar os fatores que afetam o desempenho dos explosivos. Entretanto, o tamanho dos blocos, de aproximadamente 0,38 m³ (no mínimo 1 ton.), tornam pouco prática a utilização rotineira desses testes.⁵

O tamanho dos blocos pode ser reduzido se a rocha for substituída por um material mais denso e com propriedades semelhantes a ela. Diferente do aço, o ferro fundido apresenta perfil de fraturamento e propriedades mecânicas que o tornam um material adequado para simular o material rochoso em testes de laboratório.⁵

Com base na possibilidade de se obter corpos de provas menores que simulassem os blocos de rocha de 1 ton., Rao, Mohan, Bhasu e Kumar⁵ realizaram um trabalho para investigar a possibilidade de desenvolver um novo método para avaliar o desempenho de explosivos no desmonte de rocha.

Baseando-se nos trabalhos de Rao, Mohan, Bhasu e Kumar, os objetivos desta dissertação de mestrado são:

- desenvolver e normatizar um teste para avaliar a capacidade de



fragmentação de explosivos utilizados no desmonte de rochas;

- fazer uma introdução ao estudo do voo dos fragmentos, objetivando a segurança nos desmontes;

- verificar a influência dos cartuchos no desempenho dos explosivos;

- comparar os parâmetros de avaliação e desempenho dos explosivos, obtidos experimentalmente e analisar o modelo matemático proposto no trabalho de referência⁵ e

- determinar experimentalmente os perfis de velocidade de detonação dos explosivos utilizados e analisar a influência dos períodos transientes nos resultados dos testes.



2 - REVISÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DOS EXPLOSIVOS

O conhecimento das propriedades de um explosivo é de fundamental importância para que se possa caracterizá-lo e empregá-lo de maneira adequada.

A energia química armazenada pelo explosivo é liberada durante a detonação e utilizada no desmonte de rochas e exploração de minério ou para o corte de aço e concreto nos trabalhos de demolição.

Nos trabalhos em pedreiras e mineradoras, a energia liberada durante a detonação gera os seguintes efeitos:

- esmagamento das paredes do furo,
- formação de rachaduras no material,
- corte do material,
- liberação de luz e calor,
- lançamento do material,
- vibração do solo e
- deslocamento de ar (efeito de sopro).

A energia liberada pelo explosivo para o meio rochoso se dá sob a forma de pressão de detonação e pressão de perfuração. A pressão de detonação ou de choque está relacionada com a capacidade de fragmentação do explosivo e a pressão de perfuração é responsável por parte da fragmentação e pelo lançamento do material¹.

A velocidade de detonação, a densidade, a pressão de detonação e a energia útil / força são propriedades que, calculadas ou medidas em testes, auxiliam a avaliação do desempenho de um explosivo comercial.

A brisância é uma propriedade utilizada, com maior frequência, para a avaliação de explosivos militares e é definida como a capacidade que o explosivo possui em causar efeitos de fragmentação sobre um invólucro que o contém ou sobre objetos em sua vizinhança. A brisância de um explosivo está diretamente relacionada com a densidade e a velocidade de detonação bem como com o volume gasoso e o calor de detonação do explosivo ².

Velocidade de detonação de um explosivo é a velocidade com que a onda de detonação se desloca no meio explosivo ^{1, 2, 6}.

A velocidade de detonação é uma propriedade facilmente mensurada, entretanto o seu cálculo nem sempre é preciso.

Densidade de um explosivo é sua massa específica ^{1, 6} e pressão de detonação é a pressão desenvolvida na zona de reação do explosivo.

A zona de reação é compreendida entre a frente da onda de detonação e o plano de Chapman-Jouguet ¹ (figuras 2.1 e 2.2).

A pressão de detonação ^{1, 2, 7} é medida em testes de detonação subaquática e pode ser calculada pela relação:

$$P_d = V_d \cdot v_p \cdot \rho_e \quad 2.1$$

onde: P_d = pressão de detonação



V_d = velocidade de detonação

v_p = velocidade de partícula

ρ_e = massa específica do explosivo

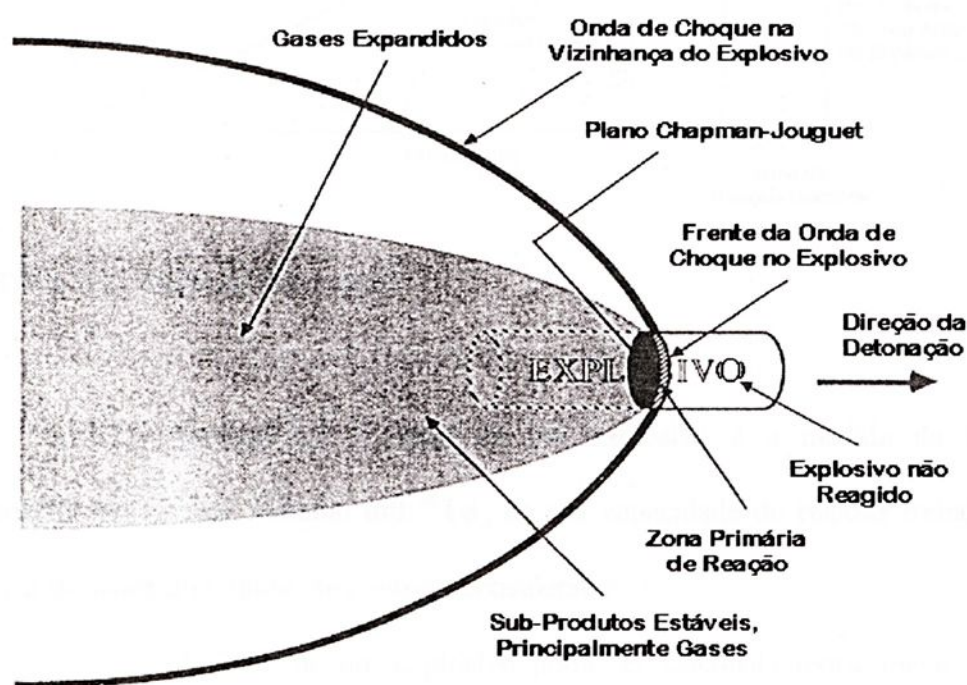


FIGURA 2.1 - Detonação em um cartucho explosivo¹.

Devido a dificuldade em se determinar a velocidade de partícula, considera-se que, para explosivos condensados, $v_p \cong V_d / 4$, pode-se obter valores aproximados pela relação:^{2,7}

$$P_d = \frac{1}{4} \cdot V_d^2 \cdot \rho_e \quad 2.2$$



FIGURA 2.2 - Onda de Detonação ⁸

Energia útil / Força de um explosivo é a medida da sua capacidade de realizar trabalho útil, ⁹ i.e., da sua capacidade de realizar trabalho sobre a fronteira do volume de controle considerado ¹.

A força de um explosivo pode ser calculada teoricamente ou medida experimentalmente.

A energia calculada é obtida pelos princípios da termodinâmica e pode ser considerada como a energia máxima obtida, definida pela equação ¹⁰:

$$E_t = \int_{V_f}^{V_i} p.dV = Q_R - q \quad 2.3$$

onde: E_t = energia total

p = pressão dos produtos da detonação

V = volume dos produtos da detonação

Q_R = energia química do explosivo

q = calor dos produtos da detonação após o trabalho realizado

Energia específica é o valor da força obtida por cálculo teórico e definida como o trabalho realizado por quilograma de explosivo. Seu valor é obtido pela equação de estado dos gases ideais²:

$$f = p.V = n.R.T \quad 2.4$$

onde: f = “força” dos gases (energia)

p = pressão dos gases

V = volume dos gases

n = número de moles de gases

R = constante universal dos gases

T = temperatura dos gases

As altas pressões envolvidas nos processos de detonação e o fato de que os gases reais aproximam-se do comportamento ideal, apenas quando rarefeitos, isto é, quando a pressão tende à zero,¹¹ indicam a necessidade de um fator de correção na equação de estado dos gases ideais.

Nos gases ideais, não existem forças de repulsão intermolecular e o volume gasoso mantém-se continuamente ocupado graças à movimentação

caótica das moléculas. Em outras palavras, o volume ocupado por um gás ideal é idêntico ao “volume livre”.^{11, 12}

Nos gases reais, as moléculas exercem, umas em relação às outras, forças de repulsão e /ou atração. Tais forças de repulsão conferem volume próprio às moléculas e portanto, para idealizar o volume ocupado por um gás real, deve-se excluir o volume ocupado pelas moléculas (covolume), de modo a ter-se o volume livre ou ideal.¹¹

A equação do gás ideal levando-se em consideração as forças de repulsão entre as moléculas é a equação de Abel³:

$$p \cdot (v - \eta) = \frac{1}{M} \cdot \mathcal{R} \cdot T \quad \therefore \quad p = \frac{\rho \cdot \mathcal{R} \cdot T}{M(1 - \eta\rho)} \quad 2.5$$

onde: v = volume específico

η = covolume específico

M = massa molecular dos gases da detonação

Os cálculos teóricos para a comparação entre o desempenho de explosivos consideram os mesmos como tendo um regime de detonação ideal o que, dentro de limitações, é satisfatório para a grande maioria dos explosivos militares que, via de regra, são compostos com estrutura química razoavelmente simples (trinitrotolueno, nitroglicerina, nitropenta, etc). Tal porém, não é o caso dos explosivos comerciais (explosivos nitroglicerizados, lamas, emulsões, etc...), que, em geral, são misturas heterogêneas de componentes diversos.

Na prática, os explosivos podem apresentar rendimentos que variam de 30% a 90% dos valores teóricos calculados, de acordo com o contato, mais íntimo ou menos íntimo, existente entre as substâncias oxidantes e combustíveis que compõem o explosivo.¹

A medida do valor da força de um explosivo pode ser feita através de vários testes. Os mais utilizados são: o teste do bloco de chumbo^{2, 3, 4, 10, 13, 15, 16}, o teste do morteiro balístico^{1, 2, 3, 9, 10, 13, 15, 16} e o teste da energia de bolha (medida no teste de detonação subaquática)^{1, 2, 3, 4, 10, 16, 17, 18}.



3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, serão apresentados comentários encontrados na literatura sobre a utilização de alguns dos testes para avaliação do desempenho de explosivos comerciais.

Rudolf Meyer,² em seu livro *Explosives*, cita a existência de vários testes para avaliar o desempenho dos explosivos, entre eles, o teste do bloco de chumbo, teste do morteiro balístico, teste da cratera e o teste do aquário (teste de detonação subaquática)

Segundo Meyer, os testes do bloco de Trauzl e do morteiro balístico apresentam a desvantagem de utilizar pequenas quantidades de explosivos para sua realização (10 g), o que os tornam imprecisos quando utilizados para avaliar explosivos pouco sensíveis.

Os explosivos pouco sensíveis não atingem o regime permanente de velocidade de detonação e boa parte da massa explosiva não reage completamente.

Comenta também que o teste da cratera é pouco preciso e que os métodos práticos necessitam de amostras com pelo menos 500 g de explosivos.

Ainda sobre os testes com bloco de chumbo e com o morteiro balístico no livro *Science of High Explosives*, Melvin Cook⁷ escreve:

— ” Teoricamente os testes com blocos de chumbo fornecem excelentes medidas de energia útil. Infelizmente esse teste não é tão reprodutível quanto o desejável e além disso também não é prático para utilização rotineira”.

— “O morteiro balístico não é um teste confiável para a



determinação da força de altos explosivos”.

Sobre o morteiro balístico Johansson, ³ em sua publicação *Detonics of High Explosives*, escreve que para o morteiro balístico resistir à pressão dos gases de detonação sem sofrer deformações é necessário limitar o seu uso a explosivos com velocidades de detonação abaixo de 2.500 m/s.

Sobre o teste da detonação subaquática, Paterson ⁴ cita, em seu artigo *Underwater Explosion*, que uma das características do teste é permitir a utilização de cargas explosivas bem maiores, de acordo com o tamanho do local onde serão realizadas as detonações. O teste também tem condições de determinar dois tipos de energia diferentes: a energia do choque e a energia de bolha, que traduzem respectivamente a pressão de detonação e a expansão dos gases da detonação ("força" do explosivo).

Em 1968, Johansson ³ analisou o trabalho realizado pela expansão dos gases de detonações confinadas em água, em bloco de chumbo e no morteiro balístico. Verificou que, apesar da propagação das ondas de choque serem semelhantes na água, no bloco de chumbo e na rocha, o processo de expansão dos gases difere grandemente em cada um dos diferentes testes. Em nenhum deles, a expansão dos gases é semelhante à expansão dos gases nas detonações em rochas.

Das observações apresentadas pelos vários autores, pode-se notar que o teste da detonação subaquática é o teste mais versátil, pois permite a utilização de cargas explosivas maiores e pode fornecer informações sobre a energia das ondas de choque e da expansão dos gases da detonação separadamente.



Porém, da mesma forma que no teste com bloco de chumbo e no teste com morteiro balístico, a expansão dos gases da detonação no teste da detonação subaquática se realiza em um meio totalmente diferente do qual o explosivo será utilizado.

As diferenças entre as propriedades dos meios, nos quais ocorrem os efeitos da detonação, é uma evidente desvantagem apresentada pelos três testes.

O interesse deste trabalho pelo teste, que utiliza blocos de ferro para simular blocos de rocha, apresentado por Rao, Mohan, Bhasu e Kumar⁵ é devido à aparente vantagem desse novo teste sobre os testes tradicionais.

4 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A realização dos testes de avaliação de desempenho e de determinação do perfil de velocidades dos explosivos foi precedida por medidas tais como a determinação do local, do material e da técnica a ser utilizada para o desenvolvimento dos trabalhos.

4.1 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS EXPLOSIVOS

O local escolhido para a realização dos testes de avaliação do desempenho de explosivos, foi o Campo de Provas da Marambaia (CPrM) no Rio de Janeiro, uma organização militar subordinada ao Centro Tecnológico do Exército (CTEx).

O CPrM possui uma “casamata” que permite a realização das detonações dos corpos de provas, o recolhimento de seus fragmentos e o registro dos impactos desses fragmentos com a segurança e eficiência essenciais neste tipo de experimento. Também possui um laboratório de metrologia que permite a realização do controle metrológico dos corpos de prova, da pesagem das cargas explosivas e da pesagem dos fragmentos, além de estar em condições de fornecer outros meios necessários à execução dos testes.

O material utilizado na realização dos testes encontra-se relacionado abaixo:

- ferro fundido cinzento (3.500 kg) para a preparação de corpos de prova (150 blocos),
- balanças de precisão para pesagem dos blocos e dos seus



fragmentos (massas variando de 0,001 até 25 kg),

• paquímetros (150 e 250 mm) para fazer a metrologia dos blocos,

• espoletas elétricas número oito (160 unidades),

• explosor e bobina com fio para o acionamento das espoletas elétricas,

• explosivo militar tipo pentaeritritol tetranitrado (PETN) (1,5 kg),

• explosivo comercial nitroglicerinado (1,5 kg),

• explosivo comercial tipo Lama Explosiva (1,5 kg),

• explosivo comercial tipo Emulsão Explosiva (1,5 kg),

• balança analítica para a pesagem das cargas explosivas,

• papel de estanho, de 80 a 100 g/m², para a confecção dos cartuchos das cargas explosivas,

• cilindro de madeira, com 150 mm de comprimento e 26 mm de diâmetro, para preparar os cartuchos de papel de estanho,

• gerador elétrico e exaustor para a exaustão de gases após as detonações,

• galão com vinte litros de gasolina para o motor do gerador,

• termômetro e higrômetro para o registro das condições do ambiente durante a realização dos testes,

• prancheta e planilhas para registrar a metrologia dos blocos, o



peso das cargas explosivas, as condições do ambiente durante as detonações, o impacto e a massa dos fragmentos,

- areia seca, passando em peneira de 0,3 mm e ficando retida em peneira de 0,15 mm (10 litros),

- sessenta cunhetes* para o recolhimento e transporte dos fragmentos

- tinta, solvente e pincel para pintar o cilindro que registra os impactos dos fragmentos.

As espoletas e os explosivos foram cedidos pela Indústria de Material Bélico do Brasil (IMBEL) através das fábricas da Estrela e Presidente Vargas.

A aquisição do ferro, para a preparação dos corpos de provas, foi precedida de uma consulta junto às empresas fornecedoras de ferro fundido cinzento. Constatou-se que o ferro fundido cinzento FC 200 fabricado pela Tupy era o que apresentava composição química e resistência à tração mais assemelhadas as do ferro especificado no trabalho publicado por Rao (trabalho de referência). Esses resultados são apresentados na tabela 4.1.

Para verificar se as diferenças observadas na tabela 4.1 são ou não significativas, realizou-se um teste com quatro corpos de prova feitos com o FC 200.

* Caixote de madeira utilizado sobretudo para guardar ou transportar munição de guerra



Os quatro blocos foram preparados e detonados com cargas de PETN de acordo com as especificações apresentadas no trabalho de Rao.⁵

Tabela 4.1 - Especificações do ferro FC 200 e do ferro utilizado por Rao

Ferro Fundido Cinzento	Composição Química (%)					Resistência à Tração (MPa)
	C	Si	Mn	P	S	
FC 200	3,2 - 3,6	2,3 - 2,7	0,4 - 0,7	0,0 - 0,1	0,0 - 0,15	167 - 184
Trabalho de referência	3,3 - 3,8	1,5 - 1,8	~ 1,5	~ 1,0	~ 1,0	~ 120

Fonte: Certificado de ensaio fornecido pelo fabricante e referência bibliográfica nº 5

A partir dos fragmentos, determinou-se a distribuição de frequência de massa acumulada por dimensão dos fragmentos e ajustou-se a curva experimental pelo modelo Rosin-Rammler-Bennett (R-R-B, modelo adotado por Rao, Mohan, Bhasu e Kumar), que, como se sabe, é representada pela seguinte expressão:

$$Y = 1 - e^{-\left(\frac{X}{X'}\right)^m} \quad 4.1$$

onde: Y = fração mássica das partículas com dimensão menor do que

X

X' = dimensão característica abaixo da qual situa-se 63,2% da massa total dos fragmentos ($X_{63,2}$)

m = coeficiente angular da reta obtida por $\ln(X)$ versus

$$\ln \left[\ln \frac{1}{1-Y} \right]$$

Além da curva de distribuição de frequência, utilizou-se os dezesseis fragmentos, de maior peso, para a determinação dos parâmetros utilizados na comparação entre os explosivos. Esses parâmetros são:

N = número de fragmentos (em ordem decrescente de massa)

utilizados para a comparação entre os explosivo

X_{max} = dimensão característica do fragmento de maior massa*

W = massa total dos N fragmentos

X_{50} = dimensão característica abaixo da qual situa-se 50% da massa total dos fragmentos (parâmetro obtido na curva de distribuição ajustada pelo modelo R-R-B)

$I.U.$ = Índice de uniformidade (parâmetro m do modelo Rosin-Rammler-Bennet de distribuição).

As massas dos dezesseis maiores fragmentos e os parâmetros obtidos dos resultados das quatro detonações são apresentados na figura 4.1 e na tabela 4.2.

Comparando-se os resultados das quatro detonações com o resultado publicado por Rao, decidiu-se especificar o ferro fundido cinzento FC 200 da Tupy, como o ferro a ser utilizado na preparação dos corpos de prova.

* A dimensão característica utilizada é a aresta do cubo de massa equivalente à massa do fragmento

Após a aquisição do ferro, os blocos foram usinados no Arsenal de Guerra do Rio de Janeiro (AGRJ).

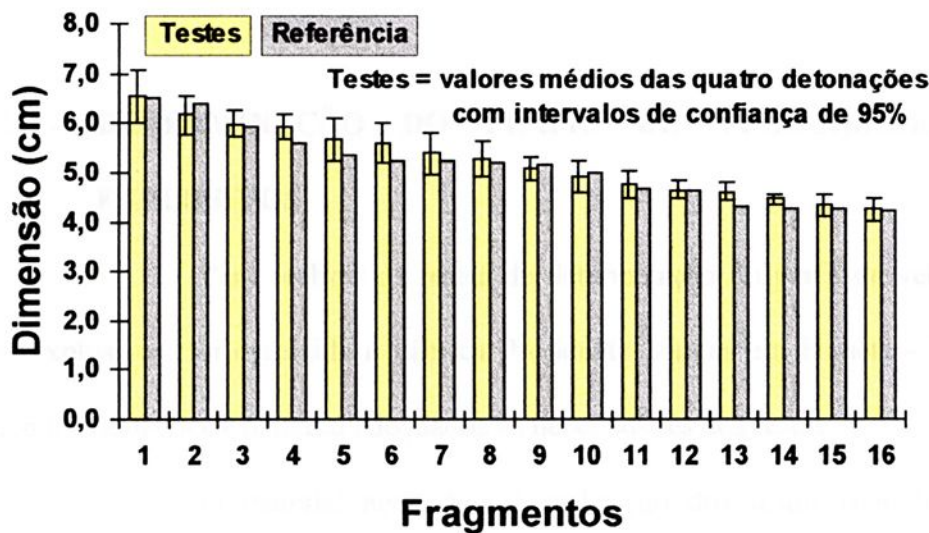


FIGURA 4.1 - Comparação entre as dimensões dos 16 maiores fragmentos

Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados na comparação entre os explosivos

	X_{max} (cm)	W (kg)	W (%)	W / N (kg)	X_{50} (cm)	$I.U.$
Testes	6,5 ± 0,5	17,33 ± 1,42	74,3 ± 4,8	1,08 ± 0,09	4,0 ± 0,5	2,0 ± 0,1
Trabalho de referência	6,5	16,38	69,7	1,02	4,7	5,4

Os valores apresentados pelos testes são os valores médios e os intervalos de confiança são de 95%

O ferro é comercializado em cilindros com diâmetros variáveis sendo que o diâmetro de 164 mm é o que mais se aproxima do diâmetro utilizado

no trabalho de referência (160 mm).

Com o intuito de tornar o teste o mais simples e prático possível, decidiu-se alterar o diâmetro do bloco de ferro de 160 mm para 164 mm evitando um trabalho adicional para correção do diâmetro.

4.2 - DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADE DOS EXPLOSIVOS

Para realizar os testes de determinação do perfil de velocidade dos explosivos, foi escolhida a Fábrica Presidente Vargas em Piquete - SP, por possuir instalações e material adequados às necessidades dos testes.

O material necessário à realização dos testes encontra-se na relação abaixo:

- tubo de PVC com diâmetro interno de uma polegada (7 m),
- tubo de ferro com diâmetro interno de uma polegada e um quarto (7 m),
- agulhas de injeção para a confecção de sensores (220 unidades),
- fio de cobre esmaltado número 28 ou 29 para a confecção de sensores (300 m),
- espoletas número oito (18 unidades),
- explosivo tipo nitroglicerinado (6 cartuchos de 1" x 12"),
- explosivo tipo lama explosiva (6 cartuchos de 1" x 12"),



- explosivo tipo emulsão explosiva (6 cartuchos de 1" x 12") e
- cronômetros digitais (CRM 1038 fabricados pela Fábrica de Material de Comunicações e Eletrônica da IMBEL) para registrar as velocidades de detonação (6 unidades).

Para a realização dos testes, decidiu-se preparar tubos de ferro, com aproximadamente 30 cm de comprimento, com uma das extremidades fechada e com furos para a colocação de sensores.

O diâmetro dos furos é o mesmo diâmetro dos sensores e a distância entre furos é de 1 cm.

Durante a preparação dos primeiros tubos de ferro, observou-se a dificuldade em se fazer a furação com precisão. Para superar este problema, substituiu-se o tubo de ferro por tubo de PVC pois, no tubo de PVC, a furação é mais precisa (figura 4.2).

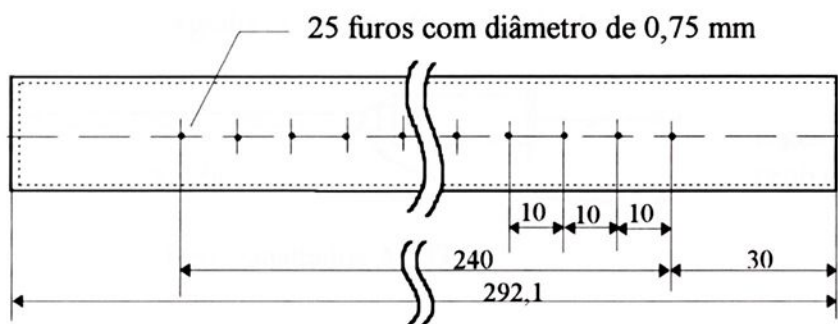


FIGURA 4.2 - Esboço do cano de PVC com cotas em mm

Para aumentar o confinamento da carga explosiva, preparou-se um cano de ferro, também fechado em uma das extremidades, dentro do qual é colocado o cano de PVC.

Uma janela foi aberta, ao longo do cano de ferro, para permitir a passagem dos sensores (figura 4.3).

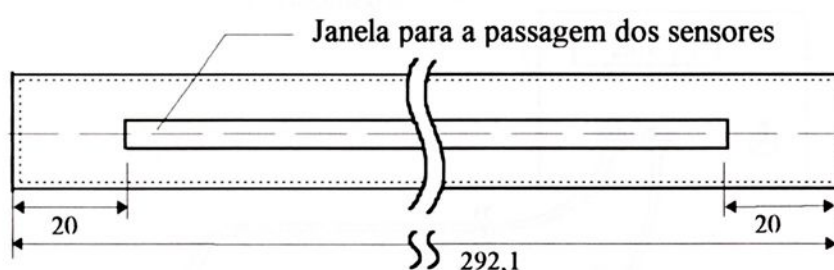


FIGURA 4.3 - Esboço do cano de ferro com cotas em mm

Os sensores foram preparados com agulhas de injeção e fios de cobre esmaltados conforme a figura 4.4.

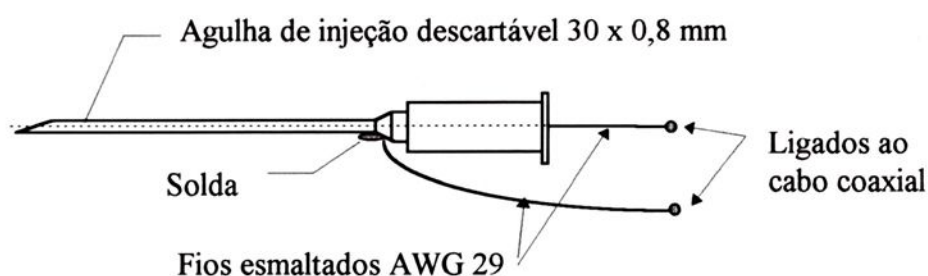


FIGURA 4.4 - Esboço do sensor*

* Esses sensores são utilizados na FPV

Antes da passagem da onda de detonação, os sensores mantêm o circuito elétrico aberto. Durante a passagem da onda de detonação, os sensores se fundem e fecham o circuito acionando e interrompendo o funcionamento do cronômetro (figura 4.5).

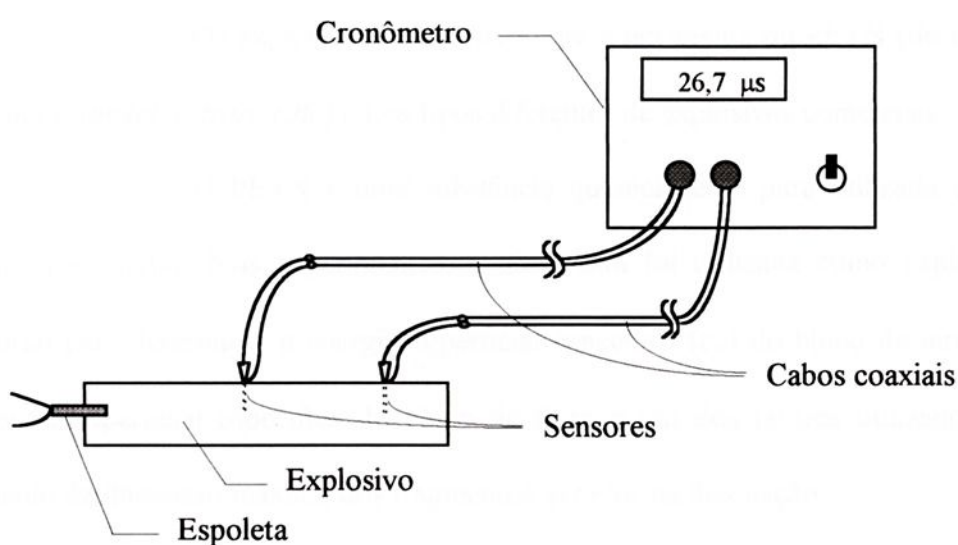


FIGURA 4.5 - Esboço da ligação do sensor ao cronômetro.

5 - TÉCNICAS EMPREGADAS

5.1 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS EXPLOSIVOS

5.1.1 - PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

A primeira etapa no desenvolvimento dos trabalhos, para realizar os testes de avaliação de desempenho de explosivos, foi o planejamento dos experimentos.

Os explosivos utilizados foram a nitropenta ou PETN (do inglês *Pentaerythritol Tetranitrate*) e três tipos diferentes de explosivos comerciais.

O PETN é uma substância quimicamente pura utilizada como explosivo militar. Nos experimentos, a nitropenta foi utilizada como explosivo padrão para determinar a energia superficial específica (ϵ_{ss}) do bloco de ferro. A energia superficial específica do bloco de ferro é um dos fatores utilizados no cálculo da dimensão máxima dos fragmentos gerados na detonação.

Os explosivos comerciais utilizados foram explosivos do tipo nitroglicerina, lamas e emulsões explosivas.

O material empregado na confecção dos corpos de prova foi o ferro fundido cinzento FC 200 da Tupy (figura 5.1). Os blocos foram preparados com as seguintes especificações, como mostrado na figura 5.2:

- diâmetro do bloco: 164 mm,
- altura do bloco: 160 mm,
- diâmetro do furo no bloco: 27 mm,
- altura do furo no bloco: 110 mm e



- massa do bloco: 24 kg.



FIGURA 5.1 - Bloco de ferro

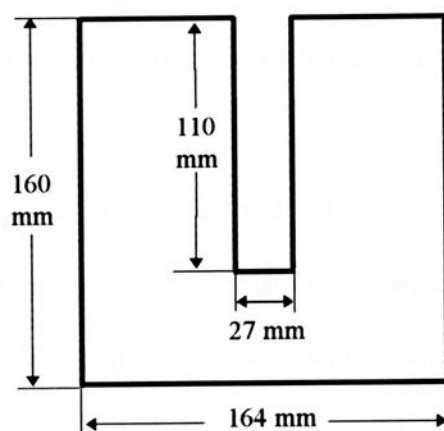


FIGURA 5.2 - Esboço das dimensões dos blocos

O número de detonações realizadas com cada tipo de explosivo foi fixado em trinta.

O Teorema do Limite Central ¹⁹ afirma que, na medida em que aumenta o tamanho n da amostra, a distribuição média $\bar{X}$ de uma amostra aleatória, extraída praticamente de qualquer população, tende para uma distribuição normal com média μ e desvio padrão $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$.

Se a população original é próxima da normal, sua convergência é rápida; já se a distribuição da população tem a forma de um V, essa convergência é mais demorada. ²⁰

Na maioria dos casos, em que o tamanho n da amostra é de cerca de 10 ou 20, a distribuição de $\bar{X}$ já é praticamente normal. ¹⁹

Como regra prática, aceita-se que, para amostras com mais de 30 elementos, a aproximação da distribuição de $\bar{X}$ a uma distribuição normal já pode ser considerada muito boa. ²⁰

As detonações foram realizadas em duas fases.

Em uma primeira fase, realizou-se a detonação de trinta cargas de PETN.

O delineamento dado às detonações com PETN foi o de experimentos inteiramente ao acaso, ^{21, 22} isto é, as cargas explosivas foram pesadas e detonadas em blocos escolhidos ao acaso em um grupo de 180 blocos.

Em uma segunda fase realizou-se a detonação de noventa cargas explosivas sendo trinta cargas para cada tipo de explosivo comercial.

Para as detonações com os explosivos comerciais, utilizou-se o delineamento de experimentos em blocos ao acaso.^{21,22} Nesse tipo de delineamento, as detonações são separadas em blocos (dias), nos quais as detonações são realizadas.

Os blocos são organizados contendo os três tipos de explosivos e o mesmo número de repetições para cada tipo. Dentro de cada bloco, a ordem das detonação é determinada inteiramente ao acaso.

Após a preparação dos blocos de ferro e o delineamento dos experimentos, o trabalho foi desenvolvido em etapas. Cada etapa compreendia três dias, nos quais os trabalhos eram divididos da seguinte forma:

- um dia destinado à preparação do material para as detonações,
- um dia destinado à realização das detonações e o recolhimento dos fragmentos e
- um dia destinado à pesagem dos fragmentos.

No dia destinado à preparação do material, as seguintes tarefas eram executadas:

- 1- Retirada das espoletas e dos explosivos no paiol.
- 2- Realização do controle metrológico dos blocos.

Cada bloco destinado à detonação tinha suas dimensões e seu peso conferidos e eram aprovados os blocos que apresentavam variação menor que 1% (240 g) em sua massa prevista (24 kg).



Os blocos aprovados eram numerados e estavam em condições de serem utilizados nas detonações.

3- Confeção dos cartuchos com papel de estanho.

As folhas de papel de estanho, recortadas em retângulos de 15 por 13 cm, eram enroladas no cilindro de madeira (26 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento) e uma de suas extremidades era fechada formando cartuchos com 100 mm de comprimento (figura 5.3). Os cartuchos prontos eram numerados na ordem em que seriam detonados.



FIGURA 5.3 - Papel de estanho, cilindro de madeira e o cartucho pronto

4- Pesagem e colocação das cargas explosivas nos cartuchos de papel de estanho.

As cargas explosivas eram pesadas em balanças analíticas

(precisão de 10^{-4} g) e colocadas nos cartuchos de papel de estanho.

As cargas de nitropenta foram preparadas com trinta gramas de explosivos e as cargas dos explosivos comerciais com trinta e cinco gramas de explosivos.

5- Colocação das cargas explosivos em dessecadores.

As cargas explosivas eram colocadas em dessecadores para que não adquirissem umidade durante o período de espera para serem detonadas.

6- Recolhimento da sobra dos explosivos no paiol.

7- transporte dos blocos de ferro, cunhetes, termômetro e higrômetro para o local das detonações.

No local das detonações, os blocos eram fechados dentro da casamata (figura 5.4).

A colocação dos blocos na casamata, no dia anterior a sua utilização nas detonações, teve por objetivo manter os blocos a uma temperatura constante pois, verificou-se que a variação da temperatura ambiente, dentro da casamata, durante uma jornada de trabalho, raramente ultrapassava 2°C . Dos treze dias utilizados para realizar as detonações apenas em dois dias a variação foi acima de 2°C .

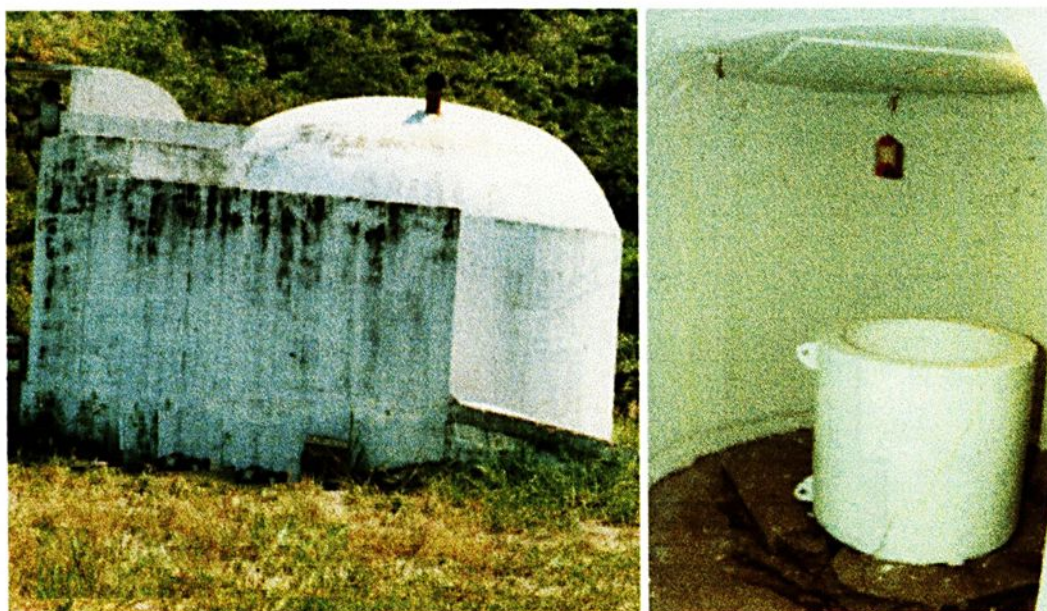
No dia destinado à realização das detonações, as seguintes etapas eram executadas:

8- Transporte para a região das detonações do seguinte material:

- cargas explosivas e espoletas,
- explosor e bobina com fio,



- gerador e exaustor,
- tinta, solvente, pincel e material para limpeza,
- prancheta, planilhas, caneta, fita adesiva, etc...



a) Exterior

b) Interior

FIGURA 5.4 - Casamata

9- Montagem e teste do circuito elétrico.

10- Registro das condições do ambiente no interior da casamata.

Antes da realização de cada detonação (para todas as detonações), a temperatura e a umidade relativa do ar eram medidas e registradas em uma planilha de controle.

11- Colocação do bloco de ferro no centro do cilindro de aço.

No interior da casamata, os blocos eram colocados dentro de um cilindro de aço com 75 cm de diâmetro e 83 cm de altura (figura 5.4.b).

12- Colocação da espoleta na carga explosiva.

O espoletamento da carga foi realizado com o cuidado de se colocar as espoletas sempre na mesma posição em relação ao explosivo, como sugerido na figura 5.5.

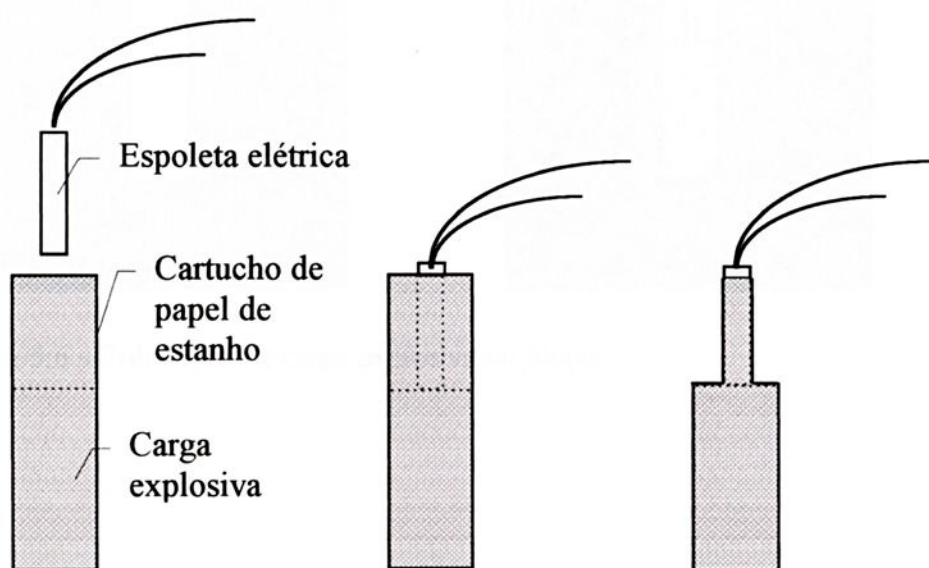


FIGURA 5.5 - Espoletamento da carga explosiva

13- Colocação da carga explosiva no bloco (figura 5.6).

14- Tamponamento da carga com areia (figura 5.7 e figura 5.8).

15- Ligação da espoleta elétrica ao circuito elétrico .

16- Conexão do explosor ao circuito elétrico (figura 5.9).

Neste ponto, a carga estava pronta para ser detonada (figura 5.10).

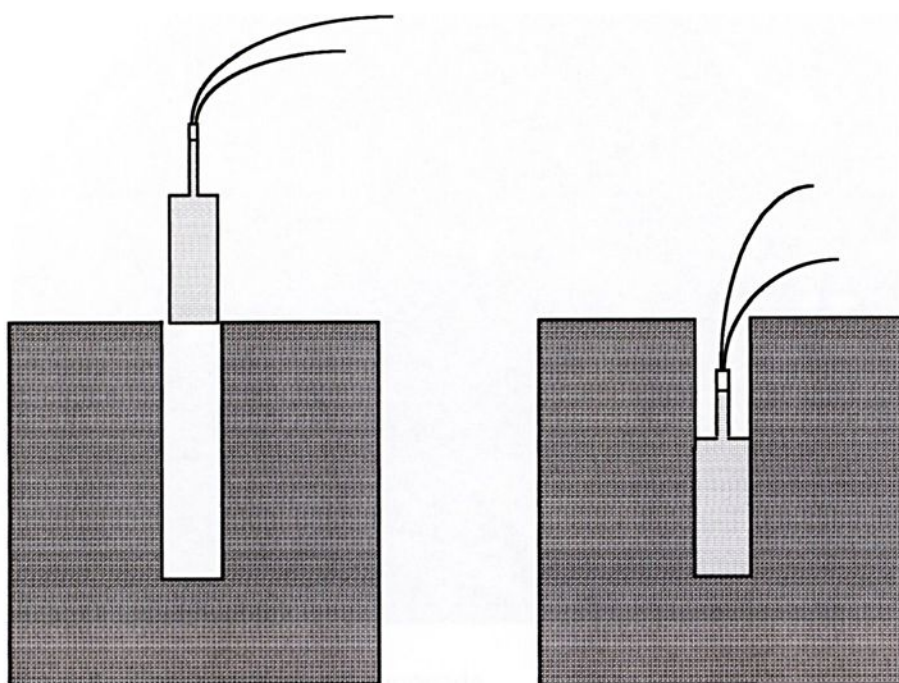


FIGURA 5.6 - Colocação da carga explosiva no bloco

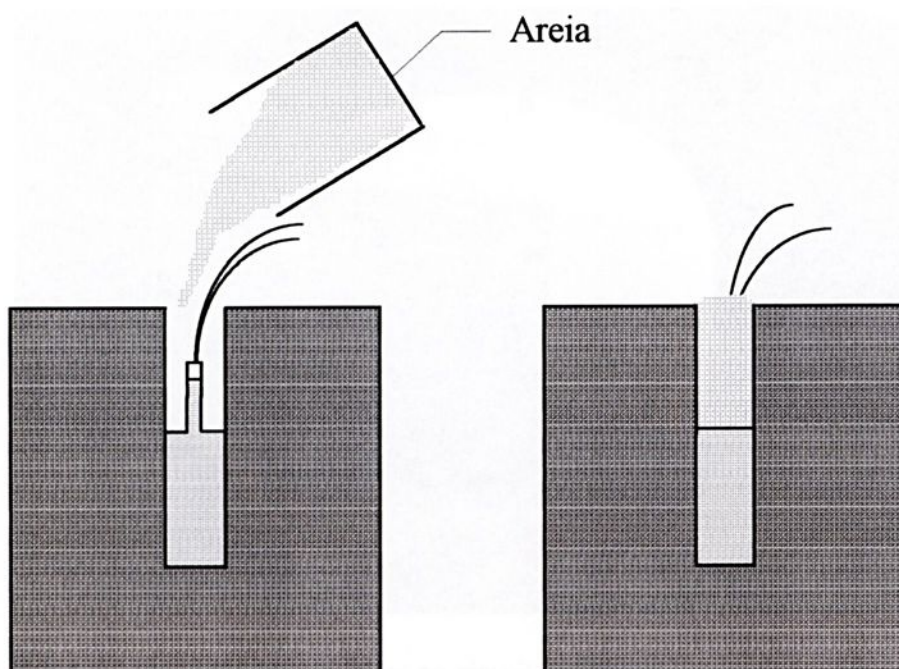


FIGURA 5.7 - Tamponamento da carga explosiva

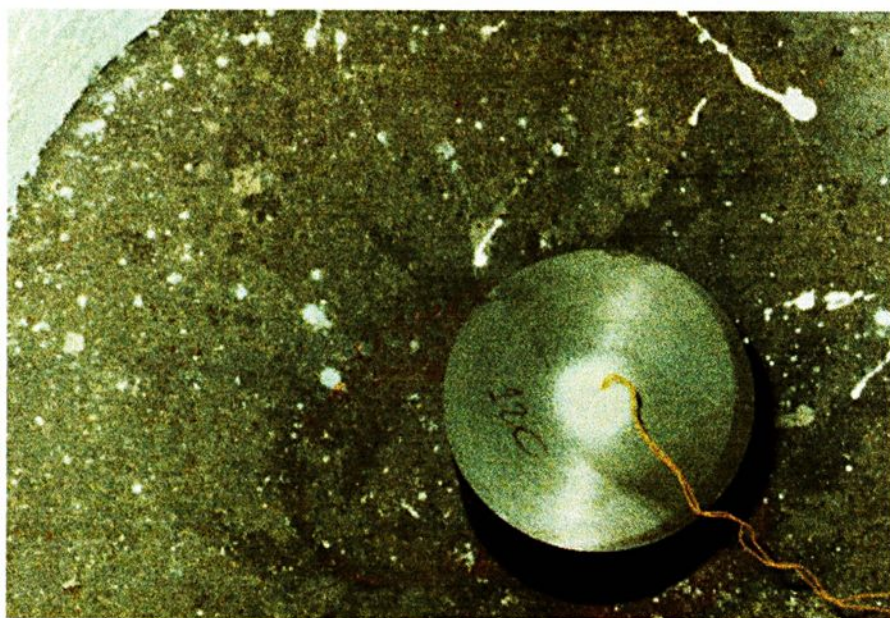


FIGURA 5.8 - Carga explosiva tamponada

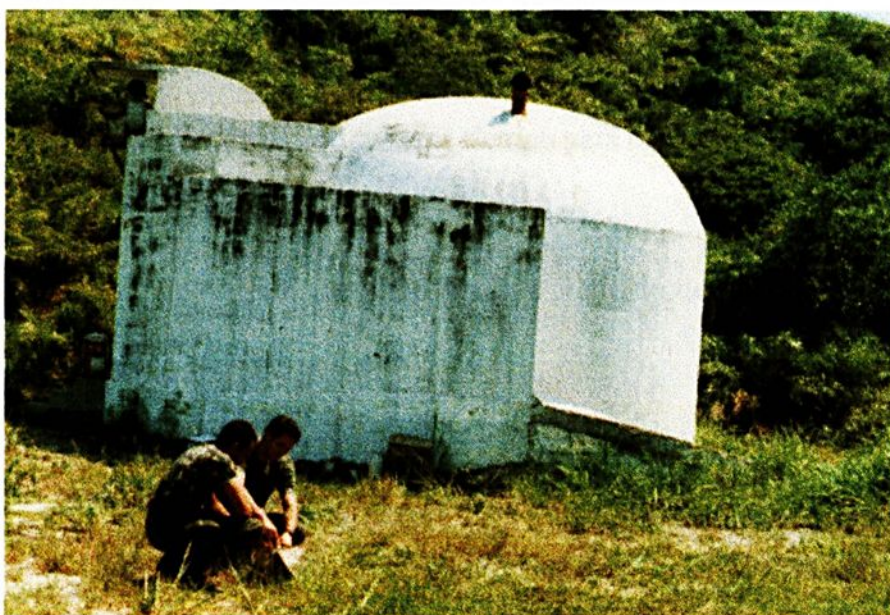


FIGURA 5.9 - Conexão do explosor ao circuito elétrico

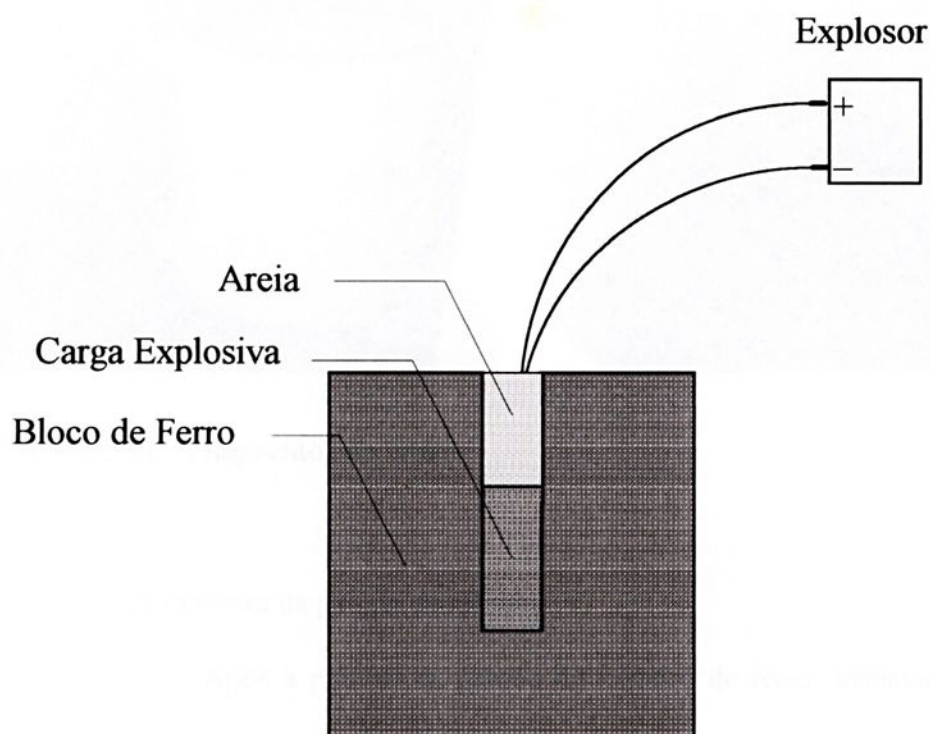


FIGURA 5.10 - Esquema de um bloco pronto para ser detonado

17- Acionamento da espoleta.

18- Acionamento do gerador elétrico para ligar o exaustor.

19- Colocação do exaustor na casamata.

O exaustor era então ligado e colocado dentro da casamata para a retirada dos gases da detonação.

20- Recolhimento dos fragmentos.

Os fragmentos (figura 5.11) eram recolhidos e colocados nos cunhetes para serem transportados até o laboratório de metrologia.

21- Registro dos impactos na parede interna do cilindro de aço.

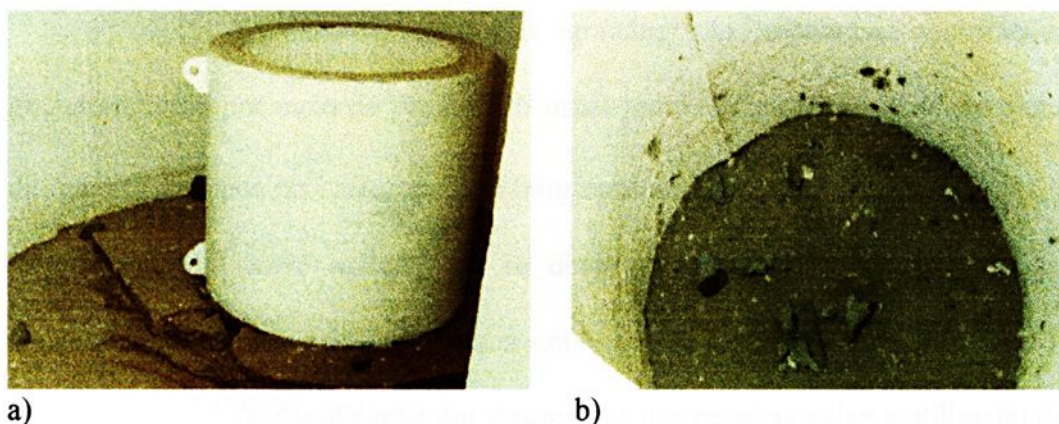


FIGURA 5.11 - Fragmentos do bloco

22- Pintura da parede do cilindro.

Após a pintura da parede do cilindro de ferro, iniciava-se uma nova detonação.

Ao término das detonações, os fragmentos eram recolhidos ao laboratório de metrologia.

No dia destinado à pesagem, os fragmentos, separados por blocos, eram pesados em uma balança de precisão e seus valores registrados em planilhas.

5.1.2 - AVALIAÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO

Para a avaliação da fragmentação do material, é necessário que se determine a distribuição granulométrica dos blocos fragmentados, pois a capacidade de fragmentação do explosivo é baseada em dois parâmetros: a dimensão do maior fragmento (X_{max}) e a dimensão abaixo da qual situa-se 50% da massa total dos fragmentos (X_{50}).

Geralmente, partículas grandes são separadas em frações granulométricas por meio de peneiras. É usual providenciar para que as aberturas das malhas das peneiras variem por um fator constante de 2, $\sqrt{2}$ ou $\sqrt[4]{2}$ ^{23, 24}.

Outro método, de se obter as distribuições granulométricas, consiste em medir as partículas e efetuar um levantamento estatístico²⁴.

A classificação dos fragmentos por peneiras exige a utilização de um peneirador vibratório industrial devido ao tamanho dos fragmentos (fragmentos de até 11 kg).

A classificação dos fragmentos, pela medida direta de suas dimensões, é muito trabalhosa devido a grande quantidade de fragmentos que podem ser gerados na detonação de um bloco de ferro (215 ou mais).

Para tornar a classificação granulométrica mais prática, optou-se pela classificação dos fragmentos segundo uma dimensão característica estimada a partir da massa do fragmento.

A dimensão característica escolhida foi a mesma utilizada no trabalho de Rao et al⁵ : a aresta do cubo de massa equivalente a massa do fragmento.

Os fragmentos foram distribuídos em classes com intervalos de 1,2 ($\cong \sqrt[4]{2}$) cm.

A escolha do intervalo de 1,2 cm foi feita para que o número de classes ficasse situado entre 5 e 15, quantidade de classes sugerida para que não se perca informações e se atinja o objetivo de resumir os dados²⁰.



Com os fragmentos classificados, obtêm-se as curvas de distribuição de frequência, de massa acumulada por dimensão de fragmentos, para cada bloco detonado. A partir das curvas de cada experimento obtêm-se a curva média (característica) para cada explosivo.

A primeira etapa na obtenção das curvas médias foi a depuração dos resultados experimentais. Para a depuração dos dados experimentais, aplicou-se a Teoria do Erro ^{25, 26, 27} aos valores da diferença entre a massa do bloco e a massa total dos fragmentos para cada experimento, sendo eliminados os resultados dos experimentos que apresentaram desvios maiores do que três vezes o desvio padrão calculado para as trinta repetições.

Após a depuração dos dados, as curvas médias foram determinadas com intervalos de confiança de 95%. ¹⁹

5.2 - ESTUDO DO VÔO DE FRAGMENTOS

O estudo do vôo dos fragmentos será realizado a partir dos impactos registrados nas paredes do cilindro de ferro (figura 5.11 b) e da velocidade inicial dos fragmentos.

5.3 - DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADE DOS EXPLOSIVOS

Os testes para a determinação do perfil de velocidade dos explosivos foram realizados com seis detonações para cada tipo de explosivo comercial.



Cada detonação obedeceu à seguinte sequência de trabalhos:

- 1- Colocação do cartucho de explosivo no interior do tubo de PVC.
- 2- Colocação do tubo de PVC no interior do tubo de ferro.

A colocação do tubo de PVC, no interior do tubo de ferro, deve ser feita observando-se que os furos do tubo de PVC fiquem na janela do cano de ferro para permitir a passagem dos sensores.

- 3- Colocação dos sensores nos furos feitos no cano de PVC.

Foram colocados seis pares de sensores, sendo um par para cada cronômetro. A distância entre os sensores, de um mesmo par, é de 3 cm, como sugerido nas figuras 5.12 e 5.13.

- 4- Ligação dos sensores aos cronômetros.
- 5- Colocação da espoleta na carga explosiva.

A extremidade da espoleta era colocada junto ao primeiro sensor do primeiro cronômetro (figura 5.12).

- 6- Acerto dos cronômetros.

Todos os cronômetros eram “zerados”.

- 7- Detonação da carga explosiva.
- 8- Anotação dos tempos registrados nos cronômetros (figura 5.14).



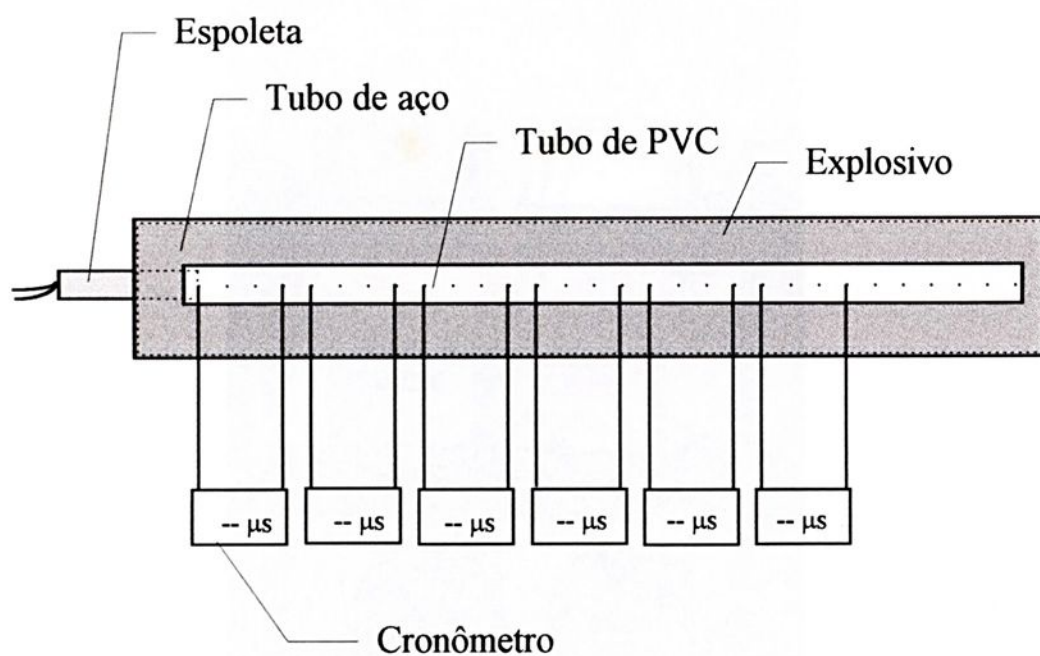


FIGURA 5.12 - Esquema da preparação da carga explosiva



FIGURA 5.13 - Carga explosiva espoletada e pronta para ser detonada



FIGURA 5.14 - Cronômetros digitais CRM 1038 fabricados pela Fábrica de Material de Comunicações e Eletrônica da IMBEL

5.4 - VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CARTUCHO NO DESEMPENHO DOS EXPLOSIVOS

Das cargas de explosivo nitroglicerinado a serem detonadas, vinte e quatro serão preparadas sem o cartucho de papel parafinado e seis com o cartucho de papel parafinado.

Das cargas de emulsão explosiva, vinte e quatro cargas serão preparadas com o cartucho de polietileno e seis sem o cartucho de polietileno.

6 - MODELAGEM ESTATÍSTICA

6.1 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS EXPLOSIVOS

O poder de fragmentação do explosivo será avaliado pelos valores de X_{max} e X_{50} .

O valor de X_{max} é calculado a partir da expressão proposta por Berta ⁶:

$$\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \varepsilon \cdot Q = V_r \cdot s \cdot \varepsilon_{ss} \quad 6.1$$

onde: η_1 = fator de impedância.

η_2 = fator de acoplamento.

η_3 = fator de fragmentação.

ε = energia liberada por unidade de massa do explosivo (calor de detonação) expressa em kJ/kg.

Q = massa de explosivo utilizada na detonação (kg).

V_r = volume de material desmontado (m³).

s = superfície específica dos fragmentos (m²/m³).

ε_{ss} = energia superficial específica do material desmontado (kJ/m²).

A expressão acima mostra que para se fragmentar um volume V_r de um material com energia superficial específica ε_{ss} em fragmentos definidos pela superfície específica s é necessária uma quantidade de energia " εQ " gerada pela

carga explosiva. Os termos: η_1 , η_2 e η_3 são fatores de aproveitamento da energia total gerada.

O fator de impedância (η_1) avalia a influência das propriedades do material a ser desmontado e do explosivo a ser utilizado, na capacidade de transmissão da energia do explosivo para o material. O fator de impedância é calculado pela expressão:

$$\eta_1 = 1 - \frac{(I_e - I_r)^2}{(I_e + I_r)^2} \quad 6.2$$

onde: $I_e = V_d \cdot \rho_e$ (impedância do explosivo) ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

V_d = velocidade de detonação do explosivo (m/s)

ρ_e = massa específica do explosivo (kg/m^3)

$I_r = C \cdot \rho_r$ (impedância do material) ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

C = velocidade de propagação do som no ferro (m/s)

ρ_r = massa específica do ferro (kg/m^3)

O fator de acoplamento (η_2) também avalia a transferência de energia do explosivo para a rocha através da razão entre o diâmetro do furo onde a carga explosiva é carregada (ϕ_f) e o diâmetro da carga explosiva (ϕ_c). O fator de acoplamento é calculado pela expressão:

$$\eta_2 = \frac{1}{e^{\frac{\phi_f}{\phi_c}} - (e - 1)} \quad 6.3$$

onde: $e = 2,718$

ϕ_f = diâmetro do furo do bloco

ϕ_c = diâmetro da carga explosiva

A superfície específica dos fragmentos (s) é a razão entre a superfície total dos fragmentos e o volume do material desmontado. A superfície específica dos fragmentos é calculada pela expressão:

$$s = \frac{6}{100 \cdot X_{max}} \cdot \sum_i \frac{F_i}{\alpha_{m,i}} \quad 6.4$$

onde: X_{max} = dimensão característica do maior fragmento obtido no desmonte.

F_i = faixa de frequência, da função de distribuição de frequência de massa acumulada por dimensão característica dos fragmentos.

$\alpha_{m,i}$ = $X_{m,i} / X_{max}$, sendo que $X_{m,i}$ é a dimensão característica média dos fragmentos situados na faixa de frequência i

Para o bloco de ferro, conforme mostrado no apêndice A, a expressão de s função de X_{max} será:

$$s = \frac{13}{X_{max}} \quad 6.5$$

O fator de fragmentação (η_3) é a porcentagem da energia



transferida para o material que é utilizada na fragmentação. O fator de fragmentação é calculado pela expressão:

$$\eta_3 = \frac{\text{energia utilizada no fraturamento } (\varepsilon_b)}{\text{energia transferida para o material } (\varepsilon^*)} \quad 6.6$$

onde: $\varepsilon_b = V_r \cdot S \cdot \varepsilon_{ss}$

$$\varepsilon^* = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \varepsilon \cdot Q$$

Rearranjando a equação 6.1, tem-se a expressão de X_{max} para o bloco de ferro:

$$X_{max} = \frac{13 \cdot V_r \cdot \varepsilon_{ss}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \varepsilon \cdot Q} \quad 6.7$$

O valor de X_{50} será obtido na curva de distribuição de frequência de massa acumulada.

Existem vários modelo de distribuição de frequência de massa acumulada por dimensão de fragmentos, que podem ser aplicados a materiais fragmentados.

Os modelos utilizados nesse trabalho foram:

A) Modelo Rosin-Rammler-Bennett^{28, 29, 30} expresso por:

$$Y = 1 - e^{-\left(\frac{X}{X'}\right)^m} \quad 6.8$$

onde: Y = é a fração em massa das partículas com dimensão menor do que X .

$X' = X_{63,2}$ (dimensão característica abaixo da qual situa-se 63,2% da massa total dos fragmentos).

m = coeficiente angular da reta obtida por $\ln(X)$ versus

$$\ln \left[\ln \frac{1}{1-Y} \right]$$

B) Modelo Gates-Gaudin-Schumann^{28, 29, 30} expresso por:

$$Y = \left(\frac{X}{K} \right)^m \quad 6.9$$

onde: $K = X_{100}$ ou X_{max}

m = coeficiente angular da reta obtida por $\ln(X)$ versus $\ln(Y)$.

C) Modelo Log-Normal^{28, 29, 30} expresso por:

$$Y = \frac{1 + \operatorname{erf}(z)}{2} \quad 6.10$$

onde: $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2} dy$

$$z = \frac{\ln \left(\frac{X}{X_{50}} \right)}{\sqrt{2} \cdot \ln \sigma}$$

$$\sigma = \frac{X_{84,1}}{X_{50}} = \frac{X_{50}}{X_{15,9}}$$

D) Modelo Logístico³¹ expresso por:

$$Y = \frac{e^{m' + mX}}{1 + e^{m' + mX}} \quad 6.11$$

onde: m' = coeficiente linear da reta obtida por X versus $\ln \frac{Y}{1-Y}$

m = coeficiente angular da reta obtida por X versus $\ln \frac{Y}{1-Y}$

6.2 - VÔO DE FRAGMENTOS

Durante o lançamento do material, é desejável observar-se o aspecto do voo dos fragmentos. O interesse pelo voo dos fragmentos é devido à segurança exigida nos desmontes, particularmente, em áreas habitadas.

Um modelo simplificado é utilizado para que se tenha as equações do movimento dos fragmentos (figura 6.1).

Para a obtenção das equações do movimento dos fragmentos, serão consideradas as forças aerodinâmicas (sustentação e arrasto) e a força gravitacional.

O arrasto (D) é a força aerodinâmica na direção oposta a direção de voo do fragmento e a sustentação (L) é a força aerodinâmica que atua na direção normal à direção de voo do fragmento.

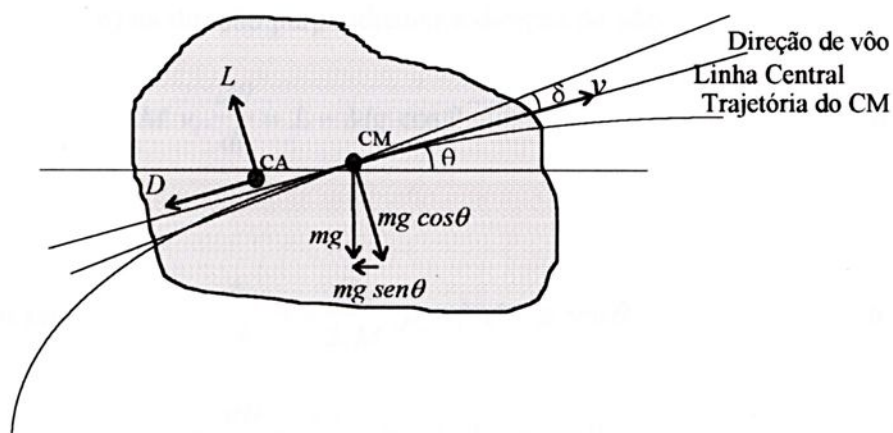


FIGURA 6.1 - Forças atuantes durante o voo do fragmento

Tanto o arrasto quanto a sustentação são expressos em função da velocidade de voo do fragmento (v_i), da massa específica do ar (ρ_a), da geometria da superfície (A) e do ângulo de ataque do fragmento (δ).

$$D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot v_i^2 \quad 6.12$$

$$L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot v_i^2 \quad 6.13$$

onde C_D e C_L são os coeficientes de arrasto e sustentação.

Os coeficientes de arrasto e sustentação são obtidos em gráficos a partir da velocidade de voo, do ângulo de ataque e da geometria da superfície do fragmento.

As equações do movimento dos fragmentos são:^{32, 33}

$$\text{a) na direção de voo: } M \cdot \frac{dv_i}{dt} = -D - Mg \cdot \sin \theta \quad 6.14$$

b) na direção perpendicular a direção de vôo:

$$M \cdot v_i \cdot \frac{d\theta}{dt} = L - Mg \cdot \cos \theta \quad 6.15$$

ou seja:
$$\frac{dv_i}{dt} = -\frac{C_D}{2 \cdot M} \cdot \rho_a \cdot v_i^2 \cdot A - g \cdot \sin \theta \quad 6.16$$

$$v_i \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{C_L}{2 \cdot M} \cdot \rho_a \cdot v_i^2 \cdot A - g \cdot \cos \theta \quad 6.17$$

Com a solução do sistema de equações diferenciais, tem-se a variação da velocidade do fragmento e do valor de θ ao longo do tempo, isto é, ao longo da trajetória.

Para se ter a distância percorrida pelo fragmento, basta integrar $v_i(t)$.

Os valores de θ_0 serão obtidos a partir da altura (h) dos impactos registrados nas paredes do cilindro de ferro de acordo com a figura 6.2.

A expressão para se estimar a velocidade inicial dos fragmentos (v_0) é obtida a partir da expressão da energia cinética local para cargas explosivas confinadas em cilindros metálicos³⁴:

$$E_c = \frac{M \cdot v_0^2}{2} + \frac{Q \cdot v_0^2}{4} \quad 6.18$$

onde: E_c = energia cinética (kJ)

M = massa do material (kg)

v_0 = velocidade inicial do fragmento (m/s)

Q = massa da carga explosiva (kg)

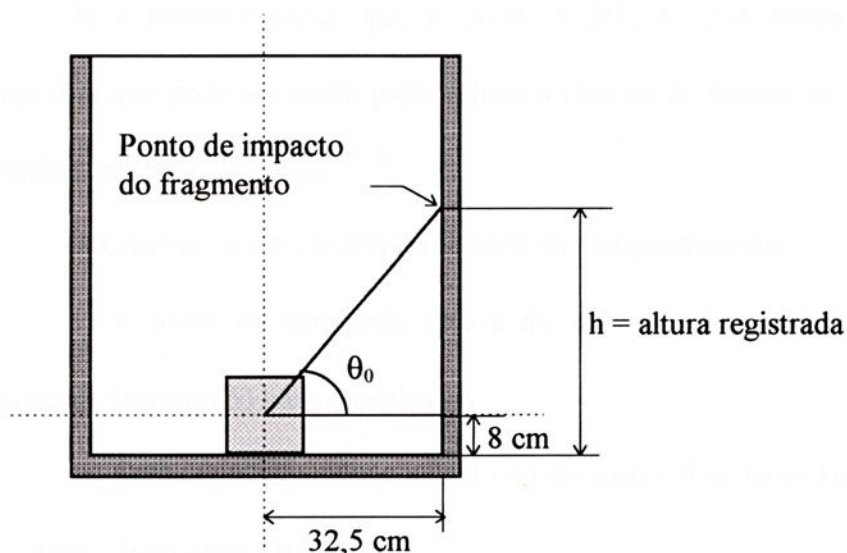


FIGURA 6.2 - Determinação de θ_0 a partir da altura (h) do impacto do fragmento

Sendo E a energia por unidade de massa que pode ser convertida em trabalho, pode-se dizer que, $E_c = E.Q$ quando toda a energia liberada pelo explosivo for convertida em trabalho e então a velocidade inicial dos fragmentos é dada pela expressão ³⁴:

$$v_0 = \sqrt{2.E} \cdot \sqrt{\frac{Q/M}{1 + Q/2.M}} \quad 6.19$$

onde: E = energia de Gurney (m^2/s^2)

A energia de Gurney é um dado experimental obtido para cada explosivo.

É importante notar que a razão $E/\Delta H_D$ é uma função da densidade, fato este que pode ser usado para estimar a Energia de Gurney na falta de valores obtidos experimentalmente.^{35, 36}

As etapas para o cálculo do alcance dos fragmentos são:

i) A partir da densidade (ρ_e) e do calor de detonação(ΔH_D) estimar a energia de Gurney (E) para o explosivo.

ii) Calcular a velocidade inicial (v_0) do maior fragmento (massa variável) e do menor fragmento (1g).

iii) A partir de valores de θ_0 calcular o valor do alcance (x) para o maior e o menor fragmento, resolvendo o sistema de equações diferenciais.



7 - RESULTADOS OBTIDOS

7.1 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS EXPLOSIVOS

As figuras 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4 apresentam fragmentações típicas para os quatro tipos de explosivos utilizados.

As distribuições médias, de frequência de massa acumulada por dimensão de fragmento para cada tipo de explosivo, são apresentadas nas figuras 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8.



FIGURA 7.1 - Bloco fragmentado pela detonação de uma carga com 30g de nitropenta

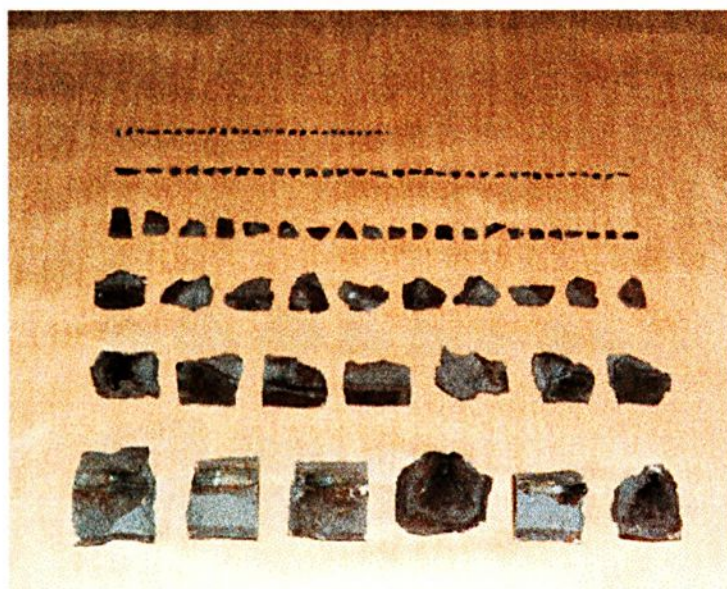


FIGURA 7.2 - Bloco fragmentado pela detonação de uma carga com 35g de explosivo nitroglicerinado

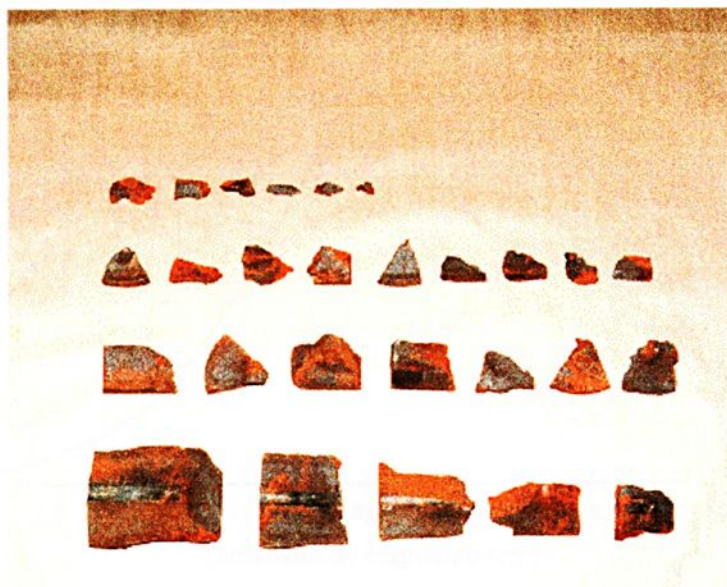


FIGURA 7.3 - Bloco fragmentado pela detonação de uma carga com 35g de lama explosiva



FIGURA 7.4 - Bloco fragmentado pela detonação de uma carga com 35g de emulsão explosiva

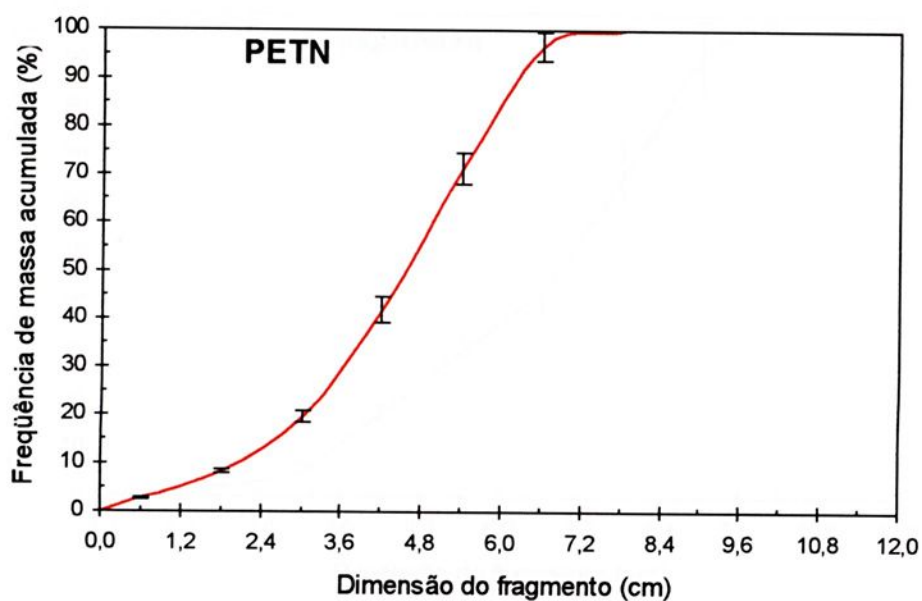


FIGURA 7.5 - Curva experimental para a nitropenta com intervalo de confiança de 95%

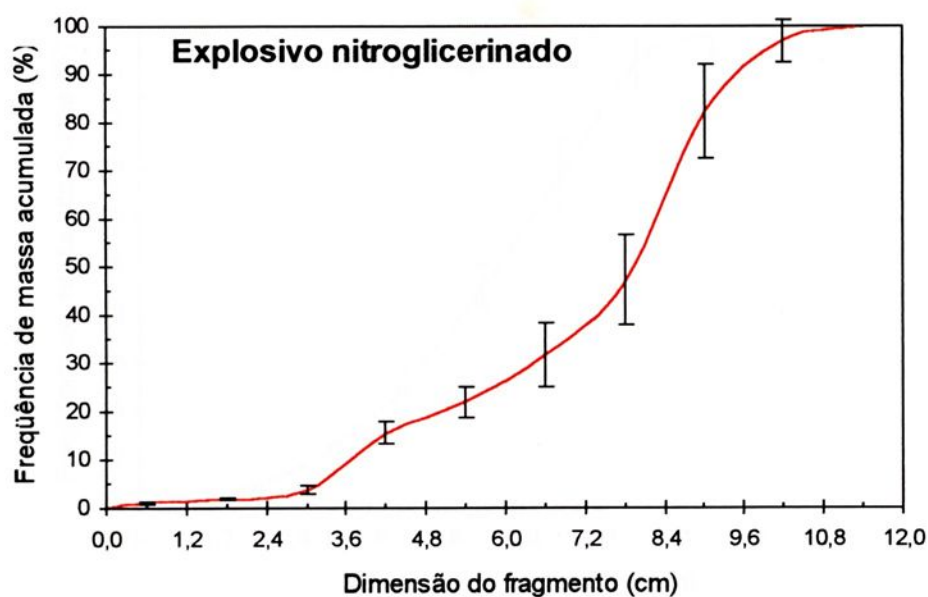


FIGURA 7.6 - Curva experimental para o explosivo nitroglicerinado com intervalo de confiança de 95%

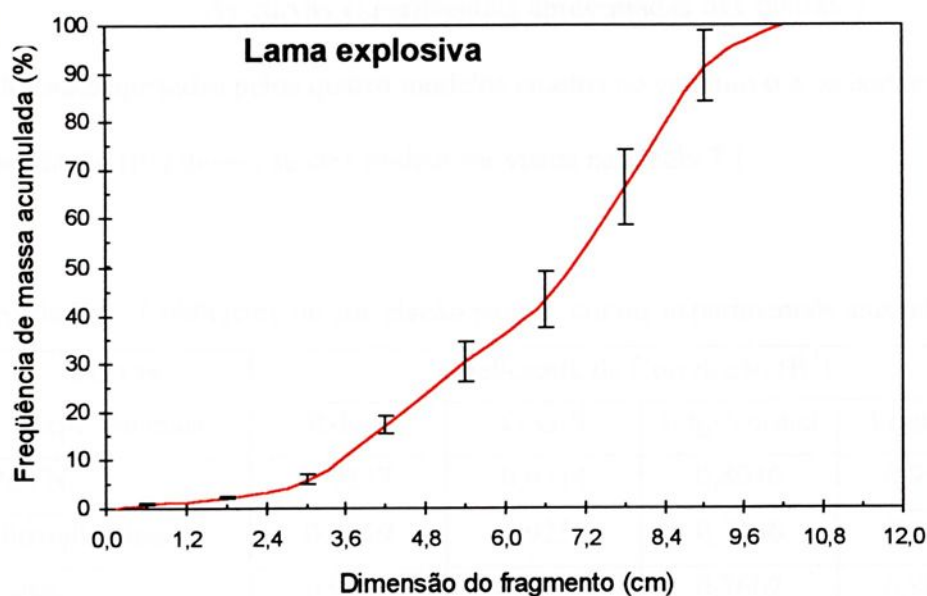


FIGURA 7.7 - Curva experimental para a lama explosiva com intervalo de confiança de 95%

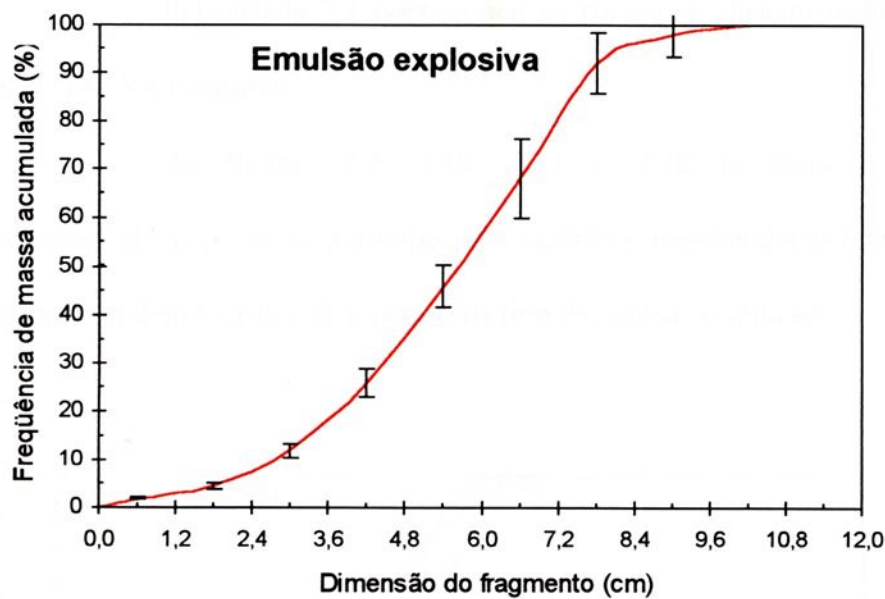


FIGURA 7.8 - Curva experimental para a emulsão explosiva com intervalo de confiança de 95%

As curvas experimentais apresentadas nas figuras 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8 foram ajustadas pelos quatro modelos citados no capítulo 6 e os coeficientes de correlação (R^2) desses ajustes podem ser vistos na tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Coeficiente de correlação para as curvas experimentais ajustadas

Curvas Experimentais	Coeficiente de Correlação (R^2)			
	R-R-B	G-G-S	Log-Normal	Logística
PETN	0,9217	0,9714	0,8036	0,9703
Nitroglicerinado	0,8719	0,9254	0,7246	0,9318
Lama	0,9064	0,9524	0,7602	0,9634
Emulsão	0,9288	0,9704	0,7825	0,9886

R-R-B = Rosin-Rammler-Bennett

G-G-S = Gates-Gaudin-Schumann

Pela tabela 7.1 nota-se que as curvas se ajustam melhor pelos modelos G-G-S e Logístico.

As figuras 7.9, 7.10, 7.11 e 7.12 mostram as curvas experimentais (E) e as curvas ajustadas pelo modelo Gates-Gaudin-Schumann (G-G-S) e pelo modelo logístico (L), para cada tipo de explosivo utilizado.

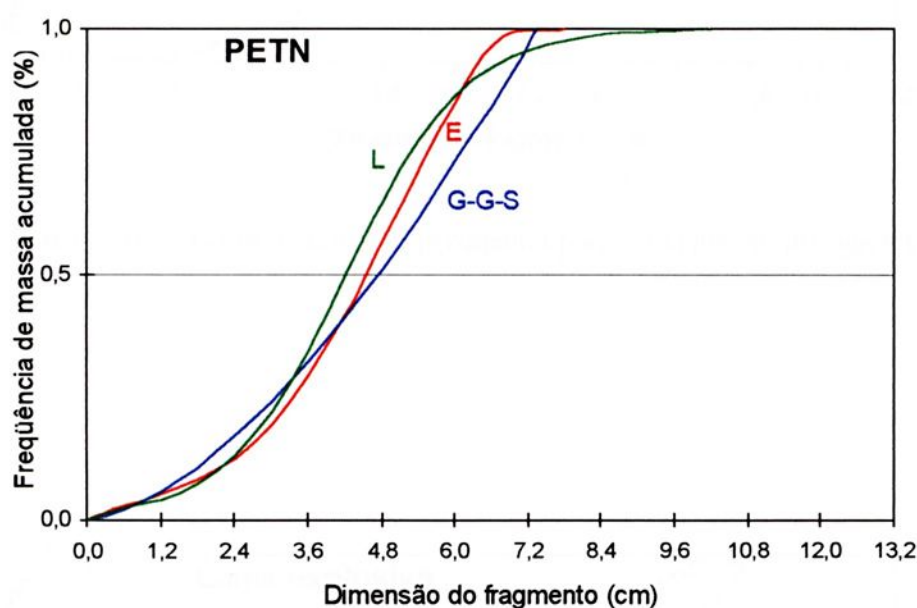


FIGURA 7.9 - Ajuste da curva experimental para a nitropenta

O modelo G-G-S foi o escolhido para o ajuste das curvas experimentais por ser o que melhor ajustou a distribuição de frequência acumulada na faixa de zero até X_{50} .

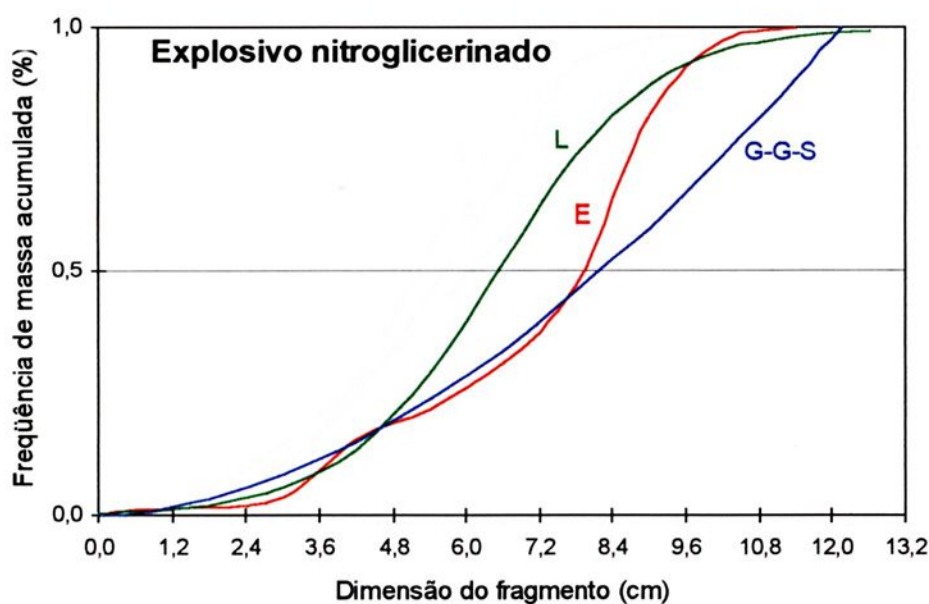


FIGURA 7.10 - Ajuste da curva experimental para o explosivo nitroglicerinado

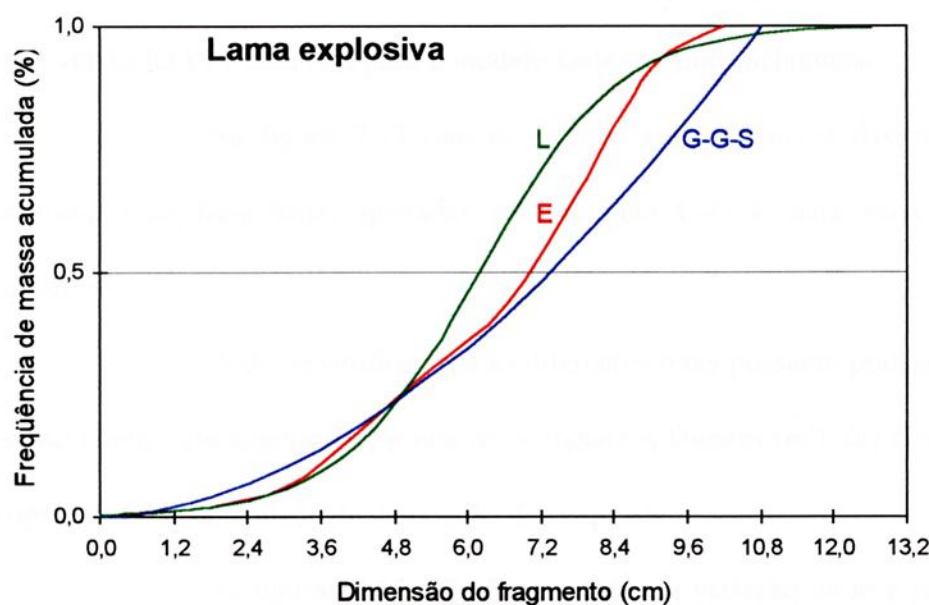


FIGURA 7.11 - Ajuste da curva experimental para a lama explosiva

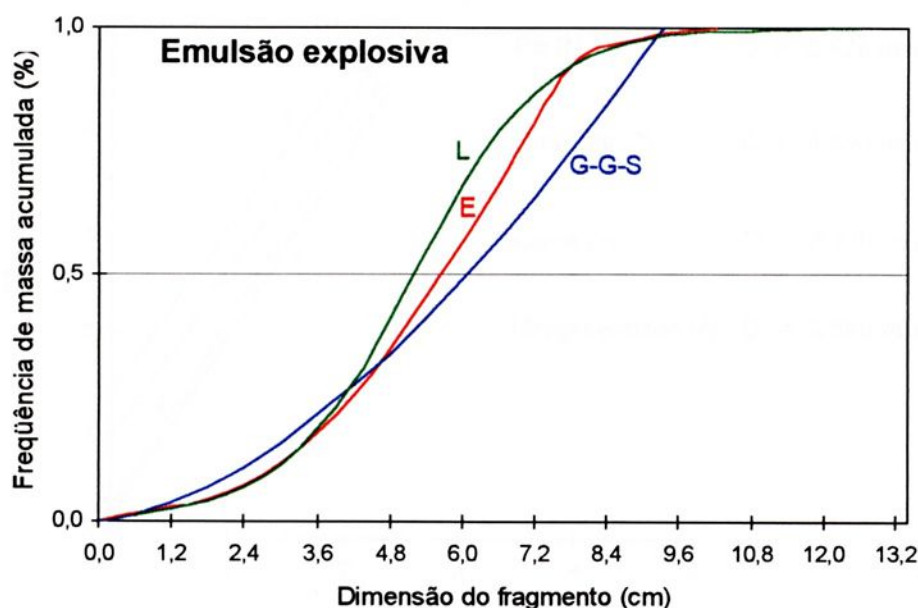


FIGURA 7.12 - Ajuste da curva experimental para a emulsão explosiva

Como se vê por sua própria definição a representação gráfica de $\ln(X)$ versus $\ln(Y)$ é uma reta para o modelo Gates-Gaudin-Schumann.

Na figura 7.13 tem-se as retas representativas das curvas de distribuição de frequência, ajustadas pelo modelo G-G-S, para cada tipo de explosivo.

Pode-se verificar que as diferentes retas possuem praticamente o mesmo coeficiente angular (m) e que os coeficientes lineares (m') são diretamente proporcionais à velocidade de detonação dos explosivos.

As figuras 7.14 e 7.15 apresentam a variação de m e m' função da velocidade de detonação do explosivo para cargas com 35g.

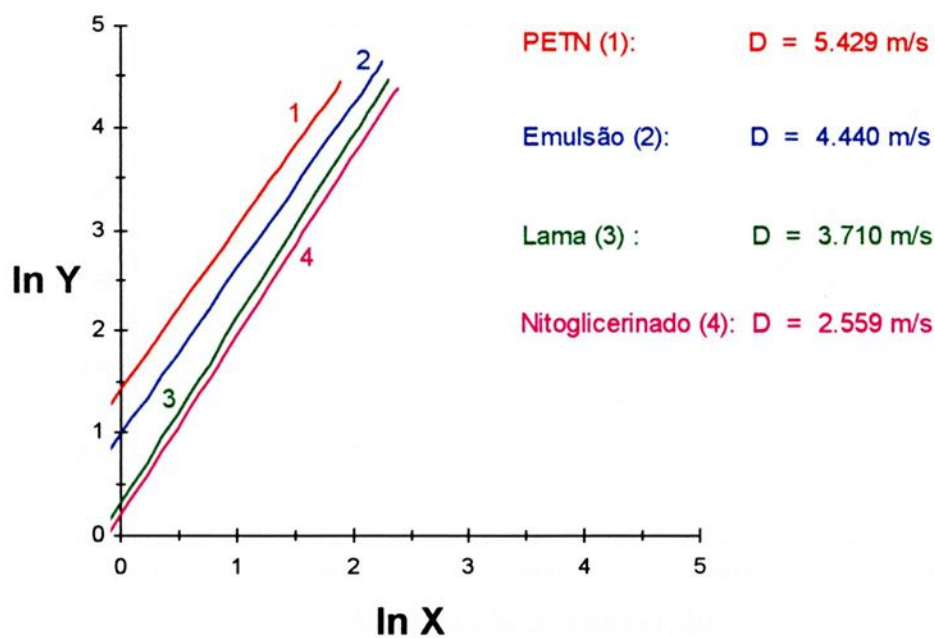


FIGURA 7.13 - Retas representativas das curvas de distribuição de frequência ajustadas pelo modelo G-G-S

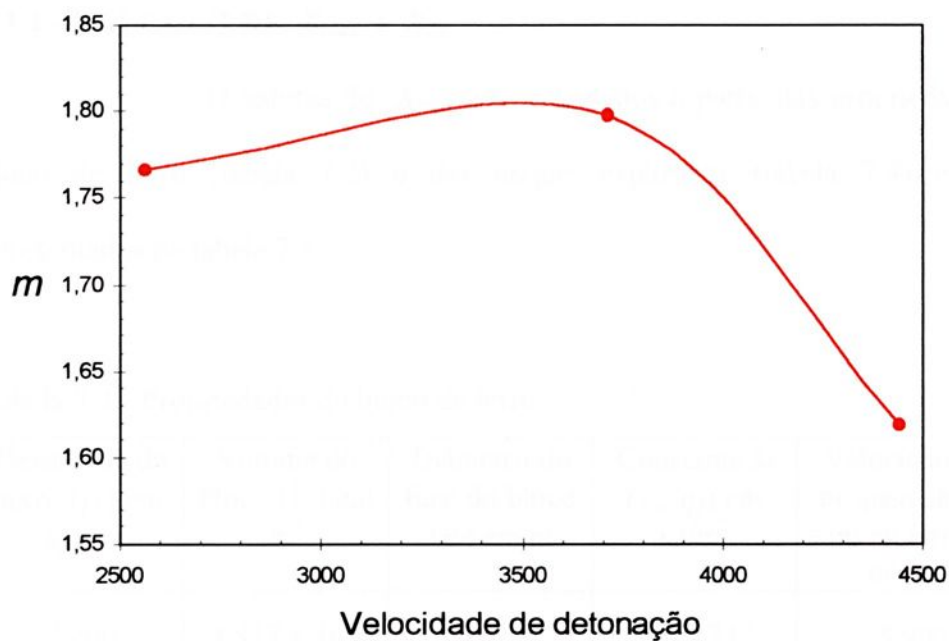


FIGURA 7.14 - Valores de m para um explosivo, qualquer, função de sua velocidade de detonação

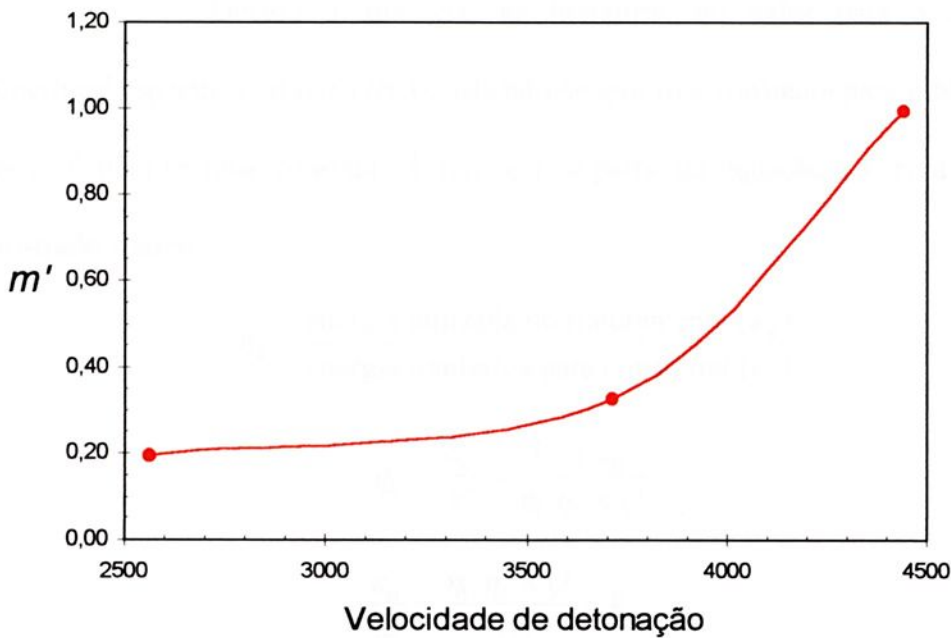


FIGURA 7.15 - Valores de m' para um explosivo, qualquer, função de sua velocidade de detonação

7.1.1 - CÁLCULO DE X_{max} e X_{50}

O valores de X_{max} são calculados a partir das propriedades do bloco de ferro (tabela 7.2) e das cargas explosivas (tabela 7.4) e estão apresentados na tabela 7.5.

Tabela 7.2 - Propriedades do bloco de ferro

Densidade do ferro (ρ_r) em kg/m^3	Volume do bloco (V_r) em m^3	Diâmetro do furo do bloco (ϕ) em m	Constante k_f (ϵ_{ss}/η_3) em kJ/m^2	Velocidade de propagação do som no ferro (C) em m/s
7.200	$3,317 \times 10^{-3}$	0,027	104,173 *	5.900

* Valor calculado a partir das propriedades e dos resultados das detonações com PETN

Devido a ausência, na literatura, do valor para a energia superficial específica do ferro (ϵ_{ss}) e sabendo-se que η_3 é constante para o bloco de ferro, definiu-se uma constante $k_f(\epsilon_{ss}, \eta_3)$, a partir da equação 6.6 conforme é mostrado abaixo:

$$\eta_3 = \frac{\text{energia utilizada no fraturamento } (\epsilon_b)}{\text{energia tranferida para o material } (\epsilon^*)} \quad 6.6$$

$$\eta_3 = \frac{\epsilon_b}{\epsilon^*} = \frac{V_r \cdot s \cdot \epsilon_{ss}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \epsilon \cdot Q} \quad 7.1$$

$$\frac{\epsilon_{ss}}{\eta_3} = \frac{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \epsilon \cdot Q}{V_r \cdot s} = k_f \quad 7.2$$

onde para a nitropenta: $\eta_1 = 0,394$

$$\epsilon = 6.322 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = 0,03 \text{ kg}$$

e para o bloco de ferro: $\eta_2 = 0,904$

$$V_r = 3,317 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

O valor da superfície específica (s) dos fragmentos obtidos pela detonações com o PETN é:

$$s = \frac{6}{100} \cdot \frac{F_i}{X_{max}} \cdot \sum_i \frac{1}{\alpha_{m,i}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{5}{0,078} \cdot 50,829 = 195,496 \text{ m}^2/\text{m}^3 \quad 7.3$$



O valor de $\sum_i \frac{1}{\alpha_{m,i}}$ é obtido pela tabela 7.3

Tabela 7.3 - Cálculo do somatório de $1/\alpha_{m,i}$

Porcentagem de massa acumulada (F)	Dimensão do fragmento (X) em cm	X/X_{max} (α)	$(X/X_{max})_{m,i}$ ($\alpha_{m,i}$)	$1/(X/X_{max})_{m,i}$ ($1/\alpha_{m,i}$)
0	0	0	-	-
5	1,16	0,149	0,074	13,448
10	2,04	0,262	0,205	4,875
15	2,61	0,335	0,298	3,355
20	3,03	0,388	0,362	2,766
25	3,33	0,427	0,408	2,453
30	3,62	0,464	0,446	2,245
35	3,87	0,496	0,480	2,083
40	4,12	0,528	0,512	1,952
45	4,34	0,556	0,542	1,844
50	4,55	0,583	0,570	1,755
55	4,76	0,610	0,597	1,676
60	4,94	0,633	0,622	1,608
65	5,14	0,659	0,646	1,548
70	5,35	0,686	0,672	1,487
75	5,57	0,714	0,700	1,429
80	5,77	0,740	0,727	1,376
85	5,98	0,767	0,753	1,328
90	6,20	0,795	0,781	1,281
95	6,48	0,831	0,813	1,230
100	7,80	1,000	0,915	1,092
				$\Sigma = 50,829$

Valores de X obtidos na figura 7.5



Tabela 7.4 - Propriedades das cargas explosivas

	Explosivos			
	PETN	Nitroglicerinado	Lama	Emulsão
Massa Volumétrica Aparente (ρ_e) em kg/m^3	975 *	1440 *	1100 *	1200 *
Velocidade de detonação (V_d) em m/s	5429 +	2559 *	3710 *	4440 *
Energia liberada pelo explosivo (ε) em kJ/kg	6322 +	3078 *	3514 *	4042 *
Diâmetro da carga explosiva (ϕ_c) em m	0,026	0,026	0,026	0,026
Massa de explosivo (Q) em kg	0,030	0,035	0,035	0,035

* Dados obtidos experimentalmente

+ Dados obtidos no Military Explosives ⁷

♦ Dados calculados pelo programa utilizado pela Fábrica Presidente Vargas (IMBEL)

Tabela 7.5 - Valores de X_{max} calculados pelo balanço de energia

Explosivos	Fatores de aproveitamento da energia		Fragmentos	
			X_{max} (cm)	
	η_1	η_2	Calculado	Experimental
Nitroglicerinado	0,294	0,904	15,7	$9,5 \pm 0,3$
Lama	0,320	0,904	12,6	$9,1 \pm 0,3$
Emulsão	0,396	0,904	8,9	$8,0 \pm 0,3$

Intervalo de confiança de 95% para o X_{max} experimental

Os valores de X_{max} também podem ser estimados a partir do modelo G-G-S.

Conhecida a velocidade de detonação de um explosivo, pode-se

obter nas figuras 7.14 e 7.15 os valores dos coeficientes (*m* e *m'*) da reta que representa a provável distribuição granulométrica dos fragmentos de um bloco desmontado pela detonação de uma carga de 35g desse explosivo.

O valor de *X_{max}* é obtido pela expressão:

$$X_{max} = e^{\left(\frac{\ln Y - m'}{m}\right)}$$

7.4

onde: *Y* = 100 (porcentagem de massa de fragmentos com dimensão característica menor do *X_{max}*)

m = coeficiente angular da reta

m' = coeficiente linear da reta

A tabela 7.6 mostra os valores de *X_{max}* calculados pelo modelo G-G-S.

Tabela 7.6 - Valores de *X_{max}* calculados pelo modelo G-G-S

Explosivos	<i>m'</i>	<i>m</i>	<i>X_{max}</i> (cm)	
			Calculado	Experimental
Nitroglicerinado	0,1955	1,7661	12,1	9,5 ± 0,3
Lama	0,3279	1,7980	10,8	9,1 ± 0,3
Emulsão	0,9933	1,6188	9,3	8,0 ± 0,3

Intervalo de confiança de 95% para o *X_{max}* experimental

O valores de *X₅₀* (tabela 7.7) são calculados pela expressão abaixo a partir dos valores de *X_{max}* e dos coeficientes angulares (*m*) obtidos na

figura 7.14.

$$X_{50} = X_{max} \cdot 0,5^{\frac{1}{m}}$$

7.5

Tabela 7.7 - Valores de X_{50} calculados pelo modelo G-G-S

Explosivos	m	X_{max} (cm)	X_{50} (cm)	
		Experimental	Calculado	Experimental
Nitroglicerinado	1,7661	9,5	6,4	$7,9 \pm 0,4$
Lama	1,7980	9,1	6,2	$7,1 \pm 0,4$
Emulsão	1,6188	8,0	5,2	$5,9 \pm 0,4$

Intervalo de confiança de 95% para o X_{50} experimental

Dos cálculos para X_{max} e X_{50} observa-se que:

i) os valores de X_{max} calculados pelo balanço de energia proposto por Berta e utilizado por Rao em seu trabalho apresentam valores muito afastados dos obtidos experimentalmente (tabela 7.8).

ii) os valores de X_{max} e de X_{50} calculados pelo modelo Gates-Gaudin-Schumann apresentam resultados mais próximos dos valores experimentais (tabela 7.8).

Deve ser observado que os calores de detonação, utilizados para o cálculo de X_{max} , são valores calculados e não obtidos experimentalmente. Esse fato pode estar aumentando o erro dos valores de X_{max} calculados pelo balanço de energia.



Tabela 7.8 - Erro dos resultados de X_{max} e X_{50} calculados.

Explosivos	X_{max} (cm)					X_{50} (cm)		
	Exp.	B E	Erro (%)	G-G-S	Erro (%)	Exp.	G-G-S	Erro (%)
PETN	6,8 $\pm 0,2$	6,8	0	7,3	7,4	4,6 $\pm 0,1$	4,4	4,3
Emulsão explosiva	8,0 $\pm 0,3$	8,9	11,3	9,3	16,3	5,9 $\pm 0,4$	5,2	11,9
Lama explosiva	9,1 $\pm 0,3$	12,6	38,5	10,8	18,7	7,1 $\pm 0,4$	6,2	12,7
Nitroglicerinado	9,5 $\pm 0,3$	15,7	65,3	12,1	27,4	7,9 $\pm 0,4$	6,4	19,0

Exp.= Experimental

B E = Balanço de energia proposto por Berta

G-G-S = Gates-Gaudin-Schumann

Vale lembrar que o valor de k_f utilizado no cálculo de X_{max} foi determinado a partir do valor de X_{max} obtido experimentalmente para a nitropenta. Por esse motivo o erro de X_{max} calculado pelo balanço de energia é nulo.

7.2 - VÔO DE FRAGMENTOS

O resultado dos impactos no cilindro de ferro, dos fragmentos das detonações com PETN, explosivo nitroglicerinado, lama explosiva e a emulsão explosiva estão registrados nas figuras 7.16, 7.17, 7.18 e 7.19.



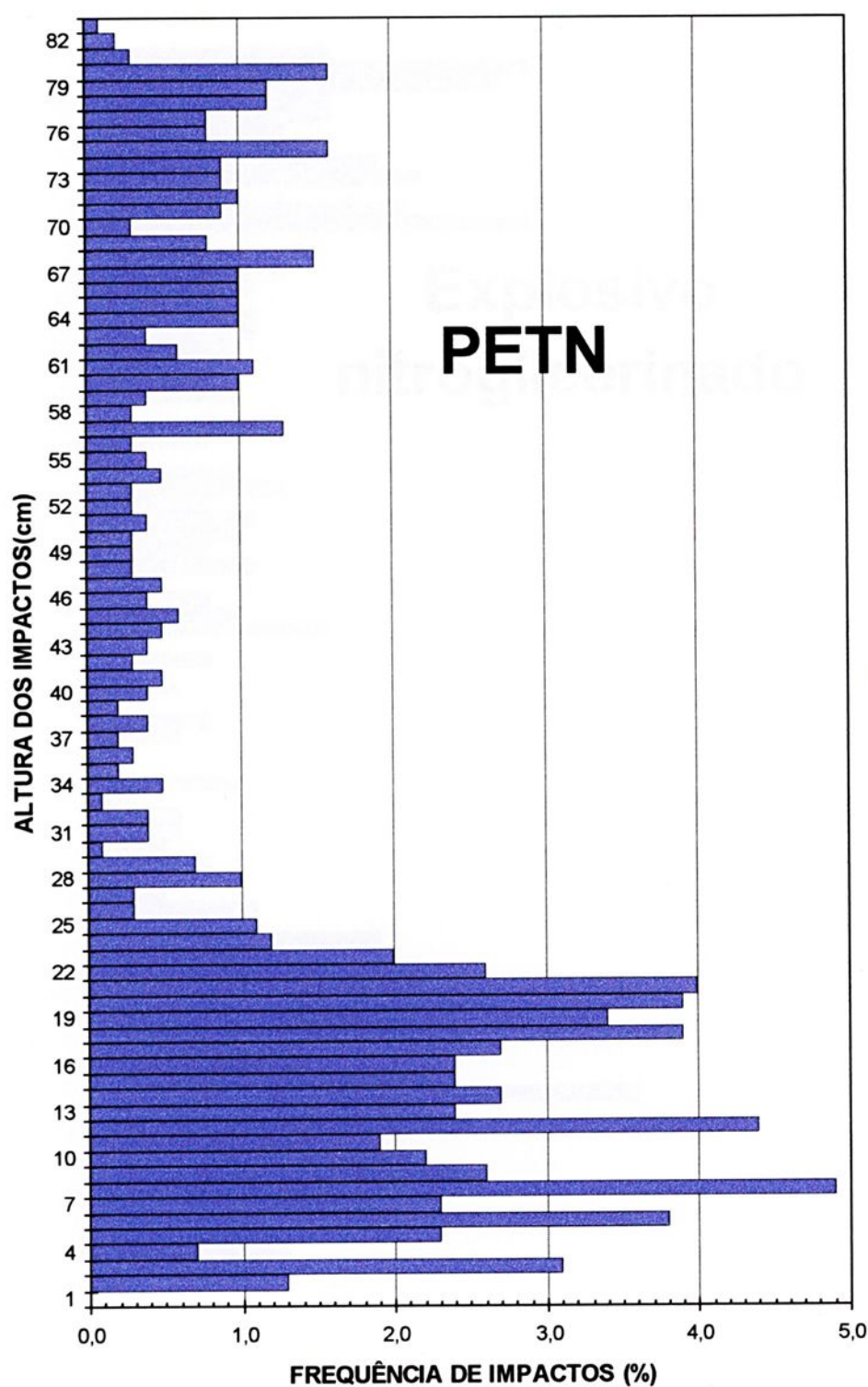


FIGURA 7.16 - Impactos dos fragmentos gerados pelas cargas de PETN

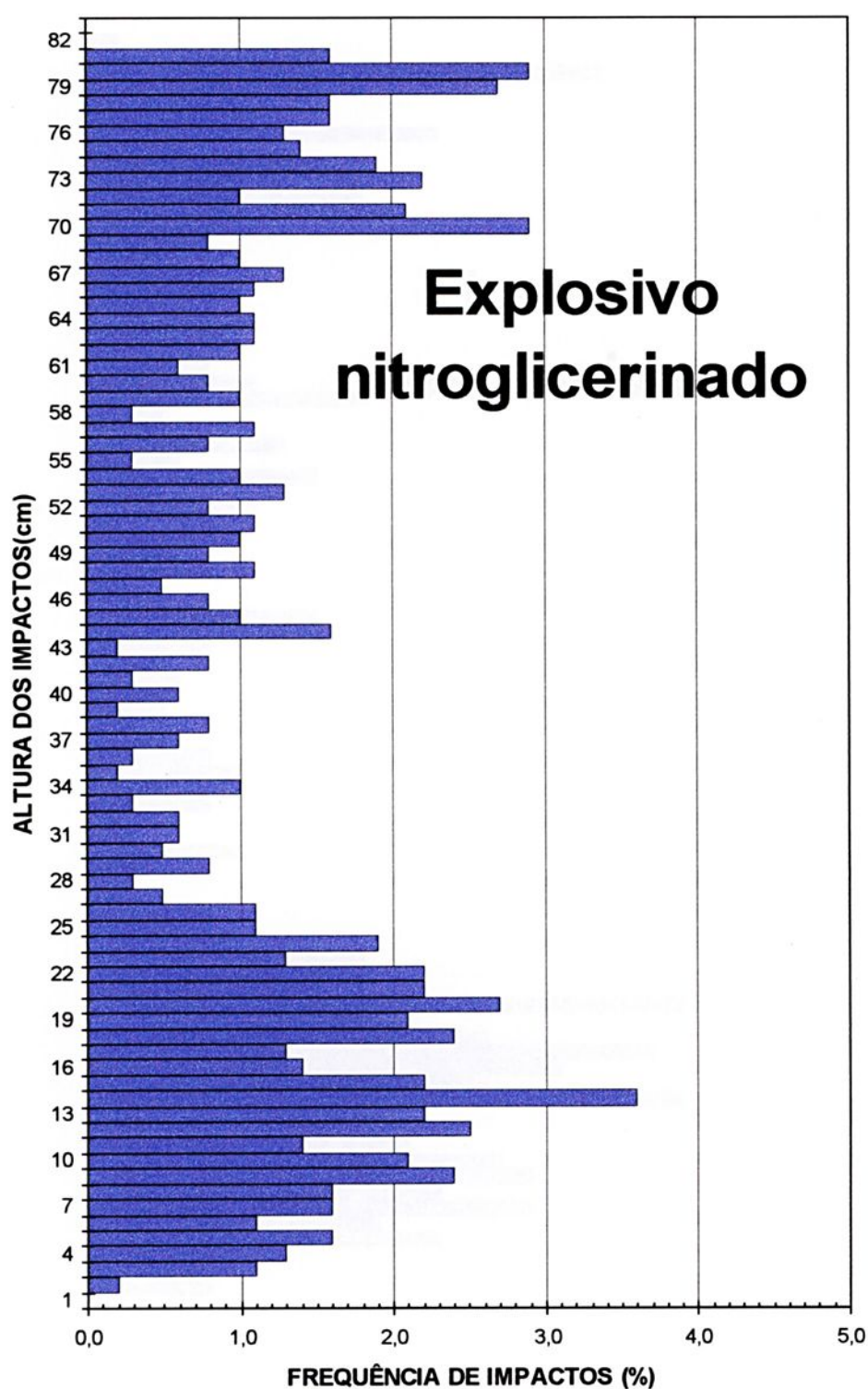


FIGURA 7.17 - Impactos dos fragmentos gerados pelas cargas do explosivo nitroglicerinado

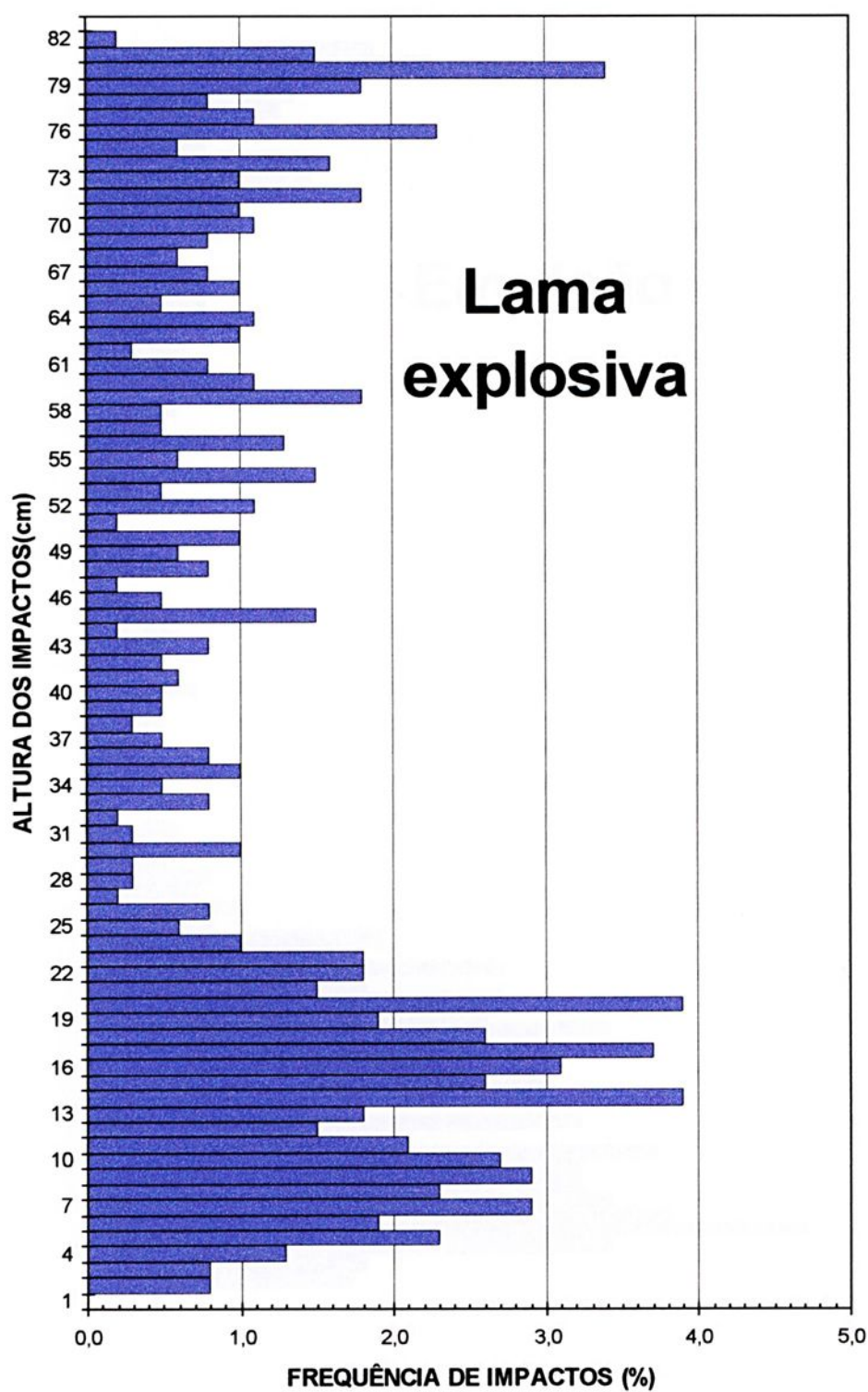


FIGURA 7.18 - Impactos dos fragmentos gerados pelas cargas de lama explosiva

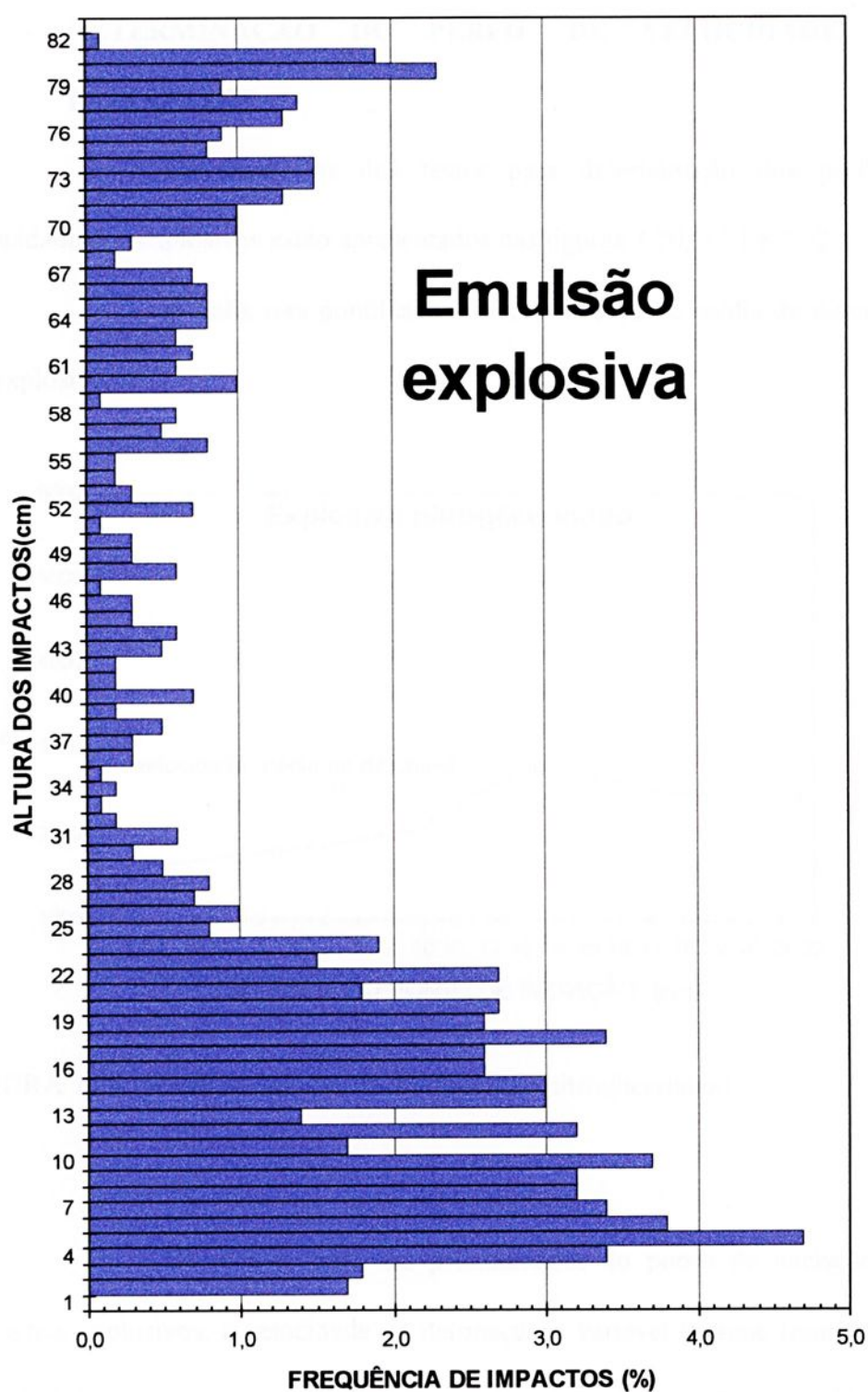


FIGURA 7.19 - Impactos dos fragmentos gerados pelas cargas de emulsão explosiva

7.3 - DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADE DOS EXPLOSIVOS

Os resultados dos testes para determinação dos perfis de velocidade dos explosivos estão apresentados nas figuras 7.20, 7.21 e 7.22.

A linha reta pontilhada indica a velocidade média de detonação do explosivo.

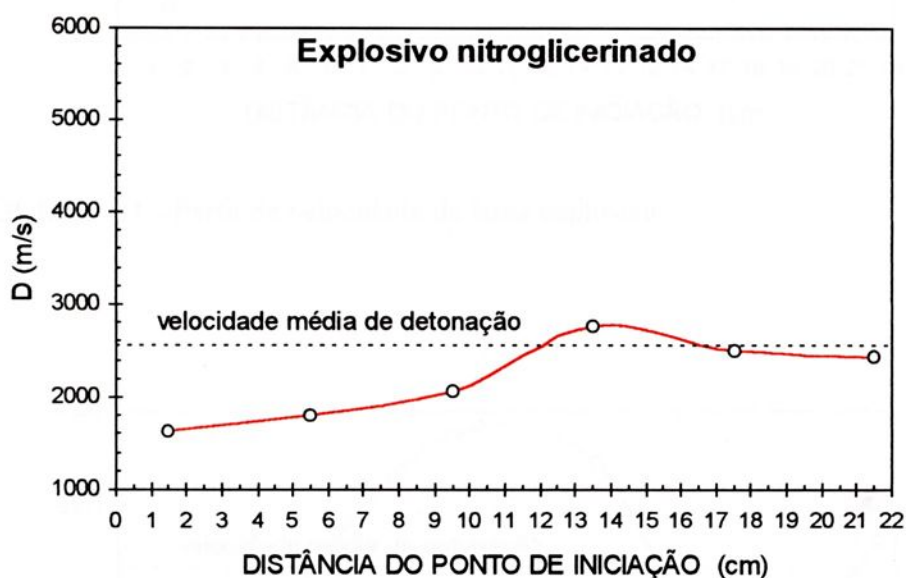


FIGURA 7.20 - Perfil de velocidade do explosivo nitroglicerinado

Observa-se que, nas proximidades do ponto de iniciação dos cartuchos explosivos, a velocidade de detonação é variável (regime transiente de detonação) até que, a uma certa distância do ponto de iniciação, a velocidade atinge a faixa de velocidade média de detonação do explosivo, passando a apresentar pequenas variações dentro dessa faixa.

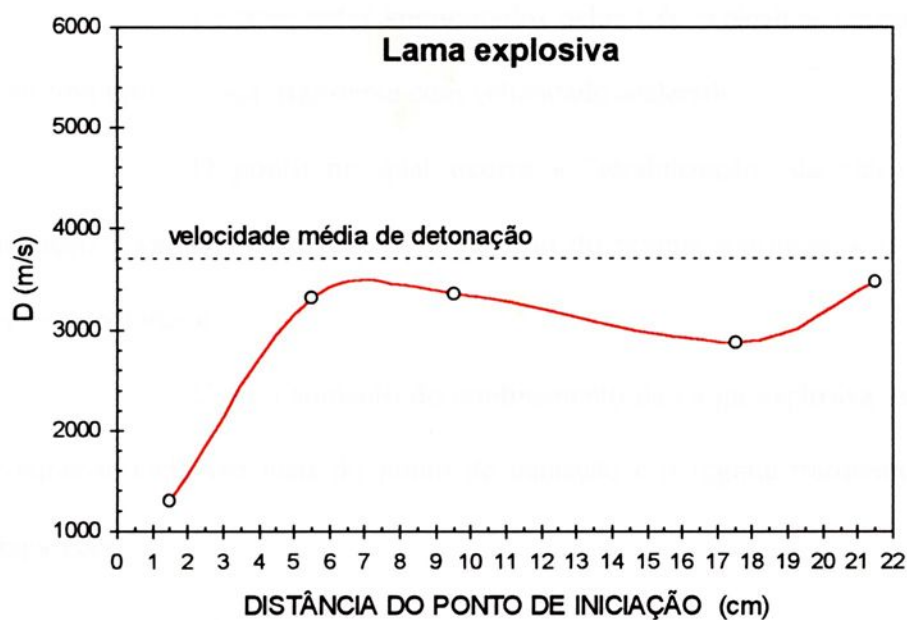


FIGURA 7.21 - Perfil de velocidade da lama explosiva

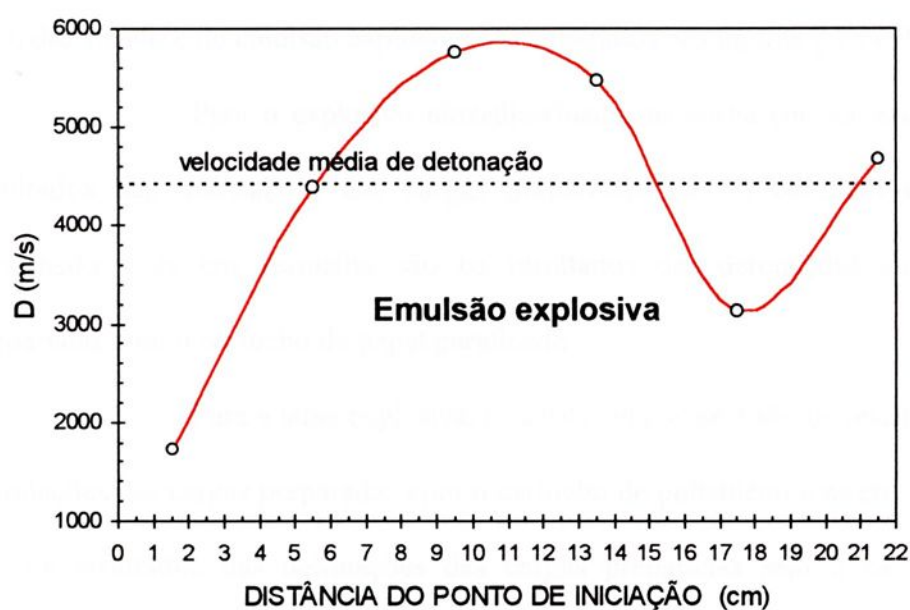


FIGURA 7.22 - Perfil de velocidade da emulsão explosiva

Os transientes apresentados pelos três explosivos comerciais são do mesmo tipo, ou seja, transiente com velocidade acelerada.

O ponto no qual ocorre a “estabilização” da velocidade de detonação é variável e caracteriza o término do regime transiente e o início do regime estacionário.

Com o aumento do confinamento da carga explosiva esse ponto aproxima-se cada vez mais do ponto de iniciação e o regime transiente tende a desaparecer.

7.4 - INFLUÊNCIA DO CARTUCHO NA DETONAÇÃO DOS EXPLOSIVOS

Os resultados das detonações com as cargas de explosivo nitroglicerinado e de emulsão explosiva são mostrados nas figuras 7.23 e 7.24.

Para o explosivo nitroglicerinado, as curva em cor azul são os resultados das detonações das cargas preparadas sem o cartucho de papel parafinado e as em vermelho são os resultados das detonações das cargas preparadas com o cartucho de papel parafinado.

Para a lama explosiva, as curva em cor azul são os resultados das detonações das cargas preparadas com o cartucho de polietileno e as em vermelho são os resultados das detonações das cargas preparadas sem o cartucho de polietileno.



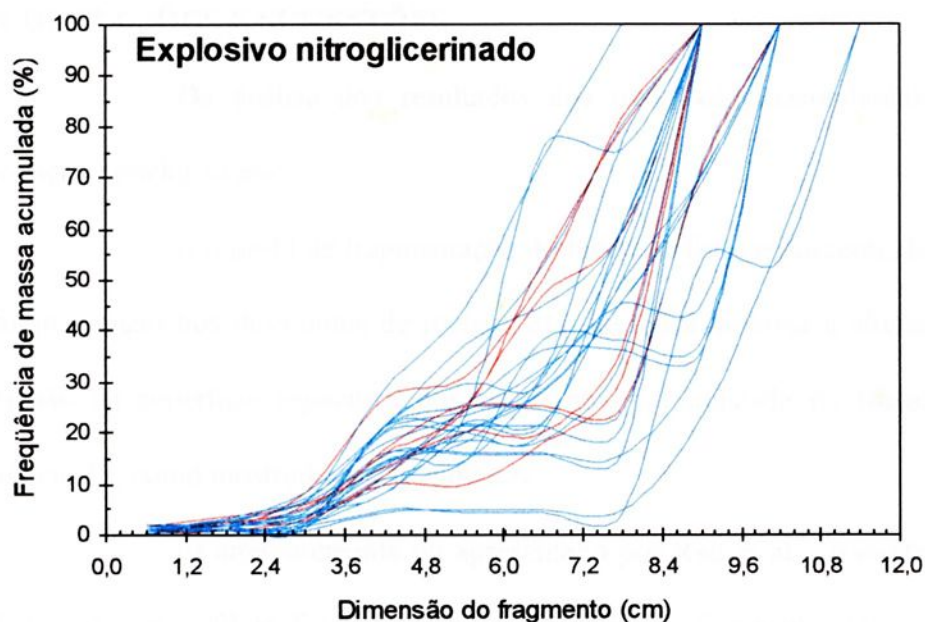


FIGURA 7.23 - Resultado das detonação das cargas com (vermelho) e sem (azul) o cartucho de papel parafinado .

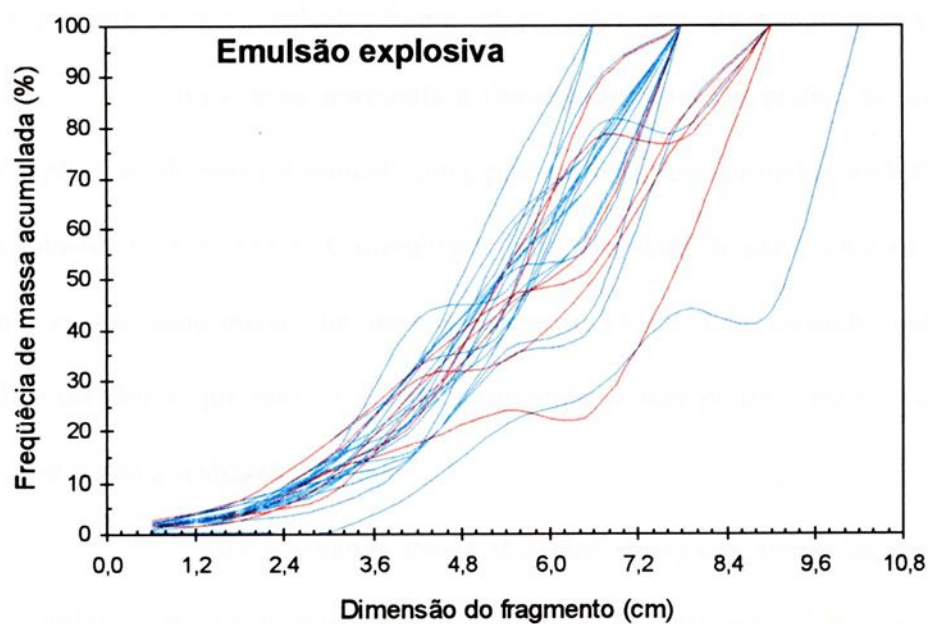


FIGURA 7.24 - Resultado das detonação das cargas com (azul) e sem (vermelho) o cartucho de polietileno.

8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Da análise dos resultados dos trabalhos desenvolvidos nesta dissertação conclui-se que:

i) o perfil de fragmentação do bloco de ferro é diferente do perfil de fragmentação nos desmontes de rocha. Esta diferença acarreta a alteração na expressão da superfície específica dos fragmentos (s) utilizada no trabalho da referência 30, como mostrado no Apêndice A;

ii) diferentemente do apresentado por Rao et al ⁵, o modelo que melhor ajustou o perfil de distribuição granulométrica dos fragmentos foi o modelo de Gates-Gaudin-Schumann;

iii) A análise da utilização do modelo do balanço de energia para se calcular os valores de X_{max} não foi conclusiva pois os valores de calor de detonação utilizados nos cálculos foram valores teóricos e não experimentais;

iv) o teste apresenta a desvantagem de não poder ser utilizado para explosivos de baixa densidade pois, por exemplo: um cartucho com 35 g de um explosivo tipo ANFO ou Carbonitrato, com densidade de carregamento de 0,6 g/cm³, teria o comprimento de aproximadamente 11 cm. Este cartucho colocado no furo do bloco, que tem 11 cm de profundidade, não poderia ser tamponado, impossibilitando a realização do teste;

v) os resultados dos testes indicam que a força do explosivo pouco influi na fragmentação do bloco de ferro. Os três explosivos comerciais testados têm praticamente a mesma força ($\cong 300 \text{ cm}^3$ no teste do bloco de chumbo) e apresentaram resultados de fragmentação visivelmente diferentes. Isto



indica que o teste do bloco de chumbo não é apropriado para avaliar o desempenho de explosivos em rochas mais resistentes;

vi) apesar do perfil de fragmentação do bloco de ferro ser diferente do perfil normalmente apresentado no desmonte de rochas, o teste é de fácil execução e se constitui num meio qualitativo eficiente para comparar o desempenho de explosivos em rochas resistentes;

vii) os três tipos diferentes de explosivos comerciais apresentaram o mesmo tipo de regime transiente de velocidade de detonação. No bloco de ferro, o transiente será fortemente inibido graças ao grande confinamento, praticamente deixando de existir;

viii) o cartucho não influencia a detonação do explosivo, pois não se observa diferença na fragmentação dos blocos detonados por cargas explosivas com e sem cartuchos, como mostrado no capítulo 7;

ix) neste tipo de estudo, é fundamental contar com o apoio de equipamentos que permitam a determinação experimental das propriedades dos explosivos comerciais.

Finalmente, é interessante que se continue o estudo da presente técnica com os objetivos de:

a) torná-la utilizável para explosivos de baixa densidade;

b) apurar o modelo que afinal foi desenvolvido para o desmonte de rochas, para os blocos de ferro, com vistas a um melhor ajuste dos parâmetros de desempenho dos explosivos (X_{max} e X_{50});



c) determinar a relação entre os resultados fornecidos pela técnica empregada neste trabalho e aqueles obtidos nos desmontes de rocha, de forma a torná-la uma técnica efetivamente quantitativa;

d) como os fragmentos do bloco de ferro não apresentam a forma cúbica, utilizada no modelo de classificação granulométrica e na dedução da expressão da superfície específica dos fragmentos (s), seria interessante a investigação de outras geometrias que melhor simulassem aquela fragmentação.



9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 *Explosives and Rock Blasting*. Dallas: Atlas Powder Company, 1987. p 1-10, 20-22, 47, 157-176, 509-512.
- 2 MEYER, R. *Explosives*. Weinheim: Verlag Chemie GmbH, 1977. p 38-39, 244, 249-252, 268-269.
- 3 JOHANSSON, C.H., PERSSON, P.A. *Detonics of High Explosives*. New York: Academic Prees Inc, 1970. p.24-28, 208-243.
- 4 PATERSON, S, BEGG, A.H. Underwater Explosion. *Propellants and Explosives*, v.3, p.63-69, 1978.
- 5 RAO, P.S., MOHAN, V.K., BHASU, V.C.J., KUMAR, A.S.. Fragmentation of Cast Iron Blocks by a Confined Explosive Charge: A New Performance Evaluation Test for Commercial Explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, v.9, p.149-154, 1994.
- 6 BERTA, G. *Explosives: An Engineering Tool*. Milano: La Moderna, 1990. p. 18-24, 36-61, 70-76.
- 7 COOK, M.A. *The Science Of High Explosives*. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1966. p. 32-35, 265-268, 271-273.
- 8 *Military Explosives*. Washington, D.C.: Headquarters Department of the Army, 1990. p 4-9, 5-1.
- 9 GREGORY, C. E. *Explosives for North American Engineers*. Clausthal: Trans Tech S.A., 1979. p. 32-36.



- 10 COOK, M.A. *The Science Of Industrial Explosives*. Salt Lake City: Ireco Chemicals, 1974. p. 1-26, 28-29, 200-207.
- 11 PILA, L. *Físico-Química I*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1979. p. 61, 75-86.
- 12 MACEDO, H. *Físico-Química I*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1981. p. 58-60, 66-72.
- 13 AHRENS, H. International Study Group for the Standardization of the Methods of Testing Explosives. *Propellants and Explosives*, v.2, p.7-20, 1977.
- 14 GUSTAFSSON, R. *Tecnica Sueca de Voladuras*. Ärlas: Nora Boktryckeri AB, 1977. p. 8-11, 18-24.
- 15 HERRMANN, C. *Manual de Perfuração de Rocha*. São Paulo, Editora polígono S.A., 1968. p.115-116.
- 16 OLOFSSON, S.O. *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. Ärla: Nora Boktryckeri AB, 1991. p. 13-17.
- 17 BJARNHOLT.G. Suggestions on Standards for Measurement and Data Evaluation in the Underwater Explosion Test. *Propellants and Explosives*, v.5, p. 67-74, 1980.
- 18 SATYAVRATAN, P. V.,VEDAM, R. Some Aspects of Underwater Testing Method. *Propellants and Explosives*, v.5, p.62-66, 1980.
- 19 WONNACOTT, T. W., WONNACOTT, R. J. *Introdução à Estatística*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1980. p. 134-138.



- 20 BUSSAB, W.O., MORETTIN, P.A. *Métodos Quantitativos: Estatística Básica*. São Paulo: Atual Editora Ltda, 1987. p. 1-12, 194-199.
- 21 GOMES, F.P. *Curso de Estatística Experimental*. São Paulo: Livraria Nobel S.A. Editora, 1985. p. 42-43, 56-57.
- 22 VIEIRA, S., HOFFMANN, R. *Estatística Experimental*. São Paulo: Editora Atlas S.A., 1989. p. 21-22, 24-27.
- 23 COULSON, J.M., RICHARDSON, J.F. *Tecnologia Química: Volume II Operações Unitárias*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1987. p. 760-761, 774-783.
- 24 FOUST, A.S., et al. *Princípios das Operações Unitárias*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1982. p. 617-622.
- 25 NETO, L. D. G. *Física I, Física Experimental: Teoria dos Erros*. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 1989. 28 p..
- 26 PHILIP, R. B. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1969. p. 56-65.
- 27 YARDLEY, B. *Introduction to the Teory of Error*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1962. p.3-6, 26-36.
- 28 LADISLAV, S. *Solid-liquid Separation*. London: Butterworths & Co. Ltda, 1990, p. 14-29.
- 29 MASSARANI, G. *Problemas em Sistemas Particulados*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1984. p 97-100.
- 30 PERRY, R.H., GREEN, D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988. p. 8-5 - 8-6.



- 31 BUSSAB, W.O., MORETTIN, P.A. *Métodos Quantitativos: Análise de Variância e de Regressão*. São Paulo: Atual Editora Ltda, 1986. p. 92-94.
- 32 ROSSER, J.B., NEWTON R.R., GROSS G.L. *Mathematical Theory of Rocket Flight*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1947 p. 1-48.
- 33 SUTTON, G.P. *Rocket Propulsion Elements: An Introduction to the Enginnering of Rockets*. New York: A Wiley - Interscience Publication, 1986. p. 96-105
- 34 *Engineering Design Handbook: Elements of Terminal Ballistics. Part One, Introduction, Kill Mechanisms and Vulnerability*. Washington, D.C.: Headquarters, US Army Materiel Command, 1962. p 4-179 - 4-187.
- 35 *Engineering Design Handbook: Principles of Explosive Behavior*. Washington, D.C.: Headquarters, US Army Materiel Command, 1972. p 3-4 - 3-5, 3-9, 3-16.
- 36 GIL, W., CARVALHO JÚNIOR, J.A., BASTOS NETTO, D. Modelagem de Explosões: Fragmentação INPE-4022-NTE/264. 7 p., 1986.
- 37 URBANSKI, T. *Chemistry and Technology of Explosives*. v.3. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1967. p.322-324, 395-402.



Apêndice A

SUPERFÍCIE ESPECÍFICA DOS FRAGMENTOS DO BLOCO DE FERRO

A determinação da expressão geral para o cálculo da superfície específica dos fragmentos (s) foi baseada no livro *Explosives: An Engineering Tool* de Giorgio Berta ⁶ e a expressão particularizada para o ferro foi determinada com base nos dados experimentais desse trabalho.

I - EXPRESSÃO GERAL

Hipóteses:

- a) os fragmentos tem a forma aproximada de um cubo;
- b) a densidade dos fragmentos se mantém constante para as diferentes classes de distribuição.

1 - Considera-se um volume total de fragmentos onde:

$$V_r = 100 \cdot X_{max}^3 \quad A.1$$

2 - O volume de fragmentos de um intervalo (i) da distribuição de frequência acumulada é dado por:

$$V_{r,i} = F_i \cdot X_{max}^3 \quad A.2$$



onde: F_i = frequência expressa em porcentagem de massa no intervalo (i)

3 - O número de fragmentos do intervalo (i) é calculado pela expressão:

$$N_i = \frac{V_i}{V_{o,i}} = \frac{F_i \cdot X_{max}^3}{X_{m,i}^3} = \frac{F_i}{\alpha_{m,i}^3} \quad A.3$$

onde: $V_{o,i}$ = volume de cada fragmento do intervalo (i)

$X_{m,i}$ = dimensão característica média dos fragmentos do intervalo

(i)

$$\alpha_{m,i} = X_{m,i} / X_{max}$$

4 - Com base na hipótese de que o fragmento tem a forma de um cubo, a superfície de cada fragmento do intervalo (i) é:

$$S_{o,i} = 6 \cdot X_{m,i}^2 = 6 \cdot \alpha_{m,i}^2 \cdot X_{max}^2 \quad A.4$$

5 - A superfície total dos fragmentos de um intervalo (i) será:

$$S_i = S_{o,i} \cdot N_i = 6 \cdot \alpha_{m,i}^2 \cdot X_{max}^2 \cdot \frac{F_i}{\alpha_{m,i}^3} = 6 \cdot \frac{F_i}{\alpha_{m,i}} \cdot X_{max}^2 \quad A.5$$

6 - A superfície total dos fragmentos será:

$$S_T = \sum_i S_i = \sum_i 6 \cdot \frac{F_i}{\alpha_{m,i}} \cdot X_{max}^2 = 6 \cdot X_{max}^2 \cdot \sum_i \frac{F_i}{\alpha_{m,i}} \quad A.6$$

7 - A razão entre a superfície total dos fragmentos e o volume de material desmontado é a expressão de (s):

$$s = \frac{S_T}{V_r} = \frac{6 \cdot X_{max}^2}{100 \cdot X_{max}^3} \cdot \sum_i \frac{F_i}{\alpha_{m,i}} = \frac{6}{100 \cdot X_{max}} \cdot \sum_i \frac{F_i}{\alpha_{m,i}} \quad A.7$$

II - EXPRESSÃO PARA O BLOCO DE FERRO

Para se obter a expressão de s , função de X_{max} , é necessário que se determine o somatório de $F_i / \alpha_{m,i}$ a partir da curva de distribuição de frequência característica para os fragmentos do bloco de ferro.

A figura A.1 mostra as curvas de distribuição de frequência das detonações com os quatro tipos de explosivos e também a curva característica para o bloco de ferro.

A figura A.2 mostra a curva de distribuição de frequência típica para rochas² e a curva típica para o bloco de ferro.

Para determinar o somatório de $F_i / \alpha_{m,i}$, arbitrou-se o intervalo de frequência de massa acumulada em 5% e os valores de $\alpha_{m,i}$ encontram-se na tabela A.1.

Substituindo-se os valores de F_i e do somatório de $1/\alpha_{m,i}$ na expressão de s , tem-se:

$$s = \frac{6}{100} \cdot \frac{F_i}{X_{max}} \cdot \sum_i \frac{1}{\alpha_{m,i}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{5}{X_{max}} \cdot 43,358$$

$$s = \frac{13}{X_{max}} \quad A.8$$



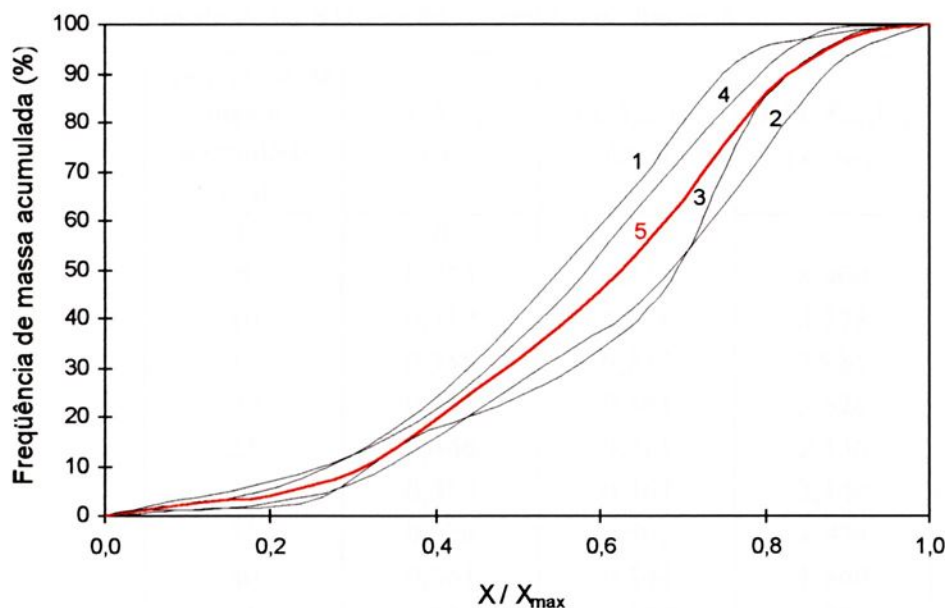


FIGURA A.1 - Curvas de distribuição de frequência das detonações com nitropenta (1), explosivo nitroglicerinado (2), lama explosiva (3), emulsão explosiva (4) e a curva característica para o bloco de ferro (5).

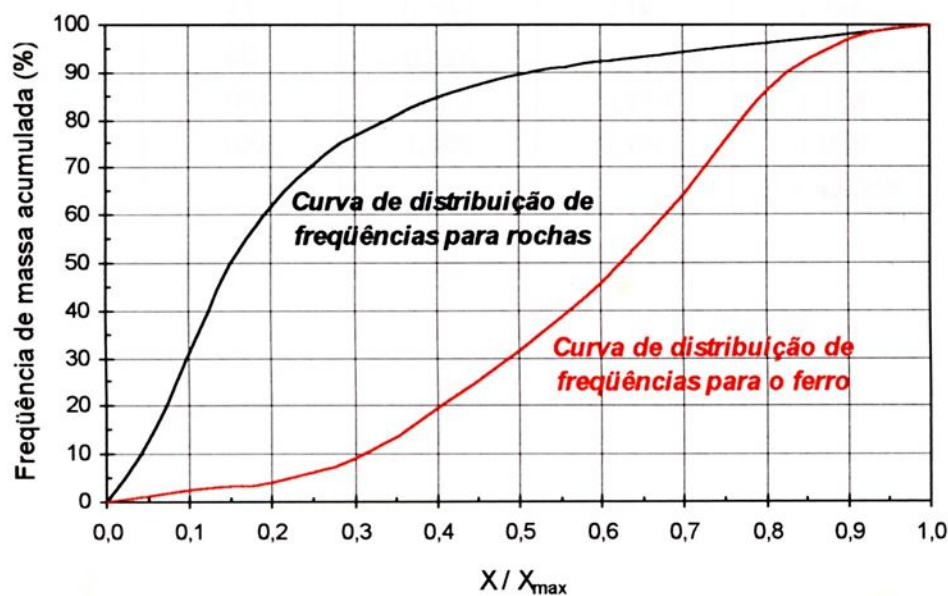


FIGURA A.2 - Curvas típicas de distribuição de frequência para rochas⁶ e para o bloco de ferro

Tabela A.1 - Valores de α obtidos da figura A.2.

Frequência de massa acumulada (%)	X/X_{max} (α)	$(X/X_{max})_{m,i}$ $(\alpha_{m,i})$	$1/(X/X_{max})_{m,i}$ $(1/\alpha_{m,i})$
0	0	-	-
5	0,223	0,112	8,969
10	0,312	0,268	3,738
15	0,358	0,335	2,985
20	0,403	0,381	2,628
25	0,446	0,425	2,356
30	0,487	0,467	2,144
35	0,526	0,507	1,974
40	0,561	0,544	1,840
45	0,595	0,578	1,730
50	0,624	0,610	1,641
55	0,653	0,639	1,566
60	0,678	0,666	1,503
65	0,704	0,691	1,447
70	0,726	0,715	1,399
75	0,747	0,737	1,358
80	0,769	0,758	1,319
85	0,793	0,781	1,280
90	0,826	0,810	1,235
95	0,872	0,849	1,178
100	1,000	0,936	1,068
			$\Sigma = 43,358$

Apêndice B

HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO

DOS EXPLOSIVOS COMERCIAIS ^{1, 14, 37}

Até o início do século XVII, a indústria de mineração na Europa utilizava a técnica de ruptura por contração para realizar o desmonte de rochas. A técnica consistia em se aquecer a face da rocha, pela combustão de madeira, quando então água fria era despejada sobre a superfície totalmente aquecida. A mudança brusca de temperatura provocava tensões na rocha que ocasionavam fissuras em sua estrutura facilitando o seu desmonte por ponteiros e cunhas.

Em 1632, engenheiros de minas alemães introduziram a utilização de pólvora negra para o desmonte de rochas. A composição e as etapas de preparação da pólvora negra foram descritas pela primeira vez no século XIII nos trabalhos de dois grandes cientistas da Idade Média; Albertus Magnus um monge dominicano nascido na Alemanha, e Roger Bacon, monge franciscano nascido na Inglaterra.

O grande desenvolvimento da pólvora negra ocorreu após a invenção da arma de fogo no século XIV pelo monge alemão Berthold Schwartz.

Até a sua utilização em pedreiras, a pólvora negra foi utilizada exclusivamente como propelente para munição de armas e para foguetes. A aceitação da pólvora negra na indústria de mineração foi relativamente rápida e, no final do século XVII, a maioria dos mineradores europeus utilizavam-na para a



exploração de pedreiras. Na América, a primeira referência de utilização de pólvora negra data de 1773 em uma mina de cobre em Connecticut, EUA.

O aumento da utilização da pólvora negra acarretou um aumento no número de acidentes, pois a iniciação das cargas era feita com pólvora negra confinada em penas de ganso, tubos de madeira, papel ou junco. Esses dispositivos de iniciação não eram seguros, pois o retardo entre o acionamento dos iniciadores e a iniciação das cargas de pólvora negra não era totalmente previsível.

O primeiro dispositivo seguro de iniciação foi o estopim de segurança, inventado em 1831, por Willian Bickford, na Inglaterra.

O estopim de segurança para minas era constituído de um carregamento de pólvora negra envolvido por juta. Esse estopim era muito parecido com o que utilizamos nos dias de hoje.

Três descobertas ocorridas, na primeira metade do século XIX, proporcionaram o início do desenvolvimento da indústria de alto-explosivos comerciais: a preparação do fulminato de mercúrio, primeiro explosivo iniciador, descrita em 1800, por Edward Howard; a descoberta da nitrocelulose, em 1833, por Pelouze e por fim, a obtenção da nitroglicerina, em 1847, por Ascanio Sobrero. O poder destrutivo da nitroglicerina assustou Sobrero que fez uma advertência quanto a sua utilização industrial.

Durante muitos anos, houve pouco interesse na utilização da nitroglicerina como explosivo, exceto por utilizações esporádicas em desmonte de rocha as quais, algumas vezes, terminava em tragédia.



Nas tentativas de utilização da nitroglicerina, Alfred Nobel percebeu a necessidade de novos dispositivos de iniciação.

Os dispositivos de iniciação então existentes não permitiam o aproveitamento eficiente da energia química da nitroglicerina, pois não realizavam uma iniciação adequada do explosivo.

Com o intuito de se melhorar os dispositivos de iniciação, foram feitas várias tentativas até que Nobel teve a idéia de utilizar espoletas de munições para armamentos. Essa espoletas eram carregadas com fulminato de mercúrio e os resultados foram satisfatórios o bastante para que, em 1861, surgisse a espoleta para iniciação de explosivos. A invenção da espoleta foi tão importante para a utilização dos explosivos comerciais quanto o próprio desenvolvimento desses explosivos.

Quando Alfred Nobel, em 1864, começou a fabricação de um óleo explosivo a base de nitroglicerina, o produto começou a ter um vasto campo de aplicação sendo comercializado em todo mundo. A nitroglicerina era utilizada como explosivo em recipientes que após serem colocados nos furos eram detonados.

O manuseio e a utilização da nitroglicerina em forma de óleo explosivo ocasionou muitos acidentes por detonações prematuras. Até que, em 1866, Nobel descobriu que a terra de infusórios (*Kieselguhr*), utilizada no transporte para evitar os choques entre os recipientes contendo nitroglicerina, era capaz de absorvê-la. Essa mistura podia ser manuseada e aplicada com mais segurança do que a nitroglicerina líquida.



Nobel embalou a mistura de nitroglicerina e *Kieselguhr* em cartuchos de papel e batizou o novo explosivo com o nome de *dynamite*.

A mistura de nitrato de amônio (NA), carvão e nitroglicerina patenteada de Ohlssen e Norrbin, em 1867, e a descoberta feita por Nobel, em 1875, do fato que a nitrocelulose em contato com a nitroglicerina formava uma gelatina explosiva (*blasting*) propiciaram o desenvolvimento das formulações atuais dos explosivos nitroglicerizados.

A propriedade explosiva do nitrato de amônio já havia sido evidenciada em vários acidentes, nos quais grandes quantidades de nitrato haviam detonado, quando em 1955, H. B. Lee e R. L. Akre patentearam uma mistura de nitrato de amônio tipo fertilizante com um combustível carbonáceo sólido.

Posteriormente, o combustível sólido foi substituído por óleo combustível dando origem aos explosivos tipo *Amonium Nitrate Fuel Oil* (ANFO). Por apresentar menor custo, maior segurança e maior rapidez na aplicação, esse novo explosivo começou a substituir os explosivos nitroglicerizados para aplicações em locais sem umidade pois, os explosivos tipo ANFO não possuem resistência a água.

Das tentativas de se desenvolver um tipo de explosivo com as vantagens do ANFO e que pudesse ser aplicado em furos com água, surgiram as lamas explosivas (*slurries water gel*), nas quais trinitrotolueno (TNT) e nitrato de amônio misturados ou não a nitrato de sódio eram dispersos em uma solução de goma guar em água. Esse tipo de explosivo foi desenvolvido por M. A. Cook e H. E. Farnham sendo testado pela primeira vez com sucesso em 1957, no Canadá.



Na década de sessenta, descobriu-se que, com ar “armadilhado”, ingredientes básicos, como nitrato de amônio, água e óleo combustível na forma de emulsão água-em-óleo, tornavam-se detonáveis. Em 1968, a empresa americana *Atlas Powder Company* introduziu pela primeira vez no mercado as emulsões explosivas, dando início a mais nova geração de explosivos comerciais.



Apêndice C

NOTA INTRODUTÓRIA

SOBRE A TEORIA DO DESMONTE DE ROCHAS¹

A teoria do desmonte de rochas talvez seja o assunto mais interessante e controvertido nos meios de fabricação de explosivos comerciais e de exploração de rochas e minérios. Ela engloba várias áreas do conhecimento tais como: a química, a física, a termodinâmica, o estudo das interações entre ondas de choque e a mecânica das rochas. Em termos gerais, o desmonte de rocha por explosivos envolve a ação dos explosivos e sua resposta no meio rochoso.

Apesar da grande quantidade de pesquisas realizadas nas últimas décadas, ainda não está formulada uma teoria única consistente e amplamente aplicável às várias condições do desmonte e aos vários tipos de material a serem desmontados. O que existe são teorias que têm sido formuladas com base em especulações, hipóteses, testes em condições específicas, experiências de vários anos de desmonte de rochas, investigações individuais e modelos matemáticos e físicos adaptados de outras áreas. Porém, uma fórmula única para prever uma fragmentação ótima até agora não foi totalmente obtida.

Para fins de estudo, pode-se dividir a teoria do desmonte de rocha, realizado por cargas explosivas confinadas, em quatro etapas:

- a) detonação
- b) propagação das ondas de choque

- c) expansão dos gases da detonação
- d) movimento do material fragmentado.

DETONAÇÃO

Detonação é um tipo específico de reação exotérmica, que está sempre associada a uma onda de choque. Nela a reação química é iniciada pelo calor gerado pela compressão de uma onda de choque sobre o material explosivo.

Durante a detonação, o explosivo condensado se decompõe em gases a altas temperaturas gerando altas pressões. As pressões desenvolvidas pelas ondas de detonação são da ordem de 9 kbar a 275 kbar e as temperaturas dos gases variam de 1650 °C até 3900 °C.

A onda de detonação é iniciada por um detonador e se desloca ao longo da massa explosiva com velocidade acima da velocidade de propagação do som no meio explosivo. Os explosivos comerciais desenvolvem velocidades da ordem de 2400 m/s a 7900 m/s. Os valores das velocidades de detonação dependem primordialmente da composição, da densidade e do tamanho das partículas do explosivo e de forma menos acentuada, do confinamento da carga explosiva.

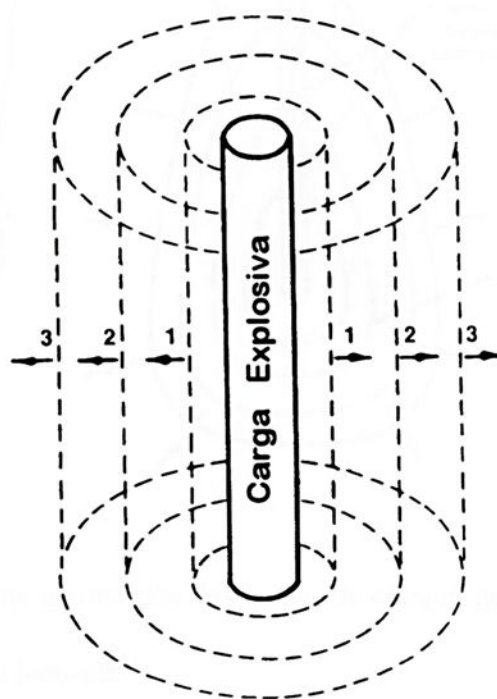
PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE

A propagação das ondas de choque ocorre durante e imediatamente após a detonação. As ondas de choque são geradas pelos picos de pressão ocorridos na detonação e se propagam através da rocha.



A forma geométrica da onda de choque depende de vários fatores, tais como: localização do ponto de iniciação, velocidade de detonação da carga explosiva e velocidade de propagação das ondas de choque no material a ser desmontado. De um modo geral, o formato da carga explosiva não influencia a geometria das ondas de choque.

Em cargas explosivas, onde a razão entre o comprimento (l) e o diâmetro (d) da carga é menor ou igual a seis, as ondas de choque são esféricas. Quando a razão é maior do que seis, as ondas são cilíndricas (figura C.1).



1,2,3 - Posições Sucessivas das Ondas de Choque

FIGURA C.1 - Geometria da propagação das ondas de choque para carga explosivas¹ com $l/d > 6$.

Nos carregamentos utilizados em desmonte de rocha, nos quais o explosivo é carregado em furações feitas na rocha e a iniciação é realizada na parte inferior da coluna explosiva, as ondas de choque geradas no ponto de iniciação propagam-se através da rocha ao mesmo tempo em que a onda de detonação propaga-se ao longo da coluna explosiva, gerando ondas de choque com a forma geométrica observada na figura C.2.

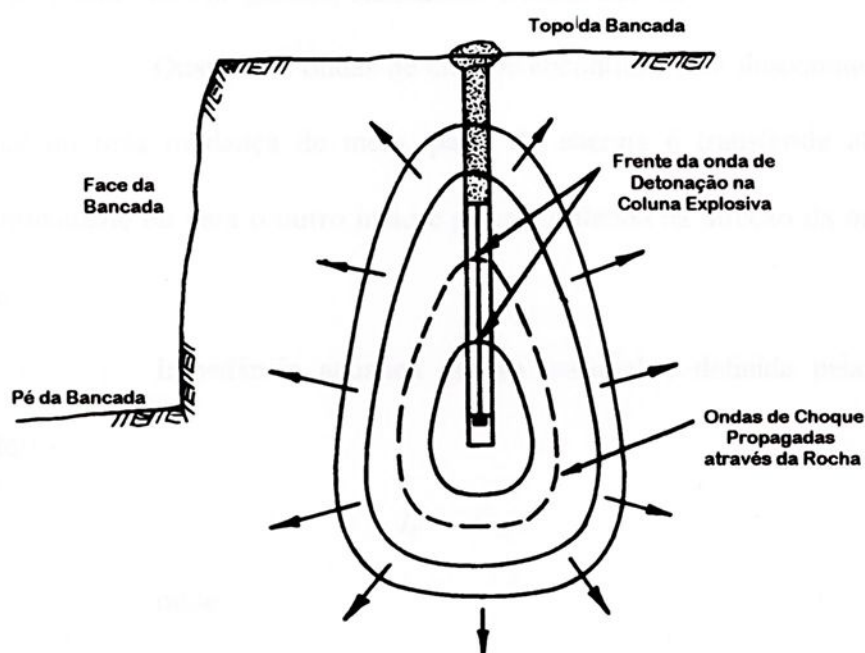


FIGURA C.2 - Forma geométrica das ondas de choque geradas na detonação em uma bancada.¹

Ao serem geradas, as ondas de choque agem sobre as paredes da coluna explosiva pulverizando e fraturando o material ao seu redor. Devido a essa ação inicial das ondas de choque, a dimensão do diâmetro do furo pode ser

aumentada em até três vezes a dimensão original dependendo do tipo de material rochoso e do explosivo utilizado.

As ondas de choque propagam-se através do material exercendo uma força de compressão na direção normal de propagação e uma força de tração (tensões tangenciais) na direção perpendicular à direção de propagação, causando as fraturas no material.

A intensidade da onda de choque decresce a medida que ela se afasta do ponto onde foi gerada, diminuindo o fraturamento.

Quando as ondas de choque encontram uma descontinuidade no material ou uma mudança de meio, parte da energia é transferida através da descontinuidade ou para o outro meio e parte é refletida na direção da origem das ondas.

Impedância acústica de um material é definida pela seguinte relação:

$$I_r = C \cdot \rho_r \quad \text{C.1}$$

onde:

I_r = impedância acústica do material

C = velocidade de propagação do som no material

ρ_r = massa específica do material

Quando a razão entre a impedância acústica do meio em que a onda de detonação está se propagando e a impedância acústica do novo meio é menor do que um, parte da energia é transferida para o novo meio na forma de

onda de compressão e parte da energia é refletida no próprio meio também na forma de onda de compressão. Quando a mesma razão é maior do que um, parte da energia é transferida para o novo meio, na forma de onda de compressão e parte da energia é refletida no próprio meio, na forma de onda de tração. Quando a razão é igual a um, não há reflexão da onda conforme ilustrado na figura C.3.

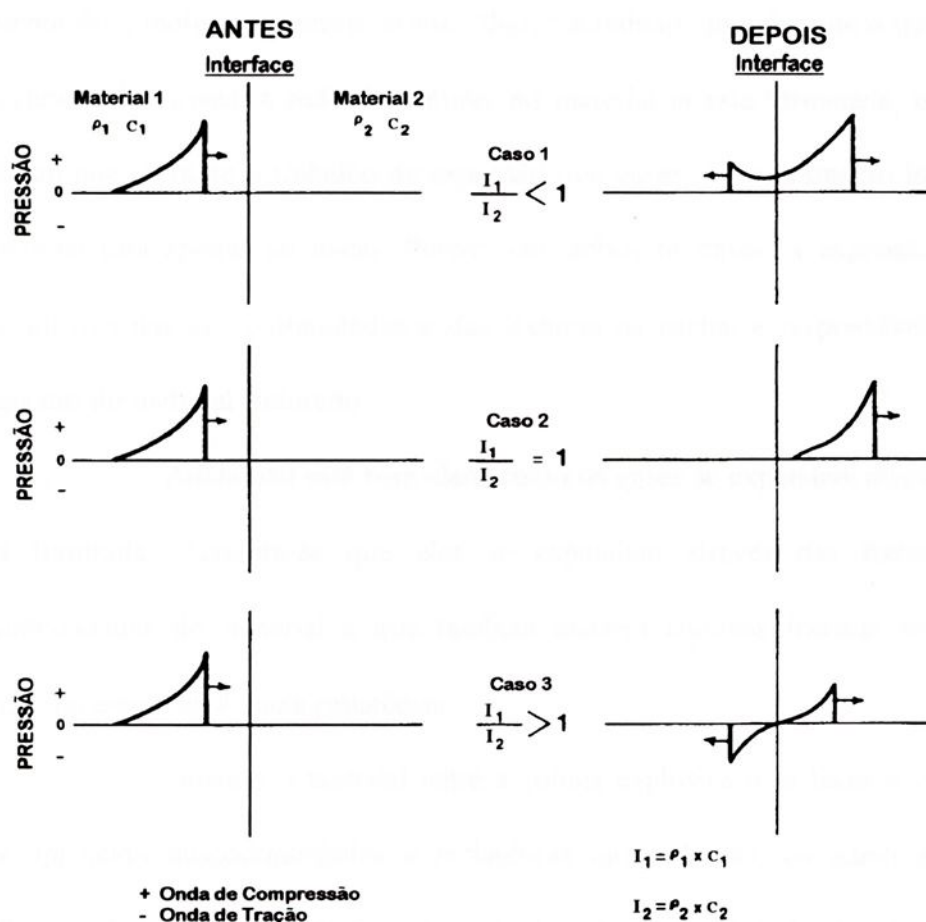


FIGURA C.3 - Interação das ondas de choque com as interfaces¹

Quando uma onda de choque, propagando-se em um meio

rochoso, encontra uma face livre, quase toda energia é refletida na forma de onda de tração.

EXPANSÃO DOS GASES DA DETONAÇÃO

A expansão dos gases ocorre durante e após a propagação das ondas de choque. A influência da expansão dos gases sobre o mecanismo de fragmentação é motivo de controvérsias. Alguns acreditam que, durante o trabalho de expansão dos gases, a rede de fraturas no material já esta terminada, outros acreditam que, durante o trabalho de expansão dos gases, o fraturamento intenso do material está apenas no início. Porém, em ambos os casos, a expansão dos gases, através das descontinuidades e das fraturas na rocha, é responsável pelo lançamento do material fraturado.

Ainda não está bem claro como os gases se expandem através da rocha fraturada. Acredita-se que eles se expandam através das fraturas e descontinuidades do material e que também causem algumas fraturas onde o material apresente uma baixa resistência.

Quando o material entre a coluna explosiva e as faces livres da banca apresenta descontinuidades e rachaduras muito largas, os gases a alta pressão rapidamente se expandem para a atmosfera, diminuindo o tempo de confinamento desses gases e, conseqüentemente, o lançamento do material.

O tempo de confinamento dos gases varia significativamente em função do tipo de material rochoso, da quantidade e tipo de explosivo utilizado, da quantidade e tipo de material utilizado no tamponamento do furo e da distância



entre a coluna explosiva e a face livre da bancada. Os tempos de confinamento podem variar de 5 a 110 ms.

MOVIMENTO DO MATERIAL FRAGMENTADO

A movimentação do material é a última etapa no processo de fratura da rocha. A fragmentação já foi realizada pela propagação das ondas de choque e pela pressão exercida na expansão dos gases, porém essa fragmentação ainda será aumentada pela colisão entre os fragmentos durante o lançamento do material e pelo impacto do material com o solo.

PERFIL DE FRATURAMENTO DO MATERIAL

A distribuição das fraturas na rocha, a partir do furo onde foi carregado o explosivo, pode ser caracterizada por quatro zonas ilustradas na figura C.4.

A zona de esmagamento é a região mais próxima da carga explosiva e nela as pressões geradas pela detonação excedem de 40 a 400 vezes a resistência a compressão do material. Essas altas pressões pulverizam e causam intensa fragmentação nas paredes do furo onde foi carregado o explosivo. Essa região também pode ser denominada como zona hidrodinâmica, na qual a resistência elástica do material torna-se insignificante.

Próximo à zona de esmagamento, encontra-se a zona de fraturamento intenso ou zona não linear. Nessa região, o material pode sofrer esmagamento, fraturamento ou deformações plásticas.



As fraturas, nessa região, são causadas pelas forças de compressão e tração (tensões tangenciais) provenientes das ondas de choque e pelas pressões causadas pela expansão dos gases da detonação.

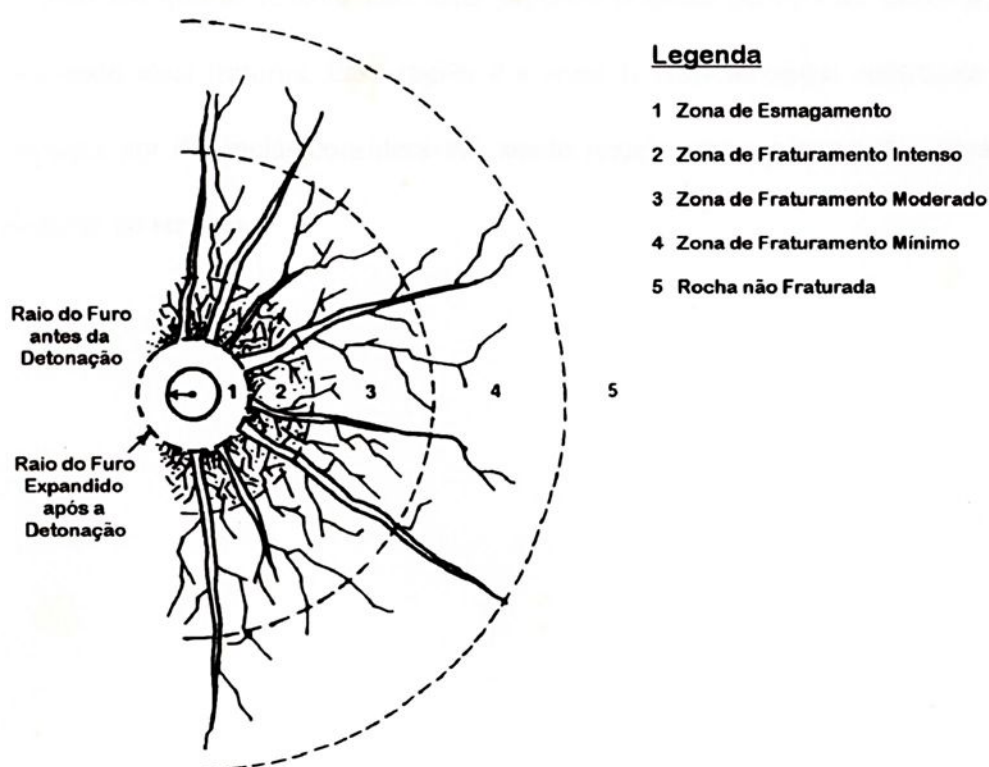


FIGURA C.4 - Perfil de fraturamento do material¹

As zonas 3 e 4 são as zonas elásticas. Nessas regiões, as tensões e as fraturas ocorrem de forma mais branda, pois grande parte da energia liberada na detonação já foi dissipada na forma de calor e atrito ou utilizada para fraturar o material nas regiões 1 e 2.

Nas regiões 3 e 4, a resistência à compressão do material supera

as forças de compressão das ondas de choque. As fraturas são causadas pelas forças de tração pois, nas rochas a resistência à tração é menor do que a resistência à compressão.

Com a diminuição da intensidade das ondas de choque, atinge-se o ponto em que as tensões não mais superam o limite elástico do material, não ocorrendo mais fraturas. Essa região é a zona 5, onde as ondas continuam a se propagar por distâncias consideráveis, sendo responsáveis apenas pelas vibrações causadas ao terreno.



