

TESE

38

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação

ITAJUBÁ - MG



Estudo de Interação Explosiva - Mate-  
rial Poroso e Controle das Vibrações  
provocadas por explosões



Cap. Eng.º José Ferreira Rocha

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO

ITAJUBÁ - MG

ESTUDO DE INTERAÇÃO EXPLOSIVO-MATERIAL ROCHO-  
SO E CONTROLE DAS VIBRAÇÕES PROVOCADAS POR  
EXPLOSÕES

"Tese apresentada à Escola Federal  
de Engenharia de Itajubá, para  
Obtenção do Título de MESTRE EM  
CIÊNCIAS".

Cap. Engº JOSÉ FERREIRA ROCHA

\* Itajubá, 20/12/1.973 \*



Class. ~~F 73~~ 622.235:534.83(043.2)

Cutt. R 672 e

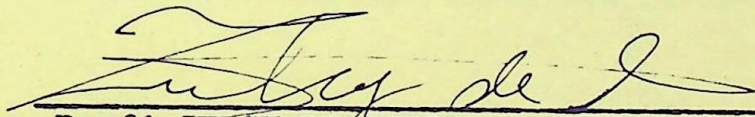
Tombo 38

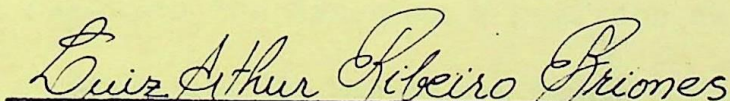
Exm<sup>o</sup> Sr

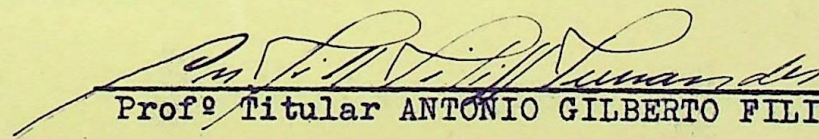
COORDENADOR DOS CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO

A Comissão de Exame da Tese de Mestrado ESTUDO DE INTERAÇÃO EXPLOSIVO-MATERIAL ROCHOSO E CONTROLE DAS VIBRAÇÕES do candidato JOSÉ FERREIRA ROCHA, em Sessão de Decisão / realizada após a defesa de Tese em 20/12/73, às 10 horas, decidiu atribuir o conceito 2 (dois) à mesma, na forma do Artigo 16 do Regulamento de Tese de Mestrado, ou seja, APROVADO.

E F E I, 20 de dezembro de 1 973

  
Prof<sup>o</sup> ZULCY DE SOUZA - E F E I

  
M.Sc. LUIZ ARTHUR RIBEIRO BRIONES - I M E

  
Prof<sup>o</sup> Titular ANTONIO GILBERTO FILIPPO  
FERNANDES - F E G

## A G R A D E C I M E N T O S

O autor gostaria de agradecer às seguintes pessoas e organizações:

- Gen Div Eng<sup>o</sup> Militar José Alves Martins, ex-Diretor da FPV, pelo inestimável apoio e, sobretudo, pela confiança e pelo estímulo, características próprias de sua pessoa, em tudo que diga respeito ao interesse do Exército e do Brasil, mormente no que concerne à Ciência e à Tecnologia.

- Gen Bda Eng<sup>o</sup> Militar Carlos Mário Tabert, Diretor da FPV, pelo interesse e o apoio indispensáveis à elaboração do presente trabalho.

- Prof<sup>o</sup> Zulcy de Souza, da EFEI, pelo muito que fez não só durante o curso de mestrado, mas, especificamente, na orientação de Tese.

- Funcionário Daniel de Souza Araujo, da FPV, pelo carinho e interesse demonstrados nos trabalhos de datilografia e encadernação.

- Funcionários do Gabinete de Estudos da FPV pelo esmero e carinho na execução dos desenhos e gráficos deste trabalho.

- Instituto de Pesquisas Tecnológicas, na pessoa dos Engenheiros Carlos Manoel Nieble e Hugo Takahashi, pelas informações / particulares prestadas.

- Companhia Vale do Rio Doce, Companhia Paraíba de Cimento Portland, Companhia Hidrelétrica do São Francisco, Companhia / Construtora Camargo Correa, pelas facilidades criadas no levantamento de dados experimentais.

I N D I C E

	<u>Página</u>
<u>CAPITULO I</u>	1
1.1 - Considerações preliminares	1
1.2 - Conceito de Explosivos e Mecanismo de Detonação	2
<u>CAPITULO II - CARACTERÍSTICAS DOS EXPLOSIVOS</u>	6
2.1 - Equação de decomposição	6
2.2 - Natureza da combustão	7
2.3 - Força do Explosivo	9
2.4 - Volume gasoso	13
2.5 - Velocidade de detonação	15
2.6 - Pressão de detonação	18
2.7 - Densidade do explosivo	25
2.8 - Potência de um explosivo	25
2.9 - Impedância de Detonação	27
<u>CAPITULO III - INTERAÇÃO EXPLOSIVO-MATERIAL ROCHOSO</u>	30
3.1 - Ondas Elásticas de Tensão	30
3.1.1. - Relação entre a velocidade de partícula e a tensão	31
3.1.2 - Relação entre deformação e velocidade de partícula	31
3.1.3 - Relação para a Velocidade da onda	32
3.1.4 - Reflexão de uma onda numa superfície livre	33
3.2 - Ondas de choque	33
3.3 - Ondas de rarefação	34
3.4 - Choque de compressão e equações de estado	34
3.4.1 - Relações na frente da onda de choque	34
3.4.2 - Curvas de Hugoniot	36
3.5 - Interação de ondas planas simples	37
3.5.1 - Transmissão de uma onda de choque	38
3.5.2 - Indução de onda de choque num material pela detonação de um explosivo	42

	<u>Página</u>
<u>CAPITULO IV - VIBRAÇÕES DO TERRENO</u>	46
4.1 - Generalidades	46
4.2 - Introdução Teórica	47
4.2.1 - Compressão e tração	47
4.2.2 - Cisalhamento	48
4.2.3 - Flexão	49
4.3 - Critérios de Interpretação	50
4.3.1 - Redução das acelerações às escalas sismológicas	50
4.3.2 - Critério da intensidade de oscilação	51
4.3.3 - Critério da Escala PAL	51
4.3.4 - Critério de H. W. Koch	52
4.3.5 - Critério de R. Kohler	53
4.3.6 - Critério de F. J. Grandell	53
4.3.7 - Critério de Langefors, Kihlstron e Westerburg	54
4.3.8 - Critério de Edwards e Northwood	55
4.3.9 - Critério de Duvall e Fogelson	55
4.3.10 - Critério de James Devine	55
4.3.11 - Critério de Ambrasseys e Hendrom	55
4.3.12 - Critério Suéco	56
<u>CAPITULO V - LIMITAÇÃO DAS VIBRAÇÕES NO TERRENO</u>	56
5.1 - Generalidades	56
5.2 - Métodos para limitação das Vibrações	58
5.2.1 - Prefissuramento	58
5.2.2 - Defasamento na detonação	59
5.3 - Redução das Vibrações	63
5.4 - Medidas de Campo e avaliação de resultados	66
5.5 - Determinação da relação carga-distância	70
5.5.1 - Fórmula de Theonem e Windes	71
5.5.2 - Fórmula de Carder e Cloud	71
5.5.3 - Fórmula de Crandell	71(53)
5.5.4 - Fórmula de Deffet	71
5.5.5 - Fórmula de Medvedev e Lyamzina	71

	<u>Página</u>
<u>CONCLUSÕES</u>	73
<u>APENDICE</u>	75
1. Companhia Vale do Rio Doce	75
2. Barragem de Paraibuna (CESP)	80
3. Usina Hidrelétrica de Paulo Afonso (CHESF)	81
- Diagrama P-u (Fig. A-2)	82
- Propriedades de alguns explosivos (Tab. A-3)	83
- Propriedades mecânicas de rochas (Tab. A-4)	84
- Brecha vulcânica (Tab. A-5)	85
- Granito (Tab. A-6)	85
- Calcáreo (Tab. A-7)	86
- Tufo Basáltico (Tab. A-8)	86
- Aluvião (Tab. A-9)	87
- $V_o$ e S para a Eq. 3.20 (Tab. A-10)	87
- Constantes para uso nas relações de Rankine - Hugoniot e Mie-Gruneisen	88
<u>SIMBOLOGIA</u>	89
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	91

## CAPITULO I

### 1.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

O tema da presente Tese, "ESTUDO DE INTERAÇÃO EXPLOSIVO-MATERIAL ROCHOSO E CONTROLE DAS VIBRAÇÕES PROVOCADAS POR EXPLOSIÕES", é uma tentativa de correlacionamento entre os Fundamentos Termodinâmicos dos Explosivos Industriais e as Técnicas de Desmonte de Rochas e Interpretação de Ensaio Dinâmicos em Maciços Rochosos, visando maior rendimento e economia nos desmontes, aliados à segurança nas detonações das cargas explosivas.

É uma decorrência da necessidade de aproximarmos os dois lados do problema, uma vez que o que observamos no Brasil é a existência de engenheiros civis, engenheiros de minas ou engenheiros mecânicos, especialistas em desmontes, e engenheiros especialistas / na tecnologia dos explosivos (estes em grande minoria), uns desconhecendo a área dos outros.

Procuraremos ordenar e ampliar os estudos de vários / autores estrangeiros, adaptando, quando possível, às condições e possibilidades nacionais.

Para atingirmos o nosso objetivo, desenvolveremos o assunto nas seguintes partes principais:

1. Fundamentos Termodinâmicos dos Explosivos.
2. Interação Explosivo-Material Rochoso, como extensão da interação de Materiais.
3. Vibrações do Terreno, com detonações.
4. Alguns resultados práticos na Indústria de Construções e de Mineração e dados sobre explosivos e rochas (Apendice).

Todas as unidades estão no sistema internacional.

## 1.2 - CONCEITO DE EXPLOSIVOS E MECANISMO DA DETONAÇÃO

Explosivos são substâncias ou misturas de substâncias capazes de se transformarem quimicamente em gases, com extraordinária rapidez e desenvolvimento de calor, produzindo elevadas pressões e / considerável trabalho, resultante da energia cinética liberada em ondas de choque.

Para que uma substância tenha caráter explosivo é necessário que apresente uma certa instabilidade, de modo a que uma pequena quantidade de energia subministrada à mesma, seja suficiente / para a sua transformação.

Não é necessário que esse impulso seja exercido sobre toda a massa explosiva. Basta que uma pequena porção o receba. Esta parte é então iniciada e a energia liberada é, em geral, suficiente / para iniciar as camadas adjacentes, e assim sucessivamente até que toda massa o seja.

Este impulso, que provoca a colisão entre as moléculas da substância explosiva, pode ser de várias origens, como: calor, choque, atrito, etc.

Certos explosivos são iniciados por meio de chama, ou outros por meio de choque. A maior parte dos explosivos, como as dinamites, por exemplo, quando submetida ao calor ao ar livre, podem se inflamar sem detonar. Eles exigem, para tal, uma forte pressão, como a produzida pela explosão de uma pequena quantidade de explosivo sensível à chama, chamados de explosivos iniciadores.

Como vimos na definição, a transformação dos explosivos em gases é uma reação química. O fenômeno usualmente denominado / explosão pode ocorrer em duas formas basicamente diversas: Deflagração ou Detonação. A primeira corresponde a uma combustão rápida. A segunda é uma reação química com velocidade muito elevada.

Para melhor entendermos a iniciação e o curso de uma reação química exotérmica apresentamos a seguir uma síntese da teoria da colisão, que resulta da equação de Schrödinger, que dá o método de cálculo das energias permitidas dos sistemas atômico e molecular e da lei de distribuição de Boltzmann, que mostra como um certo número de

partículas se distribuem em níveis de energia permitidos.

É possível calcular com quanta frequência duas moléculas colidirão sob dadas condições de concentração e temperatura, e verifica-se que, na maioria dos casos, somente pequeníssima fração de tais colisões resulta em reação efetiva (não raro apenas 1 em  $10^{15}$  colisões). Para explicar isto, sugere-se que a reação ocorrerá somente quando duas partículas colidirem com energia maior do que determinada quantidade mínima. Esta energia mínima exigida, chamada energia de ativação, é necessária para ajudar a romper as ligações desde que, em geral, a estabilidade das ligações rompidas se perde antes que estejam completamente formadas as novas ligações estáveis. Pode-se representar a situação em termos de perfil de energia para a reação (Fig. 1.1).

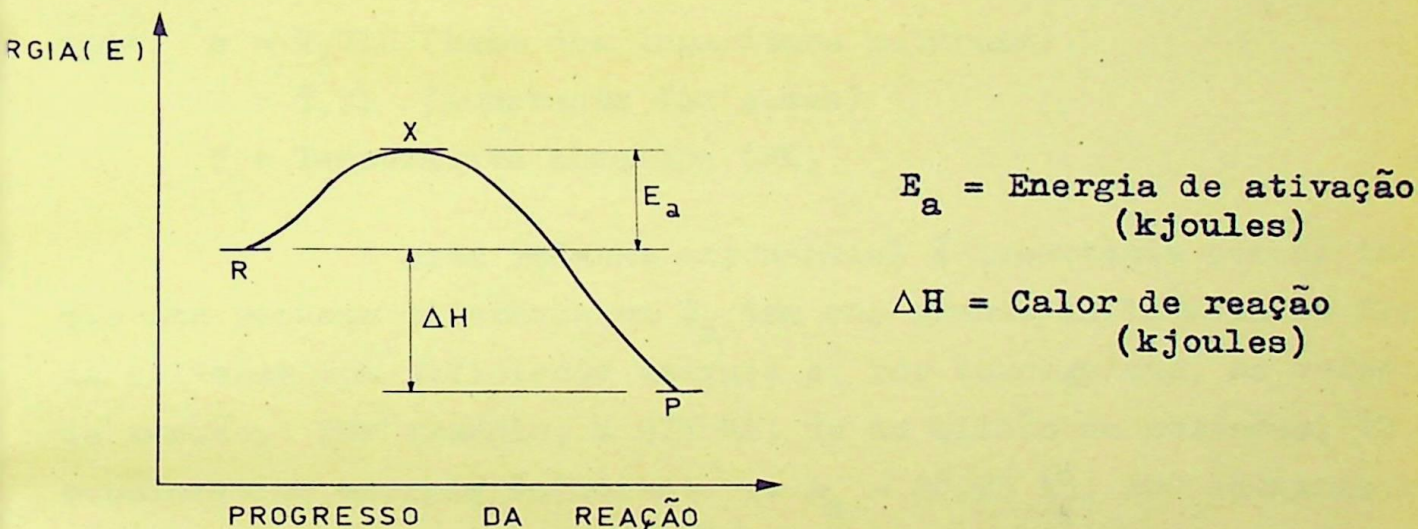
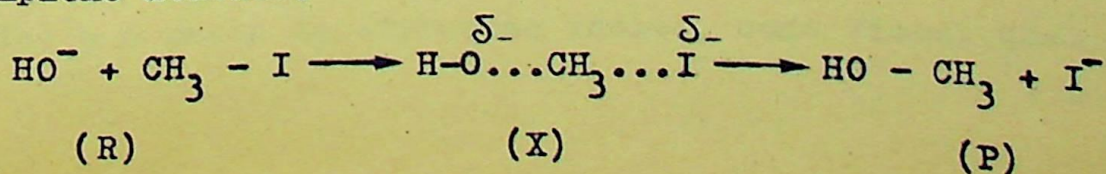


Fig. 1.1 - Diagrama da energia durante o progresso de uma reação exotérmica.

Assim, numa reação simples em que as substâncias de partida (R) são menos estáveis do que os produtos (P), durante a reação atingir-se-á um ponto X que tem energia maior do que ambos, e que, às vezes, é chamado "complexo ativado".

Por exemplo, na reação de substituição entre  $\text{OH}^-$  e iodeto de metila, em certa altura durante o processo da reação aparece o complexo ativado.



O complexo ativado, X, não é o composto intermediário mas simplesmente um estado de transição, decorrente da disposição de átomos tal que sua energia é mais alta do que a de qualquer outra ao longo do caminho da reação.

A diferença entre a energia média das substâncias reagentes e a energia deste complexo ativado é  $E_a$ , a energia de ativação, e somente aquelas moléculas da substância reagente que tiverem / esta quantidade de energia,  $E_a$ , mais do que a média poderão reagir ao colidirem.

Boltzmann<sup>(1)</sup> mostra que a fração de moléculas que possuem energia  $E_a$  ou maior é:

$$e^{-E_a/RT} = \text{Fator de energia} \quad (1.1)$$

onde:  $e = 2,718$  (base dos logaritmos naturais)

$R = 8,31$  (constante dos gases)

$T =$  Temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{K}$ )

Esta relação exponencial é importante porque indica / que uma pequena diferença em  $E_a$  tem uma grande influência na fração / de colisões com suficiente energia e, por conseguinte, na velocidade / de reação. Por exemplo, a  $275^{\circ}\text{K}$ , de um milhão de colisões, 10.000 / subministram energia suficiente se  $E_a = 20,93$  kj, 100 subministram / energia suficiente se  $E_a = 41,86$  kj e somente uma possui suficiente / energia se  $E_a = 62,79$  kj. Isto significa que (mantendo-se as outras / condições reacionais) a reação com  $E_a = 20,93$  kj será 100 vezes mais / rápida que uma com  $E_a = 41,86$  kj e 10.000 vezes mais rápida que / uma com  $E_a = 62,79$  kj.

Assim sendo, a velocidade de uma reação<sup>(2)</sup> pode ser / expressa da seguinte maneira:

$$\text{Velocidade} = Z e^{-E_a/RT} \quad (1.2)$$

em que  $Z$  é o número de colisões na unidade de tempo (por exemplo, por segundo) e o resto da expressão indica, como vimos, qual a fração das

colisões que resultou em reação.

Algumas reações obedecem muito bem a esta equação da velocidade. Todavia, pode-se mostrar, na maioria dos casos, que algumas colisões que se dão com a quantidade requerida de energia não resultam em reação, porque as moléculas colidem de maneira errada. / Somenete em determinada fração F das colisões, os átomos estarão dispostos corretamente para que a reação se dê, mesmo que exista ener- / gia suficiente; por isso, este fator de probabilidade, ou fator de orientação <sup>(2)</sup>, é geralmente também incluído na equação, cuja forma final é:

$$\text{Velocidade} = F Z e^{-E_a/RT} \quad (1.3)$$

ou seja:

$$\text{Velocidade} = \left[ \begin{array}{c} \text{Fator de} \\ \text{Orientação} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} \text{Frequência} \\ \text{de} \\ \text{Colisões} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} \text{Fator de} \\ \text{Energia} \end{array} \right]$$

Alterando-se a temperatura, mudar-se-á ligeiramente a frequência de colisão Z. O principal efeito da elevação de tempe- / ratura consiste no aumento da fração de moléculas que possuem ener- / gia suficiente para reagir. Por isto é possível determinar a ener- / gia de ativação de uma reação estudando o efeito da temperatura so / bre a velocidade. O valor de  $E_a$  informa algo a propósito das forças ou energias das diversas ligações no complexo ativado, enquanto que o valor de F nos diz algo acerca de quão sensível é a reação quanto ao alinhamento preciso das moléculas reagentes. Assim, pela aplica- / ção da teoria da colisão e pelo estudo de como a velocidade da rea- / ção depende da temperatura é possível obter informação relativa ao mecanismo pormenorizado de uma fase distinta da reação, como, por / exemplo, a iniciação.

No caso dos explosivos convencionais, a energia de / ativação é fornecida por uma espoleta ou cordel detonante. Outros ex / plosivos necessitam de iniciadores mais fortes. Estes iniciadores / são chamados de "boosters". Mais adiante apresentaremos a estrutura e funcionamento de uma espoleta, bem como do cordel detonante.

## CAPITULO II

### CARACTERISTICAS DOS EXPLOSIVOS

Dentre as diversas características termodinâmicas e físicas dos explosivos, trataremos no presente capítulo, daquelas / que mais influem e que mais nos ajudam na interpretação do fenômeno de uma detonação em um maciço rochoso.

Na detonação de furos em rochas, deveremos encarar / uma série de parâmetros interdependentes tais como:

- Energia disponível ou Força do Explosivo
- Volume gasoso
- Velocidade de detonação
- Pressão de detonação
- Densidade do explosivo
- Impedância de detonação

A determinação das características dos explosivos pode ser feita analítica e experimentalmente. A sua importância reside no fato de nos permitirem, em primeira aproximação, fazer uma / idéia das propriedades do explosivo em estudo.

O cálculo da maioria dessas características é baseado na equação de decomposição dos explosivos, motivo pelo qual iniciaremos pelo estudo deste problema.

#### 2.1 - Equação de decomposição

A equação de decomposição de uma substância explosiva é a representação qualitativa e quantitativa de sua transformação. / Sendo uma combustão e tendo em vista que os produtos de transformação dependem da natureza da mesma, a equação de decomposição é uma função da quantidade de oxigênio disponível para a combustão. Deste modo podemos ter:

- Explosivos de combustão completa
- Explosivos de combustão incompleta

conforme seja a quantidade de oxigênio suficiente ou não para a quei

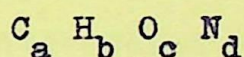
ma total do combustível.

## 2.2 - Natureza da combustão

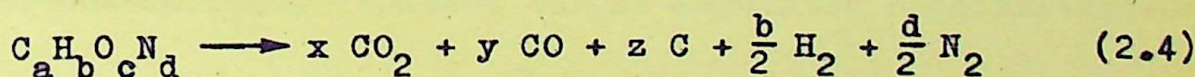
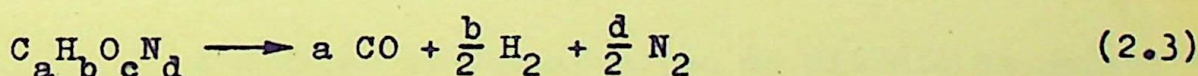
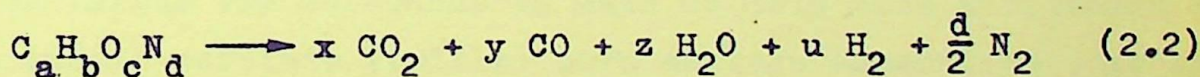
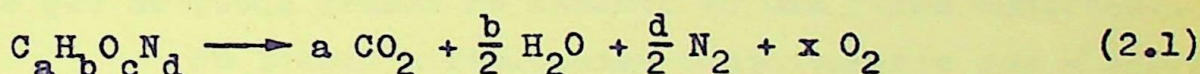
A pesquisa da natureza da combustão consiste na determinação do teor relativo de oxigênio existente na substância.

Esta operação, também denominada balanço de oxigênio (BO) é de grande importância prática, não só tendo em vista a segurança (evitar formação de monóxido de carbono, por exemplo) mas também / porque ela está intimamente relacionada com a energia de explosão, o poder de rutura e outras propriedades da substância explosiva.

As substâncias explosivas são, na sua maioria, constituidas dos elementos organógenos. Assim, consideremos um explosivo / de fórmula:



Podemos ter as seguintes equações de decomposição:



conforme a combustão seja completa ou incompleta. Na eq. (2.1) podemos ter:

$$c = 2a + \frac{b}{2} . \quad \text{Logo } x = 0 \quad (BO = 0)$$

ou

$$c > (2a + \frac{b}{2}) . \quad \text{Logo } x = \frac{1}{2} [c - (2a + \frac{b}{2})] \quad (BO > 0)$$

o que significa, no último caso, uma substância com excesso de oxigênio (balanço de oxigênio positivo).

A Eq. (2.3) representa uma combustão incompleta, isto é, com balanço de oxigênio negativo, ou seja:

$$c < (2a + \frac{b}{2}) \quad \text{para } c > a$$

Na equação (2.3) temos também uma combustão incompleta, sendo  $c = a$ .

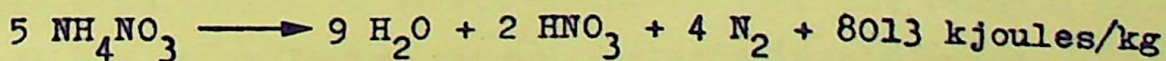
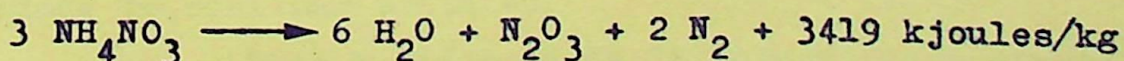
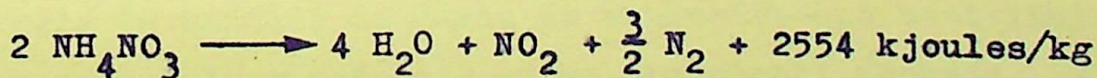
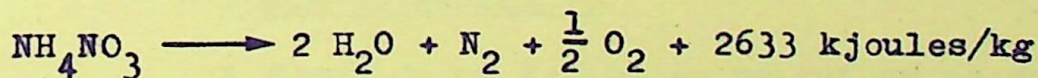
A equação (2.4) é típica de combustão incompleta, quando  $c < a$ . A maior tendência para a formação dos compostos do carbono faz com que apareçam, entre os produtos da decomposição, gás carbônico, monóxido de carbono e carbono (fuligem).

Ultimamente, o nitrato de amônio, até então usado secundariamente, junto à dinamite, passou a ser estudado isoladamente. Data de 1947, o início desta verdadeira revolução na indústria do desmonte de rochas.

Na realidade, o nitrato de amônio já era conhecido antes desta data e os suecos Olsson e Norbin já tinham feito experiências após Nobel haver descoberto a dinamite. Somente depois de 1950, quando foi possível produzir nitrato de amônio não-higroscópico (coated prills) é que se pode pensar no assunto de uma forma comercial.

No Brasil a Petroquisa conjuntamente com a Fábrica - Presidente Vargas vem estudando há mais de dois anos a obtenção de nitrato de amônio perolado (prills) para emprego específico como explosivo.

A equação de decomposição do nitrato de amônio é difícil de ser determinada. Podemos ter as seguintes possibilidades:



Sua perfeita utilização se dá quando misturado com 5 a 6% de fuel oil (óleo diesel - densidade 0,83 a 0,85), constituindo



o explosivo chamado ANFO. Quando da explosão do nitrato de amônio - com óleo diesel temos, principalmente, a formação de CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (vapor).

Na tabela (2.1) abaixo, apresentamos o balanço de oxigênio de algumas substâncias normalmente usadas na fabricação de explosivos.

SUBSTÂNCIA	Oxigênio disponível (kg/kg)	SUBSTÂNCIA	Oxigênio Disponível (kg/kg)
Amido.....	- 1,18	Nitrato de amônio (99 %).....	+ 0,19
Alumínio .....	- 0,89	Nitrato de sódio .....	+ 0,47
Enxofre .....	- 1,00	Nitrocelulose 11,96 % N .....	- 0,38
Carbono .....	- 2,66	Nitroglicerina .....	+ 0,03
Dinitroglicerina..	- 0,29	Óleo combustível .....	- 3,25
Dinitrotolueno ...	- 1,14	Óleo diesel .....	- 3,17
Dinitroxilol .....	- 1,30	Papel (involucro de cartuchos)	- 1,30
Glicerina .....	- 1,22	Serragem purificada .....	- 1,37
Farinha de trigo..	- 1,32	Trinitrotolueno .....	- 0,74
Mononitrotolueno..	- 1,81	Serragem grosseira .....	- 1,35
Carbon. de Cálcio.	0,00		

Tab. 2.1 - Balanço de Oxigênio de algumas substâncias

### 2.3 - Força do explosivo

A força de um explosivo se refere ao conteúdo de energia da unidade de massa do explosivo que contribui, por sua vez, para desenvolver potência em um recipiente fechado. É, pois, a capacidade de realizar trabalho.

Dada a dificuldade de determinação direta, a força é sempre considerada em termos comparativos, com relação ao efeito produzido por um explosivo padrão, principalmente quando queremos determinar a força de um explosivo altamente insensível, como é o caso das Lamas Explosivas (Slurry), que são misturas gelatinosas ou líquidas de nitrato de amônio com outros sensibilizadores tais como trotil (TNT), pólvora, pó de alumínio, etc.

Teoricamente, o conteúdo de energia de um explosivo (3)

é, em valor absoluto, dado pela seguinte expressão:

$$E = \frac{5}{6} \frac{Q_e}{Q_p} + \frac{1}{6} \frac{v_e}{v_p} \quad (2.5)$$

onde: E = Energia do Explosivo (adimensional)

$Q_e$  = Calor de combustão do explosivo (kjoules/kg)

$v_e$  = Volume gasoso do explosivo ( $m^3/kg$ )

$Q_p$  = Calor de combustão do padrão (kjoules/kg)

$v_p$  = Volume gasoso do padrão ( $m^3/kg$ )

O calor de combustão de um explosivo, também chamado - calor de detonação ou calor de explosão é o calor desenvolvido pela transformação da substância explosiva. No caso dos combustíveis, esta característica é denominada poder calorífico.

O seu cálculo é baseado no princípio da termodinâmica/ estabelecido por Hess e conhecido como princípio do estado inicial e do estado final, e nas suas consequências, os teoremas de Berthelot.

O princípio de Hess diz que: "O calor desenvolvido nu ma transformação química depende apenas dos estados inicial e final, quaisquer que sejam os estados intermediários".

Os teoremas de Berthelot são os seguintes:

1º)- "A quantidade de calor absorvida na decomposição de uma substância é precisamente igual à quantidade de calor despre ndida na sua formação".

2º)- "A quantidade de calor despreendida ou absorvida / para se passar de um sistema composto a outro também composto é / igual à diferença entre o somatório dos calores de formação dos com postos no estado final e a soma dos calores de formação dos compos- / tos no estado inicial".

Assim, podemos facilmente determinar o calor de combus tão através da equação de decomposição e dos calores de formação dos produtos da explosão e da substância original.

Como podemos realizar a transformação ao ar livre ou em vaso fechado, teremos:

- Calor de combustão a pressão constante
- Calor de combustão a volume constante

O calor desenvolvido e o trabalho realizado por um explosivo, correm às custas da energia interna da substância explosiva. Assim, o calor de combustão a volume constante corresponde ao decréscimo da energia interna e o calor de combustão a pressão constante, / ao decréscimo da entalpia na transformação.

A determinação experimental do calor de combustão é / feita numa bomba calorimétrica e seus acessórios, utilizando-se a / equação geral da calorimetria.

Na tabela (2.2) abaixo, apresentamos os calores de com bustão de algumas substâncias explosivas.

EXPLOSIVO	CALOR DE COMBUSTÃO (kjoules/kg)
Nitroglicerina .....	6340
Gelatina Explosiva .....	6750
Nitrocelulose .....	9490
Ácido Pícrico .....	3390
Pólvora Negra .....	2867
Nitrato de amônio .....	2637
Fulminato de mercúrio ....	1716

Tab. 2.2 - Calor de combustão de algumas explosivos

O segundo termo da Eq. (2.5) é o volume gasoso, característica que definiremos no item (2.4).

A determinação experimental da força é feita indiretamente por meio de:

a) Bloco de chumbo ou Bloco de Trauzl

Consiste em medirmos a cratera produzida pela deto nação de 10 g do explosivo em um bloco de chumbo de primeira fusão, à temperatura de 15 a 20°C e compararmos com a cratera produzida por 10 gramas de gelatina explosiva (92% de nitroglicerina e 8% de nitrocelu lose) ou por 10 g de TNT.



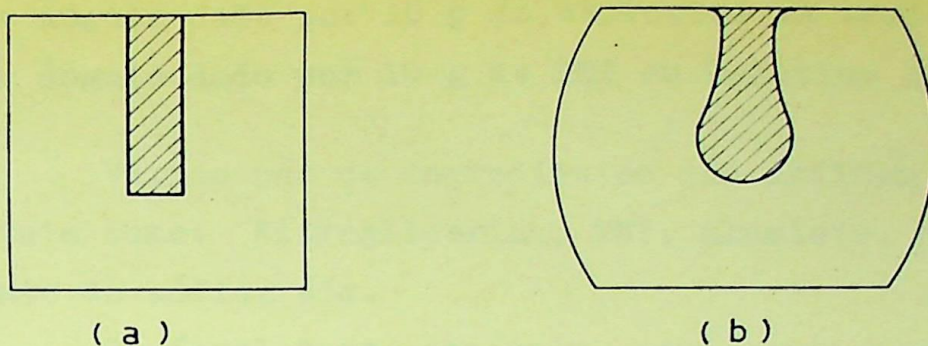


Fig. 2.1 - Bloco de Trauzl: antes (a) e depois do teste (b)

b) Morteiro balístico.

Este método é considerado como o método mais exato para a determinação da força de um explosivo.

Consiste em medir o deslocamento angular produzido pela detonação de 10 g do explosivo em estudo e comparar com o deslocamento produzido pela detonação de 10 g de explosivo padrão (TNT ou Gelatina Explosiva).

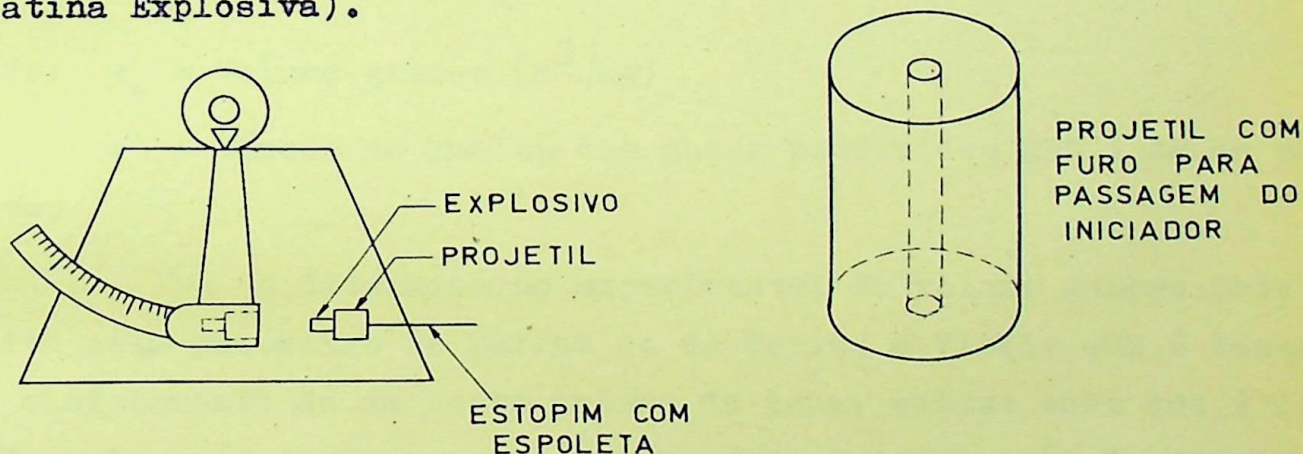


Fig. 2.2 - Morteiro balístico

Chama-se Valor Tritão ao número de gramas de TNT requerido para produzir o mesmo deslocamento angular do morteiro conseguido com 10 g de explosivo sob teste.

A força em termos de percentagens é dada pela seguinte expressão:

$$f(\%) = \frac{1 - \cos \alpha}{1 - \cos \beta} \times 100 \quad (2.6)$$

onde:  $\alpha$  = ângulo dado por 10 g do explosivo em teste

$\beta$  = ângulo dado por 10 g de TNT ou Gelatina Explosiva

Vários são os ingredientes que influem na força do explosivo, tais como: Nitroglicerina, TNT, alumínio, nitrato de amônio, nitrato de sódio, etc.

No final deste capítulo, apresentaremos alguns valores de forças de explosivos correlacionando-os com outras características.

#### 2.4 - Volume Gasoso

Entendemos por volume gasoso de um explosivo, o volume de gases produzido pela decomposição de 1 kg do explosivo, nas condições normais de pressão e temperatura. É, portanto, o volume/específico, e pode ser obtido, analiticamente, pela seguinte expressão:

$$v_e = 22,4 \times 10^{-3} n \quad (2.7)$$

onde:  $v_e$  = Volume gasoso ( $m^3/kg$ )

$n$  = Número de kmoles dos gases produzidos por 1 kg de explosivo.

A determinação experimental do volume gasoso pode ser feita pelo gasômetro de Sarrau ou de Sarrau e Vielle que é baseado no deslocamento de um certo volume de água, volume esse que é deslocado pela ação dos gases produzidos pela decomposição de determinada massa da substância cujo volume gasoso procuramos.

O gasômetro (Fig. 2.3) consiste essencialmente de uma cuba cilíndrica (A) cheia de mercúrio sobre a qual se adapta uma campânula de vidro (C) capaz de subir ou descer ao longo da haste (h). Esta campânula se comunica com a câmara de explosão por meio de um tubo flexível (t'). Por sua vez ela se acha envolvida por uma segunda campânula, também de vidro, ( $C_1$ ), maior que a primeira e fixa ao bordo superior da cuba (A).

Dispõe ainda de um funil (F), de um manômetro (M) e de um termômetro (t).

Para fazer uma determinação procedemos do seguinte modo:

Baixamos a campânula interior até que seus bordos mergulhem completamente no mercúrio; enchemos de água destilada o espaço compreendido entre as campânulas (C) e (C<sub>1</sub>), até a saída (t"). Em seguida iniciamos o explosivo. Os gases produzidos passam pelo tubo de ligação para a campânula (C), obrigando-a a elevar-se. Com esse movimento é expulso certo volume da água que se encontrava entre as duas campânulas, a qual é recolhida em vaso graduado. Verificamos o seu volume (V<sub>1</sub>), tomamos a pressão (P) na campânula interior e a temperatura (t) da água da campânula (C<sub>1</sub>)

Se (m) é a massa do explosivo, o volume (v<sub>e</sub>), será da do por:

$$v_e = (V_1 - V_i) \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{P}{760} \cdot \frac{1}{m} \quad (2.8)$$

onde V<sub>i</sub> = volume dos gases, correspondente ao iniciador à pressão (P) em mm Hg e temperatura (t) em (°C).

Na fig. (2.3) abaixo apresentamos esquema do gasômetro de Sarrau, muito comum nos laboratórios de ensaios de explosivos.

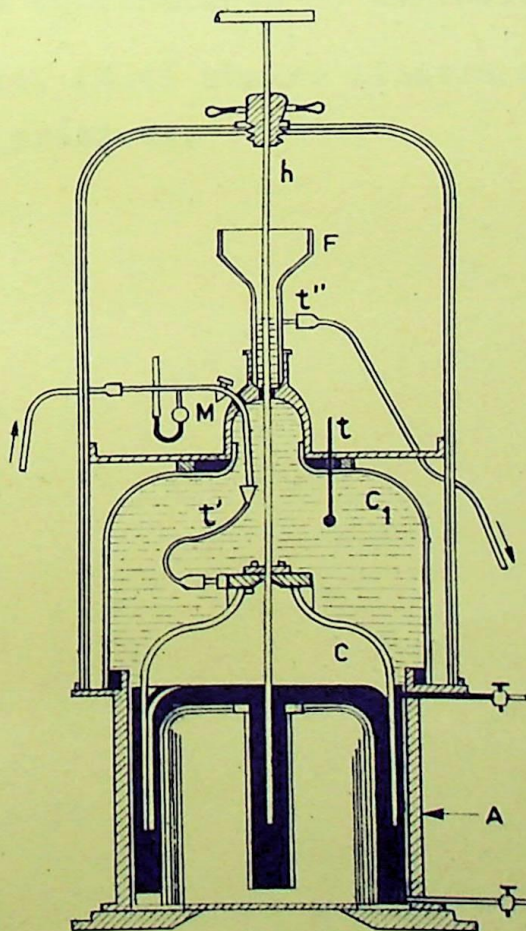


FIG. 2.3- GASÔMETRO DE SARRAU E VIEILLE

Como exemplo, apresentamos alguns valores do volume g<sub>a</sub>so (m<sup>3</sup>/kg) de alguns explosivos:

	m <sup>3</sup> /kg
Nitroglicerina.....	0,712
Nitrocelulose.....	0,859
Gelatina Explosiva .....	0,714
Nitrato de amônio.....	0,937

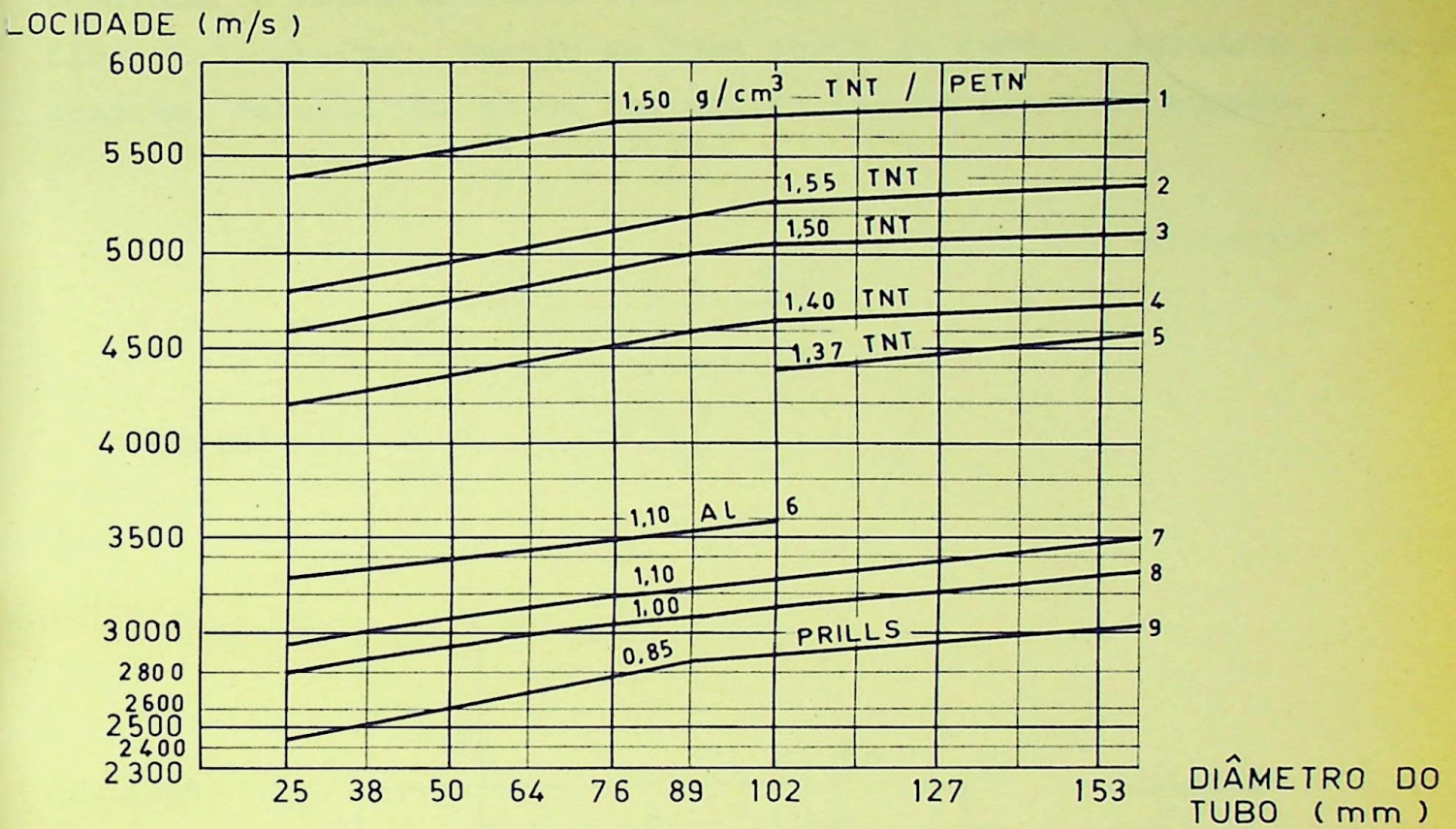
## 2.5 - Velocidade de detonação

Denominamos velocidade de detonação de um explosivo à velocidade com que a onda de detonação percorre uma coluna explosiva.

A velocidade de detonação depende principalmente:

- Da formulação do explosivo e granulometria dos ingredientes.
- Da densidade do explosivo (aumenta, geralmente, com a densidade)
- Do diâmetro do furo que o contém, aumentando com este.
- Do confinamento do explosivo

A fig. (2.4) abaixo ilustra muito bem essas influên-/  
cias, com valores práticos.



CURVAS: { 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - SLURRY  
7 - 8 - 9 - ANFO

IG. 2.4 - VELOCIDADE DE DETONAÇÃO DE SLURRY E ANFO EM FUNÇÃO DO DIÂMETER E DA DENSIDADE DO EXPLOSIVO.

A determinação prática da velocidade pode ser feita - por meio de cronógrafos eletrônicos ou pelo método de Dautrich, convencional e universalmente conhecido, o qual é baseado no esquema da fig. (2.5) abaixo. Quando as duas ondas do cordel detonante se en- / contram, resulta uma marca bem nítida (E) na placa de chumbo.

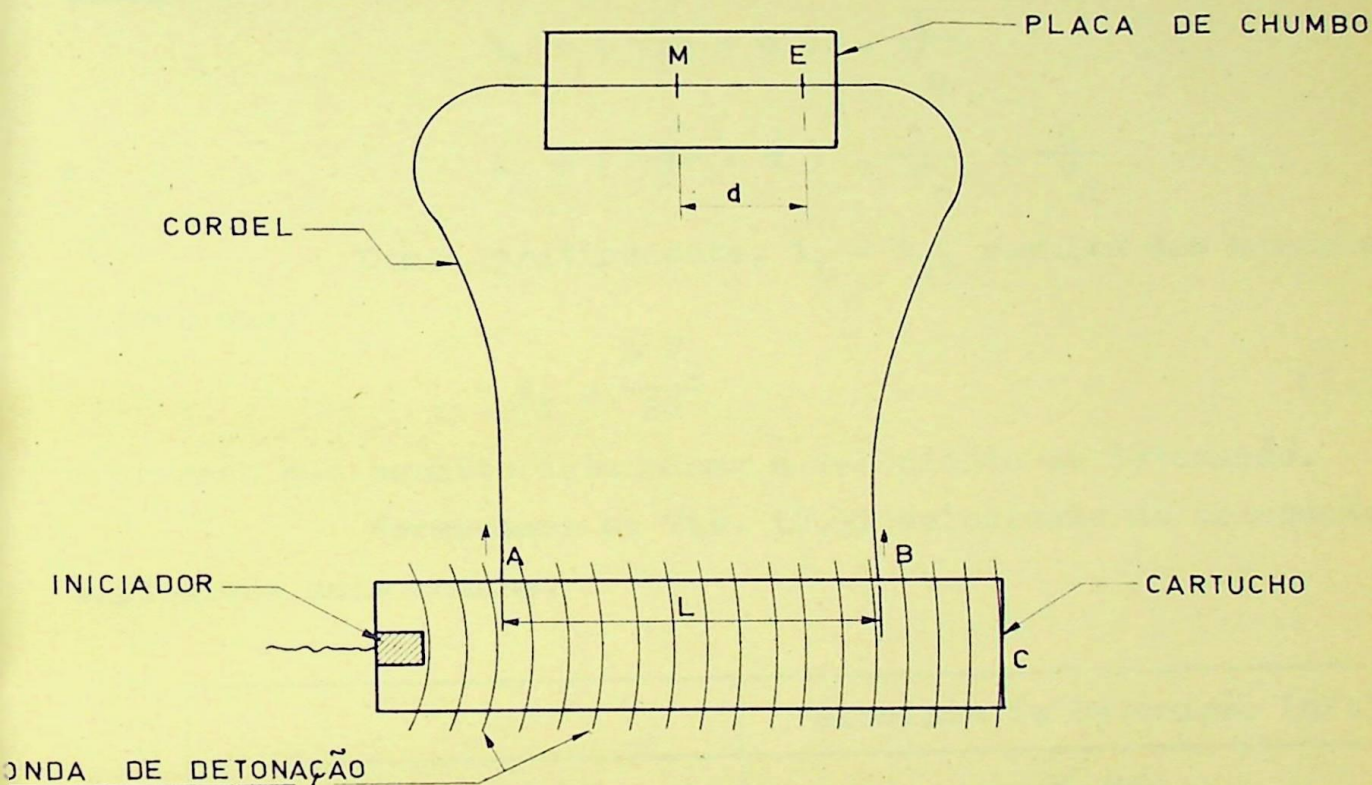


FIG. 2.5 - MÉTODO DE DAUTRICH PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE DETONAÇÃO DE UM EXPLOSIVO

Se colocássemos um certo comprimento ( $l$ ) de cordel - detonante (velocidade  $V_c$  aferida) com suas extremidades ligadas a um mesmo iniciador e iniciássemos este, a detonação se propagaria / com igual velocidade ( $V_c$ ) e as duas ondas, partidas das duas extre- midades do cordel se encontrariam exatamente num ponto (M) no meio do cordel.

Se os extremos do cordel, ao contrário, ficarem sepa- rados por uma distância (L) conhecida, entre os dois pontos A e B / de um cartucho (C) do explosivo cuja velocidade ( $V_d$ ) pesquisamos, e se iniciamos este, uma extremidade do cordel será iniciado antes da outra com um intervalo de tempo que é função daquela distância e da

velocidade de detonação procurada. Nestas condições o encontro das ondas que percorrem o cordel em direções opostas, não terá lugar / mais no ponto médio, mas em outro ponto (E), além, e tanto mais afastado de (M) quanto menor for a velocidade ( $V_d$ ).

Se designamos por ( $t_1$ ) e ( $t_2$ ) os tempos gastos pelas ondas em percorrerem os trajetos opostos e por ( $d$ ) a distância (ME), temos:

$$t_1 = \left( \frac{l}{2} + d \right) \cdot \frac{1}{V_c}$$

$$t_2 = \left( \frac{l}{2} - d \right) \cdot \frac{1}{V_c} + \frac{L}{V_d}$$

Como, praticamente,  $t_1 = t_2$ , resulta das equações anteriores que:

$$V_d = \frac{L V_c}{2d} \quad (2.9)$$

expressão que permite determinar a velocidade de detonação.

Fornecemos na Tab. (2.3) velocidade de detonação dos explosivos mais comuns.

	Velocidade de Detonação (m/s)
Hexogênio (RDX) .....	8.300
Nitropenta (PETN).....	8.100
Nitroglicerina (NG).....	8.000
Gelatina Explosiva (BG).	7,800
Trotil (TNT).....	6.300
Explosivos Piquête .....	2.000 a 7.000

Tab. 2.3 - Velocidade de detonação de alguns explosivos

No estudo da ação do explosivo sobre uma rocha e da pressão de detonação, item (2.6), voltaremos a analisar o processo de detonação e a influência da velocidade nessa característica.

## 2.6 - Pressão de detonação

Sob esta denominação é designada a pressão instantânea exercida pela onda de choque da detonação de um explosivo.

Há que distinguirmos esta pressão de onda, da pressão desenvolvida pelos gases oriundos da decomposição do explosivo, tam bém chamada de pressão termodinâmica. As duas traduzem a aptidão de um explosivo para fragmentar um maciço rochoso. A primeira, alargan do elasticamente a rocha dentro dos limites da resistência desta à compressão, e a segunda lançando a rocha fissurada após a reflexão/ da onda explosiva.

Para bem compreender a maneira como age um explosivo/ sobre uma rocha e a influência que tem sobre a qualidade das superfí cies acabadas, é necessário retornarmos aos fundamentos relativos ao desenvolvimento do processo de detonação.

Como vimos no item (1.2) o fenômeno usualmente denomi nado explosão pode ocorrer em duas formas basicamente diversas: de flagração ou detonação. A primeira correspondendo a uma combustão / muito rápida, propagando-se com velocidade crescente e a segunda, / uma reação química com velocidade muito elevada mas constante.

Para melhor esclarecer a diferença entre as duas for mas de explosão, basta observar o deslocamento de uma deflagração ao longo de um cilindro explosivo, notando-se uma sucessão de trechos em diferentes estados físico-químicos. Percorrendo o cilindro no senti do contrário ao da explosão, observaremos:

- (1) Explosivo sólido
- (2) Explosivo aquecido
- (3) Explosivo liquefeito
- (4) Explosivo gaseificado
- (5) Fase gasosa aquecida
- (6) Camada em reação química

Forma-se à frente do trecho em reação química, uma on da de pressão que avança com velocidade cada vez maior. A pressão / eleva a temperatura da fase gasosa adjacente, reduzindo o tempo da reação, que se propaga, por isso, com velocidade também crescente, / tendendo alcançar a onda de pressão. Quando as velocidades atingem valores suficientes, a compressão se faz praticamente sem perda de energia e a frente de reação passa a coincidir com a onda de pressão, dando origem a uma nova onda de detonação. A velocidade de transla ção da reação química terá alcançado seu valor máximo, não podendo /

mais aumentar. A deflagração ter-se-á transformado em detonação.

Quando isto ocorre, dizemos que o processo de decomposição atingiu regime estacionário. A interface entre a região de regime estacionário e regime não estacionário, isto é, o plano no qual a velocidade da onda de choque (igual à velocidade sônica) é igual à diferença entre a velocidade de detonação e a velocidade de partícula, é chamado de plano de Chapman-Jouguet (Plano CJ)<sup>(4,10)</sup>. Uma detonação ideal é definida como uma onda de detonação plana na qual a reação é completada no plano CJ. Para tais detonações o estado/no plano CJ é determinado se a equação de estado dos produtos da reação e a energia liberada ou a velocidade de detonação são conhecidas.

Acendendo-se uma dinamite com uma chama, dentro de um furo carregado, haverá inicialmente simples queima do explosivo. Os gases da combustão, confinados pelas paredes do furo irão aumentando de pressão e de temperatura, até que a queima se transforme em deflagração e, sucessivamente pelo processo indicado, em detonação. Esse seria um processo pouco eficiente, motivo pelo qual se empregam, como dissemos, iniciadores (espoletas ou cordel), que iniciam a explosão da carga na sua velocidade máxima de detonação (variável de 2000 a 7000 m/s conforme o explosivo - Tab. 2.3). O uso deste artifício permite obter os melhores rendimentos com o mínimo de gases nocivos.

A pressão instantânea exercida pela onda de detonação sobre as paredes do furo, alarga este e dá origem a fendilhamento na rocha (fissuras causadas por pressão direta), preparando e dirigindo a ação de deslocamento exercida pela pressão dos gases liberados na detonação.

Embora a relação entre a pressão de detonação, massa / específica e velocidade de detonação seja complexa e dependa dos ingredientes dos explosivos, podemos com uma boa aproximação<sup>(4)</sup>, calculá-la pela seguinte fórmula:

$$P_d = 2,5 \times 10^{-9} \rho_e v_d^2 \quad (2.10)$$

onde:  $P_d$  = pressão de detonação (kbars)

$\rho_c$  = massa específica do explosivo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$V_d$  = velocidade de detonação (m/s)

Por exemplo, a pressão de detonação de um explosivo - com densidade  $1,51 \text{ g}/\text{cm}^3$  e velocidade de detonação  $6300 \text{ m}/\text{s}$  será / aproximadamente de 150 kbars.

É interessante observar como termo de comparação, que a pressão exercida pelos gases liberados na detonação, calculada pela equação geral dos gases perfeitos, atinge apenas cerca de 25% / daquele valor para o mesmo explosivo. Cabe observar que, enquanto / a pressão de detonação é praticamente instantânea, a pressão dos gases não diminui até início do deslocamento (lançamento) da rocha.

A Fig. (2.6) mostra<sup>(5)</sup> a variação de pressão ao longo de uma carga após a explosão.

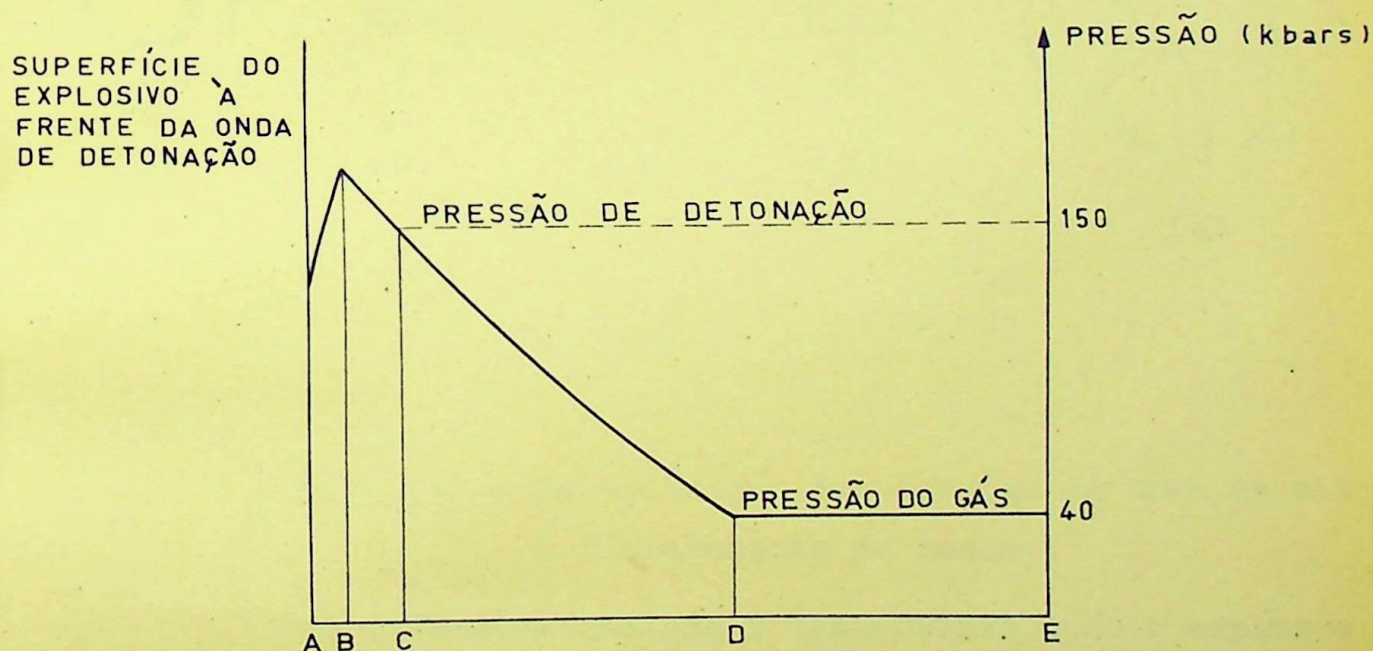


Fig. 2.6 - Variação da pressão ao longo de uma carga explosiva depois da explosão (TNT).

AB: Choque sem reação ( $< 10^{-5} \text{ cm}$ )

BC: Diminuição com reação química ( $< 1 \text{ mm}$ )

CD: Expansão dos gases no furo, durante cerca de 0,10 milisegundos (função da quantidade de carga)

DE: Pressão estática dos gases no furo alargado.

Na equação (2.10) a velocidade de detonação comparece à segunda potência. Um explosivo de alta velocidade causará portanto fendilhamento superior ao de um explosivo mais lento. Os explosivos de alta velocidade (até 7000 m/s) podem ser necessários em rochas tenazes e maciças. Em rochas naturalmente fendilhadas tais como os arenitos e basaltos, explosivos com velocidade de 2000-2500 / m/s darão melhores resultados.

As Fig (2.7) e (2.8) mostram os efeitos da onda de choque de uma explosão<sup>(5-6)</sup> num furo:

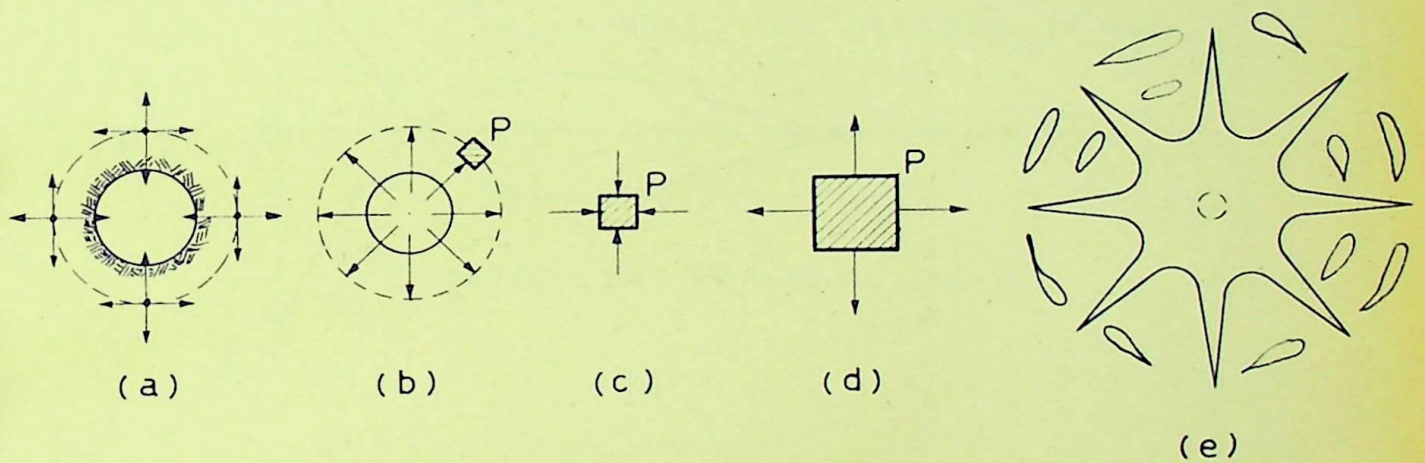


Fig. 2.7 - Distribuição das tensões da onda de choque e fissuramento da rocha.

- a) - Tensões radiais e tangenciais após a explosão.
- b) - Alargamento do furo por deformação plástica
- c) - Tensões de compressão num elemento P do material (a rocha resiste)
- d) - Tensões de tração no elemento P (a rocha quebra)
- e) - Fissuramento radial (devido à pressão direta) e devido à tração refletida.



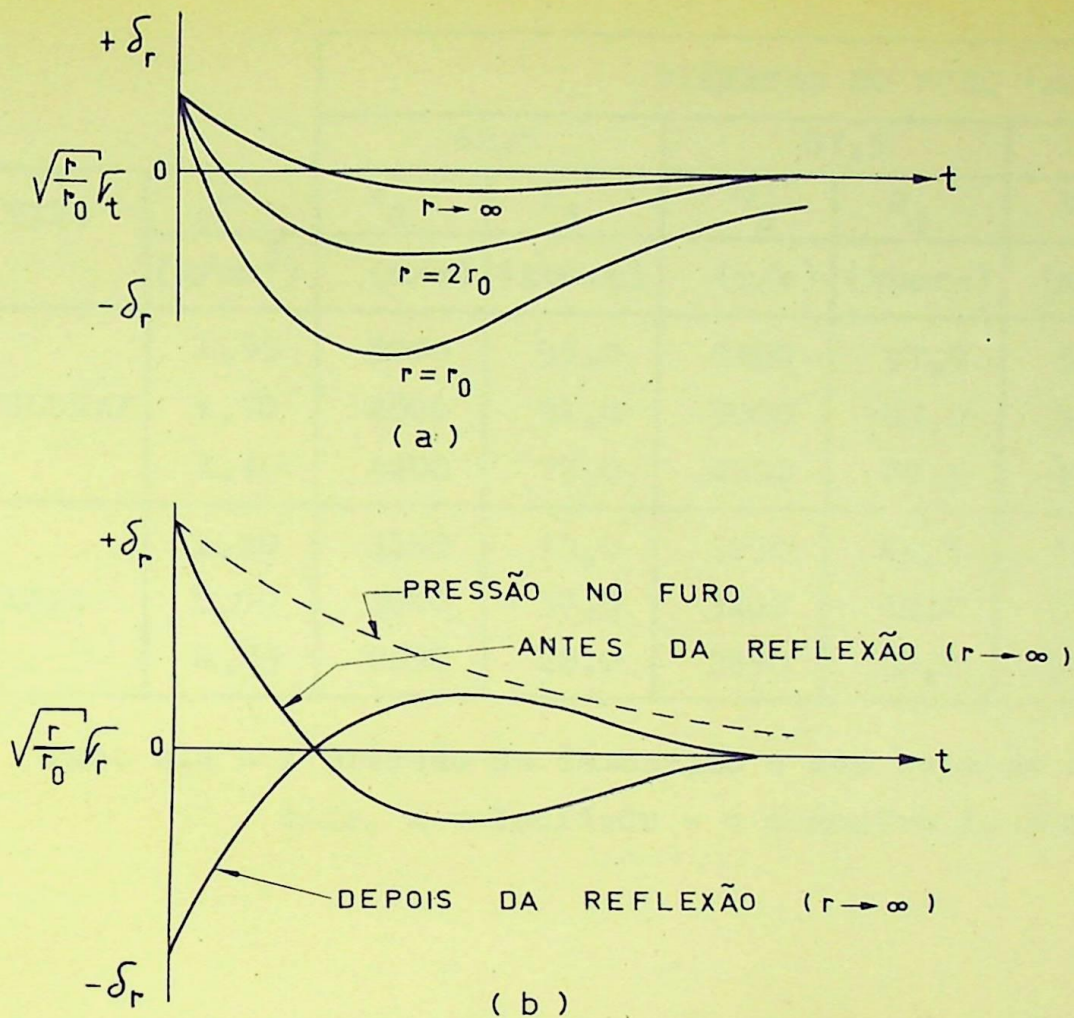


Fig. 2.8 - Tensões na frente de uma onda de choque para um bloco cilíndrico de raio  $r_0$  de furo, segundo Langefors y Kihlstrom

- a) - Tensão tangencial da onda antes da reflexão
- b) - Tensão radial da onda

A prática nos mostra que o explosivo escolhido para um desmonte de rocha deverá ter velocidade suficiente para criar as fendas estritamente indispensáveis ao deslocamento da rocha pela pressão dos gases liberados na detonação. Qualquer acréscimo da velocidade além desse limite será prejudicial pois irá causar fendilhamento da rocha remanescente, acarretando super escavações desnecessárias e criando, eventualmente, problemas de fundação.

O quadro (2.4) e a Fig. (2.8) mostram a relação entre densidade do explosivo, velocidade de detonação, diâmetro do furo e a pressão de detonação.

TIPO		DIÂMETRO DO FURO (mm)					
		62,5		87,5		150	
		$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_d$ (m/s)	$P_d$ (kbars)	$V_d$ (m/s)	$P_d$ (kbars)	$V_d$ (m/s)
SLURRY	1,55	5000	95,0	5200	97,0	5350	103,0
	1,50	4800	91,0	5000	93,0	5150	96,5
	1,40	4400	77,0	4600	80,5	4750	83,0
ANFO	1,10	3150	33,0	3250	44,5	3450	47,5
	1,00	3000	37,5	3100	39,0	3350	42,0
	0,85	2650	28,0	2850	30,0	3050	32,5

Tab. 2.4 - A pressão de detonação e sua relação com a densidade, a velocidade e o diâmetro do furo.

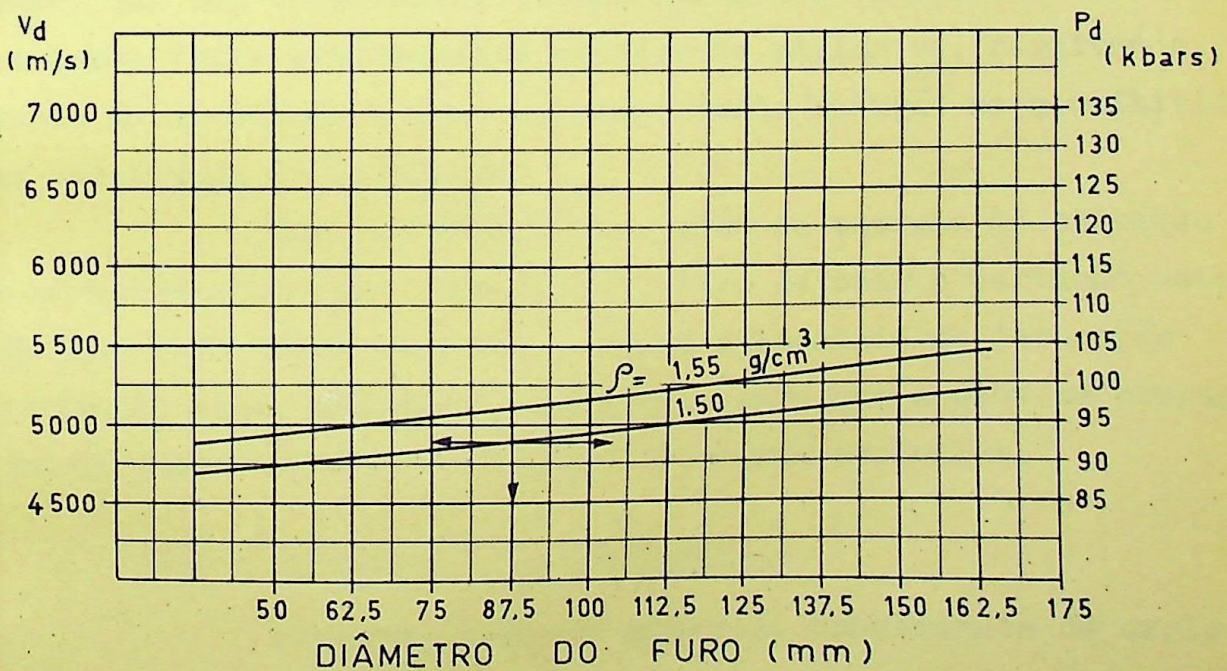


FIG. 2.8 - INFLUÊNCIA DA DENSIDADE E VELOCIDADE NA PRESSÃO DE DETONAÇÃO

## 2.7 - Densidade do Explosivo

A densidade do explosivo depende:

- Da formulação do explosivo (composição e granulometria)
- Do tipo de encartuchamento do explosivo

Densidade crítica é aquela em que o explosivo perde/ grande parte de sua sensibilidade. É também chamada de densidade limite. A partir dela (principalmente para explosivos lentos) a velocidade de detonação decresce até o explosivo perder a sua capacidade detonante.

Isto explica, de certo modo, os problemas de falhas/ em detonações sob pressão. Aumentando-se a pressão externa, a sensibilidade e a velocidade de detonação de um explosivo diminuem. A expliação é complexa, mas, para simplificar, pode-se considerar que os fatores mencionados estão muito relacionados com a quantidade de ar contida no explosivo. O ar se apresenta em pequenos glóbulos ou bolhas, que são comprimidas quando aumenta-se a pressão externa. O ar é dessa forma gradualmente expulso do explosivo, resultando num aumento de densidade e numa correspondente redução na sensibilidade/ e na velocidade de detonação.

Como conseqüências, além da energia de ativação de uma espoleta poder ser insuficiente para detonar o cartucho escorva, mesmo que este tenha sido iniciado, a velocidade de detonação pode não atingir valor suficientemente alto para que a onda se propague / de um cartucho ao outro, ao longo da coluna explosiva.

## 2.8 - Potência de um explosivo

Podemos, a estas alturas, compararmos os explosivos, correlacionando as suas principais propriedades físico-químicas, estudadas nos itens anteriores.

Vimos, pela Eq. (2.5), que a força de um explosivo / pode ser calculada em função do calor de combustão e do volume gasoso. É uma tentativa de determinar teoricamente a força do explosivo, através das características mensuráveis, correlacionando com o efei-

to produzido pelo explosivo no bloco de Trauzl ou no Morteiro Balístico.

Tomando a Gelatina Explosiva como padrão, a força de um ANFO com calor de combustão de 3579 kjoules/kg e volume gasoso de 0,845 m<sup>3</sup>/kg será:

$$E = \frac{5}{6} \times \frac{3579}{6750} + \frac{1}{6} \times \frac{0,845}{0,714} = 0,64 \text{ Ou } 64 \%$$

Deste modo são comparados os demais explosivos. Mas - outras características necessitam ser consideradas na avaliação do efeito útil do explosivo, no desmonte de um maciço rochoso.

Se considerarmos a força do explosivo assim calculada/ e a densidade do mesmo, teremos a força mássica do explosivo, que é o resultado do produto da densidade pela força.

Se computarmos a força do explosivo, a densidade e a velocidade, teremos como resultado a potência do explosivo, termo de comparação usado por vários autores, na avaliação dos efeitos da detonação.

No quadro (2.5) abaixo, apresentamos valores das pro-/  
priedades acima descritas para diversos tipos de explosivos.

Como exemplo de cálculo, tomemos a BG e a dinamite gelatinosa de densidade 1,5 g/cm<sup>3</sup>. Teremos, então:

- Força mássica:  $\rho_1 f_1 = 1,40 \times 100 = 140$  (BG)

$$\rho_2 f_2 = 1,50 \times 80 = 120 \text{ (Dinamite)}$$

Logo a força mássica =  $\frac{120}{140} \times 100 = 85,7\%$

- Potência: Temos para a BG

Força mássica = 140 ou 100%

Velocidade = 7800 m/s ou 100% (padrão)

A potência é definida como a soma destes dois valores relativos, isto é:

Potência da BG = 100 + 100 = 200 ou 1,0 (padrão)

Para a dinamite considerada, temos:

Força mássica =  $80 \times 1,50 = 120$  ou  $85,7\%$

Velocidade =  $6000 \text{ m/s}$  ou  $\frac{6000}{7800} \times 100 = 76,93 \%$

Logo a potência será igual a  $76,93 + 85,70 = 162,63$  ou  $\frac{162,63}{200} = 0,81$ .

EXPLOSIVO	Sensibilizador	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Força (%)	Força Mássica (%)	Velocidade (m/s)	Potência
Gelatina (BG)	NG	1,40	100	100,0	7800	1,00
Dinamite Gelatinosa	NG	1,50	80	85,7	6000	0,81
		1,45	60	62,1	5000	0,63
Dinamite semi-Gelatinosa	NG	1,10	60	47,0	4300	0,51
Slurry	TNT/Al	1,55	90	99,6	5100	0,82
		1,50	80	85,7	4800	0,74
	TNT	1,40	65	60,0	4400	0,54
A N F O	-	1,10	60	47,1	3150	0,43
		1,00	60	42,8	3000	0,40
		0,85	60	36,4	2700	0,35

Tab. (2.5) - A força, a força mássica e a potência de um explosivo.

### 2.9 - Impedância de detonação

Vimos que pela ação de choque as moléculas de uma substância explosiva iniciada são decompostas e esta decomposição provoca a da camada adjacente e assim sucessivamente, se propagando com uma velocidade considerável (velocidade de detonação) e sob forma de uma onda (a onda de detonação). Esta onda não se limita à massa explosiva iniciada e pode mesmo dar origem à detonação de um explosivo situado a distância. Este fenômeno é conhecido como detonação por influência ou detonação por indução.

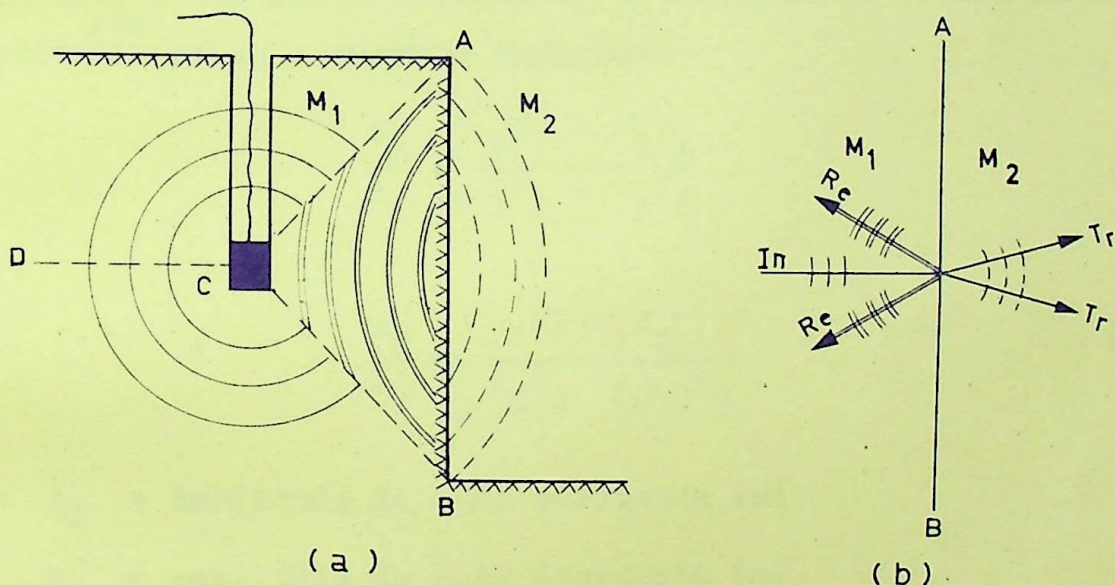
Vimos, por outro lado, que a detonação de uma carga ex

plosiva num maciço rochoso cria uma onda de compressão nas vizinhanças do furo. Essa onda se propaga radialmente em todas as direções.

Perto dele, a ~~magn~~ magnitude desta onda é suficiente para causar o fendilhamento da rocha. à medida que caminha, sua intensidade cai rapidamente até que seja refletida por uma superfície livre. Na reflexão, a onda de compressão transforma-se em onda de tração, / fragmentando a rocha, numa ação que parte da superfície livre em di reção ao furo.

Parte desta onda, contudo, é transmitida ao outro / meio, isto é, refrata na superfície livre, separação dos dois meios refringentes diferentes, numa analogia aos fenômenos óticos.

A Fig. (2.9) ilustra bem este fenômeno, pela detonação de uma carga explosiva no ponto (C).



- ONDA INCIDENTE (NÃO REFLETIDA) ( $I_n$ )
- ONDA REFLETIDA ( $R_e$ ) NO MEIO ( $M_1$ )
- ONDA TRANSMITIDA (REFRATADA) ( $T_r$ ) NO MEIO ( $M_2$ )

AB - SUPERFÍCIE DE SEPARAÇÃO DOS MEIOS REFRINGENTES ( $M_1$ ) E ( $M_2$ )

Fig. 2.9 - Fenômeno da propagação da onda explosiva

Devemos observar que sempre perdemos grande parte da energia total da onda explosiva no arranque de um material, pois so mente parte desta onda é passível de reflexão. Na Fig. (2.9.a) só o trem de ondas acima de BCD, encontra meio de propagação diferente, refletindo em consequência disto.

No desmonte de rocha buscamos sempre uma relativa coerência do explosivo com a rocha. Do mesmo modo, quando queremos unir dois materiais diferentes com explosão, deve haver um casamento do explosivo com os dois materiais (meios de propagação) diferentes.

A propriedade que responde por esta coerência é a que chamamos de impedância de detonação em se tratando do explosivo, ou impedância acústica do material.

A impedância acústica é definida como o produto da velocidade sônica dinâmica e a densidade.

A importância do relacionamento da impedância acústica nas operações com explosão pode ser melhor entendida pela consideração das interações da tensão elástica da onda na interface de separação dos diferentes meios de propagação. A interação da tensão elástica da onda entre meios diferentes é descrita em termos da impedância acústica<sup>(7)</sup> pelas seguintes equações:

$$\frac{A_R}{A_I} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \quad (2.11)$$

$$e \quad \frac{A_T}{A_I} = \frac{2\rho_2 V_2}{\rho_1 V_2 + \rho_2 V_2} \quad (2.12)$$

onde  $A_R$  = Amplitude da onda refletida (m)

$A_I$  = Amplitude da onda incidente (m)

$A_T$  = Amplitude da onda transmitida (m)

$\rho$  = Densidade dos materiais (1) e (2) ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  = Velocidade da onda explosiva no material (velocidade sônica) (m/s)

A onda incidente é compressiva, isto é,  $A_I > 0$  por definição. A onda refletida pode ser de tração ( $A_R < 0$ ) ou compressiva, dependendo da magnitude de  $\rho_2 V_2$  comparada com  $\rho_1 V_1$ . No caso do meio (2) ser o ar atmosférico, teremos sempre onda refletida de tração, o que torna possível o desmonte de rocha.

Considerando a transmissão da onda de detonação do explo-

sivo para o material, a equação (2.12) nos sugere a relação que devemos ter entre o explosivo e o material, isto é, impedância do explosivo igual à impedância do material, o que resulta  $A_T = A_I$ .

No capítulo seguinte abordaremos com mais detalhes o assunto impedância acústica, estabelecendo a sua influência na interação explosivo-material rochoso.

### CAPÍTULO III

#### INTERAÇÃO EXPLOSIVO MATERIAL ROCHOSO

##### 3.1 = Ondas Elásticas de Tensão

Suponhamos a barra da Fig. 3.1, na qual uma força constante  $\Delta F = A \Delta P$  é subitamente aplicada à extremidade livre (E) da barra, não em movimento. Uma onda de tensão se propagará ao longo da barra com uma velocidade (V) e as partículas da barra atrás da frente de onda adquirirão uma velocidade ( $\Delta u$ ).

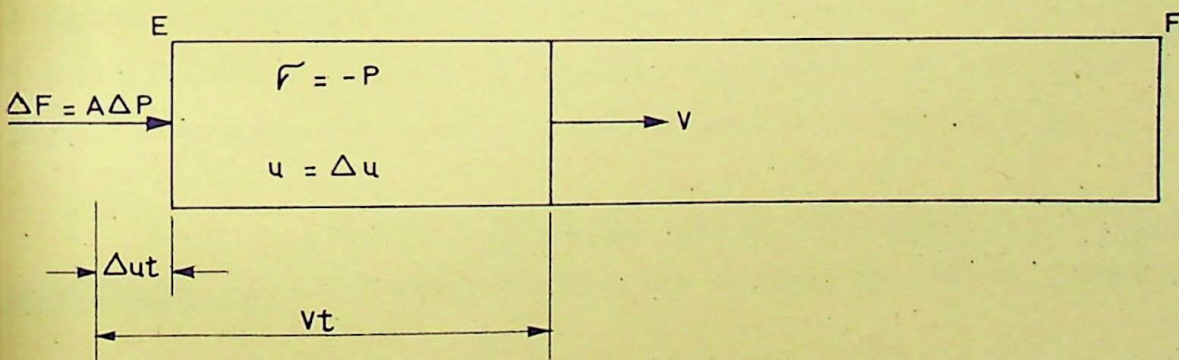


Fig. 3.1 - Propagação de uma onda de tensão elástica numa barra.

Há que distinguirmos estas duas características da onda:

1 - A velocidade da onda (V), que é a velocidade com que a perturbação se propaga no material.

2 - A velocidade de partícula ( $u$ ) que resulta da mudança de velocidade (aceleração) do material pela passagem da onda. Seu valor depende da força da onda (perturbação), e pode assumir desde valores infinitesimais para ondas de som até poucos  $\text{mm}/\mu$  seg para ondas de detonação e de choque.

Aplicando à barra da Fig. 3.1, a lei de conservação de momento depois de um determinado tempo ( $t$ ), a massa ( $m$ ) em movimento/ terá uma velocidade de partícula ( $\Delta u$ ) e a relação será:

$$\Delta Ft = m \Delta u \quad (3.1)$$

3.1.1 - Relação entre a velocidade de partícula ( $u$ ) e tensão ( $f$ ). Substituindo convenientemente na equação (3.1) temos:

$$A \Delta Pt = \rho AVt \Delta u$$

ou

$$\Delta P = \rho V \Delta u \quad (3.2)$$

onde  $\rho$  é a massa específica da barra. Sob a forma infinitesimal temos:

$$dP = \rho V du = - d f \quad (3.3)$$

A tensão na barra é zero na frente da onda e é igual à pressão em cada ponto no material comprimido atrás da onda. A velocidade de partícula sendo constante em qualquer ponto atrás da onda, o estado de tensão será estático e constante.

3.1.2 - Relação entre deformação ( $\mathcal{E}$ ) e velocidade de partícula  $u$ . O comprimento da porção da barra comprimida é

$$Vt - \Delta ut \quad (3.4)$$

Assim, a deformação unitária será:

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{-\Delta u}{V} \quad (3.5)$$

Escrevendo sob a forma infinitesimal, temos

$$d \mathcal{E} = \frac{-du}{V} \quad (3.6)$$

### 3.1.3 - Relação para a velocidade da onda (V)

Da equação (3.3), obtemos pela substituição de (du) da equação (3.6) a seguinte relação:

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = \rho v^2 \quad (3.7)$$

Da equação (3.7) obtemos para velocidade da on da (V):

$$v = \sqrt{\frac{dF/d\varepsilon}{\rho}} \quad (3.8)$$

onde  $(\frac{dF}{d\varepsilon})$  é a inclinação da curva tensão deformação do material./ Para uma haste fina ou barra sob tensão uniaxial.

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = E \quad (3.9)$$

sendo E = módulo de elasticidade do material.

Por conseguinte, a velocidade (acústica) da on da elástica na haste fina ou barra é:

$$v_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.10)$$

Para um corpo elástico isentrópico e homogê-  
nio, deformando-se uniaxialmente (11):

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = K + \frac{4G}{3} \quad (3.11)$$

onde:  $\nu$  = Coeficiente de Poisson

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (\text{módulo de elasticidade volumétrica})$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{módulo de elasticidade no cisalhamento ou mó-  
dulo de rigidez}).$$

Assim, uma onda elástica plana percorre um só lido a uma velocidade

$$v_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \quad (3.12)$$

Num fluido, ou quando um sólido é sujeito a

tensões acima do ponto limite de elasticidade, a onda plana longitudinal se propaga com uma velocidade ( $V_2$ ) dada por (11);

$$V_2 = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3.13)$$

### 3.1.4 - Reflexão de uma onda numa superfície livre: /

Quando a onda atinge a extremidade (F) da barra, o último elemento / de material adquire, por inércia, a tensão ( $\sigma$ ). Mas, cessando a aceleração, o elemento é tensionado para a esquerda (tensão  $\sigma$ ) e à direita, está descarregado. Consequentemente, a instabilidade gera uma onda de retorno, de magnitude ( $-\sigma$ ) que volta ao longo da barra, retornando esta ao estado de tensão zero, como ilustrado na Fig.3.2 (9-11).

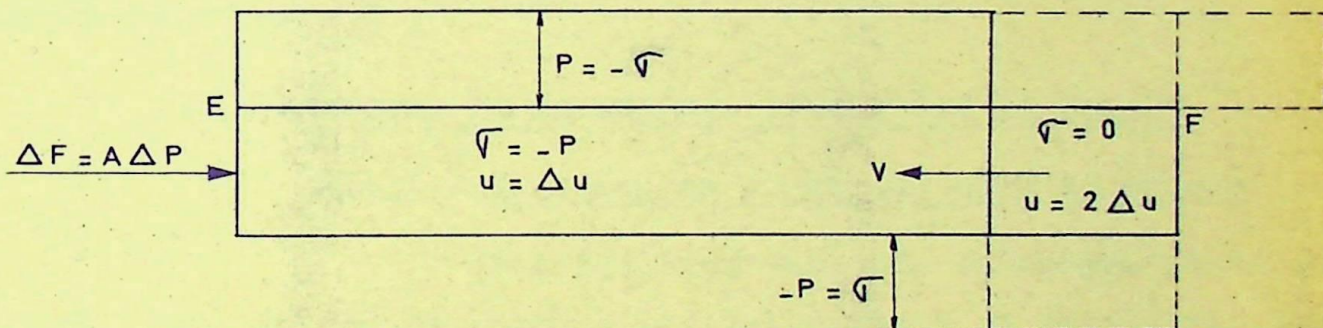


Fig. 3.2 - Reflexão de uma onda de tensão elástica numa superfície livre.

A mudança na tensão para o estado inicial / ( $\sigma = 0$ ) é acompanhada por uma onda de tensão refletida movendo-se / em direção oposta àquela que induziu a tensão ( $\sigma$ ). Consequentemen- / te, a mudança ( $\Delta u$ ) na velocidade, correspondente à mudança na ten- / são, ainda que do mesmo valor, dobra a variação original na veloci- / dade de partícula, em vez de reduzi-la a zero, como seria de espe- / rarmos à primeira vista. Quando a onda de retorno atinge a extremi- / dade esquerda (E) da barra, esta fica completamente livre de tensão, / porém se movendo com uma velocidade de  $u = 2 \Delta u$ . Tal valor tem si- / do observado em mais de 300 sólidos e líquidos (13-14-15).

### 3.2 - ONDAS DE CHOQUE

Uma onda de choque, uma frente de choque ou sim- / plesmente um choque é uma onda que produz um pico de pressão descon-

tínuo no material. Uma onda de choque se propaga mais rapidamente / que o som, ou seja, é supersônica com relação à perturbação causada com o seu avanço<sup>(12)</sup> e mantém a sua característica de descontinuidade abrupta. A onda de choque (compressão) age acelerando as partículas do material na direção de propagação da onda.

### 3.3 - ONDAS DE RAREFAÇÃO

Igualmente tão importante quanto as ondas de choque, são as ondas de rarefação (também chamadas de ondas de expansão ou ondas sem carregamento). Ela resulta da remoção da pressão que / causou a onda de choque, é a responsável pelo caimento da onda de choque e age acelerando as partículas do material em direção oposta à da propagação da onda.

### 3.4 - CHOQUE DE COMPRESSÃO E EQUAÇÕES DE ESTADO

#### 3.4.1 - Relações na frente da onda de choque

Consideremos uma onda de choque plana es-tacionária, isto é, com os estados inicial e final em equilíbrio ter-modinâmico, movendo-se num material a uma velocidade ( $V_s$ ) relativa a um observador fora do material. As relações que descrevem as mudan-ças através da frente de choque podem ser obtidas das leis de conser-vação de massa, de momento e de energia<sup>(12)</sup>.

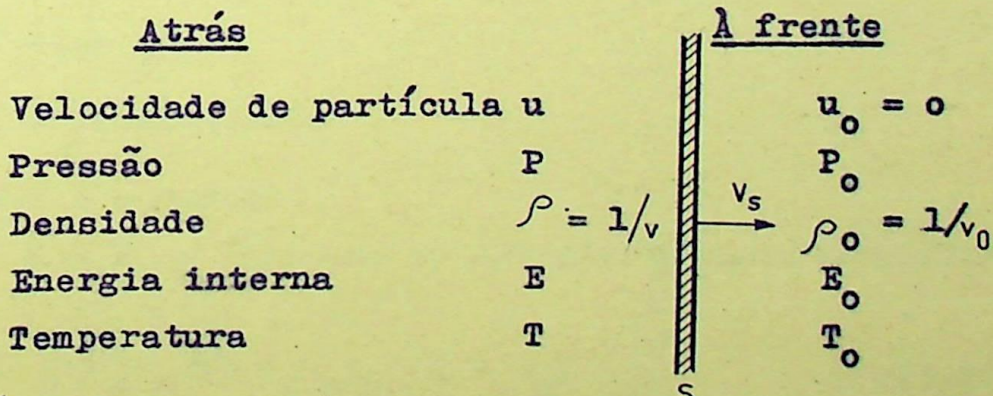


Fig. 3.3 - Frente de onda de choque plana estacionária se propagando num material não perturbado.

Da Fig. 3.3, para uma área ( $A$ ) da frente de choque e um tempo ( $\Delta t$ ), temos pela aplicação da lei de conserva-

ção de massa, a seguinte relação:

$$\rho_0 v_s \Delta t A = \rho (v_s - u) \Delta t A$$

ou seja  $\left[ \begin{array}{l} \text{massa interceptada} \\ \text{pela frente de onda} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{massa à esquerda atrás} \\ \text{da frente de onda} \end{array} \right]$

o que resulta:  $\rho_0 v_s = \rho (v_s - u)$  (3.14)

Similarmente, a conservação de momento - nos fornece:

$$(P - P_0) A \Delta t = (\rho_0 v_s \Delta t A) u$$

ou  $\left[ \text{impulso} \right] = \left[ \text{Quantidade de movimento} \right]$

o que resulta:

$$P - P_0 = \rho_0 v_s u$$
 (3.15)

onde a quantidade  $(\rho_0 v_s)$  é definida como sendo a impedância do choque do material não perturbado que, em geral, varia com a pressão do choque.

A conservação de energia requer que

$$PAu \Delta t = \frac{1}{2} \rho_0 v_s \Delta t A u^2 + \rho_0 v_s \Delta t A (E - E_0)$$

ou:  $\left[ \text{Trabalho} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Variação de energia} \\ \text{cinética} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Variação de} \\ \text{energia interna} \end{array} \right]$

sendo: PA = força

$$u \Delta t = \text{deslocamento}$$

$$\rho_0 v_s \Delta t A = \text{massa}$$

$$E - E_0 = \text{Variação de energia interna específica o que}$$

resulta:

$$Pu = \frac{1}{2} \rho_0 v_s u^2 + \rho_0 v_s (E - E_0)$$
 (3.16)

As relações (3.15) a (3.16) são chamadas de relações de descontinuidade da frente de choque ou relações de / Rankine-Hugoniot.



Resolvendo as equações (3.14) e (3.15) simultaneamente, resultam fórmulas particularmente úteis:

$$\text{Velocidade de partícula: } u = \pm \sqrt{-(P - P_0)(v - v_0)} \quad (3.17)$$

$$\text{Velocidade do choque : } V_s = \pm v_0 \sqrt{-(P - P_0) / (v - v_0)} \quad (3.18)$$

onde as raízes positivas correspondem à onda se propagando na direção do eixo dos x, enquanto que as raízes negativas correspondem à onda se propagando na direção negativa. Estas equações podem ser usadas para simplificar a Eq (3.16) e se obter a equação de Hugoniot:

$$E - E_0 = \frac{1}{2} (P + P_0)(v - v_0) \quad (3.19)$$

Se o material à frente da onda de choque / não é estacionário ( $u_0 \neq 0$ ), então ( $V_s$ ) e ( $u$ ) nas equações (3.14) e (3.17) devem ser substituídas por ( $V_s - u_0$ ) e ( $u - u_0$ ) respectivamente.

As relações anteriores foram obtidas com / base em aproximações hidrodinâmicas onde o sólido foi tratado como / um fluido perfeito, sujeito a uma pressão isotrópica(P). Para pressões menores, onde esta aproximação não é válida, (P) pode ser substituído por ( $\sqrt{x}$ ), a componente x da tensão agindo normalmente à frente de choque.

### 3.4.2 - Curvas de Hugoniot

As equações (3.17) a (3.19) incluem cinco parâmetros descrevendo o choque de compressão:  $V_s$ ,  $u$ ,  $P$ ,  $v$  e  $E$ . / Até aqui a natureza do material no qual o choque está se propagando não foi considerado. A relação que caracteriza o material particular no qual a onda de choque está se propagando é chamada de equação de estado ou relação constitutiva, a qual é uma relação simples, linear e empírica dada por (13-15):

$$V_s = V_0 + Su \quad (3.20)$$

onde:  $V_0 = \sqrt{K/\rho_0}$ , sendo (K) definido na eq. 3.11

$S = \frac{\Gamma+1}{2}$ , sendo ( $\Gamma$ ) a constante de Gruneisen<sup>(16)</sup>, que para

para muitos materiais é dada por:

$$\Gamma = v \left( \frac{\partial P}{\partial E} \right)_v = \frac{v_0^2 \beta}{c_p} \quad (3.21)$$

onde  $\beta$  = coeficiente de expansão térmica

$c_p$  = calor específico do material a pressão constante

Tais equações nos permitem construir curvas, chamadas curvas de Hugoniot, das quais, duas das mais importantes são ilustradas na Fig. 3.4.

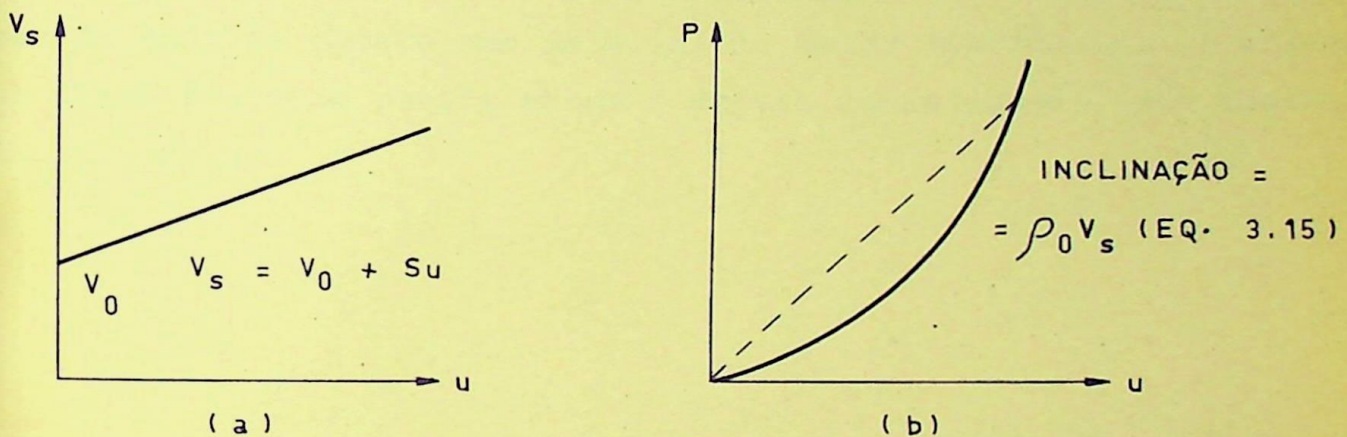


Fig. 3.4 - Alternativa das curvas de Hugoniot

As curvas de Hugoniot definem os estados de equilíbrio que podem ser atingidos pelo choque de compressão. / Seria bom enfatizar que a curva de Hugoniot não descreve os está- / gios pelos quais o material passa durante a deformação por choque. Ela define somente o lugar de possíveis estados finais de equilí- / brio.

### 3.5 - INTERAÇÃO DE ONDAS PLANAS SIMPLES

Materiais diferentes têm impedâncias de choque diferentes ( $\rho_0 v_s$ ) que influem consideravelmente na transmissão de uma onda plana de choque ou de detonação de um material para outro. As interações são melhor tratadas no plano pressão-velocidade de / partícula (Fig. 3.4-b), porque:

1 - A pressão ( $P$ ) ou a velocidade de partícula ( $u$ ) é especificada como condição inicial ou limite em certas super-

fícies.

2 - A pressão e a velocidade de partícula são contínuas nas interfaces do material.

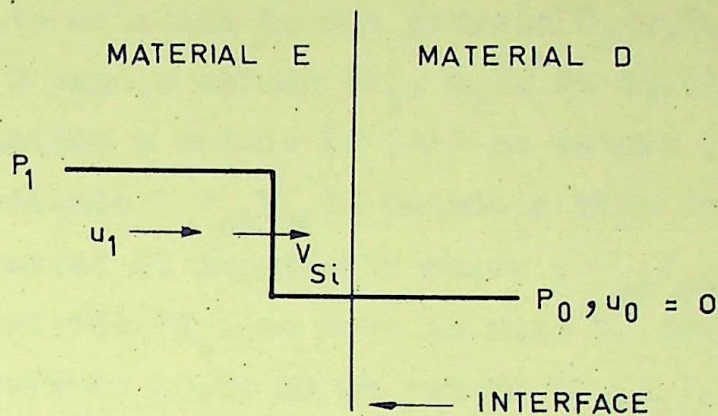
O nosso problema reside, enfim, em determinar (P) sendo dado (u) ou o contrário, determinar (u) sendo dado (P).

Ilustremos qualitativamente melhor o problema, considerando os casos seguintes:

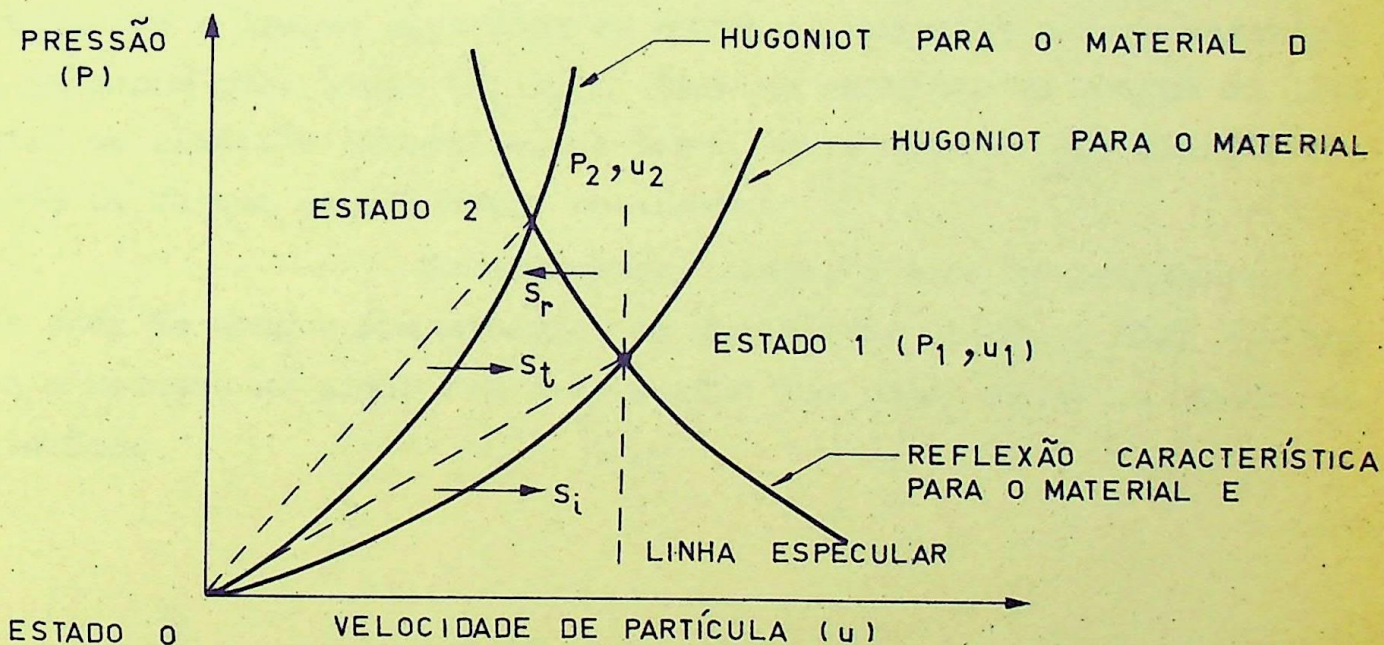
### 3.5.1 - Transmissão de uma onda de choque

Consideremos, primeiramente, a transmissão da onda de choque num material de maior impedância. A solução no plano P-u e os perfis antes e depois da interação, são mostrados na Fig. (3.5).

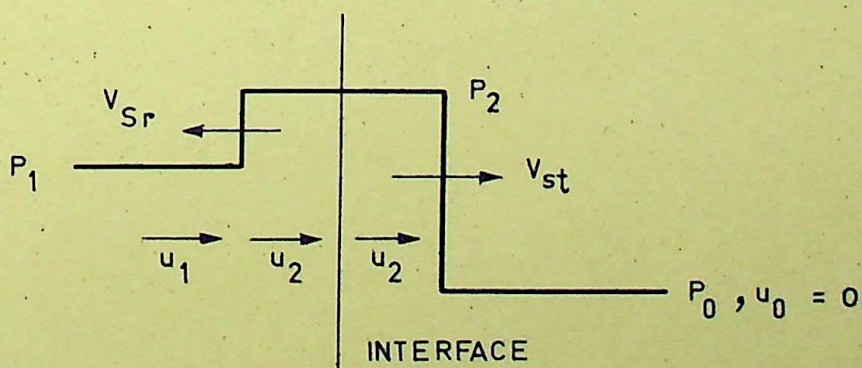




(a) PERFIL PRESSÃO - DISTÂNCIA ANTES DA INTERAÇÃO



(b) SOLUÇÃO GRÁFICA NO PLANO P - u

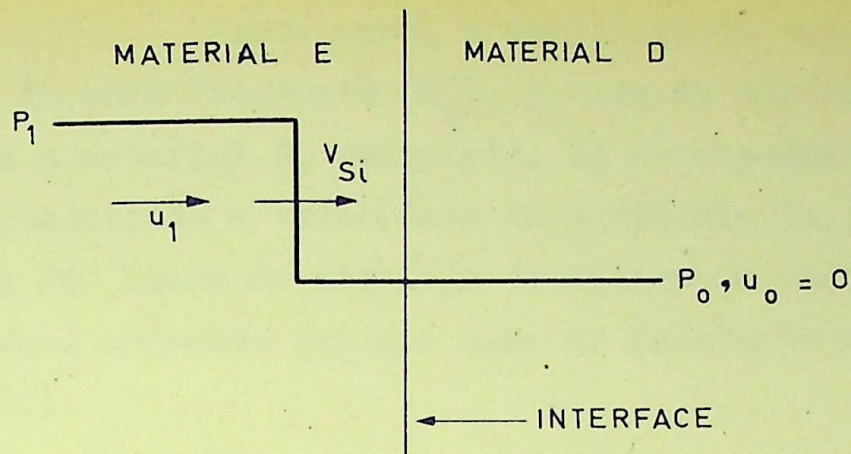


(c) PERFIL PRESSÃO - DISTÂNCIA APÓS A INTERAÇÃO

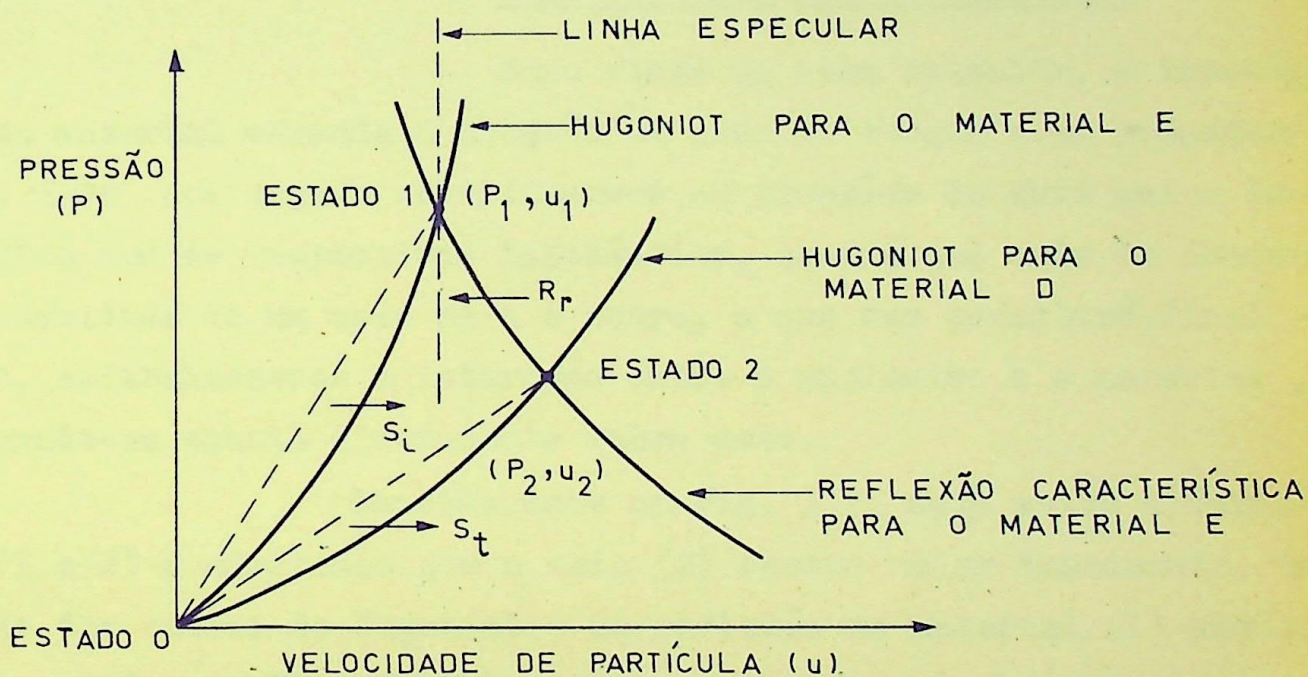
Fig. 3.5 - Transmissão de uma onda de choque plana num material de maior impedância.

Uma onda plana de choque, incidente, ( $S_i$ ) de pressão ( $P_1$ ) e velocidade de partícula ( $u_1$ ) é suposta se mover no material perturbado E (esquerda) de impedância relativamente baixa/ e transforma este material de uma pressão  $P_0 \ll P_1$  e velocidade de partícula  $u_0 = 0$  para o estado ( $P_1, u_1$ ). Da Eq.(3.15) a inclinação/ da linha reta unindo o estado ( $0, 0$ ) ao estado ( $P_1, u_1$ ) é a impedância da onda incidente ( $\rho_{oE} V_{si}$ ). Quando a onda incidente encontra o material D (direita) de impedância maior ( $\rho_{oD} V_{st} > \rho_{oE} V_{si}$ ), a onda de choque transmitida ( $S_t$ ) se move no meio D, transformando-o de um estado não perturbado ( $0, 0$ ) em um estado ( $P_2, u_2$ ). Verifica-se que uma onda refletida ( $S_r$ ) move-se no material E, agora no estado ( $P_1, u_1$ ) reduzindo a velocidade de partícula para ( $u_2$ ) e aumentando a pressão para ( $P_2$ ). O perfil desta onda de reflexão coincide aproximadamente, com a imagem especular da curva de Hugoniot para o material/ E, passando pelo ponto ( $P_1, u_1$ ). Como um exemplo, um choque de 240 kbars em alumínio transmite, no ferro, um choque de 340 kbars e reflete um choque de 100 kbars no alumínio (12).

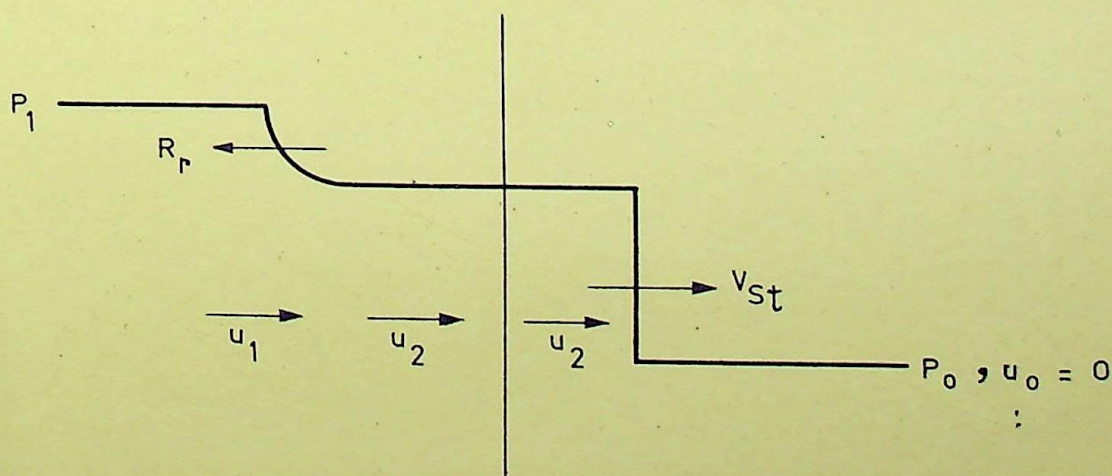
Consideremos, agora, o caso da transmissão de uma onda de choque num material de impedância menor. A Fig. 3.6 mostra a solução no plano P-u e os perfis das ondas antes e depois da interação.



(a) PERFIL PRESSÃO - DISTÂNCIA ANTES DA INTERAÇÃO



(b) SOLUÇÃO GRÁFICA NO PLANO P\_u



(c) PERFIL PRESSÃO - DISTÂNCIA APÓS A INTERAÇÃO

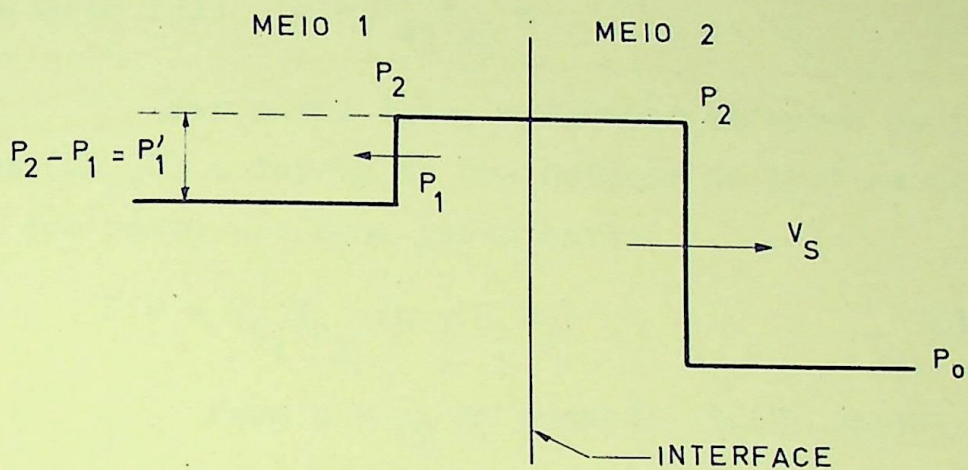
Fig. 3.6 - Transmissão de uma onda de choque plana num material de menor impedância.

Neste caso, a amplitude da onda transmitida é menor que a da onda incidente ( $S_1$ ). A onda de rarefação ( $R_r$ ) é refletida para o material E, reduzindo, em consequência disso a pressão ( $P_2$ ) e aumentando a velocidade de partícula ( $u_2$ ). Como exemplo, um choque de 240 kbars em alumínio transmite um choque de 95 kbars ao polietileno, enquanto que uma onda de rarefação de 145 kbars é refletida (12).

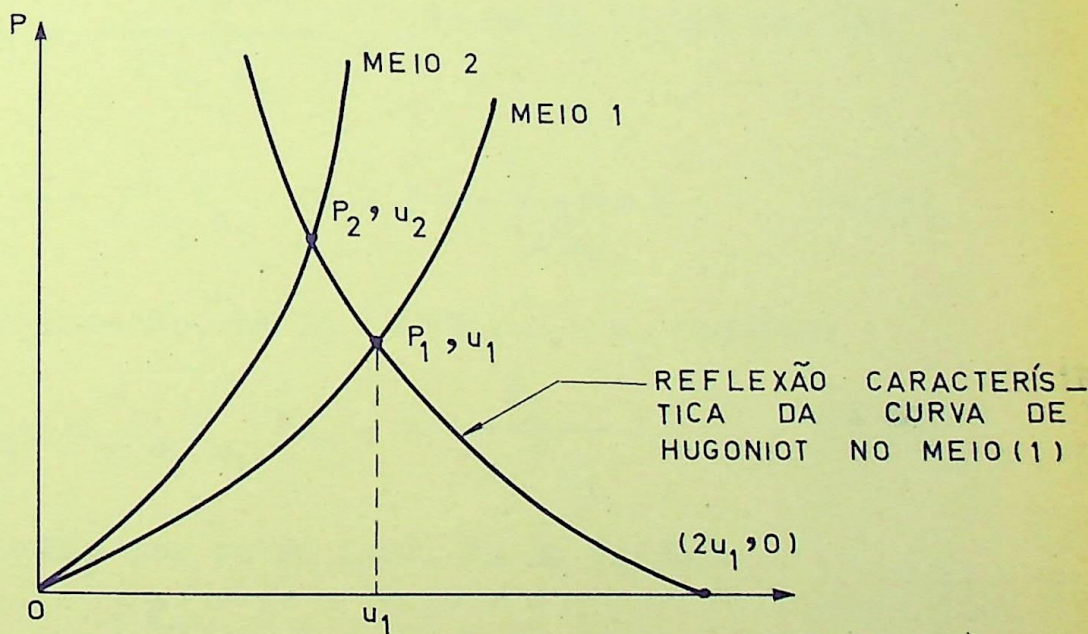
### 3.5.2 - Indução de onda de choque num material pela detonação de um explosivo

Como vimos no item anterior, a impedância do material comanda a pressão da onda de choque a se propagar/ nele. Isto nos sugere relacionarmos as pressões de dois meios diferentes com as respectivas impedâncias, quando uma onda de choque é transmitida de um meio para o outro, o que nos permitirá, finalmente, estabelecermos a interação entre o explosivo e o material, detonando-se aquele diretamente sobre este.

Consideremos na Fig. 3.7, dois meios diferentes (1 e 2) e admitamos que o meio (2) possua maior impedância. Os perfis das curvas de Hugoniot e da reflexão no material (1) estão/ representadas na Fig. 3.7(b)



(a) PERFIL DE PRESSÃO NA INTERAÇÃO DE DOIS MEIOS DIFERENTES



(b) DIAGRAMA P-u PARA O CASO (a)

Fig. 3.7 - Transmissão de uma onda de choque

Pelas Eq. (3.2) e (3.15) temos as seguintes equações para a pressão:

$$\text{No meio (1): } P = \rho_{o1} v_{s1} u \quad (3.22)$$

$$\text{No meio (2): } P = \rho_{o2} v_{s2} u \quad (3.23)$$

Por outro lado, a equação da curva de reflexão, com origem em  $(2u_1, 0)$  e depois de uma rotação de  $180^\circ$  em torno do eixo vertical que passa por esse ponto será:

$$P = -\rho_{o1} v_{s1} (u - 2u_1) \quad (3.24)$$

Para  $u = u_1$  na equação (3.22) temos:

$$P_1 = \rho_{o1} v_{s1} u_1$$

ou:

$$u_1 = \frac{P_1}{\rho_{o1} v_{s1}}, \text{ que na Eq (3.24) nos dá:}$$

$$P = -\rho_{o1} v_{s1} \left( u - 2 \frac{P_1}{\rho_{o1} v_{s1}} \right) \quad (3.25)$$

Fazendo, na Eq (3.25),  $u = u_2$  resulta:

$$P_2 = -\rho_{o1} v_{s1} \left( u_2 - 2 \frac{P_1}{\rho_{o1} v_{s1}} \right) \quad (3.26)$$

Mas por outro lado, da Eq (3.23):

$$u_2 = \frac{P_2}{\rho_{o2} v_{s2}}$$

que, na Eq (3.26) resulta:

$$P_2 = -\rho_{o1} v_{s1} \left( \frac{P_2}{\rho_{o2} v_{s2}} - 2 \frac{P_1}{\rho_{o1} v_{s1}} \right)$$

$$\text{ou } \frac{P_2}{\rho_{o1} v_{s1}} + \frac{P_2}{\rho_{o2} v_{s2}} = 2 \frac{P_1}{\rho_{o1} v_{s1}}$$

Multiplicando ambos os membros da equação por

$$(\rho_{o1} v_{s1} \rho_{o2} v_{s2}) \text{ temos: } \rho_{o2} v_{s2} P_2 + \rho_{o1} v_{s1} P_2 = 2 \rho_{o2} v_{s2} P_1$$

$$\text{ou } \frac{P_2}{P_1} = \frac{2 \rho_{o2} v_{s2}}{\rho_{o2} v_{s2} + \rho_{o1} v_{s1}} \quad (3.27)$$

Se na equação anterior, somamos e subtraímos /

$(\rho_{o1} v_{s1})$  obtemos:

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \frac{\rho_{o2} v_{s2} - \rho_{o1} v_{s1}}{\rho_{o2} v_{s2} + \rho_{o1} v_{s1}} \quad (3.28)$$

da qual podemos observar que, se a impedância do meio (2) é maior que a do meio (1) resulta  $P_2 > P_1$ , como já havíamos dito.

Por outro lado, o pico de pressão ( $P_1'$ ) na interface é dado por:

$$P_1' = P_1 \left[ \frac{\rho_{o2} v_{s2} - \rho_{o1} v_{s1}}{\rho_{o2} v_{s2} + \rho_{o1} v_{s1}} \right] \quad (3.28.1)$$

o que nos mostra que, quando o meio (2) é o ar atmosférico ( $\rho_{o2} v_{s2} = 0$ )

$$P_1' = -P_1 \text{ (onda refletida de tração).}$$

Se, agora, supomos o explosivo como sendo o meio (1) em contato direto com o meio (2), devemos considerar dois casos:

1 - Interação unidimensional, no caso da direção de propagação da onda de choque no material coincidir com a direção / de propagação da onda de detonação do explosivo.

2 - Interação bidimensional, quando a onda de detonação se propaga numa direção e o choque se verifica em direção ortogonal àquela.

Assim temos:

$$P_1 = P_{CJ} = \text{Pressão de Chapman-Jouguet (=Pd)}$$

$$v_{s1} = v_d = \text{Velocidade de detonação e as Eq.(3.27) e}$$

(3.28) resultam

$$P_2 = P_{CJ} \left[ \frac{2\rho_{o_2} V_{s_2}}{\rho_{o_2} V_{s_2} + \rho_e V_d} \right] \quad (3.29)$$

$$e \quad P_2 = P_{CJ} \left[ 1 + \frac{\rho_{o_2} V_{s_2} - \rho_e V_d}{\rho_{o_2} V_{s_2} + \rho_e V_d} \right] \quad (3.30)$$

onde  $\rho_e$  = Densidade do explosivo.

No caso de sistema bidimensional, caso normal no desmonte de rocha, devemos tomar  $P'_{CJ} = P_{CJ}/2$  ao usar as equações (3.29) ou (3.30). Isto se deve, em parte, ao fato do explosivo / não encher, normalmente, o furo da rocha que o contém.

No apêndice deste trabalho, apresentamos alguns valores úteis ao estabelecimento da interação explosivo-material rochoso, relativos a alguns tipos de rocha e resultantes de ensaios e aplicação das relações de Rankine-Hugoniot, estudadas no presente capítulo.

## CAPÍTULO IV

### VIBRAÇÕES DO TERRENO

#### 4.1 - GENERALIDADES

Com o desenvolvimento da técnica de desmonte de rocha, o problema das vibrações do solo tem tomado uma grande importância, tornando-se mais ou menos rotineiro o desmonte ao lado de edifícios, ou ainda no centro de uma cidade.

Nas áreas de implantação de barragens e usinas hidro-elétricas é bastante comum a escavação de grandes volumes de rochas próximos a estruturas de concreto. A detonação de cargas / explosivas produz propagação de ondas de choque que originam vibrações de tal natureza que poderão causar eventualmente trincas e fissuras nas estruturas vizinhas. Portanto, o abalo da fundação é o fator predominante na determinação da carga do explosivo a ser/detonada e sua distância às obras de concreto. A grande dificuldade de que se encontra na determinação dos valores limites, correspon

dentes aos diversos graus de variação de danos, reside no fato de que são relativamente poucos os casos de danos comprovados, pois sempre se toma o máximo cuidado em evitar os mesmos.

Como a escavação de rocha é bastante cara e se torna morosa em virtude das limitações impostas pelas estruturas adjacentes, cabe ao empreiteiro determinar se convém sacrificar o andamento e o custo do serviço em favor da maior segurança ou se vale a pena sacrificar a segurança, em favor de maior velocidade na produção.

#### 4.2 - INTRODUÇÃO TEÓRICA

Vimos que a detonação de uma carga explosiva num maciço rochoso produz esforços de compressão (onda transmitida) e esforços de tensão (onda de reflexão) fraturando a rocha nas vizinhanças do local da explosão. A energia restante é transmitida de uma partícula a outra da rocha, fazendo com que esta partícula oscile com as mesmas características da onda explosiva.

Quando as fundações de uma estrutura forem submetidas a vibrações, podem surgir diversos tipos de deformações/ e o dano pode ser causado por tração, cisalhamento ou flexão. Um dos fatores mais importantes em relação aos danos em estruturas é, entre outros, a relação entre a frequência de vibração natural da estrutura e a frequência de abalo, ou frequência artificial. Assim, é possível analisarmos o comportamento da estrutura em função dos tipos de solicitações apresentadas acima:

##### 4.2.1 - Compressão e tração

A análise que se segue se baseia na relação / entre as frequências de abalo e natural de uma estrutura e se fundamenta na Teoria da Elasticidade.

4.2.1.1 - Frequência de abalo para uma vibração vertical menor que a frequência natural de vibração da estrutura ( $f/f_0 < 1$ ).

O valor máximo da aceleração vertical (a) de partícula dá uma deformação máxima na direção correspondente / da parede, dada por (6):

$$\epsilon = 9,81 \rho h a / E \quad (4.1)$$

onde:  $\rho$  = densidade da estrutura ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$h$  = altura da estrutura (m)

$a$  = aceleração de partícula ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$E$  = módulo de elasticidade da estrutura ( $\text{Kg}^* / \text{m}^2$ )

$\mathcal{E}$  = deformação específica

Como:  $a = 2\pi fu = 4\pi^2 f^2 A$

$V = \sqrt{E/9,81\rho}$  (velocidade de propagação da onda na estrutura) (Eq. 3.8)

e  $f_0 = V/4h$  (segundo Langefors)<sup>(6)</sup>

temos:  $\mathcal{E} = 2\pi fu\rho h/E$  (4.2)

ou ainda:

$$\mathcal{E} = \pi^2 f^2 A / f_0 V \quad (4.3)$$

onde:  $u$  = velocidade de partícula (m/s)

$V$  = velocidade de propagação de onda na estrutura (m/s)

$f$  = frequência de abalo (cps)

$f_0$  = frequência natural da estrutura (cps)

$A$  = amplitude de onda na estrutura (m)

4.2.1.2 - Frequência da vibração que chega ( $f$ ) maior que a frequência natural da estrutura ( $f_0$ ), isto é, ( $f/f_0 > 1$ ).

Neste caso, o terreno da fundação tem tempo de oscilar uma ou mais vezes antes que a onda de compressão/alcance o topo da estrutura, evitando-se a ressonância. Quando a fundação se move verticalmente na direção  $dy$  durante um tempo  $dt$ , os esforços se distribuem como uma tração ou compressão ao longo da estrutura<sup>(6)</sup>. A deformação relativa será:

$$\mathcal{E} = \frac{dy}{Vdt} = \frac{u}{V} = 2\pi fA/V \quad (4.4)$$

onde:  $u$  = velocidade de partícula (m/s)

$V$  = velocidade de propagação de onda na estrutura (m/s)

4.2.1.3 - No caso crítico, quando  $f/f_0 \approx 1$ , obtém-se um máximo de ressonância que pode dar lugar a deformações consideravelmente maiores que nos casos anteriores.

#### 4.2.2 - Cisalhamento

Uma onda superficial que se propaga com uma velocidade ( $V_{c_1}$ ) induz vibrações no terreno, as quais, ao se

somarem aos efeitos da aceleração causam efeitos de cisalhamento, podendo o ângulo de cisalhamento, ou distorção, ser expresso sob a forma:

$$\gamma = \frac{dy}{V_{c_i} dt} = \frac{u_1}{V_{c_i}} = 2\pi f A_1 / V_{c_i} \quad (4.5)$$

onde:  $u_1$  = velocidade de partícula da onda superficial (m/s)

$V_{c_i}$  = velocidade de propagação de ondas na estrutura, na direção longitudinal (horizontal) (m/s)

$A_1$  = amplitude da onda longitudinal (m)

#### 4.2.3 - Flexão

As vibrações verticais causam curvaturas na parede da estrutura originando tração e compressão na parte superior. O valor máximo é dado, segundo Langefors<sup>(6)</sup> por:

$$\xi = h \frac{d^2 y}{dv^2} = h a / V_{c_i}^2 = 2\pi f u h / V_{c_i}^2 \quad (4.6)$$

As vibrações horizontais, tanto paralelas como perpendiculares à parede, também podem dar lugar a vibrações de flexão. Sem entrarmos em detalhes, podemos adotar o critério de dano como sendo expressão do tipo da fórmula (4.6) acima.

Os tipos de deformações tratados anteriormente podem evidentemente aumentar pela superposição de tensões locais pré-existentes na estrutura, o que aumentaria a probabilidade de risco de dano na estrutura.

Convém lembrarmos, também, que os problemas de deformações são essencialmente experimentais: ou medimos a deformação para determinarmos a tensão de solicitação ou medimos, no caso presente, frequência e amplitude de oscilação ou frequência e velocidades de partícula e de propagação, para determinarmos a deformação experimentada.

Mais adiante abordaremos o problema de medições: parâmetros da rocha, instrumentos de medidas de campo e avaliação de resultados.

De qualquer modo, observamos que procuramos /

nos basear em, pelo menos, dois parâmetros, para a avaliação de danos e, conseqüentemente, para a fixação das condições de segurança na detonação, como veremos posteriormente.

Isto é perfeitamente justificável. Poderíamos / incorrer em graves erros se considerássemos só um parâmetro do terreno. Assim, por exemplo, uma detonação numa rocha dura e compacta, como o granito, produz uma onda que se propaga no maciço rochoso com alta frequência, porém com pequena amplitude, isto é, a partícula da rocha oscila pouco. Já na mesma detonação em rochas / ou alteradas como os basaltos, calcáreos, etc, a frequência da oscilação é baixa, mas a amplitude é grande. A consideração, pois, destes dois parâmetros nos conduzem a resultados mais reais nas formulações das deformações e da determinação das cargas explosivas a detonar em função da distância segura de detonação com relação ao ponto a proteger.

#### 4.3 - CRITÉRIOS DE INTERPRETAÇÃO

A seguir, serão apresentados alguns dos critérios mais usualmente empregados na análise de vibrações mecânicas. Deve-se notar, de início, que a maioria desses critérios não coincide matematicamente. (27)

##### 4.3.1 - Redução das acelerações às escalas sismológicas.

Como os efeitos dos fenômenos sísmicos já tenham sido bem estudados e existam diversas escalas de suas intensidades, pensou-se em relacionar as vibrações provocadas pelo homem, àquelas escalas. Pode-se mostrar que, para se julgar do efeito de uma vibração artificial, basta reduzir-se sua aceleração / por meio de um fator de correção e, com o valor reduzido, entrar nas escalas sismológicas. Se a frequência for próxima de 1 cps, não se faz correção; se, entretanto, for mais alta, a correção será feita dividindo-se a aceleração pelo valor da frequência.

Das diversas escalas sismológicas, em virtude de seus níveis bem especificados, costuma-se escolher a de Mer - calli-Cancani-Sieberg que, a seguir é transcrita em parte.

<u>Grau</u>	<u>Intensidade de efeito</u>	<u>Aceleração reduzida (cm/s<sup>2</sup>)</u>
I	Não percebida pelos sentidos	0 - 0,25
II	Muito ligeira	0,25 - 0,50
III	Ligeira	0,50 - 1,00
IV	Moderada	1,00 - 2,50
V	Regularmente forte	2,50 - 5,00
VI	Forte	5,00 - 10,00

#### 4.3.2 - Critério da intensidade de oscilação <sup>(45)</sup>

W. Zeller caracteriza a nocividade de uma vibração através de uma quantidade K, a que chamou de intensidade de oscilação, ou seja, a energia dissipada pela oscilação e que é definida como: <sup>(6-27)</sup>

$$K = \frac{a_{\text{máx}}^2}{f} \quad (4.7)$$

onde K = intensidade de oscilação (m<sup>2</sup> /s<sup>3</sup>)

a<sub>máx</sub> = valor máximo da aceleração do fenômeno (m/s<sup>2</sup>)

f = frequência da vibração (cps)

Zeller apresenta diversos graus de nocividade, alguns dos quais aqui apresentamos:

<u>Grau</u>	<u>Intensidade do efeito</u>	<u>K (cm<sup>2</sup> /s<sup>3</sup>)</u>
I	Imperceptível	< 2
II	Muito ligeira	2 - 10
III	Ligeira	10 - 50
	Fissuras finas	25 - 100
IV	Moderada	50 - 250
V	Regularmente forte	250 - 1000
VI	Dano provável a estrutura	1000 - 5000

#### 4.3.3 - Critério da Escala PAL

Como os valores numéricos da intensidade de vibração K, na zona de percepção de vibrações, cobrem um largo intervalo, de cerca de 10<sup>-1</sup> cm<sup>2</sup> /s<sup>3</sup> (Grau I) até 10<sup>7</sup> cm<sup>2</sup> /s<sup>3</sup> / (Grau XII - grande catástrofe), foi introduzida pela Norma Preliminar DIN 4150, uma medida logarítmica, denominada "medida de

intensidade de vibração", cuja unidade foi designada por "pal" e cuja equação definição é a seguinte:

$$S = 20 \log \frac{u_o}{u_s} \quad (4.8)$$

onde: S = Medida de intensidade de vibração (pal)

$u_o$  = Valor eficaz da velocidade do corpo em oscilação (m/s)

$u_s = 3,16 \times 10^{-4}$  m/s, correspondente ao limite de percepção sensorial.

A seguir, apresentamos alguns graus da escala PAL.

<u>S(pal)</u>	<u>Intensidade do efeito</u>
0 - 10	Limite de percepção, conforme a posição do corpo.
10 - 20	Percepção geral
20 - 30	Desagradável para pessoas; se estas estiverem/ em edifícios e a causa for tráfego, as trepidações são inadmissíveis
30 - 40	Danos ligeiros em edifícios

#### 4.3.4 - Critério de H. W. Koch

Koch descreve os efeitos de vibrações e os relaciona com a seguinte expressão:

$$S' = 20 \log \frac{10^3 a_o}{8} + 30 \log f \quad (4.9)$$

onde: S' - Intensidade de vibração (medida em "vibrar")

$a_o$  - Valor eficaz da amplitude (cm)

f - Frequência do fenômeno (cps)

Os diversos graus da escala Koch podem ser agrupados como a seguir:

<u>S'(Vibrar)</u>	<u>Intensidade do efeito</u>
Até 30	Nenhum dano em edifícios
30 - 40	Danos ligeiros (fissuras em reboco, pequenas trincas em paredes esbeltas).
40 - 50	Fortes danos em edifícios (trincas em paredes espessas)
50 - 60	Rutura de estruturas de edifícios

#### 4.3.5 - Critério de R. Kohler

O autor julga o efeito das trepidações através da quantidade de energia transferida em um quarto do período da oscilação, designando essa quantidade por índice de danos  $S''$ , definido por:

$$S'' = 78,96 A^2 f^3 \quad (4.10)$$

onde:  $S''$  = Índice de danos ( $\text{mm}^2 / \text{s}^3$ )  
A = Amplitude do fenômeno (mm)  
f = Frequência (cps)

Kohler não constatou danos em estruturas com índices de danos menores que  $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}^3$ .

#### 4.3.6 - Critério de F.J.Crandell (17-18)

Foi considerado por muito tempo o melhor critério para o problema de detonação de cargas de dinamite próxima a estruturas. Pela primeira vez levou em consideração a natureza do meio em que as ondas se propagam.

De suas investigações experimentais, Crandell concluiu que uma relação de energia (R.E.) pode ser usada como medida do dano que pode sofrer uma estrutura devido a vibrações no terreno. Concluiu ainda que a (R.E.) é proporcional ao quadrado do peso de explosivo detonado a qualquer instante e inversamente proporcional ao quadrado da distância do ponto de detonação ao ponto de captação.

A relação de energia foi, então, definida como :

$$RE = \frac{a^2}{f^2} \quad (4.11)$$

onde: RE = Relação de energia ( $\text{m}^2 / \text{s}^2$ )  
a = Aceleração máxima ( $\text{m}/\text{s}^2$ )  
f - Frequência da vibração (cps)

Dos resultados experimentais obteve a seguinte relação:

$$RE = k \frac{Q^2}{d^2} \quad (4.12)$$

onde:  $k$  = Constante para um determinado meio

$Q$  = Carga de dinamite por espera (Kg)

$d$  = Distância ponto de detonação - captação (m)

Concluiu que  $RE = 0,28 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$  seria o limite de segurança.

Assim, partindo do ensaio para a aplicação do explosivo no desmonte de rocha, poderemos, pela lei da semelhança, relacionarmos a carga do explosivo com a distância segura, como veremos mais adiante.

#### 4.3.7 - Critério de Langefors, Kihlstron e Westerburg

São critérios mais recentes: baseiam-se na velocidade de vibração de partículas na rocha de fundação. Concluíram que  $7,35 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  é a velocidade de partículas limite de segurança, sugerindo ainda os autores que a velocidade de partícula é proporcional a  $(Q \cdot d^{-1,5})$ , sendo ( $Q$ ) a carga explosiva (Kg) e ( $d$ ) a distância (m) (6-19).

Suas conclusões, resultantes de experiências com séries de mais de 100 explosões, relacionadas aos danos que podem causar são as seguintes para os índices limites correspondentes a  $(Qd^{-1,5})$ :

<u><math>Q/d^{1,5} \text{ (Kg/m}^{1,5})</math></u>	<u>Efeitos em prédios comuns</u>
0,008	Queda de reboco, ou pedras soltas . Nenhum fendilhamento
0,015	Queda de reboco firme
0,020	Fissuras não visíveis
0,060	Fendilhamento desprezível com detonações contínuas
0,120	Formação de fendas com detonações / contínuas
0,250	Rachaduras grandes
0,500	Danos pesados
1,000	Rachaduras em rochas

No capítulo seguinte, apresentaremos gráfico correspondente aos valores acima, na parte de limitação das vibrações

#### 4.3.8 - Critério de Edwards e Northwood<sup>(19)</sup>

Os autores se basearam no mesmo critério anterior, sugerindo  $5,08 \times 10^{-2}$  m/s como velocidade limite de partículas.

#### 4.3.9 - Critério de Duvall e Fogelson<sup>(20)</sup>

Estes autores realizaram um estudo estatístico de resultados obtidos anteriormente por outros autores, concluindo que sérios danos ocorrem com velocidade de partículas superiores a  $17,76 \times 10^{-2}$  m/s e que  $5,08 \times 10^{-2}$  m/s parece ser uma velocidade razoável entre uma zona de provável perigo e de relativa segurança.

#### 4.3.10 - Critério de James Devine<sup>(21)</sup>

O critério baseado na fixação da velocidade de partículas, foi aproveitado por Devine: "se os componentes de vibração no sub-solo perto de uma estrutura têm velocidade de partículas menor que  $5,08 \times 10^{-2}$  m/s há pequenas possibilidades de ocorrer danos a estruturas. A possibilidade de ocorrer danos aumenta com o aumento do nível de vibração".

Devine apresenta gráficos bilogarítmicos onde coloca a velocidade máxima de partículas em função da distância ponto de detonação - ponto de captação, obtendo uma equação do tipo:

$$u = K(Q/d^{0,5})^{-B} \quad (4.13)$$

onde: u = Velocidade de partículas (m/s)

K = Constante para cada meio

Q = Carga máxima de explosivo por espera (Kg)

d = Distância ponto de detonação - ponto de captação (m)

B = Tangente da reta obtida.

#### 4.3.11 - Critério de Ambraseys e Hendrom<sup>(27-46-47)</sup>

Estes autores, analisando os critérios existentes concluíram também que a velocidade de partículas é o mais aceitável critério para a segurança de estruturas. Baseando-se em análise dimensional do problema estabeleceram que a veloci-

dade de partículas é proporcional à relação  $(d/Q^{1/3})$ , sendo (d) a distância (m) e (Q) a carga explosiva (Kg). Essa mesma lei foi utilizada por Medvedev em trabalho recente (1968).

#### 4.3.12 - Critério Sueco<sup>(6)</sup>

Para uma boa avaliação dos eventuais danos / causados a construções civis normais ou a rochas remanescentes de dureza média, o Departamento de Pesquisas da Técnica de Desmonte/ (Suécia) em conjunto com o Departamento de Estradas de Rodagem da cidade de Estocolmo, elaborou uma tabela que relaciona os tipos / de danos possíveis com a relação entre a velocidade de oscilação/ (u) e a velocidade de propagação da onda explosiva (V). Quando um caso em 50 chegou a causar dano, o valor correspondente foi tomado por base para elaboração da tabela.

<u>u/V(μ/m)</u>	<u>Efeitos sobre construções civis ou rocha remanescente</u>
10	Queda de reboco solto
17	Queda de reboco firme
25	Rachaduras não visíveis
33	Rachaduras leves
50	Aparecimento de trincas
75	Aparecimento de grandes fendas
100	Queda de pedras em túneis

Veremos no capítulo seguinte, que partindo - se das medidas no terreno podemos chegar à determinação da quantidade de explosivos a detonar por espera, em função da distância / para determinado nível de segurança.

## CAPÍTULO V

### LIMITAÇÃO DAS VIBRAÇÕES NO TERRENO

#### 5.1- GENERALIDADES

Limitando-se as vibrações causadas pelas ondas de

choque das explosões, é possível executar desmontes a fogo junto de construções, sem danificá-las e evitar a abertura ou a ampliação de fendas na rocha remanescente.

Dentro de certos limites (até 100 Kg por espera e até 800-1000 metros) a frequência das vibrações independe da carga explosiva e da distância da explosão ao ponto considerado, variando apenas com a natureza da rocha entre amplos limites (5 a 500 cps). É maior nas rochas duras e compactas do que nas rochas brandas fendilhadas ou parcialmente alteradas. Na maioria dos casos até hoje conhecidos, a onda de choque apresenta as três componentes com a mesma ordem de grandeza (Fig. 5.1). É normal medir-se apenas a componente vertical, fazendo-se uma verificação esporádica das outras duas (6-17).

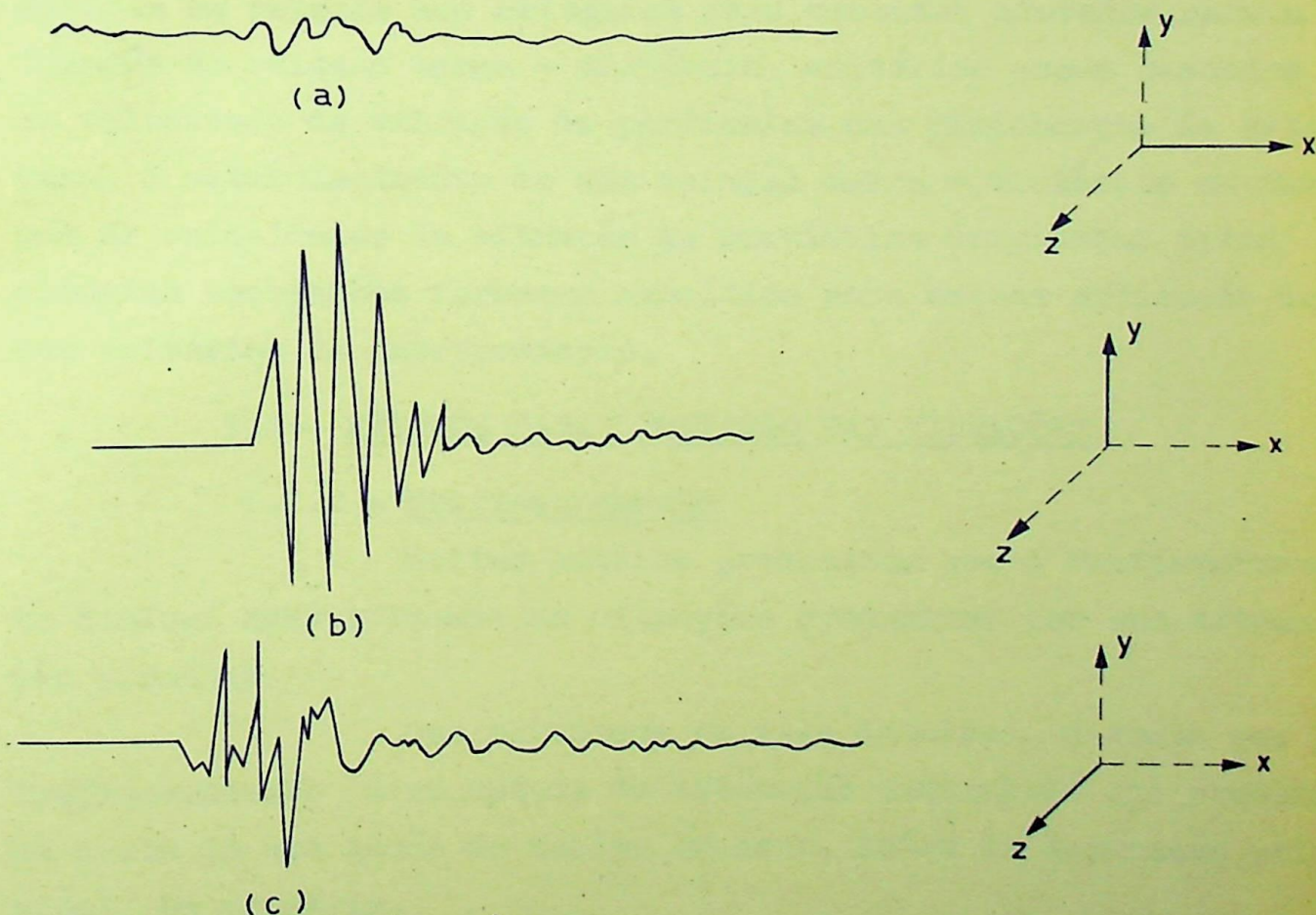


Fig. 5.1 - Comparação de frequências

(a) Longitudinal (onda de compressão) . Predomina /  
baixa frequência

(b) Vertical. Predomina alta frequência

(c) Transversal (cisalhamento), A onda inicia com al  
ta frequência, acabando com baixa frequência.

Detonando-se uma única carga isolada (Q), onda de choque só irá alcançar sua amplitude máxima (A) após algumas oscilações menores. Como regra geral, só existem três ondas de grande amplitude (superior a  $A/2$ ); as ondas seguintes sendo desprezíveis devido ao rápido amortecimento (caimento)

O problema da limitação das vibrações no terreno consiste na fixação da relação carga de explosivo - distância segura visando a segurança nas vizinhanças de frentes de desmonte, seja em estruturas ou na rocha remanescente. Tal relação é geralmente determinada através da detonação de pequenas cargas de dinamite a distâncias conhecidas de aparelhos registradores. No entanto, as informações fornecidas por essa técnica podem ser deficientes em relação aos critérios mais recentes adotados para a fixação da relação carga - distância, critérios esses baseados na velocidade de vibração de partículas nas vizinhanças da estrutura. O estabelecimento de uma relação carga - distância em função de velocidades de vibração de partículas originadas pelas próprias escavações fornecem subsídios para melhor aplicação desses critérios de interpretação.

## 5.2 - MÉTODOS PARA LIMITAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

### 5.2.1 - Prefissuramento

Muitos autores preconizam que o Prefissuramento diminui sensivelmente as vibrações produzidas por uma detonação primária.

Sem entrarmos em mais detalhes, diremos que o Prefissuramento é um método de detonação controlada que produz um corte de uma seção do maciço rochoso, antes da detonação principal, ou primária.

Não seria prudente afirmarmos que o Prefissuramento diminui as vibrações se considerarmos os estudos apresentados na publicação nº6695 do Bureau of Mines dos Estados Unidos, que dizem o contrário.

Após os trabalhos do Projeto Niágara, a técnica

ca de Prefissuramento foi sendo adotada pensando-se, principal - mente, em redução dos níveis de vibração. O Bureau of Mines re - solveu, então, investigar se existia uma significativa redução no nível de vibração em um dado ponto de observação de superfície da rocha, pela criação de um plano de fratura entre o ponto de deto - nação e o ponto de observação. Através de uma comparação entre / os níveis de vibração numa determinada área antes e depois do / Prefissuramento vertical da rocha, os engenheiros do Bureau of Mines concluíram que: "análises da velocidade de partícula em 13 detonações feitas em dois campos de prova diferentes, mostraram / que a introdução do plano de fratura vertical de Prefissuramento não causa uma redução significativa no nível de vibração na área atrás do plano de fratura. Análises da aceleração de partícula / em 10 detonações também mostraram que a criação de planos de fra - turas verticais, entre as detonações e a estação registradora , não reduz significativamente o nível de vibração na estação re - gistradora. Foi também demonstrado que os níveis de vibração da detonação para formar o Prefissuramento podem ser mais altas do que aquelas alcançadas pela detonação principal". Isto está coe - rente com o que foi mostrado no item 3.5.2.

#### 5.2.2 - Defasamento na detonação

Pode-se obter, teoricamente, uma redução quase / total das ondas de choque, detonando-se as várias cargas com in - tervalo igual a meio período,  $\tau = \frac{1}{2} T$ .

A Fig. (5.2) abaixo ilustra o resultado deste / defasamento.

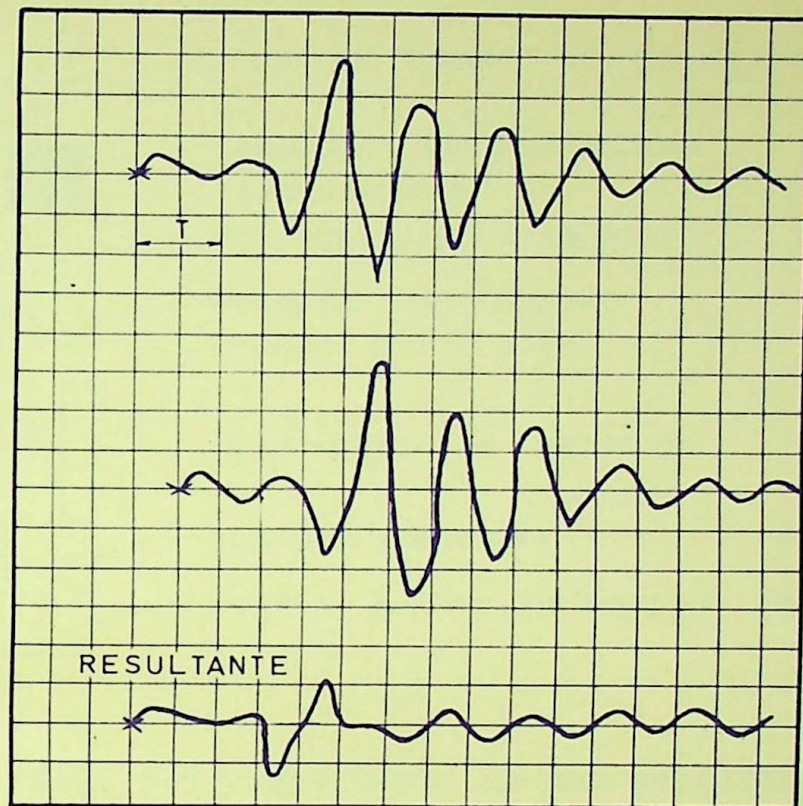


Fig. 5.2 - Anulamento parcial de ondas de choque com / tempo de espera =  $1/2 T$

Essa coincidência é muito rara, na prática, devido ao uso de espoletas ou retardadores de cordel, fabricados com tempos de espera pré-determinados. Prefere-se por isso escolher uma espera tal que  $\bar{\tau} \geq 3T$ , onde  $\bar{\tau}$  é a espera e  $T$ , o período/característico da rocha. Deixa-se, assim, passar o trem de ondas completo de uma espera antes de aparecer o trem de ondas da espera seguinte, sem que haja superposição. A amplitude máxima das vibrações nunca será, desta forma, superior à da carga de uma única espera.

Para melhor entendermos o defasamento prático com espoletas elétricas de retardo ou com retardadores de cordel detonante, veremos sucintamente, a estrutura, funcionamento e características das espoletas e retardadores de fabricação nacional.

A Fig.(5.3) abaixo, ilustra a estrutura de uma

espoleta elétrica de retardo, que pode ser de espera rápida ( até 100 miligundos de atraso) ou de espera lenta (500 ms de atraso) .

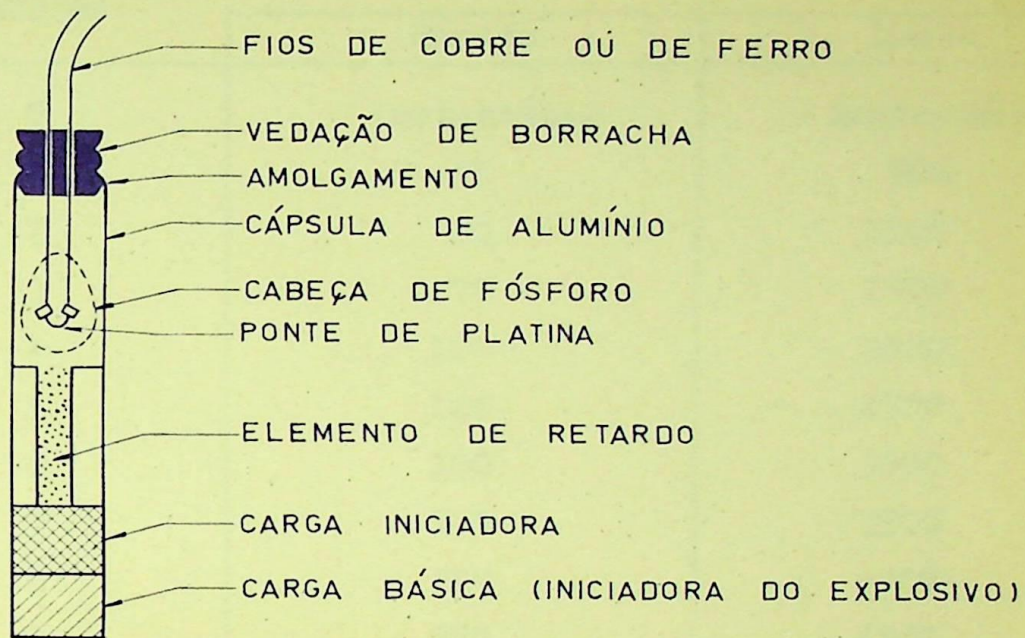


Fig. 5.3 - Estrutura de uma espoleta elétrica

A passagem da corrente elétrica aquece a ponte de platina que inflama a pérola (cabeça de fósforo) a qual provoca a detonação da carga explosiva com maior ou menor retardo, dependendo da quantidade e da pressão do elemento de retardo.

O tempo necessário à queima da pérola, chama-se / tempo de ignição e o tempo para rompimento do circuito da espoleta, chama-se tempo de rutura. O tempo de reação é, assim, a diferença/ entre o tempo de rutura e o tempo de ignição.

O quadro da tabela (5.1) abaixo, relaciona as esperas com os respectivos tempos de retardo para os dois tipos de espoletas nacionais<sup>(31)</sup>.

ESPERA	Tempo de atraso (ms)	
	Rápida	Lenta
0	Instantâneo	Instantâneo
1	25	500
2	50	1000
3	75	1500
4	100	2000
5	125	2500
6	150	3000
7	175	3500
8	200	4000
9	250	4500
10	300	5000
11	350	5500
12	400	6000

Tab. 5.1 - Tempos de atraso das diversas esperas das espoletas elétricas de retardo, de fabricação nacional

A tolerância ( $\Delta \bar{x}$ ) em torno dos valores nominais acima é de:

- + 12 ms para intervalos de 25 ms
- + 25 ms para intervalos de 50 ms
- + 50 ms para intervalos de 100 ms
- + 230 ms para intervalos de 500 ms

Na Fig. (5.4) abaixo, ilustramos a estrutura de um retardador de cordel detonante.

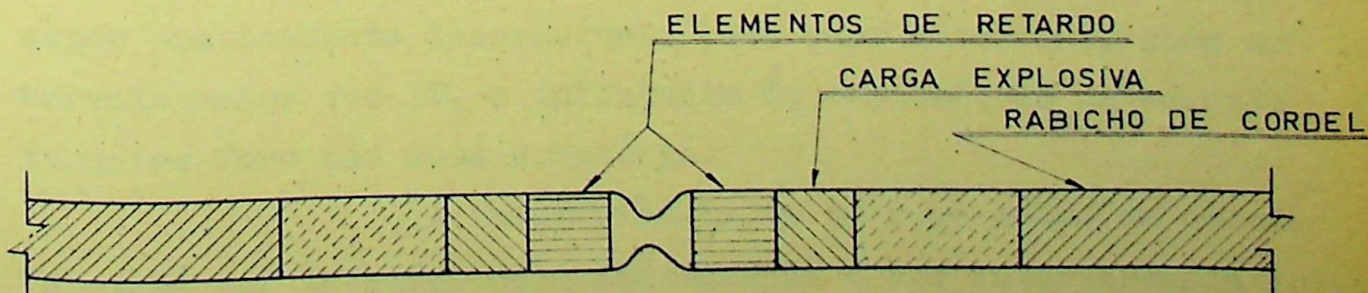


Fig. 5.4 - Retardador para cordel detonante.

O retardo da onda detonante do cordel é feito pelos elementos de retardo do retardador. Conforme seja a quantidade e o grau de compactação do misto de retardo, teremos maior ou menor tempo de atraso na onda de detonação.

Na Tab. (5.2) apresentamos relação dos tempos de atraso nominais e os limites admissíveis (tolerância máxima) dos retardadores para cordel de fabricação nacional.

Atraso nominal (ms)	Tolerância máxima (ms)
5	1 - 7
10	8 - 15
20	16 - 24
30	25 - 35
50	40 - 60

Tab. 5.2 - ~~Tempos~~ de atraso dos retardadores de cordel fabricados no Brasil.

Quando a variação ( $\Delta \zeta$ ) do tempo de espera é elevada, como no caso das espoletas nacionais, a probabilidade de que um grande número de espoletas detone em fase, é praticamente/despresível.

As vibrações na rocha podem ser reduzidas à metade ou menos, na proporção em que o tempo de espera ( $\zeta$ ) for maior do que o período da rocha (T).

### 5.3 - REDUÇÃO DAS VIBRAÇÕES

Se detonamos um furo isolado, a amplitude máxima da explosão se verifica após a primeira, segunda e, no máximo, terceira deflexão. Depois disto, a amplitude decresce bastante, sendo praticamente desprezível. Isto quer dizer que, após um intervalo maior que  $3T$ , a influência da explosão de um segundo ou terceiro furo não será somatória.

A interferência de um furo sobre os demais / far-se-á por interferência desordenada e por interferência ordenada.

A interferência desordenada é conseguida por

ação não simultânea das diferentes espoletas dentro de um mesmo intervalo. Essa não simultaneidade ( $\pm \Delta z$ ) começa a agir no sentido / de uma diminuição da amplitude de explosão, desde que ( $\Delta z$ ) atinja meio período da vibração natural ou ultrapasse esse valor. Depende, portanto, em cada caso, do fabricante da espoleta, da espera escolhida e do material rochoso que transmite a onda de choque.

No gráfico da Fig. 5.5 são dados os resultados de um grande número de detonações em granito compacto, portanto em condições particularmente desfavoráveis devido à boa transmissão / das ondas de choque. O gráfico mostra a carga máxima (Q) de explosivo como função da distância (d) em relação ao vulto de danos causados pelas detonações. O limite de 0,06 passa para 0,25 em solo / argiloso. Se as estruturas dos prédios forem em concreto, aplica-se o mesmo multiplicador.

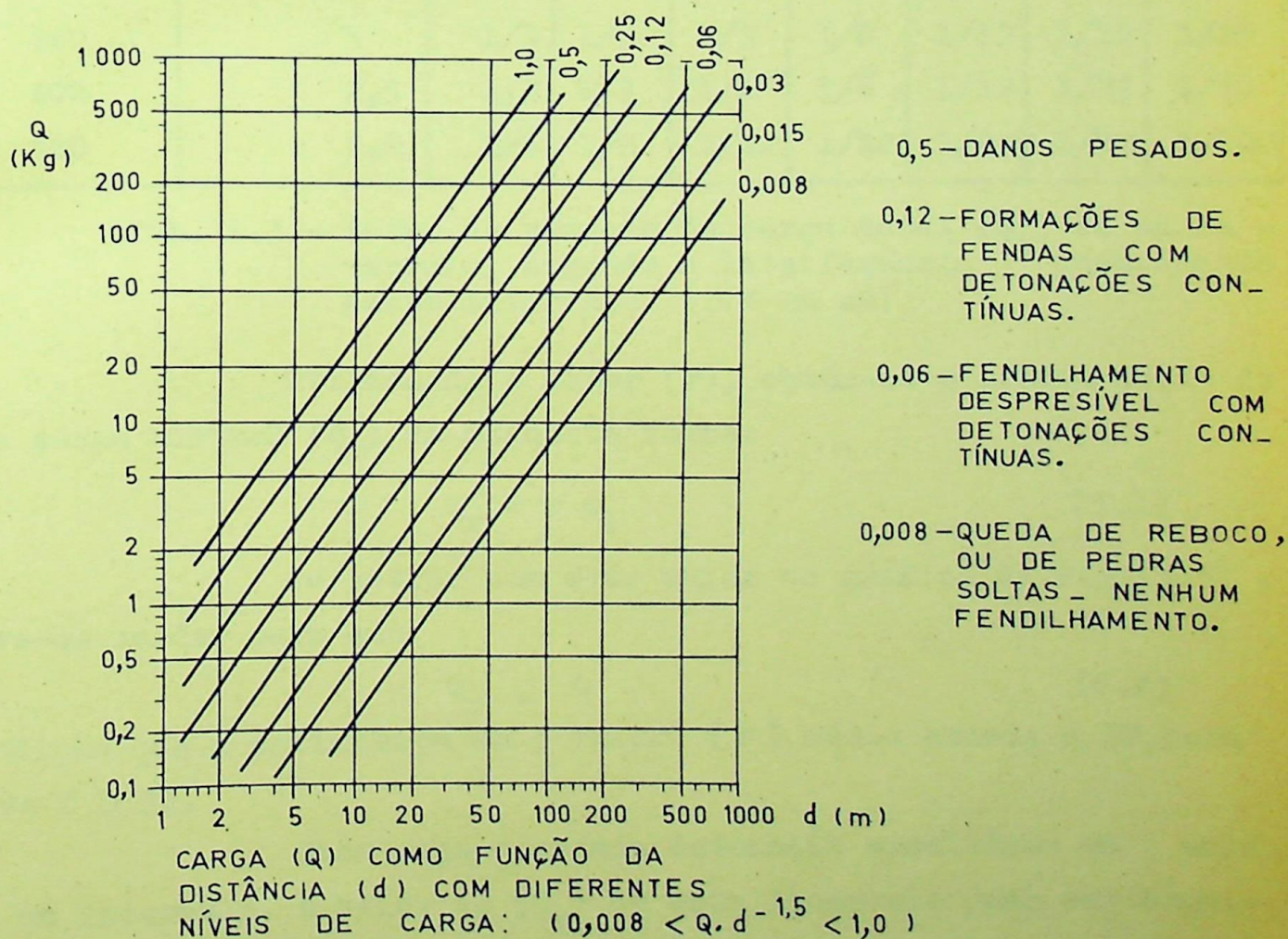


Fig. 5.5 - Relação entre a carga de uma explosão e os danos por ela produzidos, em função da distância de prédios comuns (segundo Langefors). Para os diversos níveis de danos, V. Tab. do item 4.3.7.

Para ilustrar a influência da interferência desordenada entre várias cargas, Langefors apresenta (V.Tab. 5.3) um coeficiente de redução (r) para a carga total ( $Q_i$ ) disparada num mesmo intervalo, em função da frequência (f) própria da rocha e das variações do tempo de espera ( $\bar{\tau}$ )

f (cps)	T (ms)	r						
		$\Delta\bar{\tau}=\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 25$	$\pm 40$	$\pm 100$	$\pm 200$	$\pm 400$
5	200	1	1	1	1	1/2	1/3	1/3
10	100	1	1	1	2/3	1/3	1/3	1/3
20	50	1	1	1/2	1/2	1/3	1/3	1/6
50	20	1	1/2	1/3	1/3	1/3	1/6	1/6
100	10	1/2	1/3	1/3	1/3	1/6	1/6	1/12
200	5	1/3	1/3	1/3	1/6	1/12	1/12	1/25
400	2,5	1/3	1/3	1/6	1/6	1/12	1/25	1/50
500	2,0	1/6	1/6	1/12	1/12	1/25	1/50	1/100

Tab. 5.3 - Fator de redução da carga total ( $Q_i$ ) de um intervalo, segundo a interferência desordenada deste intervalo. ( $\Delta\bar{\tau}$  em ms)

Utilizando o fator (r), obtém-se o efeito real de uma carga virtual ( $Q_r$ ) da seguinte forma:

$$Q_r = r Q_i \quad (5.1)$$

Ao entrar com este valor no gráfico da Fig.(5.5), deve-se cuidar para que

$$Q_r \leq Q \quad (5.2)$$

condição que é satisfeita se o valor ( $\bar{\tau}$ ) médio excede a  $3T$ , isto é, se  $\bar{\tau} \geq 3T$ .

Caso seja desejada detonação simultânea em mais de um intervalo, o valor de ( $Q_r$ ) de cada intervalo pode ser considerado isoladamente e estes valores de ( $Q_r$ ) dos diferentes intervalos não interferem se o tempo do intervalo ( $\bar{\tau}$ ) for superior a ( $3T$ ), conforme já vimos. Neste caso, o primeiro intervalo já está amortecido quando começar a agir o segundo intervalo.

Se  $\bar{c} < 3T$  começa a se fazer sentir o reforço mútuo dos diferentes intervalos, isto é, os diversos ( $Q_r$ ) poderão se fazer sentir ao mesmo tempo e se reforçar mutuamente. Se, por exemplo,  $\bar{c} = T$ , a primeira espera, a segunda e a terceira se reforçarão, mas a primeira e a quarta não se influenciarão, bem como a segunda e a quinta. Vale, então, a condição

$$3 Q_r \leq Q \quad (5.3)$$

Quando  $\bar{c} < T$  verifica-se em geral que  $\Delta \bar{c} < T/2$  e resulta (Tab. 5.3) um fator  $r = 1$ . Nesse caso, a carga ( $Q_i$ ) de cada intervalo age integralmente mas os diferentes intervalos sofrem a interferência ordenada. Nestas condições, vale a fórmula:

$$n \bar{c} = kT \quad (5.4)$$

desde que se verifique que  $k$  é inteiro, mas  $k/n \neq 1, 2, 3, \dots$  ( $n =$  número de intervalos).

Quando isto se verifica, duas cargas que se encontram nessas condições se amortecem mutuamente e o abalo resultante é apenas o correspondente a uma das cargas.

Para ilustrar, suponhamos 6 furos de uma só fileira, carregados com 1 kg de explosivo (cada), todos eles com espelhas de variação  $\Delta \bar{c} = + 10$  ms, num granito com frequência de 100 / cps. Pela Tabela (3.3) o fator de redução ( $r$ ) é  $1/3$ . A onda resultante terá uma amplitude máxima igual à que corresponderia a 2 furos que fossem detonados simultaneamente, ou sejam, 2 kg de explosivos. Por outro lado, se as vibrações do terreno têm uma frequência de 20 cps não podemos esperar uma redução do efeito de vibração em comparação com a iniciação instantânea.

#### 5.4 - MEDIDAS DE CAMPO E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

As medidas efetuadas no campo têm por objeto determinar a frequência própria da rocha ( $f$ ), a amplitude da vibração ( $A$ ), a velocidade de propagação das ondas ( $V$ ) e o número de ondas do trem até amortecimento de 40-50 %. Podem ser efetuadas com osciloscópios, detetores de vibrações ou vibrógrafos. Podemos determinar apenas a componente vertical da onda, o que é suficiente na maioria dos casos, ou as três componentes, se dispomos de vi-

brógrafo tri-ortogonal.

As vibrações provenientes das ondas de choque, são captadas por transdutores que transformam o impulso mecânico do fenômeno em sinais elétricos, proporcionais à velocidade das vibrações; esses sinais são enviados, amplificados e registrados em fitas de um oscilógrafo.

Através dos registros obtidos, pode-se determinar a velocidade e a frequência da vibração. Admitindo que esta última, a favor da segurança, possa ser substituída por um fenômeno harmônico, de mesma velocidade e frequência, todas as demais características podem ser determinadas por cálculo.

Na execução das medidas, quer com detetor, quer com vibrógrafos, é muito importante ancorar firmemente os aparelhos na rocha com chumbadores injetados, devido ao elevado valor das acelerações que poderiam levantar o aparelho do suporte durante as oscilações.

Detona-se normalmente uma carga de 100 gramas de explosivo colocada no fundo de um furo vertical com 60 cm de profundidade, bem tamponada. Instala-se o aparelho de medida a 30 ou 40 metros do furo.

Não dispondo de aparelhamento registrador das ondas, pode-se estimar os efeitos das vibrações, utilizando o sismômetro de queda de pinos, de fácil execução no próprio local da obra.

Basicamente este aparelho consta do seguinte: Uma série de cilindros circulares apoiados em superfícies planas horizontais e perfeitamente lisas. São pinos de aço com diâmetro aproximado de 6,35 mm e cujos comprimentos são: 102, 127, 152, 203, 254 e 381 mm (V.Fig. 5.6).

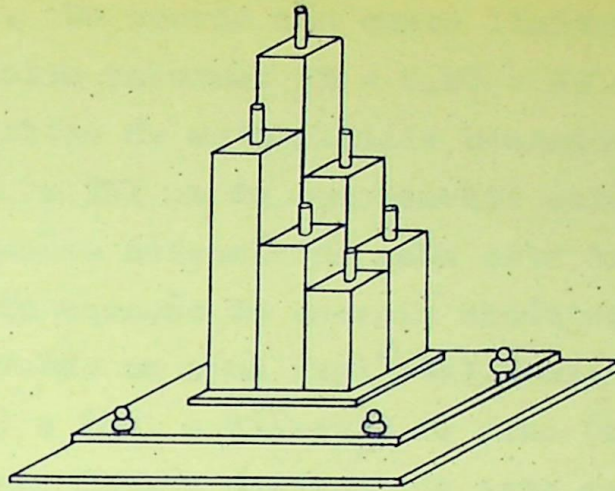


Fig. 5.6 - Sismômetro de queda de pinos

Uma detonação causará a queda de um certo número de pinos, dependendo da carga e da distância.

Podemos usar, inicialmente, uma pequena quantidade / de carga, aumentando-a gradativamente. A queda de um pino depende da energia transmitida à sua base pelas vibrações, portanto, tendo estrita relação com a equação abaixo, adaptada ao caso, e devida a Crandell (17-18).

$$E_k = \left( \frac{p}{8 g \pi^2} \right) \cdot \left( \frac{a^2}{f^2} \right) \quad (5.5)$$

onde:  $E_k$  = energia cinética (joules)

$p$  = peso da massa em vibração (kgf)

$g$  = aceleração da gravidade ( $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$ )

$a$  = aceleração do fenômeno ( $\text{m/s}^2$ )

$f$  = frequência de vibração (cps)

A primeira fração da equação é uma constante para / qualquer local, dependendo da massa em vibração. Por conseguinte, se a massa é constante, a energia cinética ( $E_k$ ) pode ser considerada como sendo proporcional a  $(a^2/f^2)$ . Esta grandeza  $(a^2/f^2)$  recebe o nome de energia relativa ou relação de energia (R.E.) como já vimos no item (4.3.6)

Baseando-se em um grande número de experiências práticas podemos estabelecer dois limites, um inferior e outro superior, levando-se em conta somente a aceleração. Teremos para o in-

ferior um valor que será 0,1 g (gravidade) e o superior, de valor/ igual à mesma (g). De acordo com esses limites estabelecidos, R.E. assumirá os seguintes valores:  $RE = 0,28$  e  $RE = 0,56 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ .

Limites de estabilidade baseados em translação para pinos de 152, 254 e 381 mm de comprimento estão em tracejado na Fig. 5.7. As relações necessárias para este tracejado podem ser obtidas a partir da equação da energia cinética para o trabalho necessário para derrubar um pino ( $mgd^2/4h$ ), onde (m) é a massa (kg), (h) é a altura (m) e (d), o diâmetro do pino (m).

Essas linhas mostram que este conceito quando se usam pinos de dimensões padronizadas, é mais conservativo que o da energia relativa (Eq. 5.5), definida acima e na Eq (4.11). Aos pinos de 152, 254 e 381 mm correspondem, respectivamente, as energias de 0,048, 0,029 e 0,019.

Afirma-se que nenhum dano irá ocorrer, quando os pinos mais curtos, ou mesmo quando qualquer dos mesmos, permanecer / em pé.

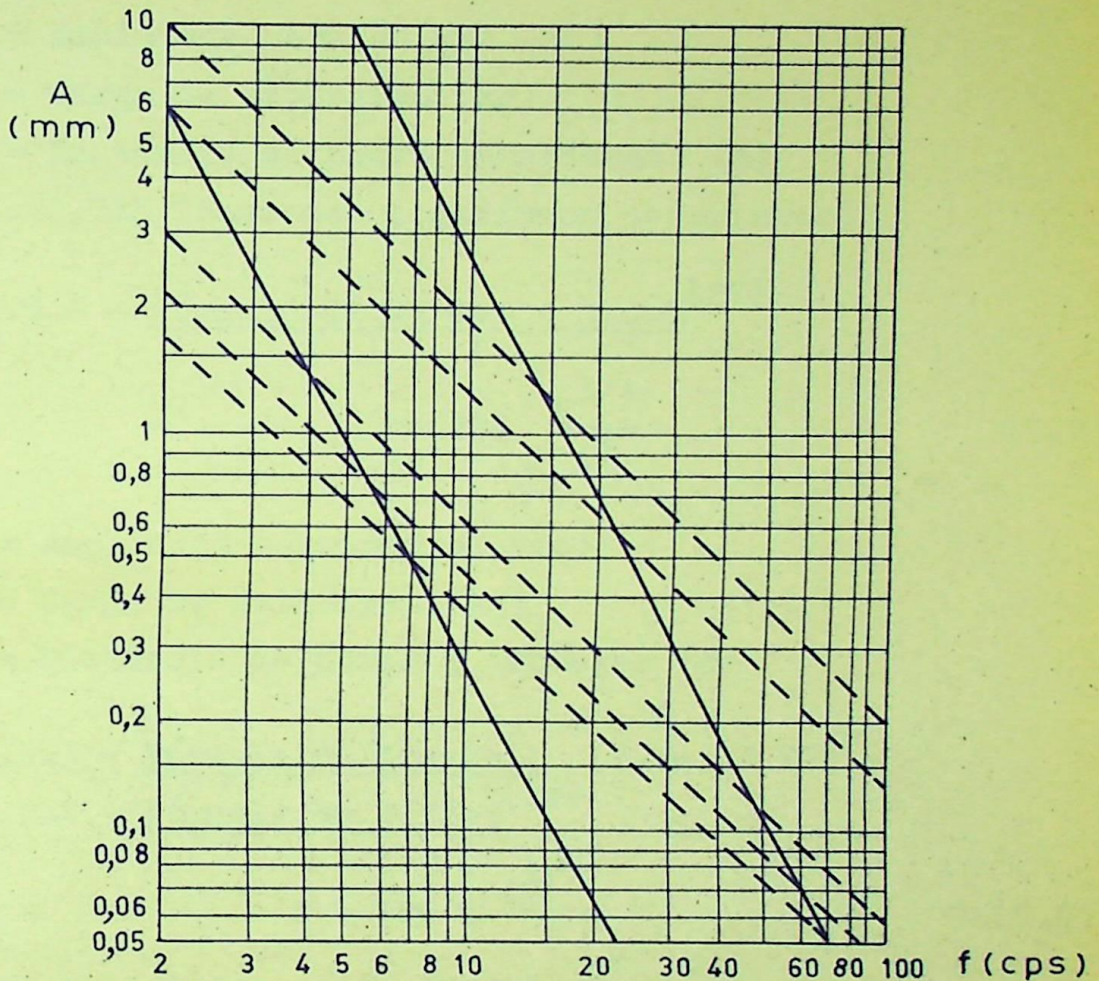


Fig. 5.7 - Relação entre a frequência (f) e a amplitude de deslocamento (A) para diferentes velocidades (linhas cheias) e acelerações (tracejadas).

### 5.5 - DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO CARGA - DISTÂNCIA

Obtidos os resultados dos ensaios para medi - das dos parâmetros da rocha, poderemos, a partir dos critérios já estudados, determinar qual a carga explosiva máxima a ser detona - da por espera. A seguir, apresentamos algumas expressões para o / cálculo da carga (Q). Os resultados das mesmas geralmente não / coincidem, devendo-se este fato a que as mesmas são empíricas, ob - tidas normalmente por análises de regressão, em locais de observa - ção os mais diversos.

5.5.1 - Fórmula de Theonem e Windes (22-23-48)

$$A = \frac{4,31}{100} Q^{2/3} (0,07 e^{-0,00469d} + 0,001) \quad (5.6)$$

onde: A = Amplitude permissível (cm)  
Q = Carga de explosivo (kg)  
d = Distância ao ponto considerado (m)  
e = 2,718 (base dos logarítmos neperianos)

5.5.2 - Fórmula de Carder e Cloud (27)

$$A = 20,234 \frac{Q^{3/4}}{d^2} \quad (5.7)$$

onde: A = Amplitude permissível (cm)  
Q = Carga de explosivo (kg)  
d = Distância ao ponto a proteger (m)

5.5.3 - Fórmula de Crandell (V.Eq. 4.12)

5.5.4 - Fórmula de Deffet (24)

$$A = 100 k \frac{Q^{1/2}}{d} \quad (5.8)$$

onde: A = Amplitude permissível (cm)  
Q = Carga explosiva em (kg) x força em (%)  
d = Distância ao ponto considerado (m)  
k = Constante do meio (0,3 a 10)

5.5.5 - Fórmula de Medvedev e Lyamzina (Ac. S. da URSS) (27)

Para vibrações horizontais, radiais ou transversais, pode-se tomar como média a expressão:

$$A = 54 k^{2/3} \quad \text{sendo } k = \frac{Q^{1/3}}{d} \quad (5.9)$$

onde: A = Amplitude permissível (mm)  
Q = Carga explosiva (kg)  
d = Distância ao ponto considerado (m)

Em síntese, poderemos adotar a seguinte rotina de cálculo:

a) Com a aparelhagem, registramos, por exemplo, a frequência (f) e a velocidade (V) de propagação da onda de choque na rocha.

b) Por meio de um critério de danos (o Sueco, / por exemplo, - item 4.3.12) determinamos a velocidade de oscilação da onda (u) em função da extensão dos danos que a onda causa.

c) Associando o fenômeno a um fenômeno harmônico, determinamos a amplitude máxima (A) admissível para a extensão de danos fixada, através da fórmula:

$$A = \frac{u}{2 \pi f} \quad (5.10)$$

d) Com este valor de (A) determinamos a carga / máxima (Q) através de uma das expressões do item (5.5).

e) Da análise das interferências desordenada e ordenada, determinaremos o número de esperas ou retardadores para a detonação, lembrando que o efeito redutor das vibrações aumenta com o número de esperas.

f) Se dispomos de gráficos do tipo da Fig.5.5 , podemos determinar a carga (Q) com mais rapidez e com boa aproximação.

No apêndice, apresentamos alguns exemplos / práticos de determinações e detonações feitas em diferentes partes do Brasil.

## C O N C L U S Õ E S

1. Partindo dos fundamentos da interação de ondas de choque entre materiais de impedâncias diferentes, é possível estabelecermos uma interação entre explosivo e material, em proveito da maior eficiência no emprego do explosivo. Esta interação fica melhor estabelecida com o advento de osciloscópios e câmaras de alta velocidade, o que possibilita uma determinação mais precisa da velocidade sônica no explosivo, da velocidade de partículas, da velocidade e da pressão de detonação, permitindo-nos aplicar simultaneamente a relação de Chapman-Jouguet e as equações de Rankine-Hugoniot. Por outro lado, tornar-se-á cada vez mais necessário, o conhecimento dos parâmetros do material rochoso a desmontar.

2. Do conhecimento das propriedades dos explosivos e dos acessórios de iniciação e de retardamento e das características do maciço rochoso, podemos controlar as detonações evitando danos em estruturas próximas ao local das explosões. Os critérios mais modernos devem merecer a preferência na avaliação de danos, pois baseando-se nos limites da velocidade de partículas, englobam frequência e amplitude dos fenômenos de vibrações. Tais parâmetros devem ser obtidos na rocha "in situ", dadas a heterogeneidade e a anisotropia da mesma.

3. Por outro lado, torna-se necessário para a generalização e prosseguimento do assunto, o seguinte:

3.1 - Determinação das curvas de reflexão característica de Hugoniot, para explosivos misturas como "slurries" e dinamites.

3.2 - Determinação da relação entre velocidade de partícula e velocidade de detonação para os explosivos do item anterior, uma vez que só para explosivos puros é válida a relação  $u = \left[ \frac{1}{\gamma + 1} \right] V_D$ ,

o que torna possível a Eq. (2.10).

- 3.3 - Medidas de velocidade de partícula em explosivos de um modo geral e a pressão correspondente.
- 3.4 - Determinação das características acústicas dos principais maciços rochosos brasileiros.
- 3.5 - Estudo mais profundo em torno da relação entre / frequência de abalo e frequência natural de vibração de estruturas, de vez que o problema nos parece bem mais complexo do que o tratamento dado por Langefors.

A P E N D I C E

Apresentamos, a seguir, alguns casos práticos ligados ao problema de controle de vibrações provocadas por detonações / de explosivos, bem como alguns valores relativos a explosivos e terreno.

1. Companhia Vale do Rio Doce

Visando a obtenção de dados que permitissem avaliar o nível das vibrações provocadas pela detonação de explosivos nas minas adjacentes, a Seção de Ensaios Dinâmicos do IPT de São Paulo, realizou uma série de medidas de vibração nos locais das minas Cauê e Conceição, em Itabira, no Estado de Minas Gerais<sup>(27)</sup>.

Os resultados dos fogos efetuados se encontram / na Tab (A.1) e serviram de base para emprego dos explosivos.

Nessa Tabela, além dos valores das cargas de explosivos e distâncias de captação, acham-se dados sobre frequências, velocidades, amplitude e acelerações dos pontos (calculadas e determinadas como descrito no capítulo V), sobre os quais / situaram-se os transdutores que oscilaram em virtude das ondas / de choque.

Os ensaios, feitos em hematita dura, hematita média, itabirito e canga, tiveram lugar durante as detonações normais da rotina de exploração da jazida.



Fogo nº	Q (kg)	Q <sub>i</sub> (kg)	d (m)	f (c/s)	u.10 <sup>2</sup> (m/s)	A.10 <sup>6</sup> (m)	a.10 <sup>2</sup> (m/s <sup>2</sup> )	OBS:
1	815	815	455	17	0,210	19,66	22,43	DCCD - SR
2	4400	275	560	18	0,105	9,28	11,88	DCCD-CR 20MS
3	15	15	220	100	0,115	1,83	72,25	DCCD - SR
4	2700	300	255	24	0,294	19,50	44,33	DCCD -CR 20MS
5	1575	480	615	17	0,265	24,81	28,31	DCCD-CR 20MS
6	1800	1800	660	26	0,498	30,49	81,35	DCCD - SR
7	1897	274	200	28	0,350	19,90	61,57	DCCD-CR 20MS
8	15	15	590	80	0,170	3,38	85,45	DCCD - SR
9	2486	2486	615	15	0,360	38,20	34,02	DCCD - SR
10	1505	246	127	18	0,280	24,70	31,67	DCCD-CR 10MS
11	1245	444	520	22	0,318	23,00	43,96	DCCD-CR 10MS
12	1245	548	202	32	0,150	7,46	30,16	DCCD-CR 10MS
13	438	438	150	12	0,406	53,81	30,61	DCCD - SR

Tab. A.1 - Resultados de ensaios feitos nas jazidas de Itabira (MG), da CVRD.

-Legenda:-

Q = Carga total de explosivo  
 Q<sub>i</sub> = Carga máxima por intervalo  
 d = Distância detonação-Captação  
 f = Frequência  
 u = Velocidade de Oscilação

A = Amplitude  
 a = Aceleração  
 DCCD = Detonação com cor - del detonante  
 CR = Com retardo  
 SR = Sem retardo (instantâneo)  
 MS = Mili-segundos

Fogo nº	$a_r \cdot 10^2$ (m/s <sup>2</sup> )	$K \cdot 10^4$ (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	S (pal)	S' (vibrar)	$S'' \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
1	1,319	29,60	13,42	21,68	149,94
2	0,660	7,79	7,42	15,93	39,66
3	0,722	52,20	8,20	24,16	264,52
4	1,835	81,88	16,36	26,12	415,06
5	1,665	47,14	15,44	23,72	238,79
6	3,129	254,54	20,94	31,37	1290,16
7	2,199	135,40	17,86	28,29	686,42
8	1,068	91,27	11,58	26,59	461,88
9	2,268	77,16	18,12	25,84	388,87
10	1,759	55,72	15,94	24,45	280,94
11	1,998	87,84	17,04	26,42	444,77
12	0,949	28,42	10,50	21,51	143,99
13	2,550	78,08	19,16	25,91	394,93

Tab. A.2 - Análise das vibrações por diversos critérios

$a_r$  = Aceleração reduzida (Mercalli-Cancani - Sieberg)

K = Intensidade de oscilação (Zeller)

S = Medida de intensidade de vibração (Escala Pal)

S' = Intensidade de vibração (Koch)

S'' = Energia de 1/4 de período da oscilação/ (Kohler)

Da Tab. (A.2) retiramos os seguintes valores máximos:

Tiro nº 6:  $a_r = 3,129 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$  (regularmente forte)  
 $K = 254,54 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}^3$  (regularmente forte)  
 $S = 20,94 \text{ pal}$  (desagradável)  
 $S' = 31,37 \text{ vibrar}$  (danos ligeiros)  
 $S'' = 1290,16 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$  (prováveis danos)

É interessante notar que estes piores efeitos foram originados por uma detonação secundária, para eliminação do capeamento de canga. A detonação foi feita em 160 furos de 76 mm, com 3 e 6 metros de profundidade. A carga de 1800 kg de explosivo, detonada instantaneamente por cordel.

Uma comparação entre este fogo e o nº 9, fornece informações de interesse.

Tiro nº 9:  $a_r = 2,268 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$  (moderada)  
 $K = 77,16 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$  (fissuras finas e moderada)  
 $S = 18,12 \text{ pal}$  (percepção geral)  
 $S' = 25,84 \text{ vibrar}$  (nenhum dano)  
 $S'' = 388,87 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$  (sem danos)

Esta detonação primária (bancada) foi feita com 11 minas de 171,5 mm, com profundidade média de 13,7 m, iniciada também instantaneamente por cordel detonante, sendo a carga total de 2.486 kg.

Seria de esperar que o fogo maior provocasse resultados mais danosos que a detonação secundária. Entretanto, não devemos esquecer o caráter cumulativo das vibrações; embora detonados / os dois fogos instantaneamente, no fogo nº 6 existiam 160 focos de vibrações, enquanto que no fogo nº 9, apenas 11 minas foram iniciadas simultaneamente. Existe uma boa possibilidade de que as vibrações originadas pelos diversos focos do tiro nº 6 tenham se superposto, ocasionando maiores efeitos, muito embora as cargas individuais tenham sido menores. Deve ser notado que as distâncias, nos dois fogos, foram compatíveis.

Outra comparação de interesse é aquela entre os fo-

gos nº 9 e nº 5, detonados à mesma distância. Fica patente (Tab.A.2) o efeito benéfico da utilização de retardadores, muito embora as cargas não sejam comparáveis, já que a iniciação, nos dois casos, foi diferente.

Embora o objetivo dos ensaios tenha sido a obtenção de dados que permitissem avaliar o nível das vibrações poderemos calcular as cargas explosivas máximas por espera, visando a segurança, bem como, opinarmos sobre o intervalo adequado entre estas cargas.

Nos cálculos a seguir, a distância a ser adotada deverá ser a favor da segurança, a menor entre o centro do fogo e a área a ser protegida. No caso em questão, podemos tomar a menor distância como sendo 127 m (Tab. A.1) e limitar a amplitude de vibração entre  $150 \times 10^{-6}$  m e  $200 \times 10^{-6}$  m, valor já suficiente para provocar trincas em estruturas, desde que estas sejam comuns, feitas de material de boa qualidade e com as devidas unidades de construção (dados do IPT). Tomaremos  $A = 150 \times 10^{-6}$  m, a favor da segurança.

- Pela expressão 5.6 do Bureau of Mines, temos:

$$Q_i = 26,2 \text{ Kg/espera}$$

- Pela fórmula 5.7 de Carder e Cloud, temos:

$$Q_i = 27,3 \text{ kg/espera}$$

- Pela fórmula 5.8 de Deffet, temos para explosivo de força 60% e (k) médio igual a 5,2:

$$Q_i = 22,3 \text{ kg/espera}$$

- Pela fórmula de Medvedev e Lyamzina (URSS), temos:

$$Q_i = 15,5 \text{ kg/espera}$$

Como o último resultado se refere a vibrações horizontais (as mais críticas no caso) radiais ou transversais, podemos fixar este valor como carga máxima segura para cada intervalo numa/detonação a 127 m de edificações.

No caso, dada a diversidade de frequência (meio heterogêneo), embora devam predominar as relativamente baixas, é difícil preconizar um intervalo ótimo entre esperas. Considerando, porém, os resultados obtidos, as esperas de 10, 20 e 50 mili-segundos pareceram adequadas ao caso presente, principalmente as últimas.

## 2. Barragem de Paraibuna (CESP)

Medições feitas nesta obra, com o objetivo de limitar o efeito das vibrações na injeção de concreto, causadas pelas detonações na pedreira, a 600 m de distância, registraram os seguintes valores:

Frequência de vibração.....  $f = 80$  (c/s)

Velocidade da onda de compressão.  $v_p = 5560$  a  $6150$  (m/s)

Velocidade da onda de cisalhamen

to.....  $v_{ci} = 2730$  a  $2870$  (m/s)

Considerando como amplitude máxima permissível / para a segurança do concreto injetado,  $A = 30 \times 10^{-4}$  cm, teremos para a distância considerada, segundo a fórmula de Carder e Cloud // (Eq 5.7) :

$$Q_i = 200 \text{ kg/ espera}$$

No esquema da Fig. (A.1), apresentamos o resumo do esquema de furação, sequência de detonação e demais parâmetros / dos fogos de desmonte de rocha, por nós realizados na pedreira da referida obra, durante o ano de 1972, sem problemas de vibração.

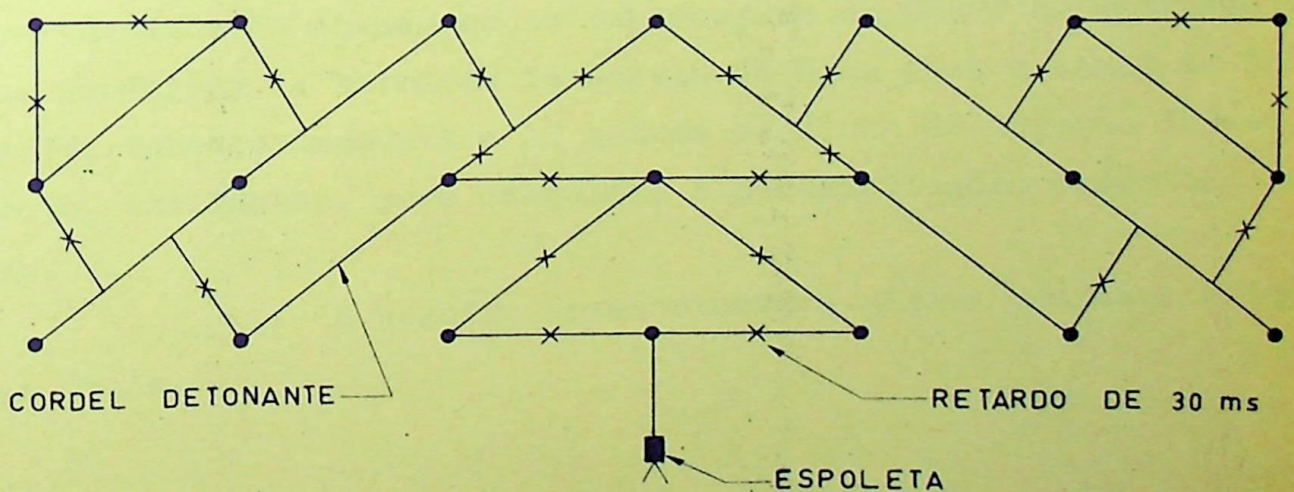


Fig. A.1 - Esquema de plano de detonação para a obra de Paraibuna - SP (J.F.Rocha)

Parâmetros do plano (no que interessa ao caso):

- Tipo de rocha : Gneiss fissurado
- Profundidade média dos furos..... 17 (m)
- Diâmetro de furação..... 63,50 (mm)
- Carga de explosivo de força 60%, por furo.... 39,50 (kg)
- Inclinação de perfuração..... 20 (º)
- Intervalo por espera..... 30 (ms)
- Carga máxima por espera..... 158,0 (kg)

### 3. Usina hidro-elétrica de Paulo Afonso (CHESF)

Com o objetivo de efetuar com segurança uma brecha de 85 m de extensão por 12 m de altura na barragem de concreto de interligação da Usina de Paulo Afonso, afim de dar acesso/ à água de alimentação de novo conjunto de turbinas, foram feitas medidas de frequência de vibração na rocha granítica daquela região, observando-se uma média de 100 cps. Os resultados obtidos permitiram que, em 1971, nova abertura fosse feita na barragem / da Usina III, daquele complexo, com segurança absoluta para as turbinas e estruturas das Usinas I e II. Recentemente, tivemos/ oportunidade de acessar os engenheiros da CHESF em detonações/ nas fundações da barragem de desvio de água para o canal da Usina IV, fazendo desmonte a 10 metros da linha de injeção de concreto, utilizando, para cálculos, a sistematização descrita no Cap. V.

A seguir, apresentaremos alguns gráficos e tabelas úteis.

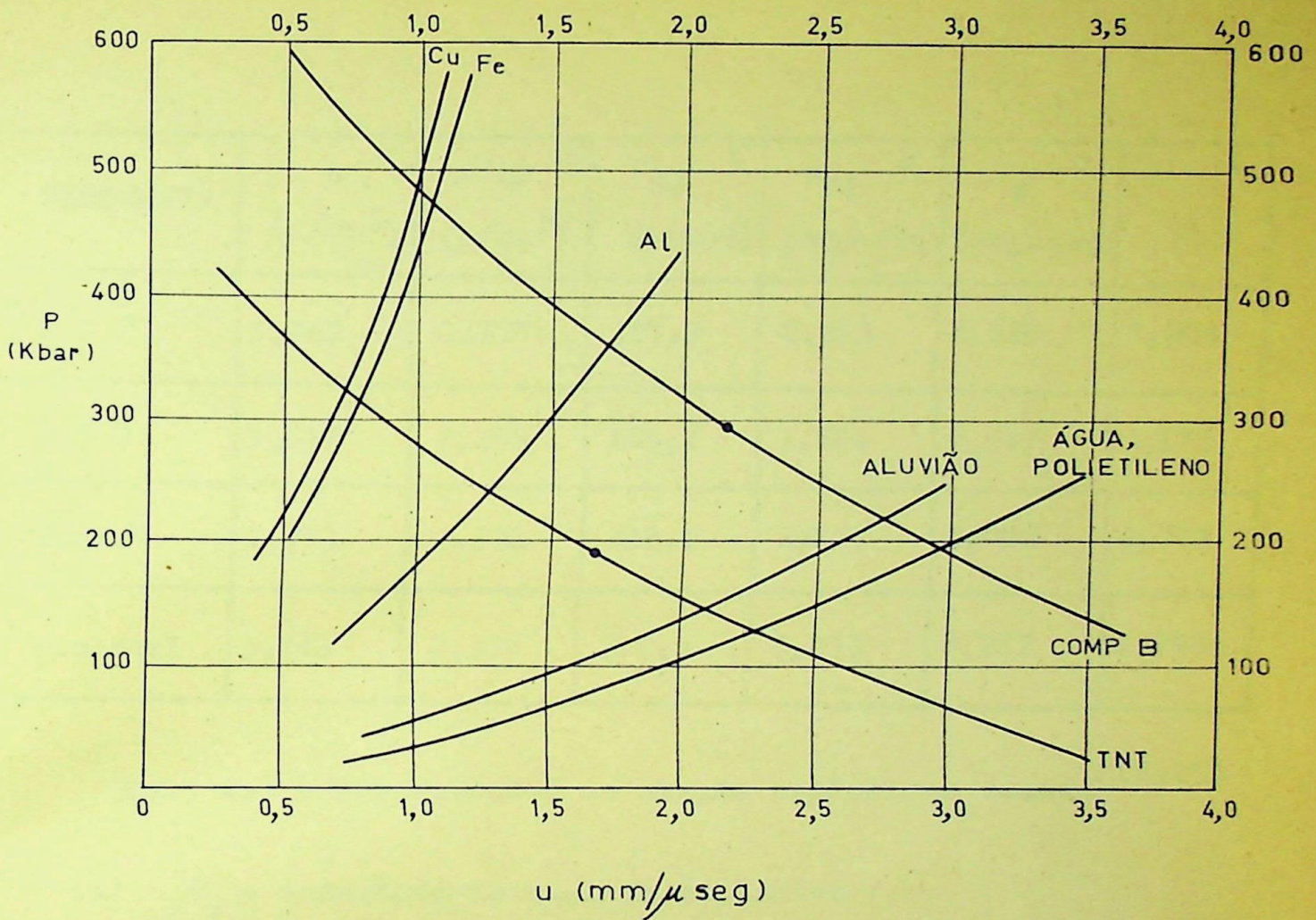


Fig. A.2 - Diagrama P-u, com curvas de Rankine-Hugoniot para vários materiais e reflexão característica para dois explosivos: TNT e Comp B (TNT + RDX). Os pontos nas curvas indicam a pressão de detonação ( $P_{CJ}$ ) e a velocidade de partícula ( $u_{CJ}$ ). As curvas representam ondas de choques induzidas nos diversos materiais por ondas de detonação plana normalmente à superfície do material (interação unidimensional)<sup>(12)</sup>.

EXPLOSIVO	$\rho_o^a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{CJ}^b$ (g/cm <sup>3</sup> )	$P_{CJ}^b$ (kbars)	$u_{CJ}^b$ (mm/ $\mu$ seg)	$v_d^c$ (mm/ $\mu$ seg)	$\gamma^d$
R D X	1,767	2,375	337,9	2,213	8,639	2,904
T N T	1,637	2,153	189,1	1,664	6,942	3,172
Comp B	1,713	2,331	292,2	2,127	8,018	2,770
Ciclotol	1,743	2,336	312,5	2,173	8,252	2,798

Tab. A.3 - Propriedades de alguns explosivos comuns<sup>(12-15)</sup>

(a)  $\rho_o$  = densidade inicial do explosivo

(b) O sub-índice CJ se refere aos valores no plano Chapman - Jouguet

(c)  $v_d$  = Velocidade de detonação do explosivo

(d)  $\gamma = c_p/c_v$

ROCHA	Resistência à tração	Resistência à compressão
	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Granito-gnaiss	29-143	1380-2163
Granito	35-132	1341-2324
Calcário	22-98	358-1827
Taconito	162-174	2372-3094
Arenito	3-161	108-1036
Dolomita	26-35	556-1300
Basalto	109-160	1514-2964
Quartzito	106-177	2182-3162
Gabro	91-113	1158-2500
Xisto	89-93	1444-1749
Ardósia	65-106	867-1749
Perigmatito	111	2125
Anortosito	118	2441
Riolito Pórfiro	69	975
Serpentinito	52	1144
Mármore	69-754	2548
Peridotite	92	1242
Gêsso	42	152
Folhelo	8-33	364-1141
Folhelo arenoso	31	476
Sienito	-	1600
Diorito	-	600
Riolito	-	2300
Traquito	-	1750
Conglomerado	-	1400
Salgema	6-28	154-294
Siltito	38	350
Concreto	24	210
Grauvaca	49	553

Tab. A.4 - Propriedades mecânicas das rochas (in situ) e concreto<sup>(35)</sup>.

A seguir, apresentamos resultados experimentais em vários tipos de rocha (in situ), baseados nas relações de Hugoniot e Mie-Gruneisen<sup>(36)</sup>.

Velocidade de choque (cm/ $\mu$ seg)	Velocidade de partícula (cm/ $\mu$ seg)	Pressão (kbar)	v/v <sub>0</sub> (*)
0,596	0,325	353	0,455
0,453	0,218	180	0,519
0,401	0,165	120	0,589
0,336	0,144	88	0,571
0,335	0,122	74	0,636
0,297	0,110	59	0,630

Tab. A.5 - Brecha Vulcânica ( $\rho_0 = 1.82 \text{ g/cm}^3$ )

Velocidade de choque (cm/ $\mu$ seg)	Velocidade de partícula (cm/ $\mu$ seg)	Pressão (kbar)	v/v <sub>0</sub> (*)
0,723	0,335	635	0,537
0,676	0,301	533	0,555
0,642	0,279	469	0,565
0,623	0,277	452	0,555

Tab. A.6 - Granito ( $\rho_0 = 2.62 \text{ g/cm}^3$ )

(\*)  $v = 1/\rho$  e  $v_0 = 1/\rho_0$

Velocidade de Choque (cm/ $\mu$ seg)	Velocidade de partícula (cm/ $\mu$ seg)	Pressão (kbar)	v/v <sub>0</sub>
0,801	0,279	594	0,652
0,723	0,223	429	0,692
0,648	0,170	293	0,738
0,582	0,129	200	0,778
0,479	0,096	123	0,800
0,580*	0,0036	5,5	0,994

Tab. A.7 - Calcáreo ( $\rho_0 = 2,66 \text{ g/cm}^3$ )

(\*) onda elástica

Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade do choque (cm/ $\mu$ seg)	Velocidade de partícula (cm/ $\mu$ seg)	Pressão (kbar)	v/v <sub>0</sub>
1,97 (seco)	0,603	0,331	393	0,451
	0,547	0,282	304	0,484
	0,473	0,209	195	0,558
	0,469	0,210	194	0,552
	0,413	0,160	130	0,613
	0,343	0,119	80	0,653
	0,340	0,119	80	0,650
	2,19 (úmido)	0,517	0,195	221
0,440		0,107	103	0,757
2,01	0,554	0,279	311	0,496
	0,565	0,260	295	0,540
	0,469	0,209	197	0,554
	0,423	0,158	134	0,626
	0,367	0,116	86	0,684
	0,359	0,117	84	0,674
	0,301	0,078	47	0,741
1,64	0,594	0,335	326	0,436
	0,403	0,171	113	0,576
	0,317	0,128	67	0,596

Tab. A.8 - Tufo basáltico

Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade do choque (cm/ $\mu$ seg)	Velocidade de pa- tícula (cm/ $\mu$ seg)	Pressão (kbar)	v/v <sub>0</sub>
1,65	0,437	0,239	172	0,453
1,70	0,429	0,225	164	0,476
1,65	0,375	0,172	106	0,541
1,70	0,398	0,169	114	0,575
1,65	0,304	0,127	64	0,582
1,70	0,314	0,126	67	0,559

Tab. A.9 - Aluvião

Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>0</sub> (cm/ $\mu$ seg)	Velocidade sônica (cm/ $\mu$ seg)	S	Pressão (kbar)
Calcáreo	2,66	0,40	0,58	1,140	P > 200
Granito	2,65	0,498	0,554*	2,647 0,619	P > 545 130 < P < 545
Brecha Vulcânica	1,82	0,157	0,28*	1,364	P > 50
Tufo ba- sáltico	1,97 (seco)	0,23	-	1,13	P > 130
	2,19 (saturado)	0,34	-	0,9	P > 100
Aluvião (seco)	1,54	0,04	-	1,53	187 < P < 330
		0,20	-	0,93	98 < P < 187
		0,04	-	1,83	P < 98

Tab. A.10 - V<sub>0</sub> e S para uso da equação (3.20)

(\*) Medidas da velocidade sônica "in situ"

Material	$\rho_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_0$ (cm/ $\mu$ seg)	$V$ (cm/ $\mu$ seg)	S	$\Gamma^*$	$\Gamma(2S-1)$
Granito	2,65 (P>620kb)	0,554	0,498	0,620	1,0 $\pm$ 0,5	0,24
Calcáreo	2,66	0,58	0,400	1,14	0,9 $\pm$ 0,5	1,28
Tufo basáltico	1,97	-	0,23	1,13	0,17 <sup>**</sup>	1,26
Brecha vulcânica	1,82	0,28	0,157	1,364	0,25 <sup>**</sup>	1,72

Tab. A.11 - Constantes para uso nas relações de Rankine-Hugoniot e Mie-Cruneisen

(\*) As tolerâncias indicadas incluem as variações dos valores de  $\beta$  (coeficiente de expansão técnica) e  $c_p$  (calor específico a pressão constante) de vários manuais // (37-38-39).

(\*\*) Nestes valores de  $\Gamma$  foram usados  $\beta$  e  $c_p$  de rocha arenosa.

S I M B O L O G I A

- A = Amplitude de onda (cm); Área ( $m^2$ );  $A_I$  = Amplitude de onda incidente;  $A_R$  = Amplitude de onda refletida;  $A_t$  = Amplitude de onda transmitida; a = Aceleração ( $m/s^2$ ).
- $c_p$  = Calor específico a pressão constante ( $kJ/kg.^{\circ}C$ )
- $c_v$  = Calor específico a volume constante ( $kJ/kg.^{\circ}C$ )
- d = Distância (m)
- E = Energia (kjoules); Módulo de Elasticidade ( $kg^*/m^2$ );  $E_a$  = Energia de ativação;  $E_k$  = Energia cinética;  $E_o$  = Energia interna / inicial; e = Base dos logarítmos neperianos.
- F = Força ( $kg^*$ ); Fração de colisões ou fator de orientação; f = / força do explosivo (%); Frequência de oscilação (cps);  $f_o$  = Frequência natural de oscilação de uma estrutura.
- G = Módulo de rigidez ( $kg^*/m^2$ ); g = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ).
- H = Entalpia (kj);  $\Delta H$  = Calor de reação ou de detonação (kj); h = Altura (m).
- K = Módulo de elasticidade volumétrica ( $kg^*/m^2$ ); Intensidade de oscilação ( $m^2/s^3$ ); k = Constante de um meio de propagação; Fator de multiplicação do período de oscilação de uma onda explosiva.
- L = Distância (m)
- m = Massa de explosivo (kg); unidade de comprimento(metro)
- n = Número de Kmoles de gases; Número de intervalos de detonação.
- P = Pressão (kbar);  $P_{CJ}$  = Pressão de detonação no plano Chapman - Jouguet ( $\equiv P_d$ );  $P_o$  = Pressão inicial;  $P_1'$  = Pico de pressão na interface de dois materiais; p = Peso ( $kg^*$ )
- Q = Calor de combustão específico (kj/kg); Carga explosiva (kg) ;  $Q_e$  = Calor de combustão de explosivo teste;  $Q_1$  = Carga total/ de explosivo por intervalo de detonação;  $Q_p$  = Calor de combustão de explosivo padrão;  $Q_r$  = Carga virtual (reduzida).
- R = Constante dos gases perfeitos ( $kJ/kmol.^{\circ}K$ );  $R_r$  = Rarefação; r = Raio (m); Fator de redução.
- S = Coeficiente de Mie Gruneisen; Entropia ( $kJ/^{\circ}K$ ); Medida de in

tensidade de vibração (pal);  $S'$  = Intensidade de vibração (vibrar) ;  $S''$  = Índice de danos ( $\text{mm}^2/\text{s}^3$ )

$T$  = Temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{K}$ ); Período de vibração (seg);  $t$  = tempo (seg)

$u$  = Velocidade de partícula (m/s);  $u_0$  = Velocidade inicial de partícula correspondente ao limite de percepção sensorial.

$V$  = Velocidade de onda (m/s); Volume ( $\text{m}^3$ );  $V_c$  = Velocidade de detonação de cordel detonante;  $V_{ci}$  = Velocidade de onda transversal em estruturas;  $V_d$  = Velocidade de detonação de explosivo;  $V_i$  = Volume de gases de iniciador;  $V_o$  = Velocidade de onda / elástica;  $V_p$  = Velocidade de onda de compressão;  $V_s$  = Velocidade de onda de choque;  $V_{si}$  = Velocidade de choque incidente ;  $V_{sr}$  = Velocidade de choque refletido;  $V_{st}$  = Velocidade de choque transmitido;  $v_e$  = Volume gasoso (específico) do explosivo/ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ );  $v_o$  = Volume específico inicial;  $v_p$  = Volume gasoso do explosivo padrão.

$Z$  = Frequência de colisões ( $\text{seg}^{-1}$ )

$\alpha$  = Angulo ( $^{\circ}$ )

$\beta$  = Angulo ( $^{\circ}$ ); Coeficiente de expansão térmica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\gamma$  = Relação  $c_p/c_v$ , ângulo de cisalhamento

$\sigma$  = Tensão relativa;  $\sigma_t$  = Tensão tangencial relativa;  $\sigma_r$  = Tensão radial relativa.

$\epsilon$  = Deformação específica

$\Gamma$  = Constante de Mie Gruneisen

$\nu$  = Coeficiente de Poisson

$\bar{r}$  = Tensão ( $\text{Kg}^*/\text{cm}^2$ );  $\bar{r}_t$  = Tensão tangencial;  $\bar{r}_r$  = Tensão radial.

$\bar{t}$  = Intervalo de tempo (seg);  $\Delta \bar{t}$  = Variação em torno dos valores nominais de espera de espoletas.

B I B L I O G R A F I A

- (1) - Morrison and Boyd, Organic Chemistry, College Chemistry Series, Allyn and Bacon, Inc., Boston, 1962.
- (2) - Ronald Breslow, Mecanismo de Reações Organicas, Tradução de Andrejus Korolkovas, EDAR - São Paulo, 1968.
- (3) - C.H. Johansson and P.A. Persson, Detonics of High Explosives, Academie Press, London and New York, 1970 (V. também referência 4 e 8).
- (4) - U. Langefors, B. Kihlstrom and F. Ahrenfeldt, Blasting experiments in Fogdo, Nitroglycerinn AB report TM 36, Sweden, / 1952.
- (5) W. Thum, Quantite d'energie requise pour l'extraction et la fragmentation des Roches an moyen d'explosifs, Bulletin Explosifs de l'Association des Fabricants Belges d'Explosifs / et du Centre de Recherches Scientifiques e Techniques pour / l'industrie des Produits Explosifs, Bruxelles, 1972.
- (6) - U. Langefors y B. Kihlstrom, Técnica Moderna de Voladura de Rocas, Ediciones Urmo, Bilbao, Espanha, 1958.
- (7) - S.H. Carpenter, R.H. Wittman and H.E. Otto, Explosion Welding Research at the University of Denver, Pergamon Press , Oxford and N. York, 1971.
- (8) - Rolf S. Paim, D.K. Holmes and Harry E Clark, Presplit Blasting at the Niagara Power Project, The Explosives Engineer , Hercules Powder Company , 1961.
- (9) - J.S. Rinehart and J. Pearson, Explosive Working of Metals , The Macmillan Company, New York, 1963.
- (10) - Cook, M.A., The Science of High Explosives, Reinhold Publishing Corp, New York, 1958.
- (11) - Rodney F. Recht, Dynamic Deformation Behavior of Metals as Related to High - Energy Rate Forming, Pat II, First Annual/ Report, Center for High Energy Forming, Martin Company, Denver

Division/University of Denver, DRI, 1966.

- (12) - O.E. Jones, Metal Response under Explosive Loading, Sandia / Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- (13) - G.E. Duval and G.R. Fowles, "Shock Waves in High Pressures// Physics and Chemistry", R.S. Bradley, Ed.(Academic Press , New York, Vol 2, 1963).
- (14) - M. Van Thiel, A.S. Kusubov, and A.C. Mitchell, Eds, "Compendium of Shock Wave Data", UCRL 50 108, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif., Vol 1 and Vol 2, 1967.
- (15) - R.G. Mc Queen, S.P. Mars , J.W. Taylor, J.N. Fritz, and W.J. Carter, "The Equation of State of Solids from Shock Waves / Studies", in High - Velocity Impact Phenomena, R. Kinslow, Ed. (Academic Press, New York, 1970).
- (16) - M.H. Rice, R.G. Mac Queen, and J.M. Walsh, "Compression of Solids by Strong Shock Waves", in Solid State Physics, F. F. Seitz and D. Turnbull, Eds (Academic Press, New York, 1958).
- (17) - F.J. Crandell, Ground Vibrations due to Blasting and its effect upon Structures - Journal of the Boston Soc. Civ. Eng, April 1949.
- (18) - F.J. Crandell, Transmission Coefficient for Ground Vibration due to Blasting - Journal of the Boston Soc, Civ Eng , April 1960.
- (19) - John F. Wiss, Effects of Blasting Vibrations on Buildings / and People, Civil Engineering - ASCE, July 1968.
- (20) - W.I. Duvall and D.E. Fogelson - Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibrations. Bureau of Mines Rept of Inv. 1962.
- (21) - J.F. Devine - Avoiding Damage to Residences from Blasting / Vibrations Highway Research Board, 1966.
- (22) - U.S. Bureau of Mines, Bulletin n<sup>o</sup> 442.
- (23) - B.G. Fish, Fundamental Considerations of Seismic Vibrations

from *Blasting, Mine and Quarry Engineering*, April, 1951 .

- (24) - B.G. Fish, *Seismic Vibrations from Blasting - Solution of the Problem in Specific Cases*, *Mine and Quarry Engineering*, July, 1951.
- (25) - Melvin A. Cook, *Explosives, a Survey of Technical Advances*, *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol 60, July, 1968.
- (26) - Luiz Philippe, *Pólvora e Explosivos*, *Publicação Interna do Instituto Militar de Engenharia*, 1962.
- (27) - *Vários Relatórios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo*, 1970.
- (28) - G. da Rocha Lima, *Relatório do Projeto de Demolição da Barragem de interligação da CHESF*, 1961.
- (29) - Timoshenko and Goodier, *Theory of Elasticity*, Mc Graw-Hill Book Company, Inc, Tokyo, Kogakusha Company, Ltd, 1951.
- (30) - R. Biron Bird, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, A. Willey International Edition, Tokyo, 1960.
- (31) - L.S. Mascarenhas, *Ind Q. Mantiqueira*, correspondência particular.
- (32) - Lothar Buchta, *Nitro Nobel AB*, anotações de trabalho conjunto.
- (33) - E. Jouguet, *J. Math*, 1905-1906, *Mecanique des Esplosifs*, Paris, O Doin et fils, 1917.
- (34) - J. Hugoniot, *J. Math* (1887); *J. école polytech (Paris)* / (1887 - 1889).
- (35) - B.H. Cintra, *Desmonte Escultural*, *Revista Escola de Minas*, 1971-1972.
- (36) - *Engineering Research*, Additional Hugoniot data for Geologic Materials, Robert C. Bass, 5232, Sandia Laboratory (a prime contractor to the United States Atomic Energy Commission) / Albuquerque, October 1966.
- (37) - *Handbook of Physical Constants*, Geological Society of Ame -

rica, Special Papers, nº 36, 1942.

- (38) - American Institute of Physical Handbook, Mc Graw-Hill, New York, 1957.
- (39) - Smithsonian Physical Tables, 9<sup>th</sup> Edition
- (40) - A.G. Thurman and A.A. Ezra, The Analysis and Design of Explosive Forming Facilities, University of Denver, Denver, Colorado 80210, 1968.
- (41) - Eduard C. Pertel and Frederick A Leckie, Matrix Methods in Elastomechanics, Mc Graw-Hill Book Company, Inc, 1963.
- (42) - Robert H. Cole, Underwater Explosions, Dover Publications, Inc, New York, 1965.
- (43) - Association of Mine Managers of South Africa, Papers and / Discussions, 1968-1969, Published by the Chamber of Mines / of South Africa, 1970.
- (44) - C. Young, R Fowles and R.P. Swift, an Electromagnetic Stress Gage, Physics International Company, San Lendro, California, 1973.
- (45) - Zeller, W. Starkebestimmung von mechanischen Erschutterungen - Der Bauingenieur 12-1931
- (46) - Ambrasseys, N.M. e Hendrom, A.J. Dynamic Behaviour of Rock Masses-Rock Mechanics in Engineering Practice - John Wiley and Sons - 1968.
- (47) - Medvedev, S.V. Evaluation of Seismic Saffety During Blasting Operations in Mines - Bulletin of the Earthquake Research Institute-Vol. 46-1968.
- (48) - Thoenen, J.R. e Windes, S.L. Seismic Effects of Quarry / Blasting. Bureau of Mines Bulletin 442 - 1942.

DATA ..... / ..... / 19 .....

PROC. ....

PED. ....

LIV. ....

RS .....

I - V - N - O	
BIM - EFEI	
DATA	Rubrica

Rocha, José Ferreira *Tese*  
 Estudo de interação explosivo-mate-  
 rial rochoso e controle das vibra-  
 ções....

622.235:534.83(043.2)  
 R672 *2* Tombo 38

Data retirada	ASSINATURA	Data devolução

**E F E I**

**BIBLIOTECA MAUÁ**

Esta publicação deverá ser devolvida dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação em seu poder.

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ  
 8200038



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA