

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Minas

ISSN 0104-0553

BT/PMI/058

**Vias Subterrâneas em
Rocha - Escavação por
Explosivos**

**Wildor Theodoro Hennies
Lineu Azuaga Ayres da Silva**

1997
Serviço de Bibliotecas
Biblioteca de Engenharia de Minas

Hennies, Wildor Theodoro

Vias subterrâneas em rocha : escavação por explosivos / W.T. Hennies, L.A.A. da Silva. -- São Paulo : EPUSP, 1997.

67p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/058)

1. Escavações em rochas 2. Escavações subterrâneas 3. Desmorte por explosivos 4. Escavações por explosivos 5. Vias subterrâneas I. Silva, Lineu Azuaga Ayres da II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas III. Título IV. Série

ISSN 0104-0553

CDU 624.123
624.133
622.235
624.138.29
625.712.35

WILDOR THEODORO HENNIES
LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA

VIAS SUBTERRÂNEAS EM ROCHA - ESCAVAÇÃO POR EXPLOSIVOS

EDIÇÃO DE CONTRIBUIÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA PARA
PROJETO DE PLANO DE FOGO EM PROBLEMAS DE
ABERTURA DE VIAS SUBTERRÂNEAS POR MÉTODOS
CONVENCIONAIS.

Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP

São Paulo, 1997

ÍNDICE		pg.
RESUMO E CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....		3
1. INTRODUÇÃO.....		4
2. PROBLEMA PROPOSTO.....		5
3. RESOLUÇÃO.....		6
3.1. PERFURAÇÃO.....		6
3.1.1 Avanço.....		6
3.1.2. Regiões da frente de Avanço.....		6
3.1.3. Seqüência de Desmonte e Seqüência da Cálculos.....		7
4. Região A - PILÃO.....		8
4.1. O PRIMEIRO QUADRILÁTERO.....		8
4.1.1 - O encargo.....		8
4.1.2 - A concentração de carga.....		10
4.2. O SEGUNDO QUADRILÁTERO.....		12
4.3. GENERALIZAÇÃO DA EXPRESSÃO PARA CÁLCULO DE V_n E B_n		15
4.4 CÁLCULO DO SEGUNDO QUADRILÁTERO (n=2).....		15
4.5 CÁLCULO DO TERCEIRO QUADRILÁTERO (n=3).....		18
4.6 CÁLCULO DO QUARTO QUADRILÁTERO (n=4).....		19
4.7 RESUMO DOS DADOS DOS FUROS DO PILÃO (GEOMETRIA E CARGAS).....		20
5. Região E - FUROS DE LEVANTE.....		21
5.1. CÁLCULO DO ENCARGO (GALERIA E RAMPA).....		21
5.2. CÁLCULO DO ESPAÇAMENTO.....		22
5.2.1. Furos de levante da Galeria.....		22
5.2.2. Furos de Levante da Rampa.....		24
5.3. CONSUMO DE EXPLOSIVO NOS FUROS DE LEVANTE (GALERIA E RAMPA).....		24
6. Região D - FUROS DE CONTORNO.....		26
6.1. DETERMINAÇÃO DOS FUROS DE CONTORNO (GALERIA).....		27
6.2. DETERMINAÇÃO DOS FUROS DE CONTORNO (RAMPA).....		28
6.3. CONSUMO DE EXPLOSIVO NOS FUROS DE CONTORNO (GALERIA E RAMPA).....		30
6.3.1. Galeria.....		30
6.3.2. Rampa.....		30
7. Região B - FUROS DE REALCE LATERAL.....		32
7.1. CÁLCULO DO ENCARGO E ESPAÇAMENTO (RAMPA E GALERIA).....		33
7.1.1. VERIFICAÇÃO DO DANO.....		34
7.2. CONSUMO DE EXPLOSIVO NOS FUROS DE REALCE LATERAL (RAMPA E GALERIA).....		40
8. Região C - FUROS DE REALCE SUPERIOR.....		41
8.1. FUROS DE REALCE SUPERIOR (GALERIA).....		42
8.2 CONSUMO DE EXPLOSIVO PARA REALCE SUPERIOR GALERIA.....		47
8.3. FUROS DE REALCE SUPERIOR (RAMPA).....		48
8.4. CONSUMO DE EXPLOSIVO PARA REALCE SUPERIOR (RAMPA).....		49
8.5. RESUMO DOS DADOS IMPORTANTES DA GALERIA.....		50
8.6. RESUMO DOS DADOS IMPORTANTES DA RAMPA.....		51
9. SEQÜÊNCIA DE DETONAÇÃO.....		52
10. DANOS DA ROCHA.....		53
11. CONSIDERAÇÕES FINAIS E AGRADECIMENTO.....		56
12. BIBLIOGRAFIA.....		56

RESUMO E CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A escavação de vias subterrâneas em rochas por métodos convencionais, usa a perfuração e o desmonte por explosivos para, numa primeira fase fragmentar a rocha. É apresentado o cálculo de um esquema racional, através da resolução comentada de um problema passo a passo para elaboração desta fase constituindo-se no chamado plano de fogo.

Neste trabalho são introduzidas duas inovações, a saber:

A primeira consiste na expressão generalizada para determinação dos encargos do pilão de quatro seções a partir do segundo quadrilátero.

A segunda, e talvez mais importante contribuição consiste na proposição de uma nova sistemática de cálculo para determinação da posição dos furos de realce lateral e dos furos de realce superior da seção transversal de via subterrânea.

Pretende-se, futuramente, completar o conjunto de estudos que se iniciou com a parte de suportes, com duas fases intermediárias - seleção de equipamento de perfuração e seleção de equipamentos de limpeza da frente de avanço conforme se comenta na introdução.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho pretende ilustrar, através de um problema resolvido passo a passo, e de forma comentada, uma seqüência de cálculos que pode ser adotada para o projeto de execução da abertura de vias subterrâneas em rocha. Neste tipo de escavação por métodos convencionais, as várias fases que compõem o seu ciclo são, a seguir, detalhadas. O ciclo total deve, preferencialmente, ser previsto para estar contido num turno de trabalho.

Na escavação duma via subterrânea em rocha, esquematicamente, tem-se:

1ª fase - Perfuração e Desmonte por explosivos

1.1 Perfuração

1.2 Carregamento dos furos de mina

1.3 Detonação e fragmentação da rocha

2ª fase - Limpeza

2.1 Exaustão dos gases de detonação

2.2 Saneamento da frente e remoção de blocos soltos ("chocos").

2.3 Limpeza da frente de avanço

3ª fase - Estabilização e tratamento

3.1. Instalação final junto a frente dos suportes ou reforços (se necessário).

Admite-se, para exemplificação, que as dimensões das seções já estejam definidas, bem como os tipos de equipamentos a serem adotados em cada fase. Trata-se, portanto, apenas do cálculo do plano de fogo, sendo que a seleção do equipamento de perfuração e a escolha da capacidade do equipamento para limpeza da frente, da mesma forma que nos sistemas de suporte, são objetos de outros trabalhos.

Pode-se depreender do exposto que este faz parte de um conjunto de outros boletins onde a parte relativa a suportes (3a. fase) já foi publicada no Boletim n° 035 com o título de "Dimensionamento de Suportes em Vias Subterrâneas".

A seguir pretende-se publicar em outros boletins: a segunda parte da 1a. fase, relativa à Seleção de equipamento de perfuração e a 2a. fase relativa a seleção de equipamentos de carga e transporte (limpeza da frente de avanço).

2. PROBLEMA PROPOSTO

Pretende-se realizar a escavação, em maciço rochoso (calcário dolomítico), duma galeria com seção transversal em forma de pata de cavalo e de uma rampa de seção aproximadamente retangular.

As dimensões da galeria são de 5 metros de vão ou largura, 2,5 m de pé direito e 2,5 m de altura da abobada, e seu desenvolvimento sendo subhorizontal (-2°).

A rampa por sua vez tem declividade de 12° sendo em grande parte de seu trajeto em espiral, e, suas dimensões de 6,0 m de largura por 3,0 m de altura.

Deseja-se que, para as mesmas condições operacionais, sejam adotadas as soluções que se revelarem as mais seguras e econômicas.

A moderna técnica de abertura de túneis e galerias que utiliza os equipamentos disponíveis hoje no mercado para perfuração das rochas, fez com que os esquemas de furos paralelos ou cilíndricos se tornasse popular ou de uso corrente.

Em vista de tal fato, as condições do problema a ser proposto definiram como hipóteses fundamentais as seguintes:

- a) Emprego do pilão cilíndrico de quatro seções no plano de fogo das duas escavações.
- b) Furo central vazio do pilão de 102 mm.
- c) Os equipamentos de perfuração onde a seleção poderá ser feita para cada tipo de via subterrânea, entre:
 - Perfuratrizes manuais
 - Carreta de perfuração (jumbo) de um braço
 - Carreta de perfuração de dois braços.
- d) As séries de hastes (brocas integrais) disponíveis para perfuração são de 35/29 mm e de 32/45 mm.
- e) O explosivo a ser utilizado é o ANFO em cartuchos de 29 mm e de 45 mm.
- f) A limpeza da frente será feita com uso de LHD cuja capacidade deve ser calculada para cada caso.
- g) A rampa terá acesso à encosta dum morro, e o ponto de despejo dista 150 m do seu portal
- h) A galeria tem em seu início um chute, onde o material desmontado pode ser lançado sendo armazenado e retirado por nível inferior.
- i) Raios de curvatura mínimos - interno - externo - deverão ser considerados na seleção do equipamento de limpeza.
- j) O desvio de furação é de 10 mm/m.
- k) O erro de emboque na furação é de 20 mm.

3. RESOLUÇÃO

1ª fase - Perfuração e Desmonte por explosivos

O plano de fogo, como citado anteriormente, constituiu-se, na realidade, de um esquema dos furos de mina a serem perfurados na frente de avanço da via subterrânea em projeto, dividida em regiões, em cada uma das quais são definidas especificamente as características dimensionais dos furos bem como a sua disposição espacial. Fazem também parte do plano de fogo detalhes relativos aos explosivos a serem utilizados nos furos de cada região, tais como: o tipo ou tipos de explosivos; a quantidade a ser carregada em cada furo (ou razão de carregamento linear); a seqüência em que devem ser detonados e os necessários acessórios para o sucesso de cada ciclo de avanço da via. A primeira etapa, portanto, consiste no cálculo da perfuração.

3.1. PERFURAÇÃO

Nesta fase, o cálculo da metragem a ser perfurada e sua disposição espacial, necessária à fragmentação eficiente da rocha durante o desmonte pelos explosivos, é o objetivo principal da definição do plano de fogo.

A resolução iniciar-se-á, portanto, por este dimensionamento.

Para tanto será utilizada a metodologia proposta por Holmberg (1984), que considera como eficiente todo avanço real da galeria que atinge cerca de 95% da profundidade perfurada.

3.1.1 Avanço

A primeira definição é a de profundidade H de perfuração que é fornecida pela seguinte expressão:

$$H = 0,15 + 34,1 \phi - 39,3 \phi^2 \quad [1]$$

onde:

ϕ = diâmetro do furo vazio no pilão (m)

Observe-se que esta fórmula experimental foi obtida a partir de dados onde os avanços resultantes tiveram uma extensão igual a 95% do comprimento H perfurado.

Assim, ao designar-se o avanço por (I) tem-se a expressão a seguir:

$$I = 0,95 H \quad [2]$$

A expressão [1] e por conseguinte a [2] acima, apenas são válidas quando o desvio de perfuração não excede 2%, o que é fácil de ser atingido, desde que o maquinista da perfuratriz ou operador do jumbo tenha certa experiência ou esteja devidamente treinado.

Verifica-se, então, o desvio da perfuração dado pela expressão:

$$F = \alpha H + \beta \quad [3]$$

onde:

α = 10 mm/m (desvio angular)

β = 20 mm (erro de embocadura)

Aplicando-se o valor de ϕ em [1], obtém-se de [1], [2] e [3]

$$H = 0,15 + 34,1 \times 0,102 - 39,4 \times 0,102^2 = 3,22 \quad \therefore \quad H = 3,22 \text{ m}$$

$$I = 0,95 H = 3,06 \quad I = 3,06 \text{ m}$$

$F = 0,052 \text{ m}$ que corresponde a 1,62 % de H, o que atende à condição de validade da equação [1]

O avanço, no método empregado, será o mesmo para os dois tipos de vias subterrâneas.

3.1.2. Regiões da frente de Avanço

Para efeito de cálculo da razão de carregamento dos furos, bem como de seus afastamentos e espaçamentos, a frente de desmonte pode ser dividida em regiões conforme ilustrado na figura 1.

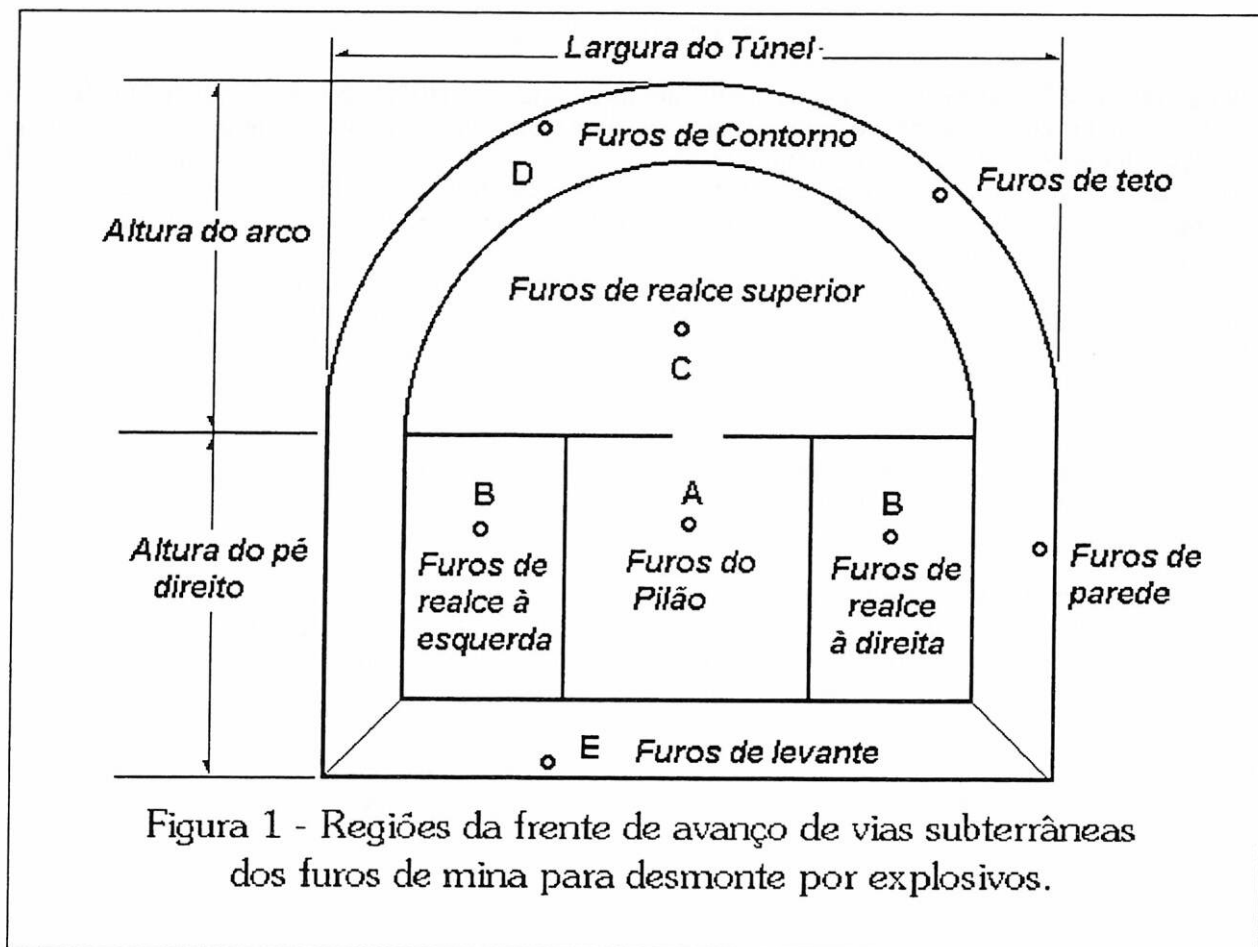


Figura 1 - Regiões da frente de avanço de vias subterrâneas dos furos de mina para desmonte por explosivos.

3.1.3. Seqüência de Desmonte e Seqüência da Cálculos

As regiões A, B, C, D e E, estão assim organizadas, em função da *seqüência de desmonte* que na prática é utilizada.

Sabe-se que a abertura da seção da galeria se dará por sucessivos alargamentos a partir do *pilão*.

Assim, o fogo iniciará pelo pilão, propagar-se-á nas regiões de realce lateral, realce superior, furos de contorno e furos de levante.

A *seqüência de cálculos* das cargas e posições dos furos, contudo, será outra:

Inicia-se pelo cálculo dos furos de pilão - região A. Em seguida é necessário que se calcule os furos de levante - região E e os furos de contorno - região D, para que se conheça a porção remanescente, correspondente às regiões B e C.

A região seguinte, a ter definidos os furos de mina é a B e finalmente os cálculos serão concluídos com a determinação da posição e carga dos furos da região C.

4. Região A - PILÃO

Antes do cálculo do Pilão, reveja-se a sua definição (pg. 62 HENNIES & AYRES DA SILVA, 1995) "Os primeiros furos de mina a detonarem devem criar um vazio para o qual se lança sucessivamente o resto da rocha. Esta abertura, o *pilão*, que em geral ocupa um metro quadrado da frente de avanço é a chave que abre a rocha até uma profundidade que depende da forma e sucesso conseguido no mesmo, dispondo-se os furos de mina numa série de cunhas, em leque ou segundo um modelo cônico ou cilíndrico."

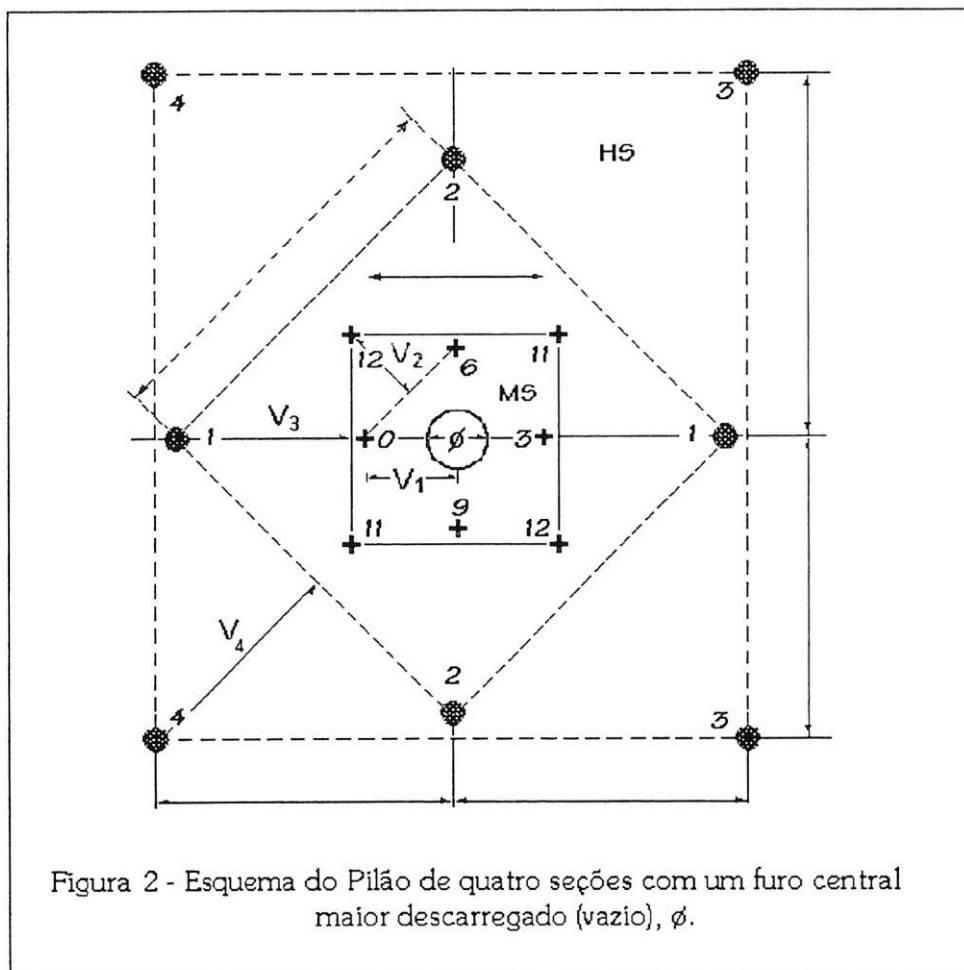
O cálculo do Pilão será portanto comum tanto à seção da galeria quanto à da rampa, porque independe de suas dimensões específicas. Os furos do pilão estão indicados na figura 2. Será utilizado, conforme as condições propostas, o pilão de quatro seções. Na figura 2, cada seção é indicada por um quadrilátero e seu respectivo encargo (V).

4.1. O PRIMEIRO QUADRILÁTERO

As condições em que se dará o desmorte, vão depender do tipo de explosivo, da estrutura da rocha e da distância entre o furo carregado e o furo vazio (encargo ou afastamento).

4.1.1 - O encargo

O encargo, a partir de experiências práticas, foi definido no primeiro quadrilátero, como sendo no máximo igual a $1,7 \phi$, sendo ϕ o diâmetro do furo central. Esta é a distância próxima da ideal para que ocorra uma satisfatória fragmentação da rocha com limpeza da abertura realizada pelo explosivo, ou seja a chamada detonação limpa.



As condições gerais em que ocorre o desmonte produzido por um furo carregado contra um furo vazio, funcionando como superfície livre, estão indicadas na figura 3.

Por esta figura observa-se que com encargo próximo ou maior do que 2ϕ , não haverá ruptura da rocha e apenas deformação plástica, em virtude do ângulo de saída do material ser muito pequeno.

O limite de proximidade entre d e ϕ é indicado na figura pela linha detonação limpa. Sendo V_1 muito pequeno, a grande concentração de carga poderá causar o falhamento do pilão, pelo impacto da rocha em estado de fusão contra o furo vazio e sua conseqüente obstrução.

Indica-se por $V_{(n)}$ o máximo encargo para o quadrilátero n , e, por V_n o *encargo prático* correspondente. *Encargo prático* é aquele que é marcado sobre a face da frente de avanço para localizar os pontos de execução dos furos de mina. O encargo máximo será utilizado para a definição do encargo prático. Quando o desvio do furo em relação à sua profundidade for da ordem de 0,5 a 1%, então o encargo prático (V_1) para os furos do pilão deve ser menor do que o máximo encargo ($V_{(1)} = 1,7\phi$)

Nessa faixa de desvio (0,5 a 1 %) recomenda-se

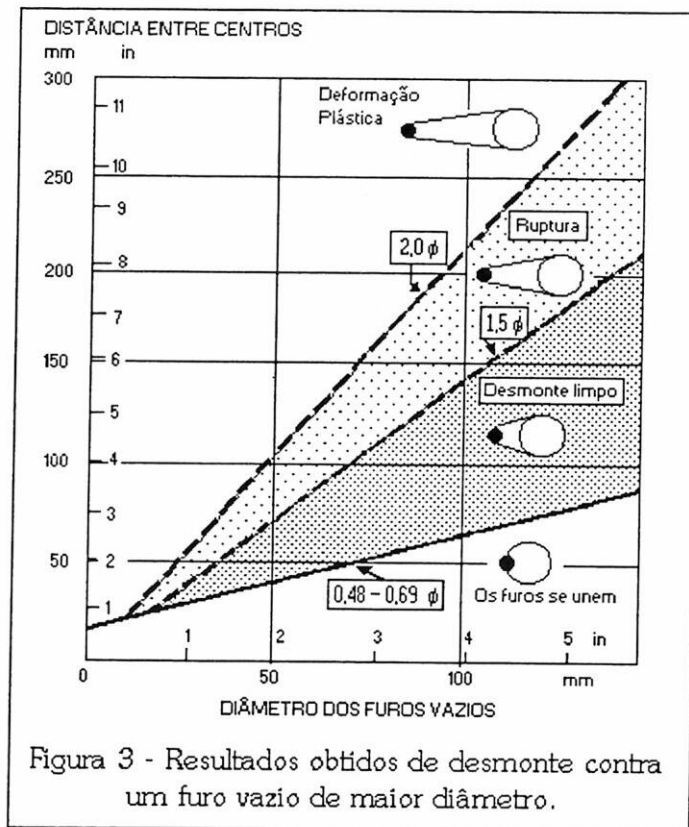
$$V_1 = 1,5\phi \quad [4]$$

Quando o desvio da perfuração for superior a 1 % e inferior a 2%, deve ser descontado o seu valor do encargo máximo. Vide expressão [3].

Então, $V_1 = V_{(1)} - F$

$$V_1 = 1,7\phi - F \quad [5]$$

Na prática, a precisão da perfuração é normalmente boa para permitir o uso da equação [5].



$$F = 0,052 \text{ m}$$

CÁLCULOS
de 3.1.1 exp. [3]

$$V_{(0)} = 1,7 \times 0,102 = 0,1734 \text{ m}$$

$$V_1 = V_{(0)} - F = 0,1734 - 0,052 = 0,1214 \text{ m}$$

$$V_1 = 12 \text{ cm}$$

4.1.2 - A concentração de carga

É dada pela seguinte expressão obtida por LANGEFORS & KHILSTRÖM (1963). Representa a razão de carregamento linear de um furo de mina, necessário a uma boa fragmentação da rocha, detonando contra a parede cilíndrica de um furo vazio, à distância V:

$$\ell = 1,5 \left(\frac{V}{\phi} \right)^{1,5} \left(V - \frac{\phi}{2} \right) (\text{kg} / \text{m}) \quad [6]$$

onde:

ℓ = razão de carregamento linear do furo de mina de diâmetro de 0,032 m detonado contra um furo vazio de diâmetro ϕ
V = encargo ou afastamento.

HOLMBERG, generaliza esta equação, propondo as seguintes hipóteses:

- A razão de carregamento linear é diretamente proporcional ao diâmetro do furo carregado, para manter o mesmo nível de fraturamento da rocha.

$$\ell = \frac{d}{d_1} \ell_1 \quad [7]$$

- Deve existir um fator que leve em conta a qualidade da rocha. É o chamado fator rocha C (vide observação 1, adiante). Como o fator rocha para o granito experimentado (LANGEFORS & KHILSTRÖM, 1963) é de 0,4, isso deve ser levado em conta na generalização.
- A força unitária relativa do explosivo deve ser considerada (vide observação 2). Assim, a força unitária relativa do ANFO (Sanfo) em relação à dinamite considerada por LANGEFORS & KHILSTRÖM (1963) como padrão, deve entrar na expressão. Qualquer outro explosivo, então, terá sua influência definida na expressão por um valor multiplicativo inverso, ou seja, $1/S_{\text{ANFO}}$.

A partir destas hipóteses a expressão [6] foi generalizada, para quaisquer materiais rochosos através da constante (c), explosivos (S_{ANFO}) e diâmetros dos furos de mina d, em relação ao de 0,032 m e tem-se:

$$\ell = \frac{1,5}{0,032} \cdot d \left(\frac{V}{\phi} \right)^{1,5} \left(V - \frac{\phi}{2} \right) \left(\frac{c}{0,4} \right) \cdot 1,19 \quad (\text{kg} / \text{m})$$

$$S_{\text{ANFO}}$$

$$\ell = \frac{55 \cdot d \left(\frac{V}{\phi} \right)^{1,5} \left(V - \frac{\phi}{2} \right) \left(\frac{c}{0,4} \right)}{S_{\text{ANFO}}} (\text{kg} / \text{m})$$

[8]

Observação 1 - Da constante da rocha

O fator constante da rocha c é uma medida empírica da quantidade de explosivo necessária para desmontar um metro cúbico de rocha. As experiências de campo pelos quais o valor de c foi determinado tiveram lugar em detonações de bancada.

Desmontes em granito cristalino friável, forneceram um valor de c igual a 0,2. Em praticamente todos os outros materiais rochosos, desde o arenito ao mais homogêneo granito, um valor c de 0,3 a 0,4 kg/m³ foi encontrado. Nas condições da Suécia, o valor predominante da constante c, nas operações de desmonte por explosivos adotado é de 0,4 kg/m³.

Para as condições brasileiras um estudo realizado em grande número de pedreiras para produção de brita, foi realizado, analisando granitos, gnaisses, diabásios, basaltos e calcários. Um índice de desmontabilidade de rochas tenta ser proposto (vide FUJIMURA, SOARES, HENNIES & SILVA, 1994).

Observação 2 - Da força unitária relativa do explosivo

A melhor forma de classificar explosivos, obviamente seria medir a capacidade de quebra da rocha em diferentes materiais rochosos (com diferentes operações de desmonte) sob diferentes condições de carga. Deste modo uma avaliação torna-se, entretanto, proibitiva em virtude dos custos e tempo envolvidos.

Neste trabalho é utilizada a relação sueca de força unitária relativa ("Weight Strenght") para a correlação de diferentes explosivos.

Tal força é dada pela expressão seguinte:

$$S = \frac{5}{6} \cdot \frac{Q}{Q_0} + \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{V_0}$$

[9]

onde S é a força relativa a um explosivo tomado como padrão (dinamite LFB), por exemplo;

Q₀ é o calor de explosão para 1 kg de explosivo padrão;

V₀ é o volume de gás gerado a partir do kg de explosivo padrão nas condições normais de pressão e temperatura;

Q é o calor de explosão para um kg do explosivo considerado; e,

V o volume de gás gerado pelo explosivo considerado. No caso da dinamite LFB Q₀ é 5,0 MJ e V₀ é 0,85 m³.

A fórmula baseia-se no fato de que o trabalho de arrancamento da rocha depende primariamente do calor de explosão que provocará a expansão e, secundariamente, dos produtos gasosos gerados na reação e que serão expandidos. As constantes 5/6 e 1/6 na fórmula acima foram determinadas em experiências de campo onde os explosivos de baixo e alto volume de gás foram utilizados e comparados com a dinamite LFB nas condições de desmonte de bancada.

Hoje, a força unitária relativa é raramente expressa em relação à dinamite LFB. Usualmente ela é dada utilizando como explosivo padrão o ANFO (Nitrato de Amônio/óleo combustível) ou relativamente à dinamite produzida pela Nitro Nobel AB's chamada Dynamex B. Quando a força é expressa em relação ao ANFO, deve-se inicialmente calcular a força relativa a LFB e depois dividir o valor obtido pela força do ANFO relativa a LFB. Veja a tabela 1.

EXPLOSIVO	Q1 MJ/kg	V1 m ³ /kg	S _{LFB}	S _{DYN}	S _{ANFO}	DENSIDADE kg/m ³
Dinamite LFB	5,00	0,850	1,00	1,09	1,19	
Dynamex B	4,60	0,765	0,92	1,00	1,10	1450
ANFO	3,92	0,973	0,84	0,91	1,00	900
TNT	4,10	0,690	0,82	0,89	0,98	1500
ETN	6,12	0,780	1,17	1,27	1,39	
NABIT	4,10	0,892	0,86	0,93	1,02	1000
GURIT	3,73	0,425	0,71	0,77	0,85	1000

Tabela 1 - Força unitária relativa para alguns explosivos (fornecidos pela Nitro Nobel com seus nomes comerciais).

Geralmente, o conceito de "Weight Strenght" ou força unitária relativa descreve, melhor do que o conceito de energia liberada, a magnitude do trabalho de expansão (arrancamento) que o agente de desmonte pode realizar numa operação.

CÁLCULOS

da equação [8] tem-se:

$$\ell = \frac{55 \cdot d \left(\frac{V}{\phi} \right)^{1,5} \left(V - \frac{\phi}{2} \right) \left(\frac{c}{0,4} \right)}{S_{ANFO}} \text{ (kg / m)}$$

onde: $d = 0,029 \text{ m}$

$$V = 0,173 \text{ m}$$

$$f = 0,102 \text{ m} \quad (\text{diâmetro do furo vazio } f)$$

$$S_{ANFO} = 1,0$$

$$c = 0,35$$

portanto:

$$\ell = \frac{55 \cdot 0,029 \left(\frac{0,173}{0,102} \right)^{1,5} \left(0,173 - \frac{0,102}{2} \right) \left(\frac{0,35}{0,4} \right)}{S_{ANFO}} = 0,3761 \text{ kg / m}$$

$$\boxed{\ell = 376,1 \text{ g / m}}$$

Comprimento do tampão:

$$(t) = 10 \cdot d = 10 \cdot 0,029 \text{ m} = 0,29 \text{ m}$$

$$\boxed{t = 0,29 \text{ m}}$$

$$\text{Massa (m)} = V \cdot d = \frac{\pi D^2}{4} \cdot 1 \cdot 900 \text{ kg (cartuchos de 1 m)}$$

$$m = \frac{3,1416 \cdot (0,029)^2}{4} \cdot 1 \cdot 900 = 0,5945 \text{ kg}$$

$$\boxed{m = 594,5 \text{ g contidas em 1 m de cartucho}}$$

Número de cartuchos:

$$n = \frac{376,9}{594,5} = 0,63 \text{ m de cartucho por m de furo}$$

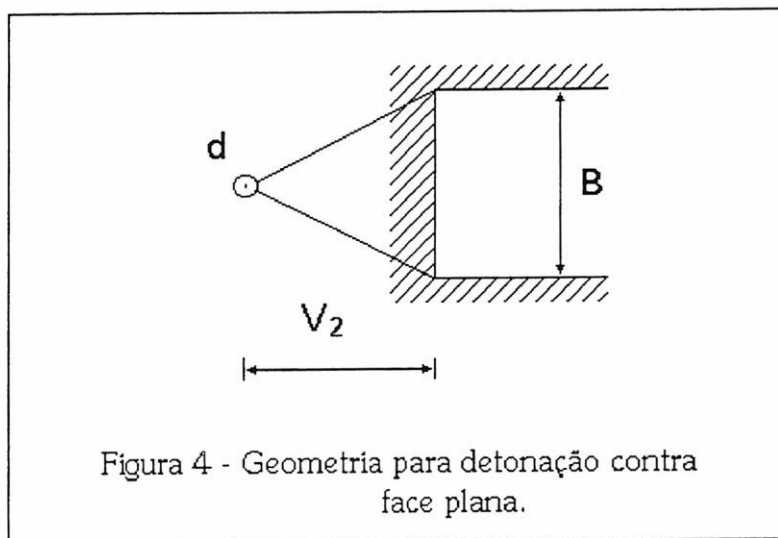
$$\boxed{\begin{array}{l} n = 0,63 \text{ cartuchos / m de furo} \\ d = 0,029 \text{ m ou } 29 \text{ mm} \end{array}}$$

4.2. O SEGUNDO QUADRILÁTERO

Após o primeiro quadrilátero ter sido calculado, uma nova aplicação geométrica resolverá a determinação dos encargos para os quadriláteros seguintes. O desmonte por explosivos tendo como superfície livre um furo circular naturalmente necessita uma concentração de carga mais alta do que

o desmonte que tem esta superfície como uma face reta, devido ao alto confinamento e à baixa reflexão efetiva da onda de choque.

Assim, se houver uma abertura retangular de largura B, e o encargo V for conhecido (figura 4), a concentração de carga l relativa ao ANFO é dada por:



$$l = \frac{32,3 d \cdot c \cdot V}{S_{ANFO} \left(\sin \left(\arctg \left(\frac{B}{2V} \right) \right) \right)^{1,5}} \quad (\text{kg/m}) \quad [10]$$

Mas quando, ao invés disso, parte-se da acepção de que a concentração de carga para o explosivo em uso e a abertura retangular de largura B são conhecidos, então o encargo $V_{(n)}$ pode ser expresso explicitamente com boa precisão como uma função de B_{n-1} e de l .

$$V_{(n)} = 8,8 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{B_{n-1} \cdot l \cdot S_{ANFO}}{d \times c}} \quad (\text{m}) \quad [11]$$

No cálculo do encargo para o novo quadrilátero, o efeito dos desvios de perfuração F (definidos na equação [3]) devem ser incluídos.

Isto é feito considerando-se os furos no primeiro quadrilátero como se eles fossem colocados na posição mais desfavorável (vide figura 5).

Da figura 5 pode-se ver que a superfície livre B que deve ser usada na equação [11] difere da distância entre furos $B_{(1)}$ no primeiro quadrilátero.

$$B_1 = \sqrt{2} (V_1 - F) \quad (\text{m}) \quad [12]$$

Por substituição, o encargo para o novo quadrilátero é:

$$V_{(2)} = 10,5 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{(V_1 - F) \cdot l \cdot S_{ANFO}}{d \times c}} \quad (\text{m}) \quad [13]$$

Obviamente, este valor deve ser reduzido do desvio de furação para obter-se o encargo prático (ou real).

$$V_2 = V_{(2)} - F \quad (\text{m}) \quad [14]$$

Existem duas restrições que devem ser aplicadas a V_2 :

CONDIÇÃO 1

O encargo V_2 deve satisfazer a seguinte condição:

$$V_2 \leq 2 B_1$$

[15]

para que não ocorram deformações plásticas.

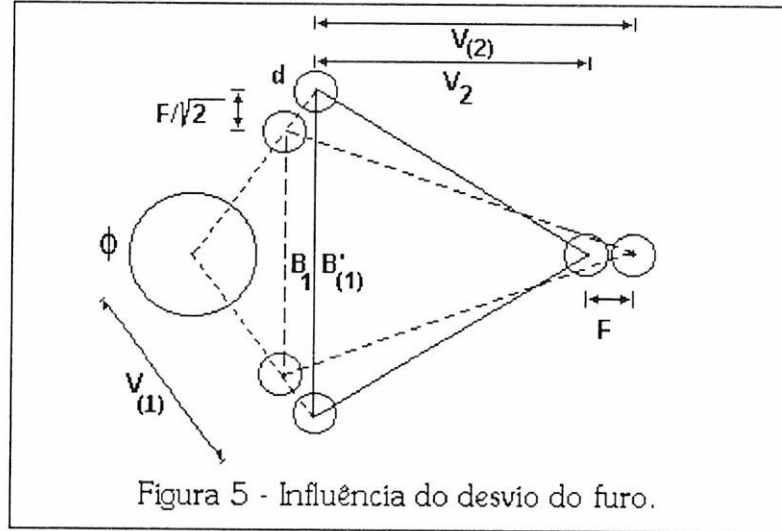


Figura 5 - Influência do desvio do furo.

Quando isto não ocorrer, usando as equações [10] e [15], a concentração de carga deve ser reduzida a

$$\ell = \frac{32,3 d \cdot c \cdot 2 B_{n-1}}{S_{\text{ANFO}} \left\{ \text{sen} \left[\text{arctg} \left(\frac{1}{4} \right) \right] \right\}^{1,5}}$$

[16]

ou

$$\ell = \frac{540 \cdot d \cdot c \cdot B_{n-1}}{S_{\text{ANFO}}} \text{ (kg/m)}$$

[17]

Quando a restrição para deformação plástica não puder ser satisfeita, é melhor escolher um explosivo ou uma força relativa mais baixa de forma a otimizar o desmonte.

CONDIÇÃO 2

O ângulo de abertura também deve ser menor que 1,6 rd (90°), senão o pilão perderá seu caracter de um pilão de quatro seções. Isto significa:

$$V_2 > 0,5 B_1$$

[18]

GUSTAFSSON (1973) sugere que o encargo para cada quadrilátero deve ser $V_n = 0,7 B'_{(n-1)}$.

Uma regra prática para o número de quadriláteros no pilão é que o comprimento do lado do último quadrilátero B' não deve ser menor do que a raiz quadrada do avanço.

O algoritmo para o cálculo dos quadriláteros remanescentes é o mesmo utilizado para o segundo quadrilátero.

Os furos de mina dos quadriláteros devem ser carregados de tal forma que o seu tampão, em um comprimento (h) de dez vezes seu diâmetro, deve ser deixado descarregado.

$$h = 10 d \text{ (m)}$$

[19]

4.3. GENERALIZAÇÃO DA EXPRESSÃO PARA CÁLCULO DE V_n E B_n

Neste item são apresentadas as expressões generalizadas para cálculo do encargo e extensão da face do quadrilátero de ordem n , em função do desvio de furação (F), de acordo com a figura 6.

O enésimo Quadrilátero

$$B'_{(n-1)} = \sqrt{2} \left[\frac{B'_{(n-2)}}{2} + V_{n-1} \right] \quad [20]$$

expressão da dimensão lateral de sadia do material desmontado no quadrilátero de ordem $n-1$, na boca do pilão.

$$B_{n-1} = \sqrt{2} \left[\frac{B'_{(n-2)}}{2} + V_{n-1} - F \right] \quad [21]$$

expressão da dimensão lateral de sadia do material obtida na pior condição contra a qual se dará o arranque de encargo V_n

$$V_{(n)} = 8,8 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{B_{n-1} \cdot \ell \cdot S_{ANFO}}{d \cdot c}} \quad [22]$$

$V_{(n)}$ = máximo encargo do furo de mina a ser detonado contra a face B_{n-1}

V_n = encargo prático do furo de mina a ser detonado contra a face B_{n-1}

$$V_n = V_{(n)} - F \quad [23]$$

Condições de validade:

1a.) $V_n \leq 2 B_{n-1}$

2a.) $V_n > 0,5 B_{n-1}$

$$B'_{(n)} = \sqrt{2} \left[\frac{B'_{(n-1)}}{2} + V_n \right] \quad [24]$$

expressão da dimensão lateral de saída do material do pilão no quadrilátero de ordem n , na boca do pilão

$$B_n = \sqrt{2} \left[\frac{B'_{(n-1)}}{2} + V_n - F \right] \quad [25]$$

expressão da dimensão lateral de saída do material do pilão, na pior condição, contra a qual se dará o arranque de encargo V_{n+1} .

Dimensão final do Pilão

O pilão de 4 seções pode ter mais de quatro quadriláteros. O pilão terá dimensão suficiente quando $B_n \geq 1 \text{ m}$ ou sua área $B_n^2 \geq 1 \text{ m}^2$ [26]

4.4 CÁLCULO DO SEGUNDO QUADRILÁTERO ($n=2$)

Do segundo quadrilátero em diante, será verificada a possibilidade de utilização dos cartuchos de $d = 29 \text{ mm}$ e $d = 45 \text{ mm}$. Para :

$$d = 29 \text{ mm} \rightarrow \ell = 595 \text{ g/m.}$$

$$d = 45 \text{ mm} \rightarrow \ell = 1430 \text{ g/m.}$$

Utilizando-se as expressões generalizadas de cálculo:

$$V_{(1)} = 17 \text{ cm}$$

$$V_1 = 12 \text{ cm}$$

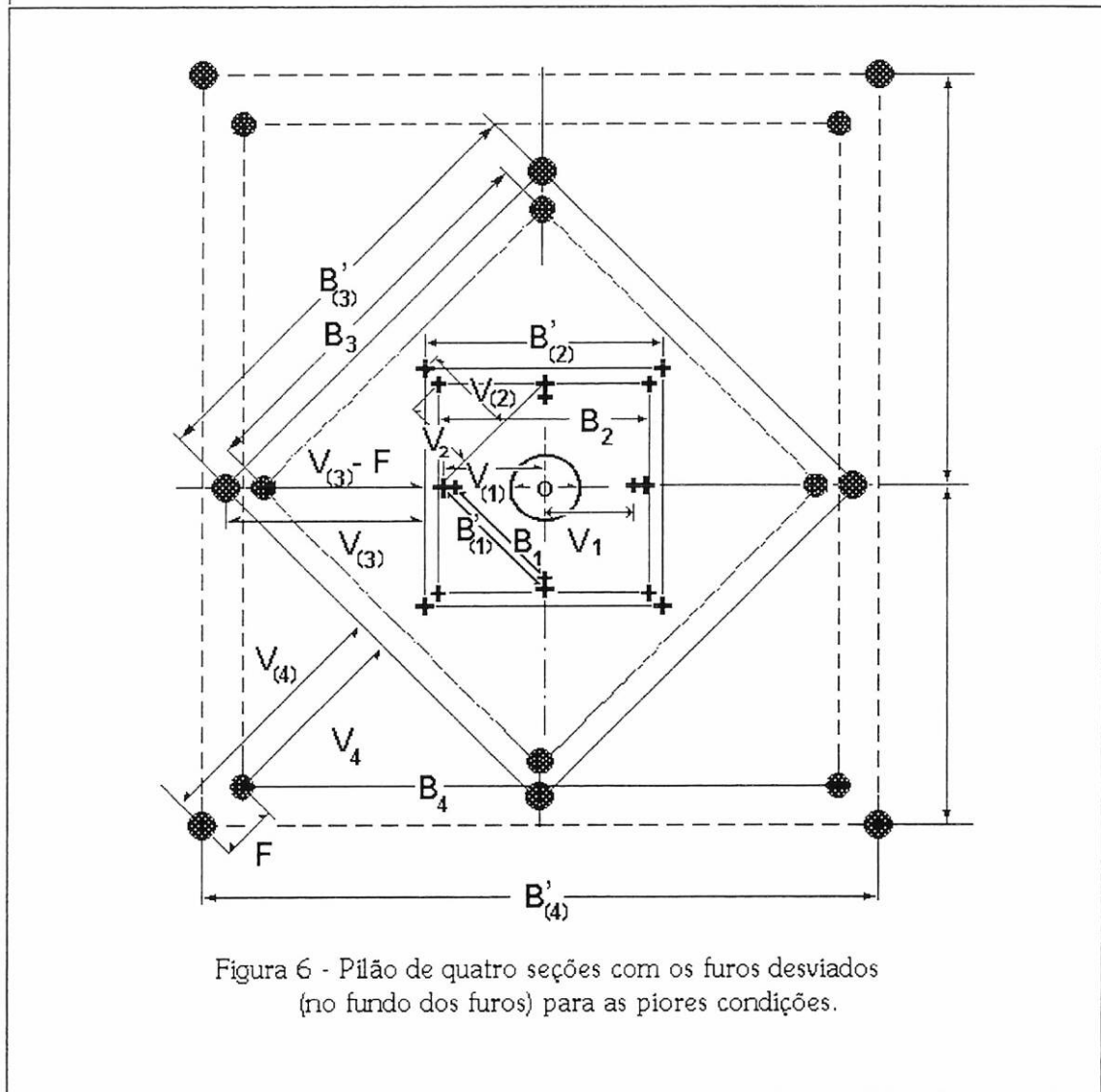


Figura 6 - Pilar de quatro seções com os furos desviados (no fundo dos furos) para as piores condições.

$$B'_{(2-1)} = \sqrt{2} \left(\frac{B_{(2-2)}}{2} + V_{2-1} \right) = \sqrt{2} \cdot V_1$$

$$B'_{(1)} = \sqrt{2} \cdot 12 = 17 \text{ cm}$$

$$B_1 = \sqrt{2} (V_1 - F) = \sqrt{2} (0,12 - 0,05) = 10 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} B'_{(1)} &= 17 \text{ cm} \\ B_1 &= 10 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2 B_1 &= 0,20 \text{ m} \\ 0,5 B_1 &= 0,05 \text{ m} \end{aligned}$$

$$V_{(2)} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{B_1 \cdot \ell \cdot S_{ANFO}}{d \cdot c}}$$

$$V_{(2)} p / d = 29 \text{ mm}$$

$$V_{(2)} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{0,10 \cdot 0,595 \cdot 1}{0,35 \cdot 0,049}} = 0,21 \text{ m}$$

$$V_2 = 0,21 - 0,05 = 0,16 \text{ m} \quad |$$

$$\begin{aligned} V_{(2)} &= 0,21 \text{ m} \\ V_2 &= 0,16 \text{ m} \end{aligned}$$

condições de validade 1ª e 2ª satisfeitas.

$$V_{(2)} p / d = 45 \text{ mm}$$

$$V_{(2)} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{0,10 \cdot 1,430 \cdot 1}{0,35 \cdot 0,049}} = 0,27 \text{ m}$$

$$V_2 = 0,27 - 0,05 = 0,22 \text{ m} \quad |$$

$$\begin{aligned} V_{(2)} &= 0,27 \text{ m} \\ V_2 &= 0,22 \text{ m} \end{aligned}$$

não satisfaz a 1ª condição de validade pois $V_2 > 2B_1$.

$$d = 29 \text{ mm}$$

$$t = 29 \text{ cm}$$

Fica-se com $d = 29 \text{ mm}$ e o tampão = $10 \cdot 0,029 = 0,29 \text{ m}$

$$B'_{(2)} = \sqrt{2} \left(\frac{B'_{(1)}}{2} + V_2 \right)$$

$$B'_2 = \sqrt{2} \left(\frac{0,17}{2} + 0,16 \right) = 0,35$$

$$B'_{(2)} = 0,35 \text{ m}$$

dimensão do pilão na boca.

4.5 CÁLCULO DO TERCEIRO QUADRILÁTERO (n=3)

$$2 B_2 = 0,56 \text{ m}$$

$$0,5 B_2 = 0,14 \text{ m}$$

$$B_2 = \sqrt{2} \left(\frac{0,17}{2} + 0,16 - 0,05 \right) = 0,28$$

$$V_{(3)} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{0,28 \cdot \ell \cdot 1}{d \cdot 0,35}}$$

$$V_{(3)} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot 0,89 \sqrt{\frac{\ell}{d}} = 0,0787 \sqrt{\frac{\ell}{d}} \text{ (m)}$$

$$p/d = 0,029 \text{ m} \rightarrow V_{(3)} = 0,36 \text{ m}$$

$$V_3 = 0,36 - 0,05 = 0,31 \text{ m}$$

$$V_{(3)} = 0,36 \text{ m}$$

$$V_3 = 0,31 \text{ m}$$

$$p/d = 0,045 \text{ m} \rightarrow V_{(3)} = 0,44 \text{ m}$$

$$V_3 = 0,44 - 0,05 = 0,39 \text{ m}$$

$$V_{(3)} = 0,44 \text{ m}$$

$$V_3 = 0,39 \text{ m}$$

Os dois encargos satisfazem as condições 1ª e 2ª, fica-se com o maior.

$$d = 45 \text{ mm}$$

$$\therefore t = 45 \text{ cm}$$

$$\text{tampão} = 10 \cdot 0,045 = 0,45 \text{ m}$$

$$B'_{(3)} = \sqrt{2} \left(\frac{B'_{(2)}}{2} + V_3 \right) = \sqrt{2} \left(\frac{0,35}{2} + 0,39 \right) = 0,80 \text{ m}$$

$$B'_{(3)} = 0,80 \text{ m}$$

dimensão do pilão na boca.

4.6 CÁLCULO DO QUARTO QUADRILÁTERO (n=4)

$$B_3 = \sqrt{2} \left(\frac{0,35}{2} + 0,39 - 0,05 \right) = 0,73 \text{ m}$$

= lateral na pior condição de desvio contra a qual se dará o desmonte de V_4

$2 B_3 = 1,46 \text{ m}$ $0,5 B_3 = 0,37 \text{ m}$

$$V_{(4)} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{0,73 \cdot 1,430 \cdot 1}{0,045 \cdot 0,35}} = 0,72 \text{ m}$$

$$V_4 = 0,72 - 0,05 = 0,67 \text{ m}$$

$V_{(4)} = 0,72 \text{ m}$ $V_4 = 0,67 \text{ m}$

As condições 1 e 2 são satisfeitas.

$$\text{tampão} = 10 \cdot 0,045 = 0,45 \text{ m} \quad \therefore \quad t = 45 \text{ cm}$$

$$B'_{(4)} = \sqrt{2} \left(\frac{B_{(3)}}{2} + V_4 \right) = \sqrt{2} \left(\frac{0,80}{2} + 0,67 \right) = 1,51 \text{ m} \geq 1 \text{ m}$$

$$B_4 = \sqrt{2} \left(\frac{B_{(3)}}{2} + V_4 - F \right) = \sqrt{2} \left(\frac{0,80}{2} + 0,67 - 0,05 \right) = 1,44 \text{ m} \geq 1 \text{ m}$$

Portanto, o pilão será até o quarto quadrilátero.

4.7 RESUMO DOS DADOS DOS FUROS DO PILÃO

DESCRIÇÃO	Pilão de Quatro Seções Furo central vazio $\phi = 0,102$ m				
	1° Qua- drilátero	2° Qua- drilátero	3° Qua- drilátero	4° Qua- drilátero	Totais / Médias
Comprimento de perfuração H (m)	3,22	3,22	3,22	3,22	
Avanço l (m)	3,06	3,06	3,06	3,06	
Dimensão da lateral de saída $B_{(n)}$ e B_n (m)	$B_{(1)} = 0,17$ $B_1 = 0,10$	$B_{(2)} = 0,35$ $B_2 = 0,28$	$B_{(3)} = 0,80$ $B_3 = 0,73$	$B_{(4)} = 1,51$ $B_4 = 1,44$	
Encargo máximo $V_{(n)}$ (m)	$V_{(1)} = 0,17$	$V_{(2)} = 0,21$	$V_{(3)} = 0,44$	$V_{(4)} = 0,72$	
Encargo prático V_n (m)	$V_1 = 0,12$	$V_2 = 0,16$	$V_3 = 0,39$	$V_4 = 0,67$	
Diâmetro do furo d (m)	d=dc=0,029	d=dc=0,029	d=dc=0,045	d=dc=0,045	
Diâmetro do cartucho dc (m)					
Comprimento de perfuração por quadrilátero (m)	4x3,22 = 12,88	4x3,22 = 12,88	4x3,22 = 12,88	4x3,22 = 12,88	51,52
Explosivo por Quadrilátero (kg) $[4 \times H - 4 \times T] \times \ell$	6,97	6,97	15,84	15,84	45,63
Razão de carregamento linear l (kg/m)	0,595	0,595	1,430	1,430	0,890
Comprimento do tampão T (m)	4x0,29=1,16	4x0,29=1,16	4x0,45=1,80	4x0,45=1,80	
Volume desmontado no Pilão (m ³) $[S_n - S_{n-1}]$	0,0308	0,273	2,037	4,317	6,62
Razão de carregamento volumétrica de explosivo (kg/m ³)	226	25,5	7,78	3,67	6,89
Razão de Perfuração p/m ³ desmontado (m/m ³)	418,2	47,18	6,32	2,98	7,78
Dimensão final do pilão $B_{(4)}$ B_4 Seção- menor					1,51 1,44 2,07

Tabela 2 - Resultados dos cálculos do Pilão

5. Região E - FUROS DE LEVANTE

Para dimensionamento geométrico dos furos de mina de levante, é essencial a consideração da largura da seção de escavação. Assim, estes cálculos serão feitos simultaneamente, tanto para a galeria quanto para a rampa, tendo-se presente apenas a largura de uma e outra.

O afastamento para os furos de levante em um fogo é, em princípio, calculado pela mesma expressão do desmonte em bancada. A altura de bancada é substituída pelo comprimento do avanço e um fator de fixação mais alto é usado devido ao efeito gravitacional em virtude do maior intervalo de tempo entre a detonação dos furos.

O máximo afastamento é dado pela expressão:

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{\ell \cdot S_{ANFO}}{\bar{c} \cdot f \cdot \frac{E}{V}}} \quad (\text{m}) \quad [27]$$

onde: f é o fator de fixação, E/V é a relação entre o espaçamento (E) e o afastamento (V) e \bar{c} é a constante da rocha corrigida.

Um fator de fixação de 1,45 e a relação de E/V igual a 1 são normalmente usados para os furos de mina de levante.

$$\bar{c} = \begin{cases} c + 0,05 & V \geq 1,4 \text{ m} \\ c + 0,07/V & V < 1,4 \text{ m} \end{cases} \quad [28]$$

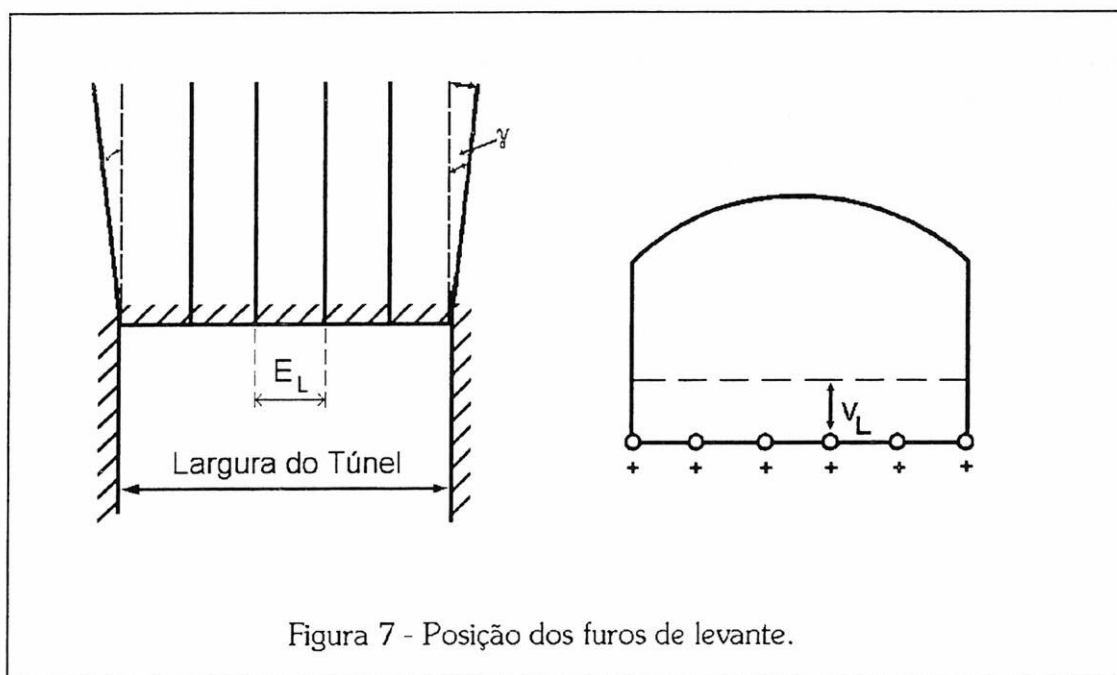


Figura 7 - Posição dos furos de levante.

Ao locar os furos de levante, devemos ter em mente os ângulos de saída γ (vide figura 7).

A magnitude do ângulo depende do equipamento de perfuração disponível e da profundidade do furo.

Para um avanço em torno de 3 m um ângulo de saída igual a 0,05 rd (3° - correspondendo a 5 cm/m) deve ser suficiente para permitir espaço para a perfuração da nova frente.

5.1. ENCARGO DOS FUROS DE LEVANTE (RAMPA E GALERIA)

Para os furos de levante, tanto da galeria quanto da rampa, os cálculos de V independem da largura podendo, portanto, serem efetuados simultaneamente.

Aplicando-se a equação [27], e tendo em vista as relações indicadas para os furos de levante tem-se, para $d = 29 \text{ mm}$ (que produzirá menor dano na rocha remanescente - vide item 10)

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{0,595 \cdot 1}{0,35 \cdot 1,45 \cdot 1}} \quad (\text{m})$$

$$V = 0,9 \cdot 1,08 = 0,97 \text{ m}$$

$$V = 0,97 \text{ m} < 1,4 \text{ m}$$

$$\bar{c} = \frac{0,07}{V} + c = \frac{0,07}{0,97} + 0,35$$

$$\bar{c} = 0,42$$

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{0,595 \cdot 1}{0,42 \cdot 1,45}} = 0,9 \times 0,99 = 0,89$$

$$\bar{c} = \frac{0,07}{0,89} + 0,35 = 0,43 \Rightarrow V = 0,9 \times 0,98 = 0,88 \text{ m}$$

Iterativamente, o cálculo de V conduzirá ao valor constante $V = 0,88 \text{ m}$ tanto para a rampa, quanto para a galeria.

O afastamento real ou prático dos furos de mina de levante deve ser reduzido do ângulo de saída no piso e do desvio de perfuração (figura 8).

Assim,

$$V_L = V - H \cdot \text{sen } \gamma - F \quad (\text{m}) \quad [29]$$

$$V_L = 0,88 - 3,22 \cdot \text{sen } 3^\circ - 0,05$$

$$\gamma = 3^\circ$$

$$V_L = 0,88 - 0,17 - 0,05 = 0,66 \text{ m}$$

$$V_L = 0,66 \text{ m}$$

Tem-se portanto para a rampa e a galeria:

A referência para definição de V é a linha de greide do piso da galeria.

5.2. CÁLCULO DO ESPAÇAMENTO.

5.2.1.- Furos de levante da Galeria

Para determinar a posição dos furos de levante na Galeria com largura de 5 m deve-se determinar o seu espaçamento.

O espaçamento dos furos de levante (E) deve ser igual a (V), em primeira aproximação. Haverá, entretanto, uma variação em função da largura do túnel.

O número de furos de levante N , é dado por:

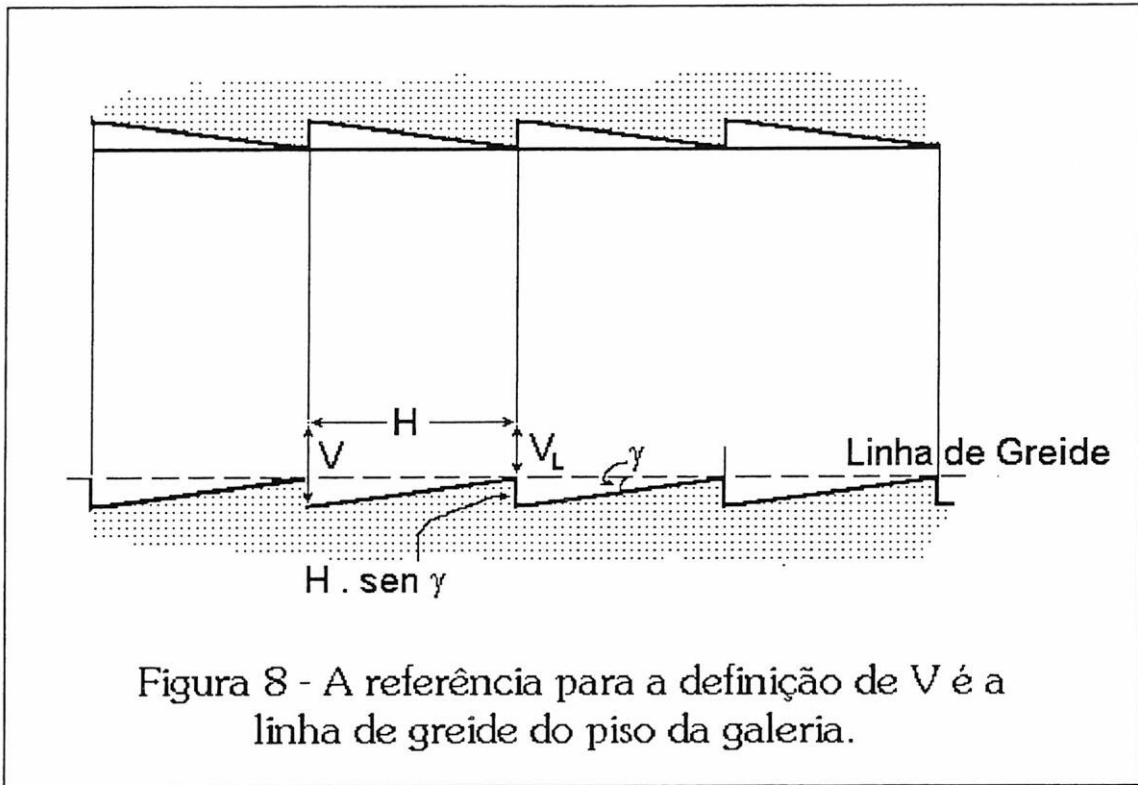
$$N = \text{INT} \left(\frac{\text{Largura do túnel} + 2 \cdot H \cdot \text{sen } \gamma}{V} + 2 \right) \quad [30]$$

assim,

$$N = \text{INT} \left(\frac{5 + 2,3,22 \text{ sen } 3^\circ}{V} + 2 \right) = \left(\frac{5,34}{V} + 2 \right)$$

$$N = \left(\frac{5,34}{0,88} + 2 \right)$$

$$N = 8$$



O espaçamento é, portanto, ajustado para os furos de levante (com exceção dos furos das extremidades), pela expressão:

$$E_{LG} = \frac{\text{Largura do túnel} + 2 \cdot H \cdot \text{sen } \gamma}{N - 1} \text{ (m)} \quad [31]$$

Então:

$$E_{LG} = \frac{5,0 + 0,34}{8 - 1} = 0,76 \text{ m} \therefore E_{LG} = 0,76 \text{ m}$$

O espaçamento real para os furos dos cantos é igual a:

$$E'_{LG} = E_{LG} - H \cdot \text{sen } \gamma \text{ (m)} \quad [32]$$

$$E'_{LG} = 0,76 - 0,17 \therefore E'_{LG} = 0,59 \text{ m}$$

$$E_{LG} = 0,76 \text{ m}$$

$$E'_{LG} = 0,59 \text{ m}$$

Resumindo, para a galeria tem-se:

5.2.2. Furos de Levante da Rampa

Para determinar o número dos furos de levante na rampa com largura de 6 m usa-se a

$$N = 9 \text{ furos}$$

expressão [30]

O espaçamento ajustado dos 9 furos, será:

$$E_{LR} = \frac{6,0 + 0,34}{9 - 1} = 0,79 \text{ m} \therefore E_{LR} = 0,79 \text{ m}$$

O espaçamento para furos de canto, de [32]

$$E'_{LR} = 0,79 - 0,17 \text{ (m)} \therefore E'_{LR} = 0,62 \text{ m}$$

$$E_{LR} = 0,79 \text{ m}$$
$$E'_{LR} = 0,62 \text{ m}$$

Resumindo, para a rampa tem-se:

5.3.- CONSUMO DE EXPLOSIVOS NOS FUROS DE LEVANTE (GALERIA E RAMPA)

O comprimento da carga de fundo (h_f) necessária para o arrancamento do pé é

$$h_f = 1,25 V \text{ (m)} \quad [33]$$

O comprimento da carga de coluna (h_c) é dado por:

$$h_c = H - h_f - 10 \cdot d \text{ (m)} \quad [34]$$

e sua concentração de carga deve ser reduzida a 70% da carga de fundo. Entretanto, isto nem sempre é feito por consumir trabalho e tempo. Geralmente a mesma concentração é usada no fundo e na coluna.

Para os furos de levante, um comprimento descarregado de 10 d é geralmente deixado no emboque (tampão).

Quando se utiliza a equação [27], a seguinte condição deve ser obedecida:

$$V \leq 0,6 H \quad [35]$$

Por outro lado, o máximo afastamento pode ser sucessivamente reduzido, diminuindo-se a razão de carregamento linear. Assim, na determinação do espaçamento prático (E_L) e do afastamento prático (V_L), isto deve ser considerado.

Cálculo da carga de fundo

Como se está adotando o cartucho ANFO de $d = 29 \text{ mm}$ com $\ell = 0,595 \text{ kg/m}$, esta carga de fundo ℓ_f deve ser reduzida a 70% para o cálculo da carga de coluna (ℓ_c).

Assim

$$\ell_c = 0,7 \cdot \ell_f \text{ (kg/m)}$$

$$\ell_c = 0,7 \cdot 0,595 = 0,416 \text{ kg/m}$$

$$\ell_c = 0,42 \text{ kg/m}$$

de [33]

$$h_f = 1,25 \cdot V_L \quad \therefore \quad h_f = 0,83 \text{ m}$$

$$h_c = 2,10 \text{ m}$$

de [34]

Portanto, o total de explosivos para os furos de levante da rampa será:

$$m_c = h_c \times \ell_c = 2,10 \times 0,42 = 0,88 \text{ kg/furo}$$

$$m_f = h_f \times \ell_f = 0,83 \times 0,60 = 0,50 \text{ kg/furo}$$

$$Q_c = m_c \times N = 0,88 \times 9 = 7,92 \text{ kg}$$

$$Q_f = m_f \times N = 0,50 \times 9 = 4,50 \text{ kg}$$

$$12,42 \text{ kg}$$

Total da rampa =

E o total de explosivos para os furos de levante da Galeria, será:

$$Q_c = m_c \times N = 0,88 \times 8 = 7,04 \text{ kg}$$

$$Q_f = m_f \times N = 0,50 \times 8 = 4,00 \text{ kg}$$

$$11,04 \text{ kg}$$

Total da Galeria =

Observação 3 - Do fator de Fixação

Nas fórmulas dadas, diferentes fatores de fixação f são usados para o cálculo do afastamento em diferentes situações. Por exemplo, em desmonte de bancada com furos verticais posicionados segundo uma fileira com o fundo engastado (sobrefuração), $f = 1$. Quando os furos de mina são inclinados, torna-se mais fácil o arranque do pé. Em vista disso, um fator de fixação mais baixo ($f < 1$) é utilizado para um furo inclinado. Isto resulta em um afastamento maior. Na abertura de túneis, alguns furos são detonados na mesma espera. Algumas vezes os furos devem ter seu encargo em sentido ascendente (levante) e outras vezes em sentido descendente (região C). Assim, diferentes fatores de fixação são usados para incluir os efeitos dos múltiplos furos de mina e da gravidade.

Observação 4 - Do fator de Fixação dos FUROS DE REALCE nas regiões B e C:

O método para o cálculo dos furos de realce nas regiões B e C (figura 1), não difere muito do cálculo dos furos de levante.

Para os furos de realce lateral, algumas vezes designados também por certos autores como furos de alívio lateral, que desmontam a rocha horizontalmente e para cima na região B é usado um fator de fixação de 1,45 e relação E/V variando de 1,0 a 1,25.

Para os furos de realce da região C (desmontam para baixo), o fator de fixação é reduzido para 1,2 com a relação E/V permanecendo no mesmo intervalo de 1,0 a 1,25.

A concentração de carga de coluna para os furos de realce de ambas regiões deve ser igual a 50% da concentração da carga de fundo.

6. Região D - FUROS DE CONTORNO

Para a galeria e a rampa estão já definidos os furos de pilão e os furos de levante.

Para a definição da região remanescente a ser desmontada nos realces, é bom que se definam os furos de contorno e seus encargos.

Quando o *desmonte cuidadoso não for necessário*, o encargo e espaçamento dos furos de contorno são calculados de acordo com o que já foi dito para os furos de levante, com as seguintes exceções:

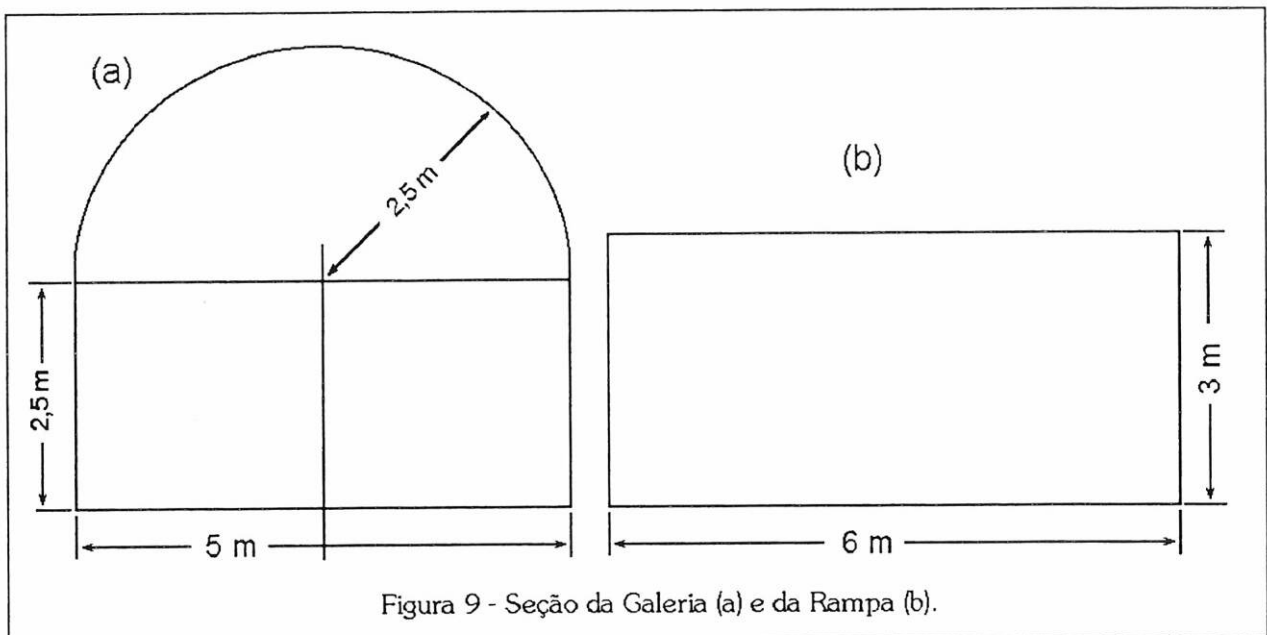
1. Fator de fixação $f = 1,2$;
2. Relação E/V deve ser igual a $1,25$
3. A concentração de carga de coluna é 50% da concentração da carga de fundo.

O dano produzido pelo desmonte por explosivos no teto e paredes de uma abertura subterrânea, freqüentemente determinam um custo excessivo em suporte. Em rochas de baixa resistência, um tempo bastante longo de auto-suporte ("stand up time") pode ser atingido com um desmonte mais cuidadoso do contorno.

Um furo de mina de 3 m de extensão, carregado com ANFO (1,5 kg/m) é capaz de produzir uma zona de dano de aproximadamente 1,5 m de raio.

Com desmonte cuidadoso, esta zona perturbada pode ser reduzida a um mínimo. Diz Persson em 1973 "Nossa experiência tem demonstrado que o espaçamento é uma função linear do diâmetro do furo de mina".

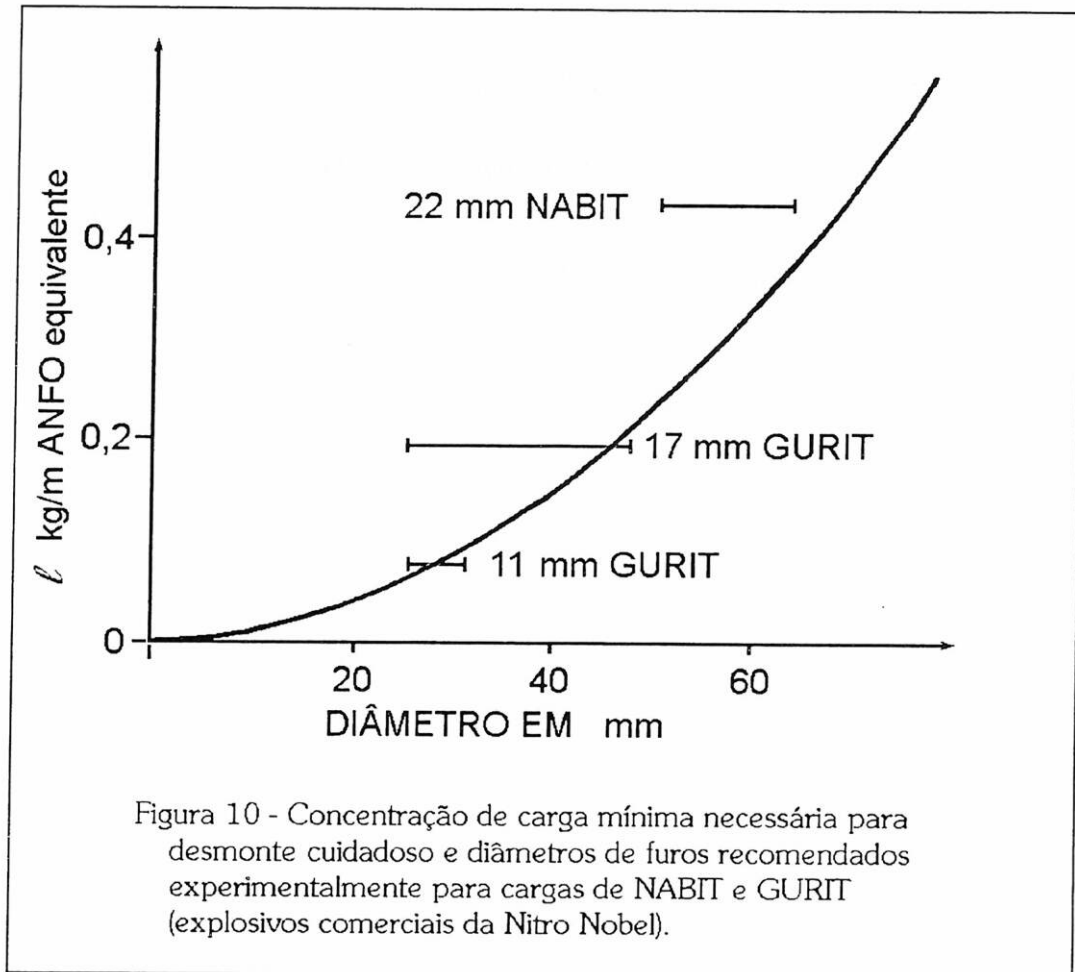
$$E = K \cdot d \quad (\text{m}) \quad \text{onde } E = \text{espaçamento máximo} \quad [36]$$



Onde a constante K varia de 15 a 16. Uma relação de E/V de 0,8 deve ser usada. Para um furo de mina de 41 mm de diâmetro o espaçamento será em torno de 0,6 m e o afastamento próximo de 0,8 m.

A mínima concentração de carga por metro de furo de mina é também função do diâmetro do furo. Para furos de diâmetro acima de 0,015 m a seguinte relação tem sido usada:

$$\ell = 90 d^2 \quad (\text{kg/m}) \quad [37]$$



Em desmonte cuidadoso o *comprimento total* do furo deve ser carregado. Na figura 10, ℓ é plotado como uma função de d .

6.1. DETERMINAÇÃO DOS FUROS DE CONTORNO (GALERIA)

Na Galeria será adotado *desmonte cuidadoso em todo o contorno*.

de [36] $E = K \cdot d$

fazendo $d = 0,029 \text{ m}$

$E = 15 \times 0,029 = 0,44 \text{ m}$

de [37] $\ell = 90 \cdot d^2 \text{ (kg/m)} \therefore \ell = 90 \cdot 0,029^2 = 0,076 \text{ (kg/m)}$

Definido E , sabe-se que:

$$\frac{E}{V} = 0,8 \therefore V = \frac{E}{0,8} \therefore V = \frac{0,44}{0,8} \therefore \boxed{V = 0,55 \text{ m}}$$

Em virtude da inclinação para fora ("look out") e dos desvios de perfuração dos furos de contorno, o afastamento prático, será dado por :

$$V_D = V - H \cdot \text{sen } 3^\circ - F \therefore \quad [38]$$

$$V_D = 0,55 - 3,22 \cdot \text{sen } 3^\circ - 0,05 = 0,33 \text{ m}$$

$$V_D = 0,33 \text{ m}$$

$$N_D = \text{INT} \left(\frac{L_D}{E} + 1 - n \text{ furos da interface entre regiões} \right) \quad [39]$$

onde: N_D = Número de furos de contorno

L_D = Extensão do contorno = Perímetro da abertura - linha de levante

n = número de furos sobre a linha limite entre regiões - no caso, entre levante e contorno.

$$L_D = 2 \times 2,5 + \pi \times 2,5 = 12,85$$

$$N_D = \text{INT} \left(\frac{2,85}{0,44} + 1 - 2 \right) = \text{INT} (29,20) = 29$$

O espaçamento prático E_D é dado pela expressão:

$$E_D = \frac{L_D}{N_D + 1} \quad [40]$$

$$E_D = \left(\frac{2,85}{30} \right) = 0,43 \quad \therefore$$

$$E_D = 0,43 \text{ m}$$

$$V_D = 0,33 \text{ m}$$

$$N_D = 29$$

Dano dos furos de contorno

Utilizando as tabelas anexas para furos de 3 m e 3,5 m, com a razão de carregamento de 0,076 kg/m, pode-se calcular a região de dano na rocha (vide gráficos em anexo).

6.2.- DETERMINAÇÃO DOS FUROS DE CONTORNO (RAMPA)

Na Rampa é feito o *Desmonte Cuidadoso no teto* e normal nas paredes

Desmonte cuidadoso no teto

A *razão de carregamento linear, encargo e espaçamento* obtidos da mesma forma que em 6.1.

$$\ell = 0,076 \text{ (kg / m)}$$

$$E = 0,44 \text{ m}$$

$$V = 0,55 \text{ m}$$

$$V_{DT} = 0,33 \text{ m}$$

de [30]

$$N_{DT} = \text{INT} \left(\frac{L_D + 2 \cdot H \cdot \text{sen } \gamma}{E} + 2 \right) = \text{INT} \left(\frac{6 + 0,34}{0,44} + 2 \right)$$

$$N_{DT} = 16$$

$$E'_{DT} = \frac{L_R + H \cdot \text{sen } \gamma - F}{N}$$

$$E_{DT} = \frac{L_R + H \cdot \text{sen } \gamma}{N} = 0,423$$

$$E_{DT} = 0,423$$

Os dois dos cantos $\Rightarrow E'_{DT} = E_{DT} - H \cdot \text{sen } 3^\circ$

$$E'_{DT} = 0,423 - 0,169 = 0,254$$

$$E'_{DT} = 0,25 \text{ m}$$

Desmorte normal nas paredes
de [27] e [28]

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{\ell \cdot S_{ANFO}}{\bar{c} \cdot f \cdot \frac{E}{V}}} \text{ (m)} \quad \bar{c} = \begin{cases} c + 0,05 & V \geq 1,4 \text{ m} \\ c + 0,07/V & V < 1,4 \text{ m} \end{cases}$$

$$f = 1,2$$

$$1 < E/V \leq 1,25$$

$$\ell_c = 0,5 \cdot \ell_f$$

$$p/d = 0,029 \text{ m}$$

$$V_{DP} = 0,9 \sqrt{\frac{0,595 \cdot 1}{c \cdot 1,2 \cdot 1,25}} \quad V_{DP} = 0,567 \sqrt{\frac{1}{c}}$$

$$V_{DP} = 0,863 \text{ m}$$

$$0,86 \text{ m} < E_{DP} \leq 1,08 \text{ m}$$

de [29]

$$V_{DP} = V - H \cdot \text{sen } \gamma - F \text{ (m)}$$

$$V_{DP} = 0,863 - 3,22 \cdot \text{sen } 3^\circ - 0,05$$

$$V_{DP} = 0,64 \text{ m}$$

ESPAÇO DISPONÍVEL NA VERTICAL

$$H_D = 3,00 - 0,66 - 0,33 = 2,01 \text{ m}$$

$$p/ \quad E_{DP} = \frac{H_D}{2} = 1,01 \Rightarrow \text{cai no intervalo indicado}$$

$$N_{DP} = \left(\frac{L_D}{E_{CP}} + 1 \right) \times 2 = \left(\frac{2,01}{1,01} + 1 \right) \times 2 = 6$$

$$N_{DP} = 6$$

$$E_{DP} = 1,01 \text{ m}$$

$$V_{DP} = 0,64 \text{ m}$$

6.3. CONSUMO DE EXPLOSIVOS NOS FUROS DE CONTORNO (GALERIA E RAMPA)

6.3.1. Galeria

Quantidade de explosivo por furo / total dos furos de contorno da galeria (*desmonte cuidadoso*):

$$\ell_f = \ell_c = 0,076 \text{ kg/m}$$

$$h = H = 3,22 \text{ m}$$

$$m = h \times \ell = 0,076 \times 3,22 = 0,25 \text{ kg/furo}$$

$$Q_D = m \times N_D$$

[41]

$$\therefore Q_D = 0,25 \times 29 = 7,25 \text{ kg}$$

$$\text{Total da Galeria} = 7,25 \text{ kg}$$

6.3.2. Rampa

Quantidade de explosivo por furo / total dos furos de contorno da rampa
No teto (*desmonte cuidadoso*):

$$\ell_f = \ell_c = 0,076 \text{ kg/m}$$

$$h = H = 3,22 \text{ m}$$

$$m = h \times \ell = 0,076 \times 3,22 = 0,25 \text{ kg/furo}$$

$$Q_{DT} = m \times N_D$$

$$\therefore Q_{DT} = 0,25 \times 16 = 4,00 \text{ kg}$$

Nas paredes (*desmonte convencional*):

$$\ell_f = 0,60 \text{ kg/m}$$

$$\ell_c = 0,5 \quad \ell_f = 0,30 \text{ kg/m}$$

de [33]

$$h_f = 1,25 V_{CP} \text{ (m)}$$

[42]

O comprimento da carga de coluna (h_c) é dado por:
de [34]

$$h_c = H - h_f - 10 d \text{ (m)}$$

Então,

$$h_f = 1,25 \times 0,64 \text{ (m)} \quad \therefore h_f = 0,80 \text{ m}$$

$$h_c = 3,22 - 0,60 - 0,29 \quad \therefore h_c = 2,13 \text{ m}$$

$$m = h \times \ell = 0,80 \times 0,60 + 2,13 \times 0,30 = 1,12 \text{ kg / furo}$$

$$Q_{DP} = m \times N_p$$

$$\therefore Q_{DP} = 1,12 \times 6 = 6,72 \text{ kg}$$

Total da Rampa = 10,72 kg

Assim, conhecidos E_D e V_D , dos furos de contorno, resta o cálculo dos furos de realce das regiões B e C, para desmontar a rocha descontados os espaços aí definidos. Obviamente, descontar-se-á também a área desmontada pelos furos de levante e pilão. O posicionamento ótimo do pilão, passa a ser um problema de conveniência da melhor posição dos furos de realce, como função de seus encargos.

7. Região B - FUROS DE REALCE LATERAL

A figura 11 indica o pilão e as regiões remanescentes a desmontar, com as dimensões correspondentes.

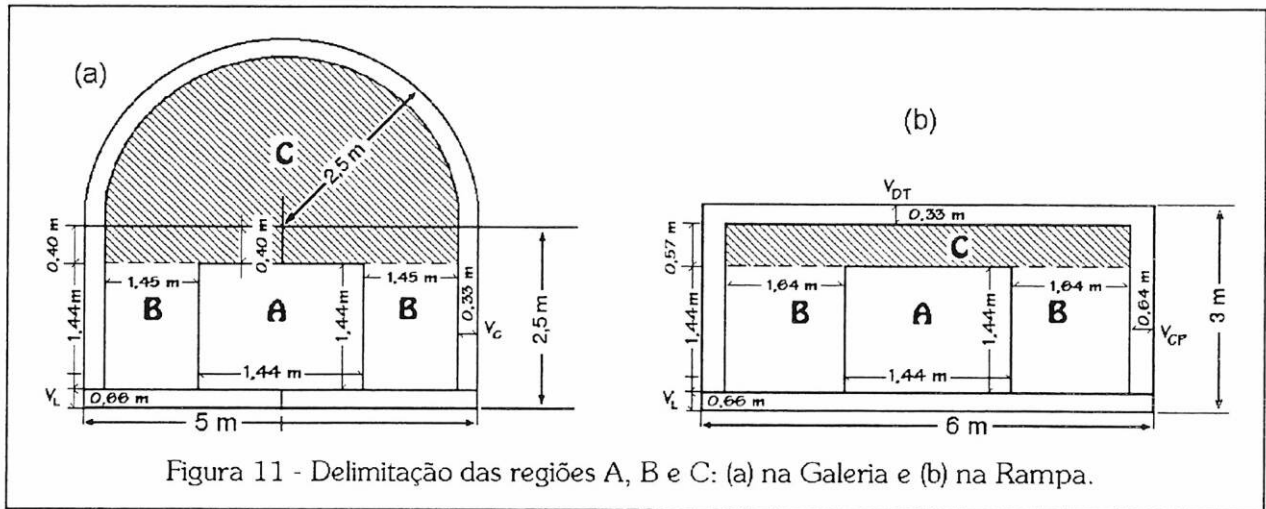


Figura 11 - Delimitação das regiões A, B e C: (a) na Galeria e (b) na Rampa.

Nos cálculos para o posicionamento dos furos de realce lateral, adota-se a seguinte sistemática: Determinam-se os encargos como já exposto na observação 4, com o fator de fixação de 1,45 e a relação E/V no intervalo 1 a 1,25, adotando-se no cálculo o maior valor.

A partir do valor do encargo descontado o desvio

$$V_{Bn} = V - F \text{ (m)} \quad [43]$$

$$V_{Bn} < E_B \leq 1,25 V_{Bn} \quad [44]$$

determina-se o número de linhas verticais laterais ao pilão (colunas), pelas expressões

$$N_{BC} = \text{INT} \left(\frac{L_{BH}}{V_B} \right), e, \quad [45]$$

$$L_{BH} = L - 2 \cdot V_D - L_{\text{Pilão}} \quad [46]$$

onde: L = largura da seção

V_D = encargo dos furos de contorno (região D)

$L_{\text{Pilão}}$ = largura do pilão.

Na altura do pilão o número de linhas de furos será dado pela expressão:

$$N_{BL} = \text{INT} \left(\frac{L_{\text{Pilão}}}{E_{Bn}} + 1 \right) \quad [47]$$

O número de furos, a serem dispostos convenientemente, será dado pelo produto:

$$N = N_{BC} \times N_{BL}$$

[48]

7.1. CÁLCULO DO ENCARGO E ESPAÇAMENTO (RAMPA E GALERIA)

Então,

de [27] e [28] e da condição:

$$\Rightarrow 1 < E/V < 1,25$$

para o diâmetro $d = 0,029$ m tem-se:

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{0,595 \cdot 1}{0,35 \cdot 1,45 \cdot 1,25}} = 0,87 \text{ m} \quad \therefore V = 0,52 \sqrt{\frac{1}{c}}$$

que iterativamente se tornará constante para:

$$V = 0,78 \text{ m}$$

Considerando-se o desvio de furação, de [43]

$$V_B = 0,78 - 0,05 \quad \therefore \boxed{V_B = 0,73 \text{ m}} \quad \Rightarrow 0,73 \text{ m} < E_B \leq 0,91 \text{ m}$$

e de [44]

para o diâmetro $d = 0,045$ m tem-se:

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{1,430 \cdot 1}{c \cdot 1,45 \cdot 1,25}} \quad \therefore V = 0,80 \sqrt{\frac{1}{c}}$$

que iterativamente, se tornará constante para

$$V = 1,26 \text{ m}$$

O encargo prático [43] será:

$$V_B = 1,26 - 0,05 \quad \therefore \boxed{V_B = 1,21 \text{ m}} \quad \Rightarrow 1,21 \text{ m} < E_B \leq 1,51 \text{ m}$$

e de [44]

Furos de realce lateral (Galeria):

Considerando-se o espaço disponível (L_{BH}) para o posicionamento dos furos de realce de B na horizontal, tem-se:

$$L_{BH} = \text{Largura} - 2 \times V_D - L_{\text{Pilão}}$$

$$L_{BH} = 5,00 - 2 \times 0,33 - 1,44 = 2,90 \text{ m}$$

para $d = 29$ mm

$$V_B = 0,73 \text{ m} \quad \Rightarrow 0,73 \text{ m} < E_B \leq 0,91 \text{ m}$$

para $d = 45$ mm

$$V_B = 1,21 \text{ m} \quad \Rightarrow 1,21 \text{ m} < E_B \leq 1,51 \text{ m}$$

$$\text{de [45]} \quad \therefore N_{BC} = \text{INT} \left[\frac{L_{BH}}{V_B} \right] = \left[\frac{2,90}{V_B} \right]$$

$$N_{BC29} = 4$$

$$N_{BC45} = \text{INT}[2,40] \cong 3$$

$$\therefore \boxed{N_{BC} = 4}$$

Portanto, posicionando os furos de B para $d = 29$ mm

$$4 \times V_B = 4 \times 0,73 = 2,93 \text{ m} \cong 2,90$$

Portanto, 4 colunas com encargo $V_B = 0,73$ m podem ser posicionadas dos lados do Pilão.

Na altura do pilão (1,44 m) podem ser colocadas duas N_{BL} , correspondentes ao Espaçamento, e de [47]

$$N_{BL} = \text{INT} \left[\frac{L_{\text{Pilão}}}{E_B} + 1 \right] = \frac{1,44}{0,73} + 1$$

$$\boxed{N_{BL} = 3}$$

Número de furos da região B para a galeria; de [48]:

$$N_{BG} = N_{BC} \times N_{BL} \quad \boxed{N_{BG} = 12}$$

7.1.1 VERIFICAÇÃO DE DANOS

Como todo o contorno da galeria tem *desmonte cuidadoso*, é necessário verificar se os furos de realce lateral, não produzirão uma zona de dano maior do que aquela provocada pelos de contorno (Vide item 10). Isso é feito com o uso dos ábacos do anexo.

Caso a galeria *não* tivesse a condição do desmonte cuidadoso os cálculos *acima da 1ª linha de furos do realce lateral estariam corretos*.

Os furos de contorno, tendo razão de carregamento linear (l) = 0,076 kg/m, produzirão, para uma carga de 3,22 m de comprimento, uma região de dano na seção da galeria de extensão:

$$\boxed{0,07 \text{ m} < d_{ND} < 0,17 \text{ m}}$$

Os furos de realce laterais da linha vertical mais próxima do contorno, tendo diâmetro 0,029 m e razão de carregamento linear de 0,60 kg/m, produzirão cada um uma região de dano expressa por:

$$0,48 \text{ m} < d_{N1} < 0,60 \text{ m}$$

A distância dos furos da 1ª linha de realce lateral até a linha de contorno é igual ao encargo dos furos de contorno V_D , portanto 33 cm

$$V_D = 0,33 \text{ m}$$

Assim, o dano máximo produzido pela 1ª linha do realce lateral deve ser, no máximo:

$$d_{Nn} \leq d_{ND} + V_D + \sum_{i=0}^{n-1} V_{Bi} \text{ (ou } V_{Ci}) \quad [49]$$

onde: d_{Nn} - é a extensão do dano máximo admissível produzido pelo furo da linha vertical de ordem n , no realce lateral ou superior (dano máximo).

d_{ND} = extensão do dano máximo produzido pelos furos de contorno com desmonte cuidadoso.

V_D = encargo prático do furo de contorno.

$\sum_{i=0}^{n-1} V_{Bi}$ ou $\sum_{i=0}^{n-1} V_{Ci}$ = Somatória das extensões dos encargos dos furos das $n-1$ linhas

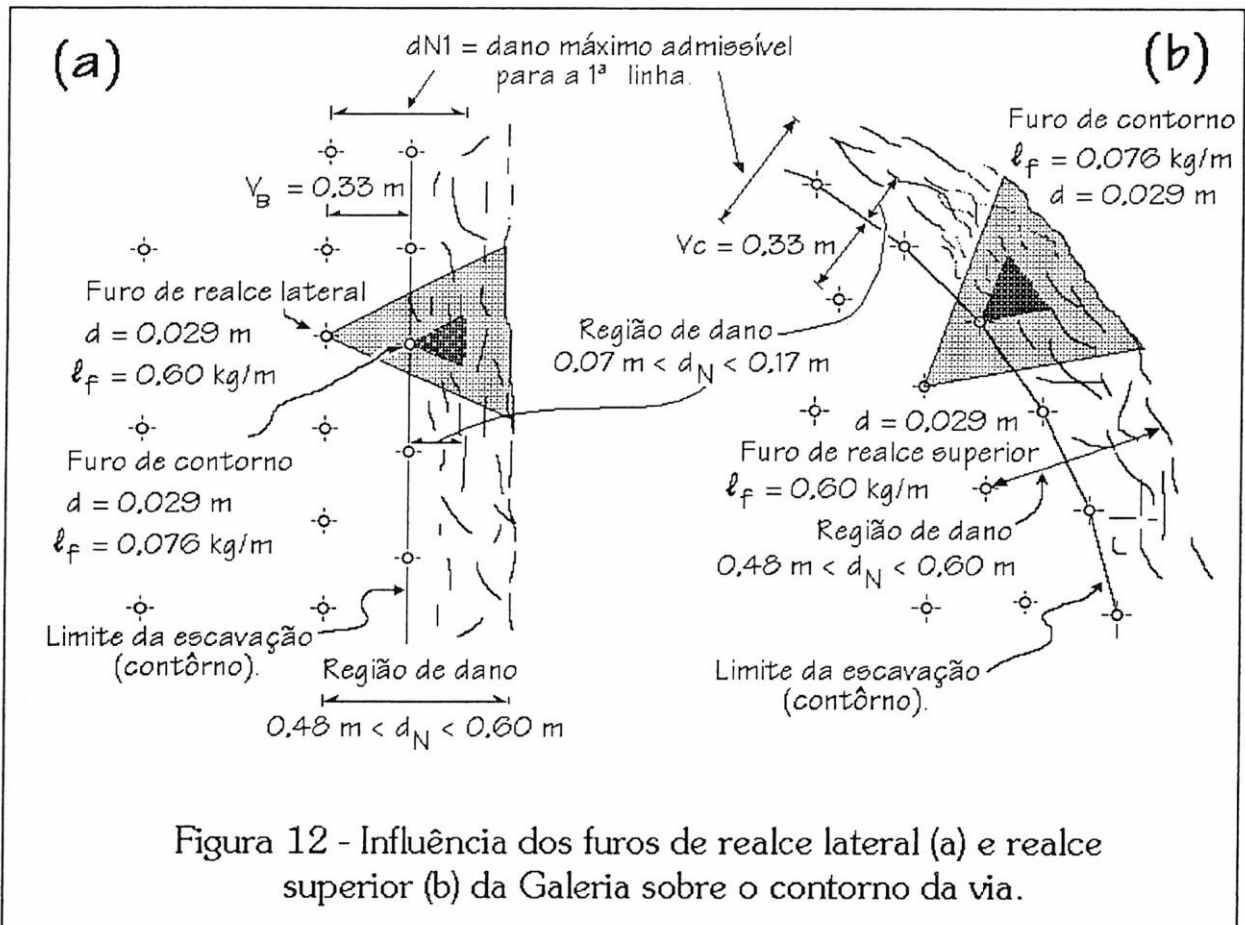
anteriores à de ordem n , cujos danos produzidos foram, a cada linha, menores que o dano máximo admitido naquela fase.

Assim, de [49]

$$d_{N1} \leq d_{ND} + V_D$$

$$d_{N1} \leq 0,17 + 0,33 \Rightarrow d_{N1} = 0,50 \text{ m (dano máximo).}$$

Portanto, não se pode usar a razão de carregamento $\ell_f = 0,60 \text{ kg/m}$ nestes furos sob pena de ultrapassar a região de dano máximo admissível dos furos de contorno.



A figura 12 (a) ilustra essa condição.

Fixada, portanto, a extensão do dano máximo, com o uso dos ábacos do anexo pode-se determinar que a razão de carregamento linear máxima a ser utilizada seja de:

$$\ell_f = 0,190 \text{ kg/m}$$

que produz um dano de extensão:

$$0,26 \text{ m} < d_{N1} < 0,50 \text{ m}$$

portanto compatível com a condição de dano máximo. Através das equações [27] e [28], pode-se calcular o valor do encargo a adotar-se para as linhas de realce lateral ou superior da galeria.

1ª linha

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{0,190 \cdot 1}{c \cdot 1,25 \cdot 1,45}}$$

$$V = 0,29 \sqrt{\frac{1}{c}}$$

que convergirá para o valor:

$$V = 0,40 \text{ m}$$

de [43]

$$V_{B1} = 0,40 - 0,05 = 0,35 \text{ m}$$

o espaçamento, segundo [44] será:

$$0,35 \text{ m} < E_B \leq 0,44 \text{ m}$$

Na altura do pilão serão, portanto, dispostos segundo [47] N_{BL1} furos dados por:

$$N_{BL1} = \text{INT}\left(\frac{1,44}{0,44} + 1\right) = 5 \text{ furos}$$

e o espaçamento prático, será:

$$E_{B1} = \frac{1,44}{4} = 0,36 \text{ m} \therefore \text{ dentro do intervalo de [44]}$$

$$E_{B1} = 0,36 \text{ m}$$

$$V_{B1} = 0,35 \text{ m}$$

Portando, o número de furos da 1ª linha do realce lateral dos dois lados da galeria terá um total de 10 furos com carga linear de 0,190 kg/m pelos seguintes cálculos:

$$N_{B1} = 2 \times 5 = 10 \text{ furos}$$

$$c / \ell_f = 0,190 \text{ kg/m}$$

2ª linha

O espaço disponível para posicionar as outras linhas verticais de furos de realce lateral na galeria é dada pela expressão:

$$L_{Bn} = L - L_{\text{Pilão}} - 2 \times V_D - 2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} V_{Bi} \text{ ou } V_{Ci} \quad [50]$$

onde:

L_{Bn} = espaço disponível para posicionar as linhas verticais de furos de realce laterais restantes.

L = largura da seção da via

V_D = encargo prático do furo de contorno (afastamento).

$L_{\text{Pilão}}$ = Largura do Pilão

$\sum_{i=0}^{n-1} V_{Bi}$ conforme definido para a equação [49]

n = Número de ordem da linha vertical de furos do realce lateral ou superior.

Portanto,

$$L_{B2} = 5,00 - 1,44 - 2 \times 0,33 - 2 \cdot 0,35 = 2,20 \text{ m}$$

O novo valor do dano máximo possível [49], será:

$$d_{N2} \leq d_{ND} + V_D + V_{B1}$$

$$\Rightarrow d_{N2} \leq 0,85 \text{ m (dano máximo).}$$

do abaco $\ell_f = 0,30 \text{ kg/m}$

que produz o dano $0,45 < d_{N2} \leq 0,85 \text{ m}$

portanto, o encargo máximo possível de [27] e [28] será:

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{0,30 \cdot 1}{c \cdot 1,25 \cdot 1,45}} = 0,37 \sqrt{\frac{1}{c}}$$

que convergirá para o valor:

$$V = 0,53 \text{ m}$$

$$\therefore V_{B2} = 0,53 - 0,05 = 0,48 \text{ m}$$

$$\ell_f = 0,30 \text{ kg/m}$$

$$V_{B2} = 0,48 \text{ m}$$

O número de furos de cada 2ª linha vertical é dada por:

$$N_{BL2} = \text{INT}\left(\frac{1,44}{0,60} + 1\right) = 4 \text{ furos}$$

e o seu número total será:

$$N_{B2} = 2 \times 4 = 8 \text{ furos}$$

finalmente o espaçamento prático, será:

$$E_{B2} = \frac{1,44}{3} = 0,48 \text{ m}$$

\therefore dentro do intervalo de [44]

$$0,48 \text{ m} \leq E_B \leq 0,60 \text{ m}$$

3ª linha

O espaço para posicionar a 3ª linha vertical de furos de realce lateral na galeria é dada pela expressão [50]

$$L_{B3} = 1,43 \text{ m}$$

e, se

$$V_{B3} = \frac{1,24}{2} = 0,62 \text{ m}$$

o dano máximo possível, de [49] será:

$$d_{N3} \leq d_{ND} + V_D + V_{B1} + V_{B2} = 1,33 \text{ m}$$

$$d_{N3} \leq 1,33 \text{ m}$$

No ábaco, para esse dano, tem-se:

$$\ell_f = 0,50 \text{ kg/m}$$

que dá $0,80 \text{ m} < d_{N3} < 1,30 \text{ m}$

calculando-se V_{B3} , por [27] e [28], tem-se:

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{0,50 \cdot 1}{c \cdot 1,25 \cdot 1,45}} = 0,47 \sqrt{\frac{1}{c}}$$

que convergirá para:

$$V = 0,71 \text{ m} \therefore$$

$$V_{B3} = 0,71 \text{ m} - 0,05 = 0,66 \text{ m}$$

V_{B3} calculado por [27] e [28], pode ser considerado praticamente igual a V_{B3} calculado pelo espaço disponível (ou se poderia diminuir de um mínimo o valor de ℓ_f , que diminuiria o dano)

Assim,

$$V_{B3} = 0,62 \text{ m}$$

$$0,62 < E_B \leq 0,78 \text{ m}$$

$$E_{B3} = 0,72 \text{ m}$$

Na altura, de [47]

$$N_{BL3} = \text{INT}\left(\frac{1,44}{0,78} + 1\right) = 3 \text{ furos}$$

e o espaçamento prático:

$$E_{B3} = \frac{1,44}{2} = 0,72 \text{ m}$$

dentro do intervalo de [44]

Assim, para a terceira linha vertical de furos do realce lateral da galeria tem-se:

$$N_{B3} = 2 \times N_{BL3} = 6 \text{ furos}$$

Assim, temos de cada lado, no realce lateral da região B na galeria os dados apresentados na tabela 2.

linha vertical	Nº de furos	Nº Total	lf kg/m	lc kg/m	d (m)	hf (m)	hc (m)	V _B (m)	E _B (m)	Qtde p/ furo	expl. Total
1a	5	10	0,19	0,10	0,029	0,44	2,49	0,35	0,36	0,33	3,33
2a	4	8	0,30	0,15	0,029	0,60	2,33	0,48	0,48	0,53	4,24
3a	3	6	0,50	0,25	0,029	0,78	2,15	0,62	0,72	0,72	5,57
Total		24									13,11

Tabela 3 - Resumo dos furos de realce lateral da galeria.

Furos de realce lateral (Rampa):

Espaço disponível horizontal para furos de realce B, de [46]

$$L_{BH} = \text{Largura} - 2 \times V_{\text{contorno}} - L_{\text{Pilão}}$$

$$L_{BH} = 6,00 - 2 \times 0,64 - 1,44 \quad \therefore \quad L_{BH} = 3,28 \text{ m}$$

Número de colunas laterais ao pilão, possíveis, de [45],

$$N_{BC} = \text{INT} \left[\frac{L_{BH}}{V_B} \right]$$

$$N_{BC45} = 3$$

$$N_{BC29} = 5 \quad \Rightarrow \quad \frac{3,28}{5} \Rightarrow V_B = 0,66 \text{ m}$$

$$N_{BC} = 5 \quad \therefore \quad 0,66 \text{ m} < E_B \leq 0,82 \text{ m}$$

Na altura do pilão (1,44 m), analogamente à galeria, podem ser posicionadas 3 linhas

$$N_{BL} = \text{INT} \left[\frac{L_{\text{Pilão}}}{E_B} + 1 \right] = \left[\frac{1,44}{0,73} + 1 \right] = 3$$

$$N_{BL} = 3$$

Número de furos da região B para a rampa, de [48]

$$N_{BR} = N_{BC} \times N_{BL} = 5 \times 3 \quad N_{BR} = 15$$

Assim, tem-se, 3 colunas de um lado do pilão com 9 furos e 2 colunas do outro com 6 furos.

Observação: Não tendo a rampa desmonte cuidadoso nas paredes, não há que verificar danos do realce lateral

7.2. CONSUMO DE EXPLOSIVO NOS FUROS DE REALCE LATERAL (GALERIA E RAMPA).
Para a Galeria os cálculos foram feitos acima e estão na tabela 3,

$$Q_{BG} = 13,11 \text{ kg}$$

Portanto o explosivo para realce lateral da Galeria:

Para realce lateral da Rampa tem-se:

a razão de carregamento

carga de fundo $\ell_f = 0,595 \text{ kg/m}$

carga de coluna $\ell_c = 0,50 \ell_f = 0,298 \text{ kg/m}$

comprimentos:

da carga de fundo $h_f = 1,25 \times 0,66 = 0,83 \text{ m}$

da carga de coluna $h_c = 2,10 \text{ m}$

do tampão $t = 0,29 \text{ m}$

$$m = \ell_f \times h_f + \ell_c \times h_c = 0,60 \times 0,83 + 0,30 \times 2,10 = 1,13 \text{ kg/furo}$$

$$m = 1,13 \text{ kg/m}$$

para a Rampa

$$Q_{BR} = 15 \times 1,13 = 16,92 \text{ kg}$$

$$Q_{BR} = 16,92 \text{ kg}$$

Explosivo para realce lateral da rampa, tem-se:

8. Região C - FUROS DE REALCE SUPERIOR

Para o cálculo da posição dos furos do realce superior C, devem ser consideradas as seções transversais tipo, conforme figura 13 a seguir.

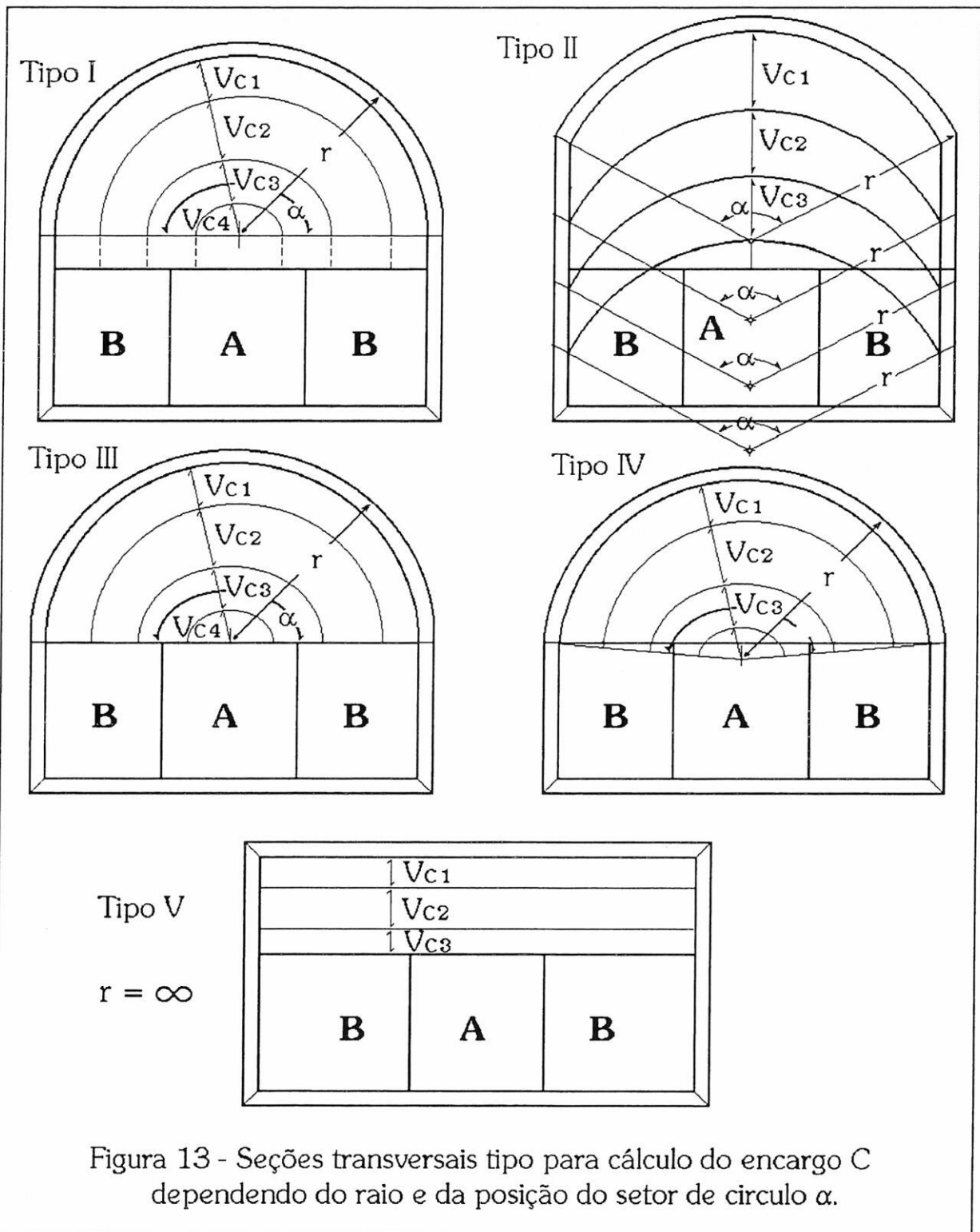


Figura 13 - Seções transversais tipo para cálculo do encargo C dependendo do raio e da posição do setor de círculo α .

A seção transversal da abertura subterrânea deve pertencer a um dos cinco tipos básicos da ilustração. No caso proposto, a galeria pertence ao tipo I enquanto a rampa pertence ao tipo V.

Conhecidos o raio r e o valor do arco α que definem a região C, calcula-se o encargo V_{C1} , o espaçamento E_{C1} , e a extensão da linha L_{C1} . O encargo V_{C1} definirá a posição da linha L_{C1} , e com sua extensão determinada, serão calculados os pontos dos furos através das expressões fornecidas abaixo. Vai-se então, linha após linha, do índice 1 ao índice n , até que o número de furos numa linha seja igual ou superior a 4.

V_C é calculado pelas equações [27] e [28], conforme observação 4, com fator de fixação 1,2 e a relação E/V no intervalo entre 1 e 1,25.

As expressões de cálculo generalizadas são as seguintes:

$$V_{Cn} = V - F \quad [51]$$

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{\ell \cdot S_{ANFO}}{c \cdot 1,2 \cdot 1,25}} \text{ (m)} \quad [52]$$

$$V_{Cn} < E_{Cn} \leq 1,25 V_{Cn} \quad [53]$$

O número de furos em cada linha (n) é dado pela expressão:

$$N_{Cn} = \text{INT} \left[\frac{L_{Cn}}{E_{Cn}} + 1 - K \right] \quad [54]$$

onde $K = 2$, quando a linha de ordem n intercepta a linha que separa os realces laterais (e pilão) do realce superior.

$K = 0$, quando a linha de ordem n intercepta linhas de contorno (como algumas linhas das seções tipo II e V).

Espaçamento (prático) dado por

$$E_{Cn} = \frac{L_{Cn}}{N_{Cn} + K - 1} \quad [55]$$

8.1. FUROS DE REALCE SUPERIOR (GALERIA).

para $d = 0,029$ mm

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{0,595 \cdot 1}{c \cdot 1,20 \cdot 1,25}} \quad \therefore \quad V = 0,57 \sqrt{\frac{1}{c}}$$

para $d = 0,045$ mm

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{1,430 \cdot 1}{c \cdot 1,20 \cdot 1,25}} \quad \therefore \quad V = 0,88 \sqrt{\frac{1}{c}}$$

Que, iterativamente, estabilizarão respectivamente em:

$$V_{29} = 0,87 \text{ m}$$

$$V_{45} = 1,39 \text{ m}$$

Portanto $V_{C29} = 0,82 \text{ m}$, ou,

$$V_{C45} = 1,34 \text{ m}$$

Cálculo do número de linhas:

Sua determinação deve ser uma combinação dos encargos práticos possíveis, em função dos diâmetros disponíveis.

Tem-se uma altura disponível de

$$H_{CG} = H_T - V_L - B_4 - V_D \text{ (m)} \quad [56]$$

$$H_{CG} = 5,00 - 0,66 - 1,44 - 0,33 = 2,57 \text{ m}$$

$H_{CG} = 2,57 \text{ m}$

Verificação de danos

Como a Galeria tem desmonte cuidadoso no contorno a fixação da primeira linha L_{C1} , após o contorno, será definida em função do encargo que produza o menor dano, conforme detalhado no item 10, e já calculado no realce lateral.

Com o uso dos ábacos do anexo chega-se aos valores conforme apresentado na figura 12 (b).

Portanto a razão de carregamento linear dos furos da 1ª linha após o contorno devem ser reduzidos à uma distância de dano, conforme [49].

$$d_{NI} < d_{ND} + V_D \quad V_D = 0,33 \text{ m (encargo do furo de contorno).}$$

$$d_{NI} \leq 0,33 + 0,17$$

$$d_{NI} < 0,50 \text{ m}$$

Do ábaco, obtém-se que:

$$\ell_f \text{ deve ser } 0,190 \text{ kg/m, produzindo um dano de extensão } 0,26 \text{ m} < d_{NI} < 0,50 \text{ m.}$$

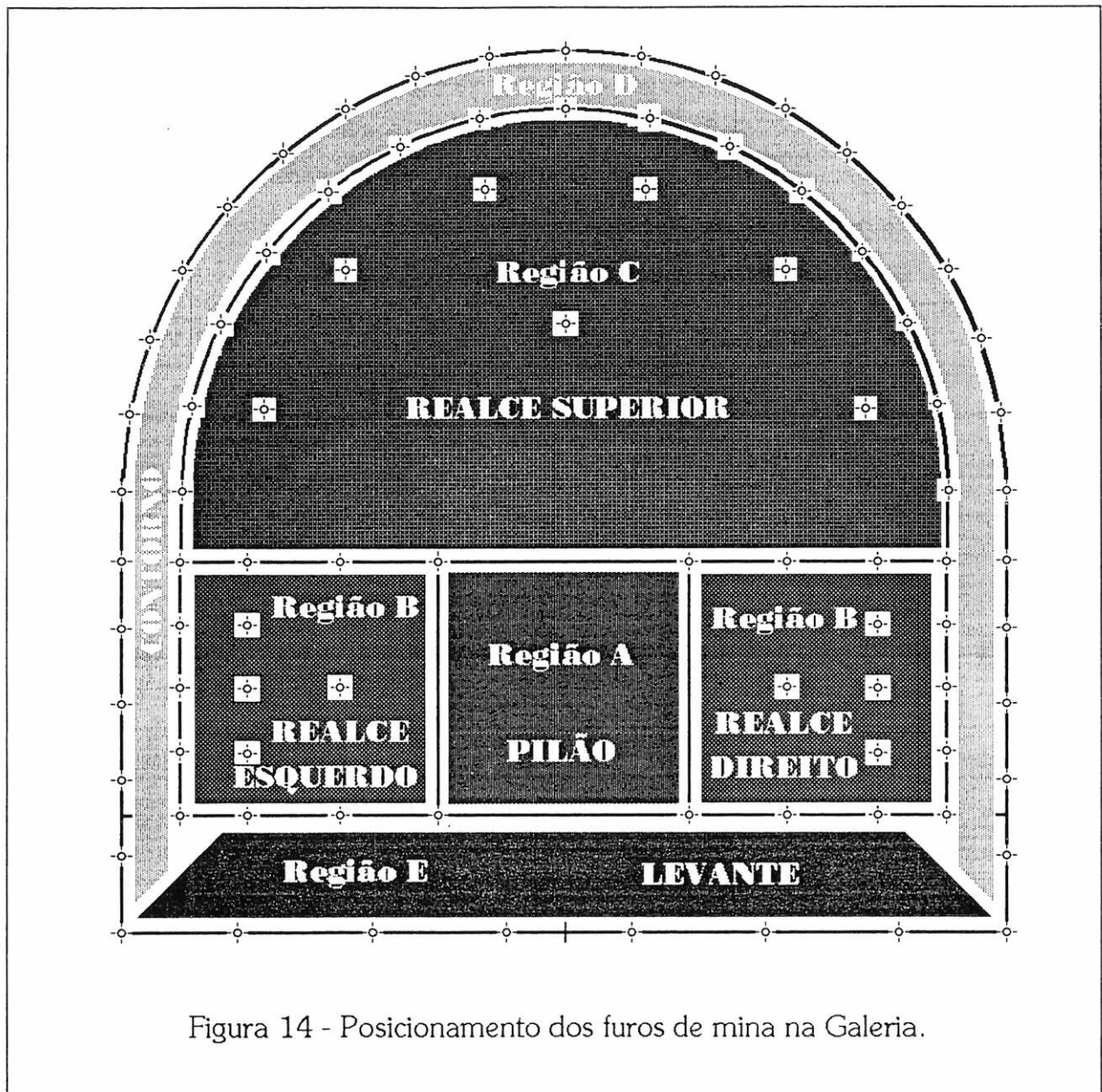
Pode-se agora calcular qual deve ser o valor do encargo V_C a adotar-se para essa linha, de [52] e [53]:

$$V = 0,9 \sqrt{\frac{0,190 \cdot 1}{c \cdot 1,20 \cdot 1,25}}$$

$$V = 0,32 \sqrt{\frac{1}{c}} \Rightarrow V = 0,45 \text{ m}$$

de [51]

$$V_{C1} = V - F = 0,45 - 0,05 = 0,40 \text{ m}$$



$$V_{C1} = 0,40 \text{ m}$$

Definido $V_{C1} = 0,40$

$$0,40 \text{ m} < E_{C1} < 0,50 \text{ m}$$

$$r_1 = 2,57 - 0,40 = 2,17 \text{ m}$$

$$L_{C1} = \pi \cdot r_1 + 0,80 \quad \therefore \quad L_{C1} = 7,62 \text{ m}$$

O número de furos desta primeira linha é dado por [54]

$$N_{C1} = \text{INT} \left[\frac{L_{C1}}{E_c} + 1 - K \right]$$

Neste caso, $K = 2$

$$N_{C1} = \text{INT} \left[\frac{7,62}{0,50} + 1 - 2 \right]$$

$$N_{C1} = 15$$

$$\ell_f = 0,190 \text{ kg/m}$$

E o encargo prático, de [55]

$$E_{C1} = \frac{7,62}{16} = 0,48 \text{ m}$$

dentro do intervalo exigido.

Para a segunda linha L_{C2} , após o contorno, tem-se:

$$r_2 = 2,17 - 0,40 = 1,77 \text{ m}$$

$$L_{C2} = 1,77 \cdot \pi + 2 \times 0,40 = 6,36 \text{ m}$$

$$p/d = 0,029 \quad V_{C2} = 0,82 \quad \Rightarrow 0,82 \text{ m} < E_c < 1,03 \text{ m}$$

$$p/d = 0,045 \quad V_{C2} = 1,34 \quad \Rightarrow 1,34 \text{ m} < E_c < 1,68 \text{ m}$$

$$N_{C2} = \text{INT} \left[\frac{6,36}{1,03} + 1 - 2 \right]$$

$$N_{C2} = 6 \text{ furos}$$

ou,

$$N_{C2} = \text{INT} \left[\frac{6,36}{1,68} + 1 - 2 \right]$$

$$N_{C2} = 3 \text{ furos}$$

há necessidade de verificar-se o dano produzido à distância, de [49]:

$$d_{N2} \leq 0,17 + 0,33 + 0,40 = 0,90 \text{ m}$$

para

$$\ell_f = 1,430 \text{ kg/m} \Rightarrow d = 0,045 \text{ m}$$

$$1,70 \text{ m} > d_{N2} > 0,90 \text{ m} \quad \therefore \text{excessivo}$$

Portanto, o dano será maior que o admissível e adota-se o $d = 0,029 \text{ m}$ que produz dano de $0,48 \text{ m} < d_{N2} < 0,60 \text{ m}$

Tendo-se assim,

$$V_{C2} = 0,82 \text{ m}$$

$$\text{e o espaçamento prático de [55]} \quad E_{C2} = \frac{6,36}{6+2-1} = 0,91 \text{ m}$$

$$\ell_f = 0,596 \cong 0,60 \text{ kg/m}$$

O cálculo da terceira linha L_{C3} , será:

$$r_3 = 1,77 - 0,82 = 0,95 \text{ m}$$

$$L_{C3} = 0,95 \cdot \pi + 2 \times 0,40 = 3,78 \text{ m}$$

e como já visto acima,

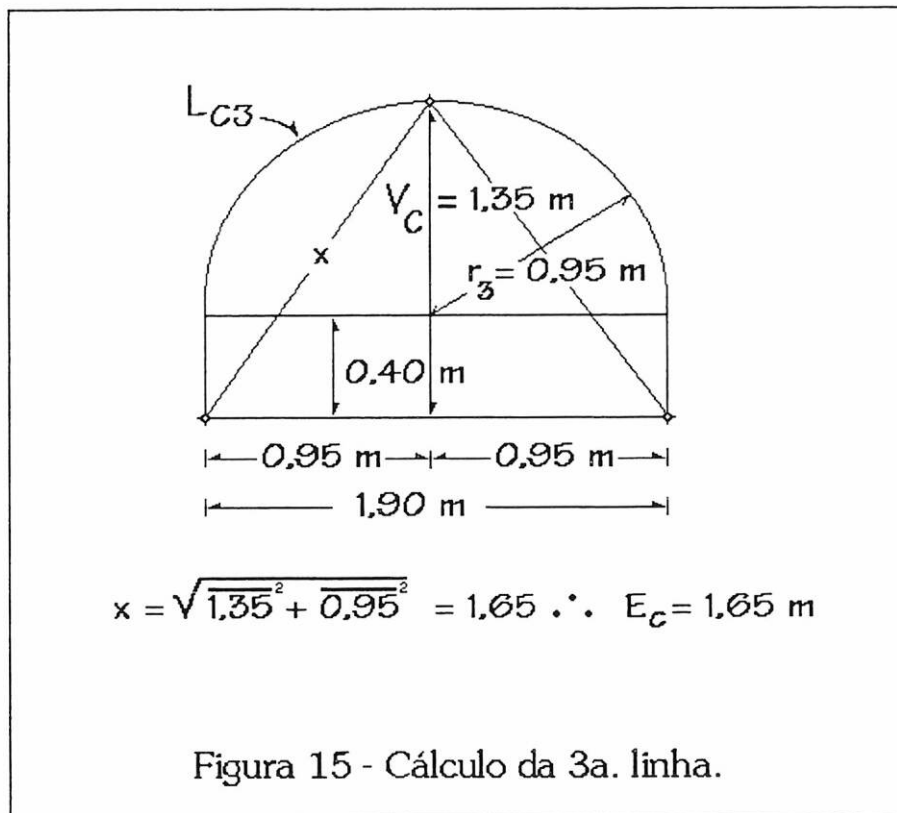
$$p/d = 0,029 \quad V_C = 0,82 \quad \Rightarrow 0,82 \text{ m} < E_{C3} < 1,03 \text{ m}$$

$$p/d = 0,045 \quad V_C = 1,34 \quad \Rightarrow 1,34 \text{ m} < E_{C3} < 1,68 \text{ m}$$

Ao considerar-se a interseção de L_{C3} com a vertical que passa pelo centro da figura 14, ter-se-á a altura h de:

$$h = r_3 + 0,40 = 0,95 + 0,40 = 1,35 \text{ m}$$

que praticamente coincide com V_C para $d = 0,045 \text{ m}$.



Em virtude do pequeno raio de L_{C3} , o espaçamento a considerar será dos lados do triângulo constituído pelo ponto de interseção anterior, com os pontos de interseção de L_{C3} com a linha limite entre as regiões A/B e C.

Assim, calculando-se o triângulo, essas distâncias serão: $E_C = 1,65 \text{ m}$, portanto, perfeitamente de acordo com a condição: $1,34 \text{ m} < E_{C3} < 1,68 \text{ m}$.

Haverá, portanto apenas mais um furo com:

$d = 0,045 \text{ m}$
$V_{C3} = 1,35 \text{ m}$
$E_{C3} = 1,65 \text{ m}$

8.2 CONSUMO DE EXPLOSIVO PARA REALCE SUPERIOR GALERIA

Primeira linha de furos L_{C1}

$$t_{C1} = 10 \cdot d = 10 \cdot 0,029 \text{ m} = 0,29 \text{ m}$$

$$N_{C1} = 15 \text{ furos}$$

$$\ell_{fC1} = 0,190 \text{ kg/m}$$

$$\ell_{cC1} = 0,5 \times 0,190 \text{ kg/m} = 0,095 \text{ kg/m}$$

$$h_{fC1} = 1,25 V_{C1} = 1,25 \cdot 0,40 = 0,50 \text{ m}$$

$$h_{fC1} = 0,50 \text{ m}$$

$$h_{cC1} = H - h_{fC1} - t = 3,22 - 0,50 - 0,29 = 2,43 \text{ m}$$

$$h_{cC1} = 2,43 \text{ m}$$

$$Q_{fC1} = N_{C1} \cdot \ell_{fC1} \cdot h_{fC1} = 15 \times 0,190 \times 0,50 = 1,43 \text{ kg}$$

$$Q_{cC1} = N_{C1} \cdot \ell_{cC1} \cdot h_{cC1} = 15 \times 0,095 \times 2,43 = 3,46 \text{ kg}$$

O total de explosivos da primeira linha na Galeria será:

$$Q_{C1} = Q_{fC1} + Q_{cC1} = 4,89 \text{ kg}$$

$$Q_{C1} = 4,89 \text{ kg}$$

Segunda linha de furos L_{C2}

$$t_{C2} = 10 \cdot d = 10 \cdot 0,029 \text{ m} = 0,29 \text{ m}$$

$$N_{C2} = 6 \text{ furos}$$

$$\ell_{fC2} = 0,595 \text{ kg/m}$$

$$\ell_{cC2} = 0,5 \times 0,595 \text{ kg/m} = 0,298 \text{ kg/m}$$

$$h_{fC2} = 1,25 V_{C2} = 1,25 \cdot 0,82 = 1,03 \text{ m}$$

$$h_{fC2} = 1,03 \text{ m}$$

$$h_{cC2} = H - h_{fC2} - t = 3,22 - 1,03 - 0,29 = 1,90 \text{ m}$$

$$h_{cC2} = 1,90 \text{ m}$$

$$Q_{fC2} = N_{C2} \cdot \ell_{fC2} \cdot h_{fC2} = 6 \times 0,595 \times 1,03 = 3,68 \text{ kg}$$

$$Q_{cC2} = N_{C2} \cdot \ell_{cC2} \cdot h_{cC2} = 6 \times 0,298 \times 1,90 = 3,40 \text{ kg}$$

O total de explosivos da segunda linha na Galeria será:

$$Q_{C2} = Q_{fC2} + Q_{cC2} = 7,08 \text{ kg}$$

$$Q_{C2} = 7,08 \text{ kg}$$

Terceira linha de furos L_{C3}

A terceira linha só contém um furo, portanto:

$$t_{C3} = 10 \cdot d = 10 \cdot 0,029 \text{ m} = 0,29 \text{ m}$$

$$N_{C3} = 1 \text{ furo}$$

$$\ell_{fC3} = 1,430 \text{ kg/m}$$

$$\ell_{cC3} = 0,5 \times \ell_{fC3} = 0,72 \text{ kg/m}$$

$$h_{fC3} = 1,25 V_{C3} = 1,25 \cdot 1,34 = 1,68 \text{ m}$$

$$h_{fC3} = 1,68 \text{ m}$$

$$h_{cC3} = H - h_{fC3} - t = 3,22 - 1,68 - 0,45 = 1,09 \text{ m}$$

$$h_{cC3} = 1,09 \text{ m}$$

$$Q_{fC3} = N_{C3} \cdot \ell_{fC3} \cdot h_{fC3} = 1 \times 1,430 \times 1,68 = 2,40 \text{ kg}$$

$$Q_{cC3} = N_{C3} \cdot \ell_{cC3} \cdot h_{cC3} = 1 \times 0,72 \times 1,09 = 0,78 \text{ kg}$$

O total de explosivos da terceira linha na Galeria será:

$$Q_{C3} = Q_{fC3} + Q_{cC3} = 3,18 \text{ kg}$$

$$Q_{C3} = 3,18 \text{ kg}$$

O total de explosivos do realce C da Galeria é dado por:

$$Q_{CG} = Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3} = 4,89 + 7,08 + 3,18 = 15,15 \text{ kg}$$

$$Q_{CG} = 15,15 \text{ kg}$$

8.3. FUROS DE REALCE SUPERIOR (RAMPA)

Havendo desmonte cuidadoso no teto, a primeira linha após o contorno deve ser verificada para garantir o mesmo nível de dano.

Altura disponível em C:

$$H_{CR} = H_{Rampa} - H_{Pilão} - V_D - V_E$$

$$H_{CR} = 3,00 - 1,44 - 0,33 - 0,66 = 0,57 \text{ m}$$

$$H_{CR} = 0,57 \text{ m}$$

$$d_N \leq 0,17 + 0,33 = 0,50 \text{ m}$$

obtem-se:

$$\ell_f = 0,190 \text{ kg/m}$$

chega-se a

$$\left\{ \begin{array}{l} V_C = 0,40 \\ 0,40 \text{ m} < E_C \leq 0,50 \text{ m} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{não satisfatórios,}$$

pois o espaço vertical disponível é de 0,57 m, portanto, adotando-se:

$$V_C = \frac{H_{CR}}{2} = 0,29 \text{ m}$$

$$V = V_C + F = 0,29 \text{ m}$$

$$\therefore V = 0,29 + 0,05 = 0,35 \text{ m} \Rightarrow \ell_f = 0,110 \text{ kg/m para } d_N < 0,50 \text{ m}$$

Assim,

$$V_C = 0,29 \text{ m}$$

$$0,29 \text{ m} < E < 0,36 \text{ m}$$

$$\ell_f = 0,110 \text{ kg/m}$$

$$\ell_c = 0,5 \ell_f = 0,055 \text{ kg/m}$$

o número de furos é dado por:

$$L_{CR} = L_R - 2 \times 0,64 \text{ m} \therefore L_{CR} = 6 - 1,28 = 4,72 \text{ m}$$

$$N_{C1} = N_{C2} = \text{INT} \left[\frac{4,72}{E_{C1}} + 1 \right] = 15 \text{ furos}$$

$$N_{C1} = N_{C2} = 15 \text{ furos}$$

O espaçamento prático, será:

$$E_{C1} = E_{C2} = \frac{4,72}{N_{C1} - 1} = 0,34 \text{ m}$$

que satisfaz o intervalo definido.

8.4 CONSUMO DE EXPLOSIVO PARA REALCE SUPERIOR (RAMPA)

Os índices de carregamento lineares são iguais para as duas linhas, e temos:

$$\ell_f = 0,110 \text{ kg/m}$$

$$\ell_c = 0,5 \times 0,110 \text{ kg/m} = 0,060 \text{ kg/m}$$

$$h_f = 1,25 V_{C1} = 1,25 V_{C2} = 1,25 \times 0,29$$

$$h_f = 0,36 \text{ m}$$

$$h_c = 3,22 - 0,36 - 0,29 = 2,57 \text{ m}$$

$$h_c = 2,57 \text{ m}$$

$$m = h_f \cdot \ell_f + h_c \cdot \ell_c$$

$$m = 0,36 \cdot 0,110 + 2,57 \cdot 0,060 = 0,190 \text{ kg/m}$$

o consumo de explosivo para realce superior da rampa será:

$$Q_{CR} = m \cdot N_{CR} = 0,190 \times 30 = 5,69 \text{ kg}$$

$$Q_{CR} = 5,69 \text{ kg}$$

8.5. RESUMO DOS DADOS IMPORTANTES DA GALERIA.

Furo N°	Tipo de furo	Profundidade	N° de furos	Metros perfurados	Carga de fundo		Carga de coluna		Carga total kg
					kg	kg/m	kg	kg/m	
1-4	Pilão	3,22	4	12,88			6,97	0,595	6,97
5-8	Pilão	3,22	4	12,88			6,97	0,595	6,97
9-12	Pilão	3,22	4	12,88			16,76	1,430	16,76
13-16	Pilão	3,22	4	12,88			16,76	1,430	16,76
17-24	Levante	3,22	8	25,76	4,00	0,595	7,04	0,426	11,04
25-53	Contorno	3,22	29	93,38			7,25	0,076	7,25
54-63	Realce lateral linha1/6	3,22	2x5	32,20	0,84	0,190	2,49	0,100	3,33
64-71	Realce lateral linha2/5	3,22	2x4	25,76	1,44	0,130	2,80	0,150	4,24
72-77	Realce lateral linha3/4	3,22	2x3	19,32	2,34	0,500	3,23	0,250	5,57
78-92	Realce Superior 1ª linha	3,22	15	48,30	1,43	0,190	3,46	0,095	4,89
93-98	Realce Superior 2ª linha	3,22	6	19,32	3,68	0,595	3,40	0,298	7,08
99	Realce Superior 3ª linha	3,22	1	3,22	2,40	1,430	0,78	0,715	3,18
Total			99+1	322					94,05

RESULTADOS MAIS IMPORTANTES DA GALERIA:
 1.- Metros perfurados por metro cúbico "In situ": 4,71
 2.- Kg de explosivo por metro cúbico "In situ": 1,38
 3.- O consumo de explosivo será de 30,74 kg e a perfuração de 105 metros por metro de avanço da galeria com 22.33 m² de seção transversal.

Tabela 4 - Resumo dos resultados de cálculo da Galeria.

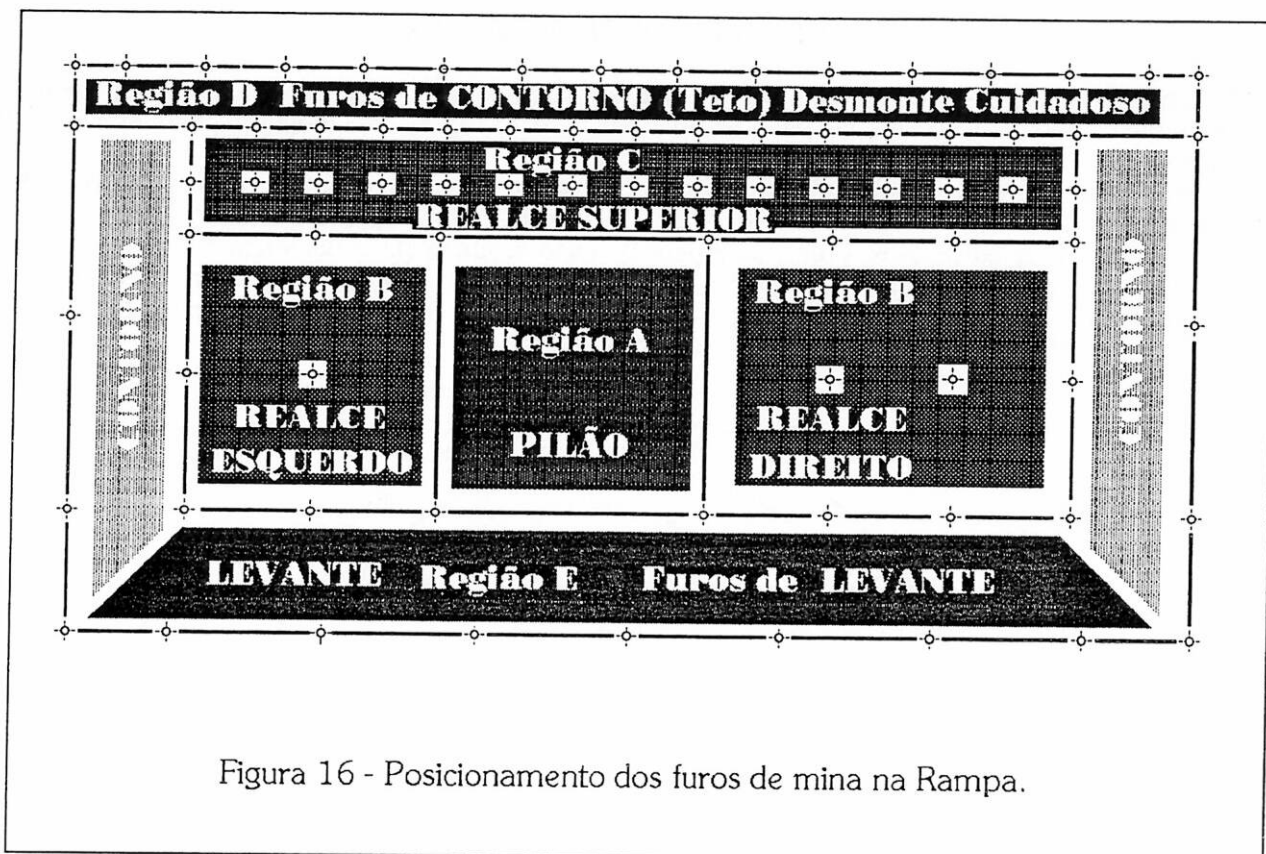


Figura 16 - Posicionamento dos furos de mina na Rampa.

8.6. RESUMO DOS DADOS IMPORTANTES DA RAMPA

Furo N°	Tipo de furo	Profundidade	N° de furos	Metros perfurados	Carga de fundo		Carga de coluna		Carga total kg
					kg	kg/m	kg	kg/m	
1-4	Pilão	3,22	4	12,88			6,97	0,595	6,97
5-8	Pilão	3,22	4	12,88			6,97	0,595	6,97
9-12	Pilão	3,22	4	12,88			16,76	1,430	16,76
13-16	Pilão	3,22	4	12,88			16,76	1,430	16,76
17-25	Levante	3,22	9	28,98	4,48	0,595	7,92	0,426	12,40
26-41	Contorno teto	3,22	16	51,52			7,25	0,076	4,00
42-47	Contorno parede	3,22	6	19,32	2,88	0,595	3,83	0,298	6,71
48-62	realce lateral	3,22	15	48,30	7,47	0,595	9,45	0,298	16,92
63-92	realce superior 2 linhas	3,22	30	96,60	1,19	0,110	4,63	0,060	5,69
Total			92+1	299,46	Total				93,18

RESULTADOS MAIS IMPORTANTES DA RAMPA:

- 1.- Metros perfurados por metro cúbico "In situ": 5,44
- 2.- Kg de explosivo por metro cúbico "In situ": 1,69
- 3.- O consumo de explosivo 30,45 kg e perfuração de 98 metros por metro de avanço da rampa com 18 m² de seção transversal.

Tabela 5 - Resumo dos resultados de cálculo da Rampa.

9. SEQUÊNCIA DE DETONAÇÃO

Como a seqüência de detonação nas vias subterrâneas, tem o objetivo de seqüencialmente ir expandindo os furos iniciais, no pilão a salva dos furos de mina está indicada pelos números das esperas.

Nos dois primeiros quadriláteros tem-se espoletas com espera de milisegundos (MS) onde a espoleta 4 é de 100 ms., assim um intervalo de 25 ms entre cada número seguinte de espera.

Nos 3º e 4º quadriláteros, utiliza-se espera de meio segundo (HS), havendo entre cada número seqüencial de espera um intervalo de 0,5 s, que corresponde a espoleta nº 1. A figura 2 mostra estes números para o caso do detalhe do pilão, enquanto a figura 16 nos dá um desenho dos furos da galeria e da rampa com a salva de detonação recomendada.

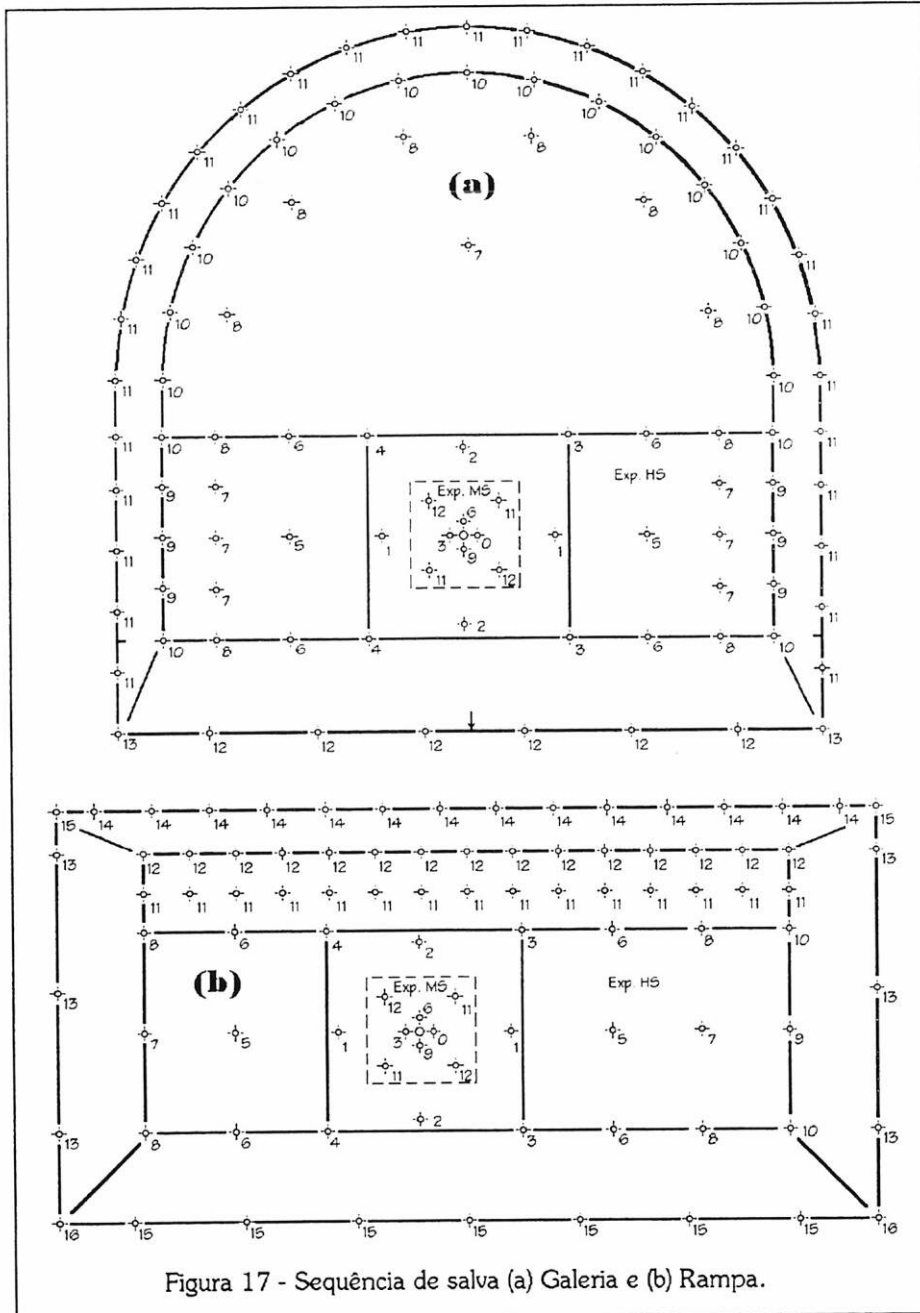


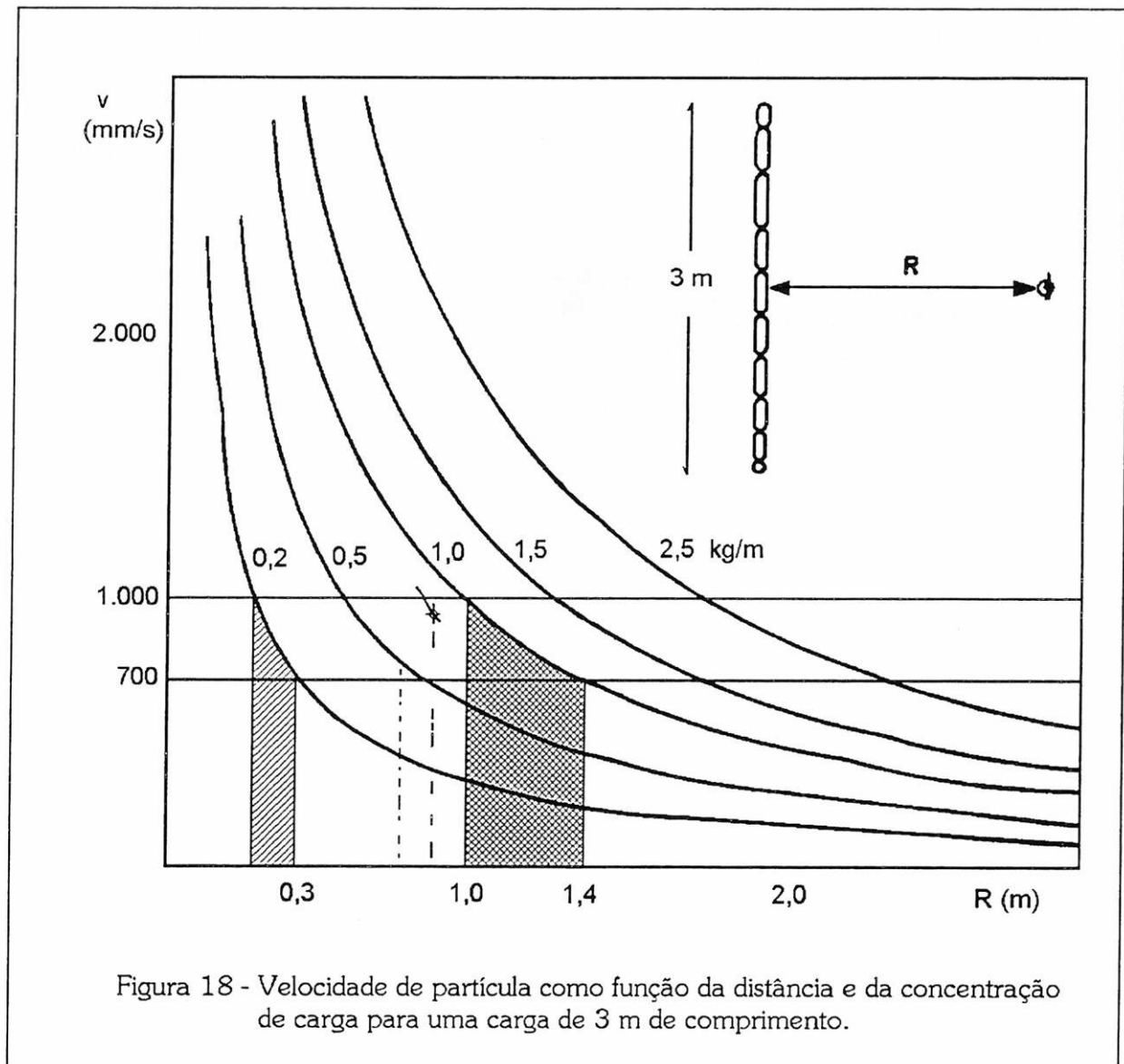
Figura 17 - Seqüência de salva (a) Galeria e (b) Rampa.

10. DANOS DA ROCHA

A súbita expansão causada por uma explosão em um furo de mina gera uma onda de tensão que se propaga no maciço rochoso. Para um material elástico a tensão induzida é diretamente proporcional à sua densidade, velocidade de partícula e velocidade de propagação da onda.

Junto à carga a tensão atingirá tal magnitude que são produzidos danos permanentes. O quanto tais danos terão influência significativa na capacidade de auto-suporte para um túnel depende antes do carácter dos prejuízos causados, do tempo de exposição, da influência da água do subsolo e da orientação dos planos de juntas com relação ao contorno e cargas estáticas.

Por um longo tempo, o critério de risco para estruturas construídas nas vizinhanças de uma frente de desmonte foram baseadas na velocidade de partícula. Segundo o SveDeFo (Fundação Sueca de Pesquisas de Detônica) o mesmo critério tem se revelado útil para aplicações na estimativa de danos na rocha remanescente de um desmonte (Persson, Holmberg e Persson, 1977; Holmberg e Person 1978; Holmberg, 1978).



A equação empírica utilizada é a seguinte:

$$v = \frac{700 Q^{0,7}}{R^{1,5}} \quad [51]$$

onde:

v = velocidade de partícula (mm/s)

Q = carga em peso (Kg)

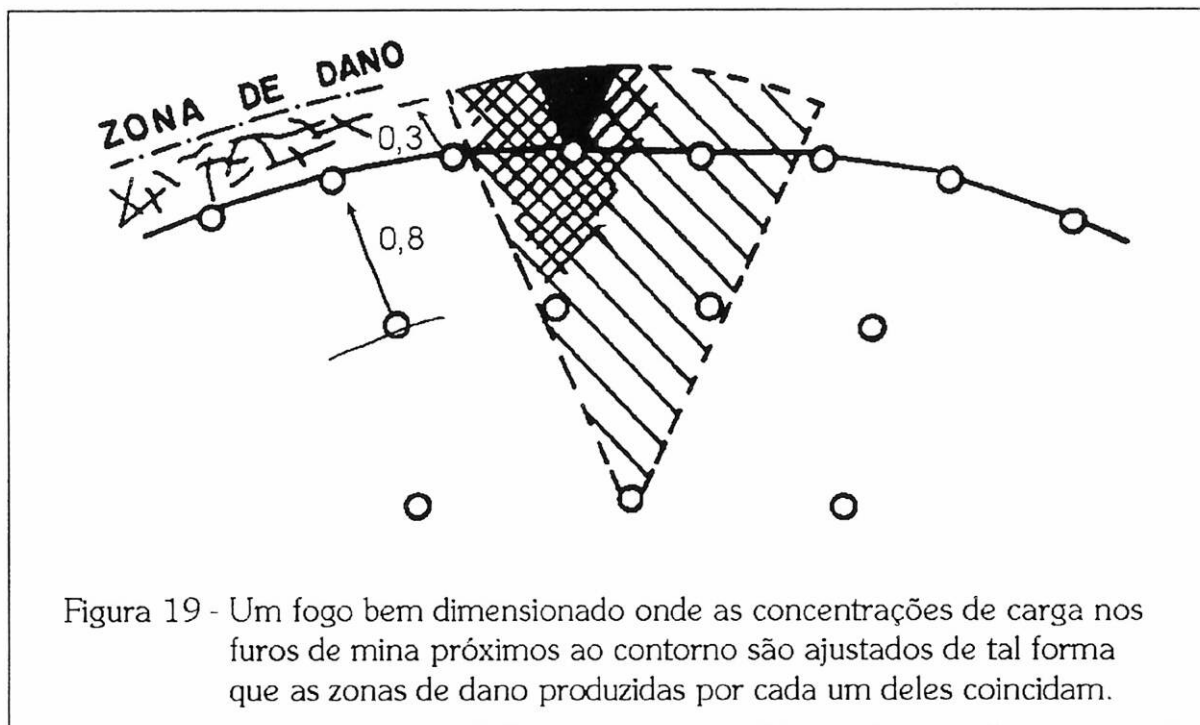
R = distância (m)

A expressão é válida para calcular a velocidade de partícula a distâncias tais que a carga pode ser tratada como sendo esférica. Para pequenas distâncias a discrepância verificada entre valores observados e calculados é inaceitável.

Procedendo-se, contudo, a uma integração de todo o comprimento da carga, foi possível obter-se a velocidade de partícula como uma função da distância, comprimento da carga por metro de furo de mina. Na figura 18 é dado o cálculo para uma carga de 3,00 metros de comprimento.

Quando a velocidade de partícula atinge um valor entre 700 e 1000 mm/s (fig. 19), são induzidas ou alargadas trincas em um maciço rochoso de granito. A concentração de 1 Kg/m significa que o dano ocorre numa zona de raio 1,0 a 1,4 m no entorno da carga.

No anexo são apresentados ábacos com distâncias de danos para cargas em coluna com comprimento desde 2,0 a 4,5 m, com razões de carregamento variando de 0,04 kg/m até 0,24 kg/m e em outro grupo desde 0,50 até 3,0 kg/m (Estes ábacos foram produzidos pelo Eng. de Minas Eduardo Cesar Sansone - Pesquisador do Laboratório de Mecânica de Rochas do PMI da EPUSP).



Em ensaios de campo sobre gnaiss, pegmatito e granito (resistência à tração de 5 a 15 MPa), foi encontrada uma boa coerência entre valores calculados e medidos.

Relatos sobre zonas de danos também tem verificado consistência nas distâncias calculadas para cargas similares se for utilizado o critério de velocidade de partícula entre 700 e 1000 mm/s. Isto é válido para concentrações de carga variando entre 0,2 e 75 Kg/m.

Nos ensaios de campo têm sido utilizados acelerômetros juntamente com fitas FM e gravadores. As velocidades de partícula tem sido obtidas por integração numérica.

As menores distâncias entre as cargas localizadas em furos de 25 a 250 mm e os acelerômetros têm sido da ordem de 1,5 a 13 m.

Medidas próximas ao contorno do túnel têm indicado que cargas na fileira anterior freqüentemente causam velocidades de partícula mais altas e maior dano do que a fileira de desmonte cuidadoso. Quando o resultado de um desmonte cuidadoso não deve ser prejudicado pelo restante dos furos de mina, é uma boa providência reduzir a concentração de carga da fileira anterior à do contorno. A figura 18 fornece um guia para estimar a concentração de carga. Uma concentração de 0,2 Kg/m no contorno resulta numa zona de dano de 0,3 m. Quando o afastamento for 0,8 pode-se ver que a concentração de carga para a fileira interna deve ser limitada em cerca de 1 Kg/m para que a zona de dano de 0,3 m não seja ultrapassada.

10.- CONSIDERAÇÕES FINAIS E AGRADECIMENTO

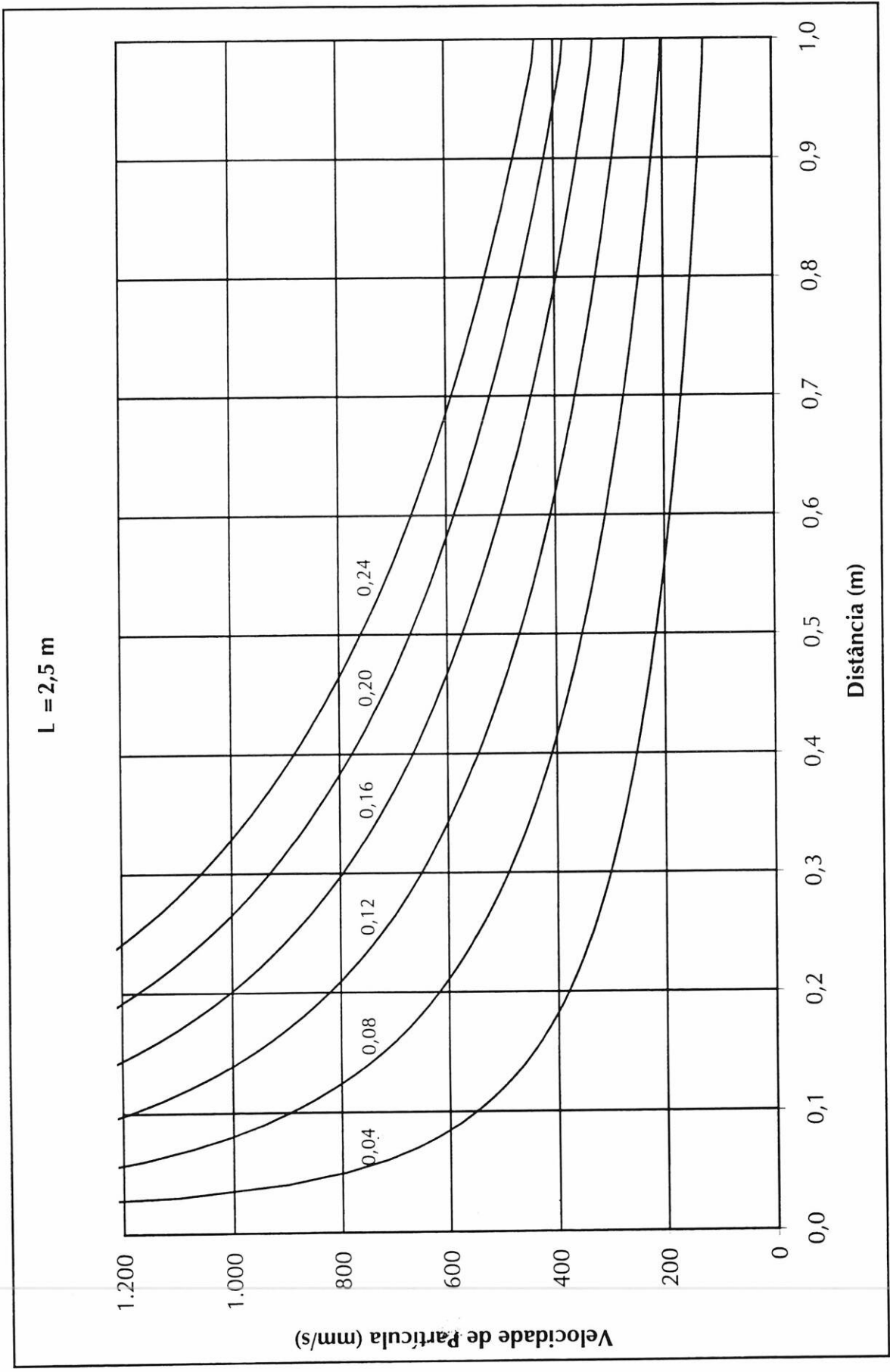
A presente obra técnico científica divulgada no vernáculo, como boletim da EPUSP, tem como objetivo auxiliar na prática cálculos de planos de fogo em subsolo rochoso à todos os engenheiros e técnicos que tratam com problemas de vias subterrâneas tanto aqueles de obras subterrâneas da construção civil quanto aqueles da abertura de vias de mineração.

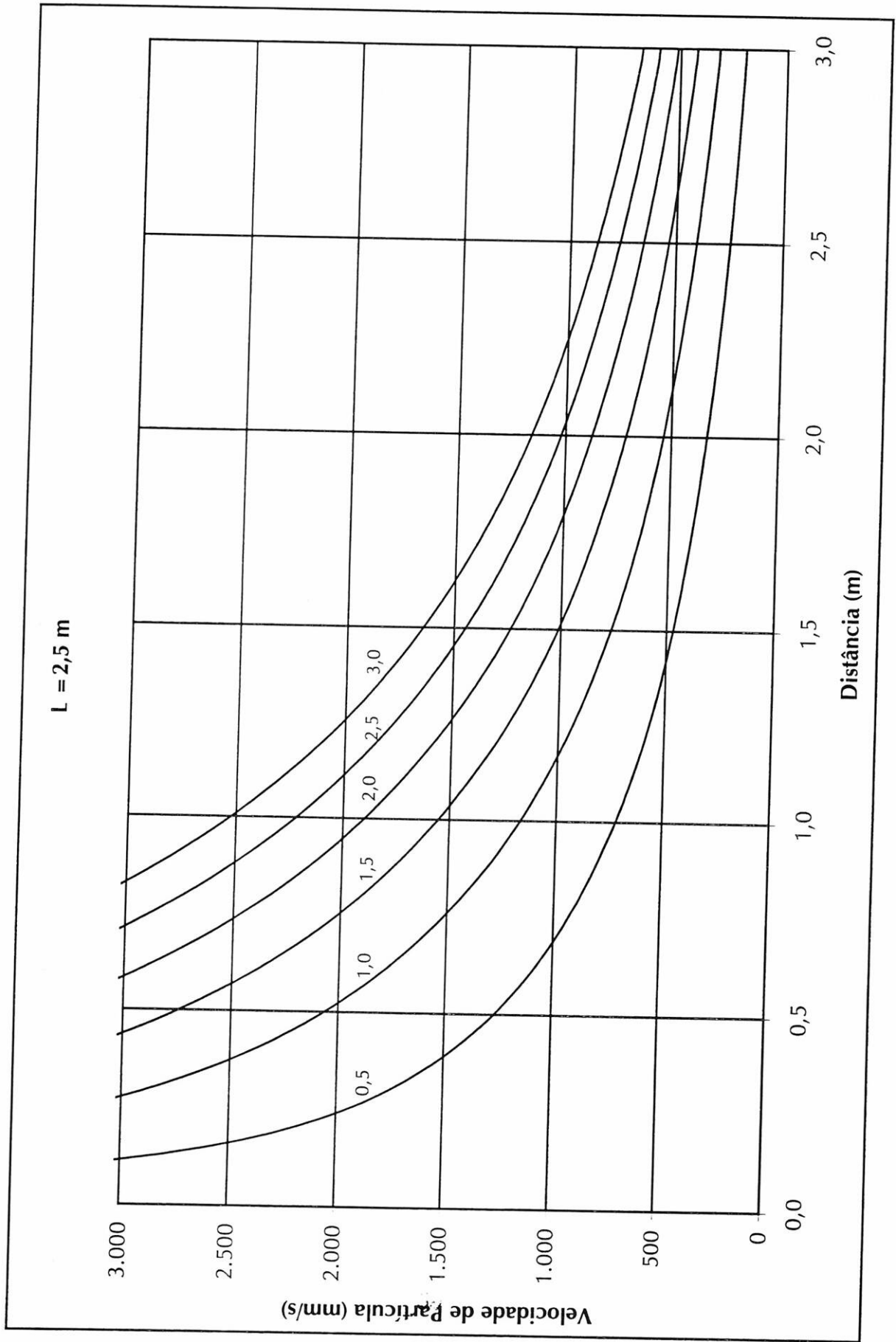
O A. da obra deseja ainda deixar aqui registrado o seu mais profundo agradecimento, principalmente ao CNPq, que tornou possível a dedicação de tempo maior no estudo e elaboração desta pesquisa, que sem dúvida é uma contribuição importante para o aprimoramento da técnica de escavação de rochas em nosso país.

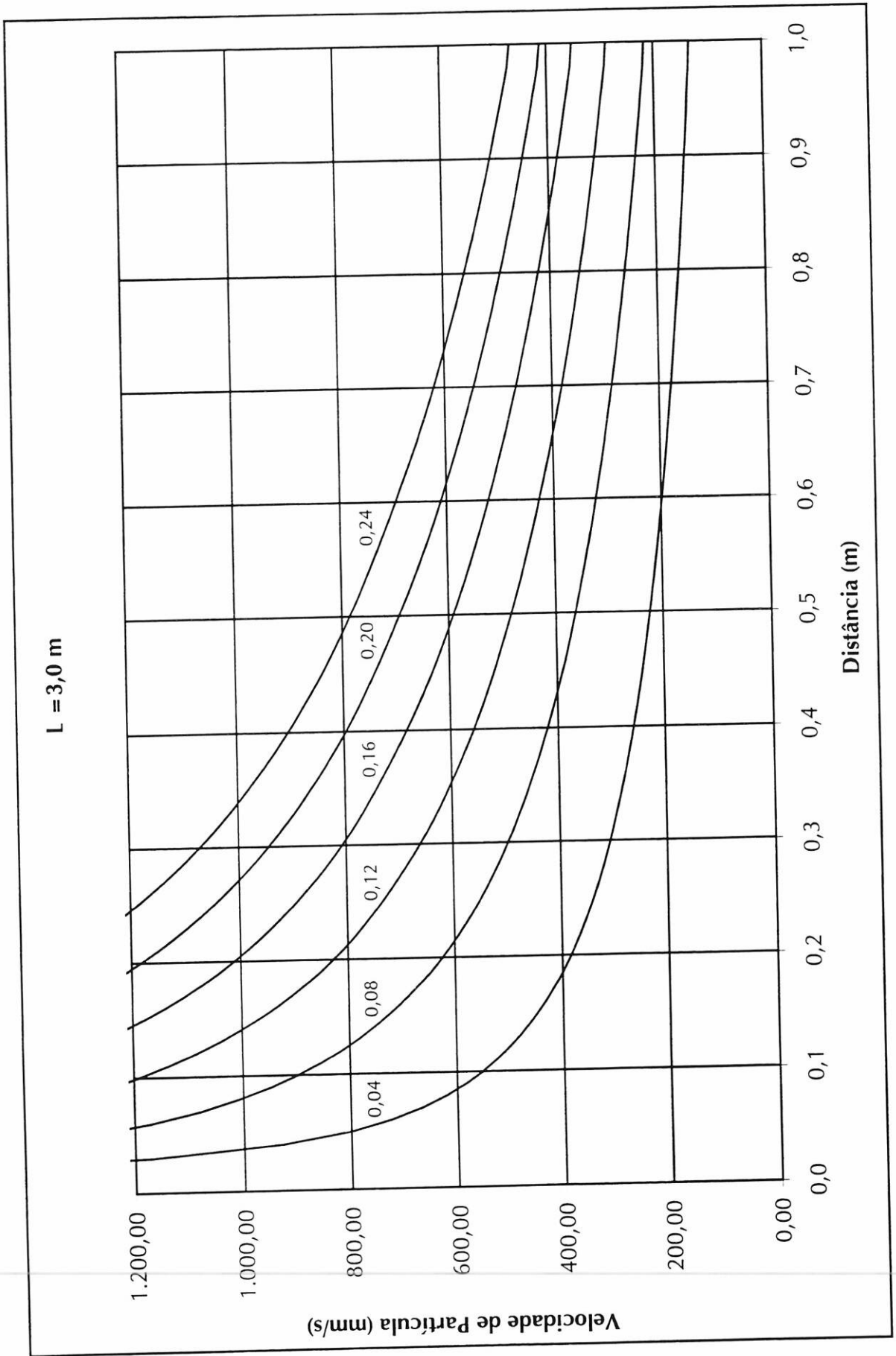
11.- BIBLIOGRAFIA

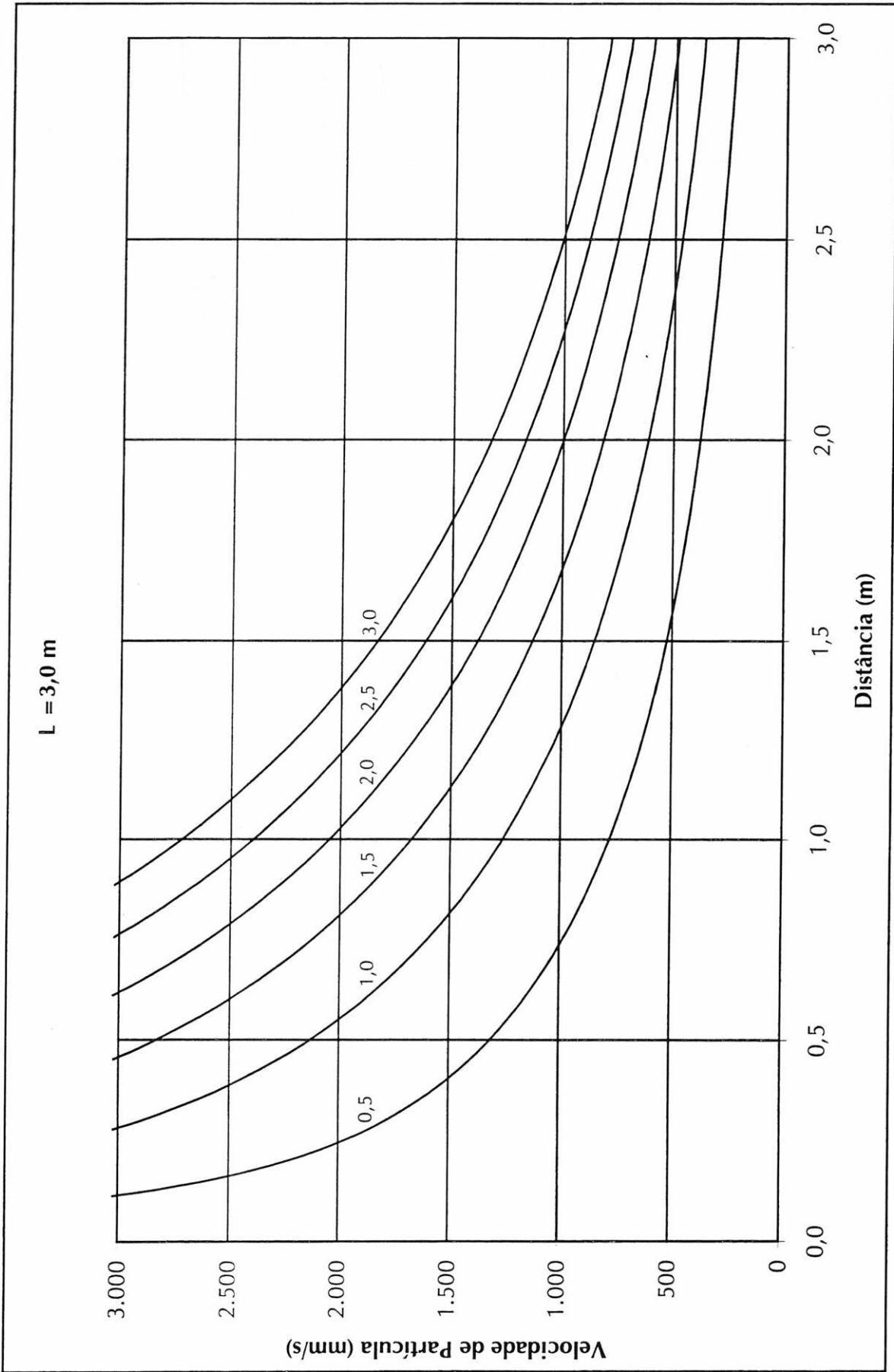
- FUJIMURA, Fernando; SOARES, Lindolfo; HENNIES, Wildor Theodoro.; SILVA, M.A.R. 1994 A new practical method to analyze the blastability of rock. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 3., Istanbul, 1994. *Mine planning and equipment selection 1994: proceedings*. Rotterdam, Balkema, 1994. p.657-62.
- GUSTAFSSON, R. 1973 Swedish Blasting Technique Nora Bocktryckeri AB, Sweden.
- HENNIES, Wildor Theodoro e AYRES DA SILVA, Lineu Azuaga. 1995 Abertura de vias subterrâneas, São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo 277 p./Apostila/
- HOLMBERG, R. 1982 Charge calculations for tunneling. In: HUSTRULID, W. A. (Ed) *Underground mining methods handbook; blasting*. New York: Society of Mining Engineers. AIME, Chap. 1, p. 1580-1589.
- LANGFORS, U. and B. KHILSTROM 1978 - The modern technique of rock blasting. John Willey and Sons Inc. 3th Ed. New York
- PERSSON, P. A.; HOLMBERG, R.; LEE, J. 1994 - Rock blasting and explosives engineering. CRC Press, London.
- RUSILO, Luiz Carlos; SANSONE, Eduardo Cesar; HENNIES, Wildor Theodoro; AYRES DA SILVA, Lineu Azuaga. 1994 Design and optimization of tunneling blasting operations. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 3., Istanbul, 1994. *Mine planning and equipment selection 1994: proceedings*. Rotterdam, Balkema, p.651-5.
- SANSONE, Eduardo Cesar, 1997 - Estudo de Aspectos Geomecânicos Aplicados ao Projeto de Minas Subterrâneas. Dissertação de Mestrado da EPUSP. São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

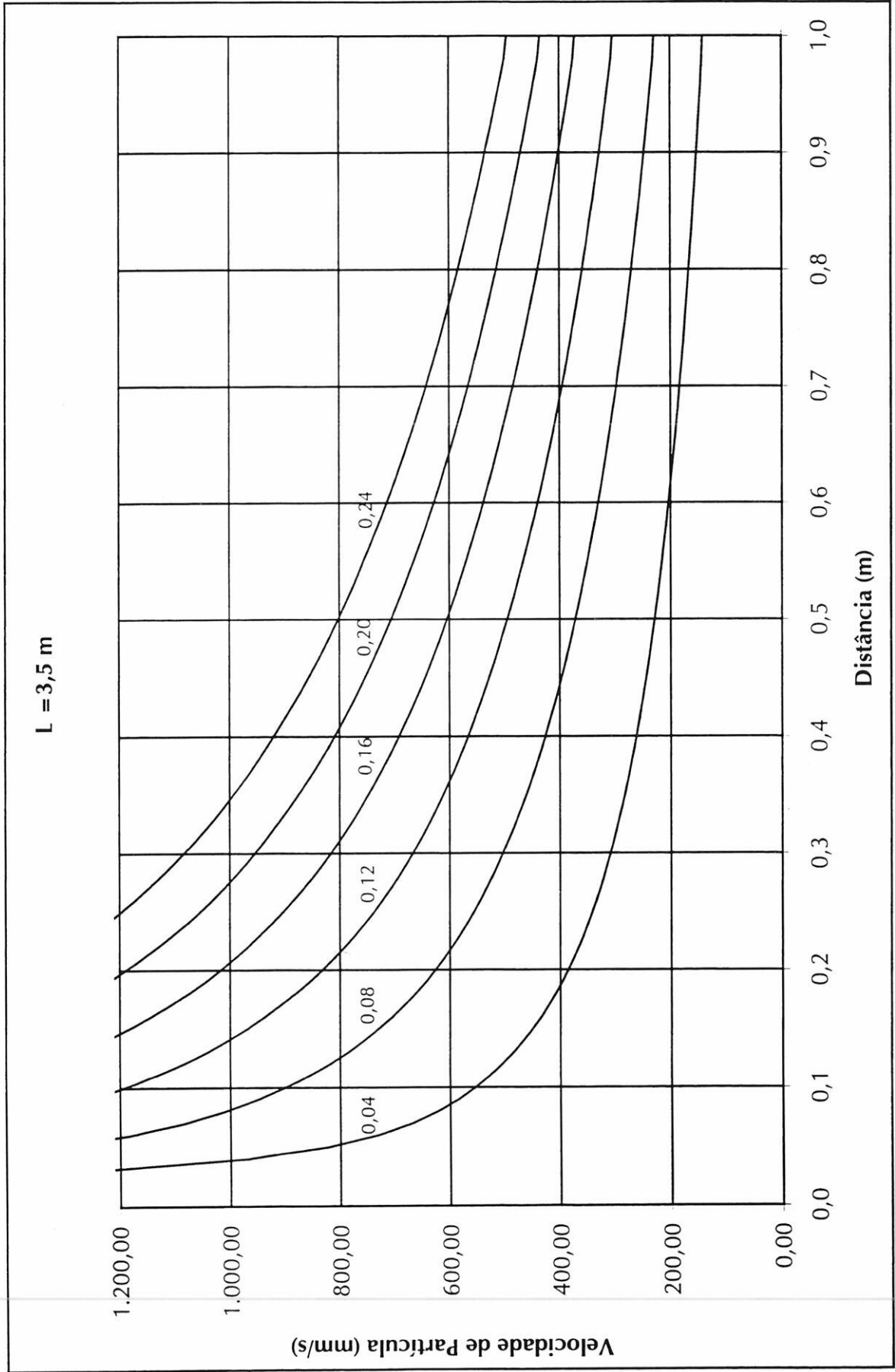
ANEXO

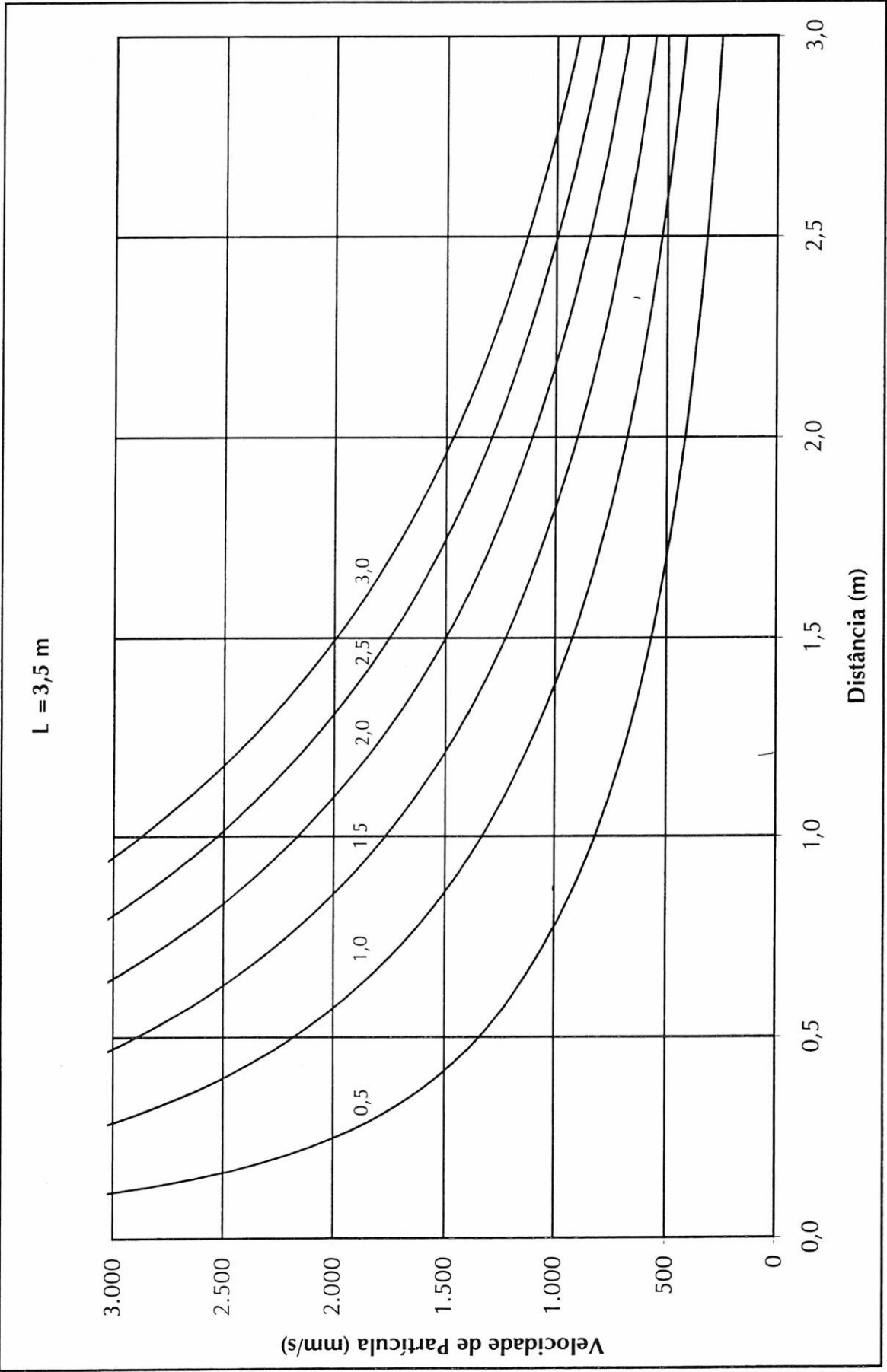


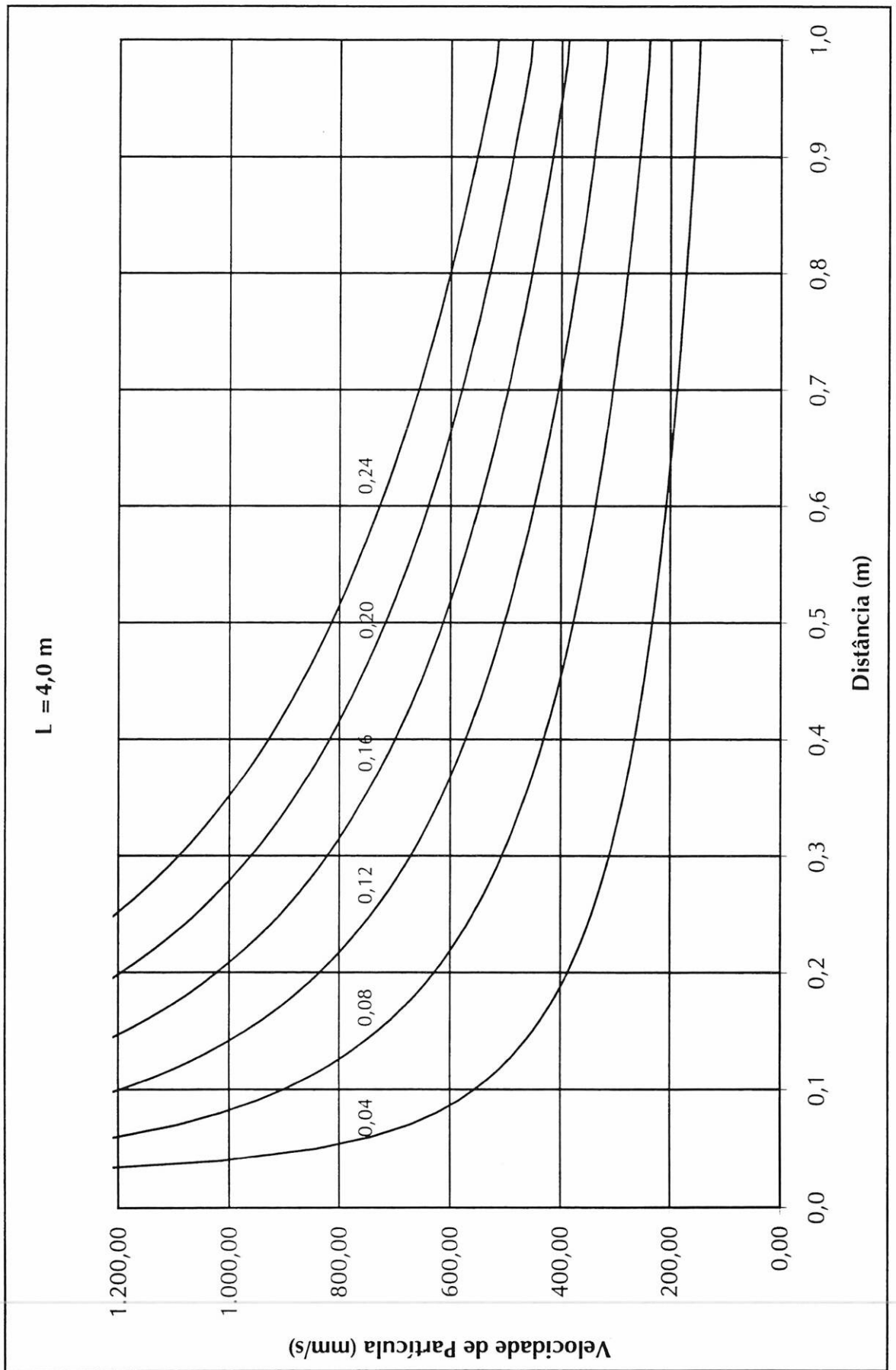


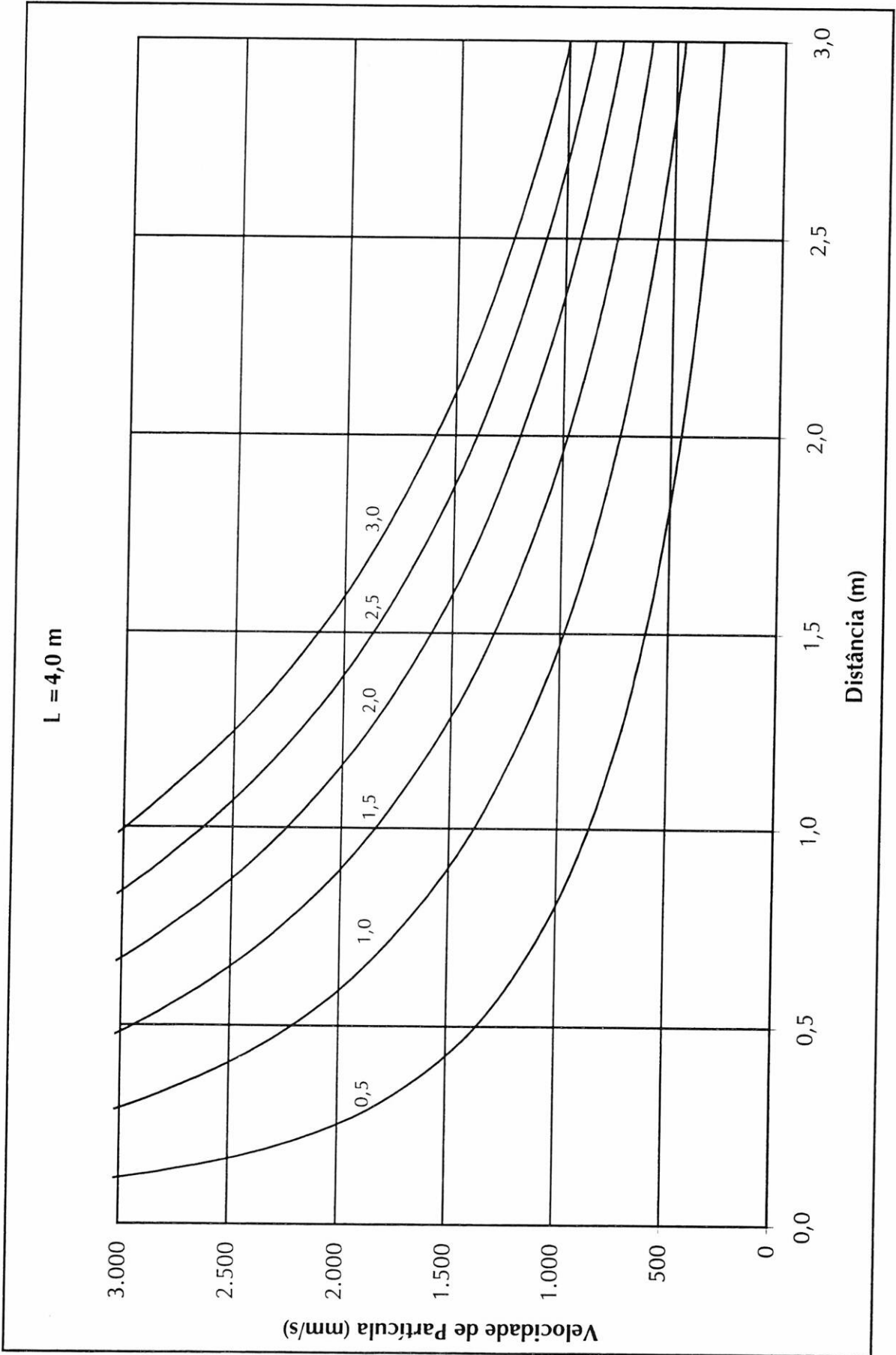


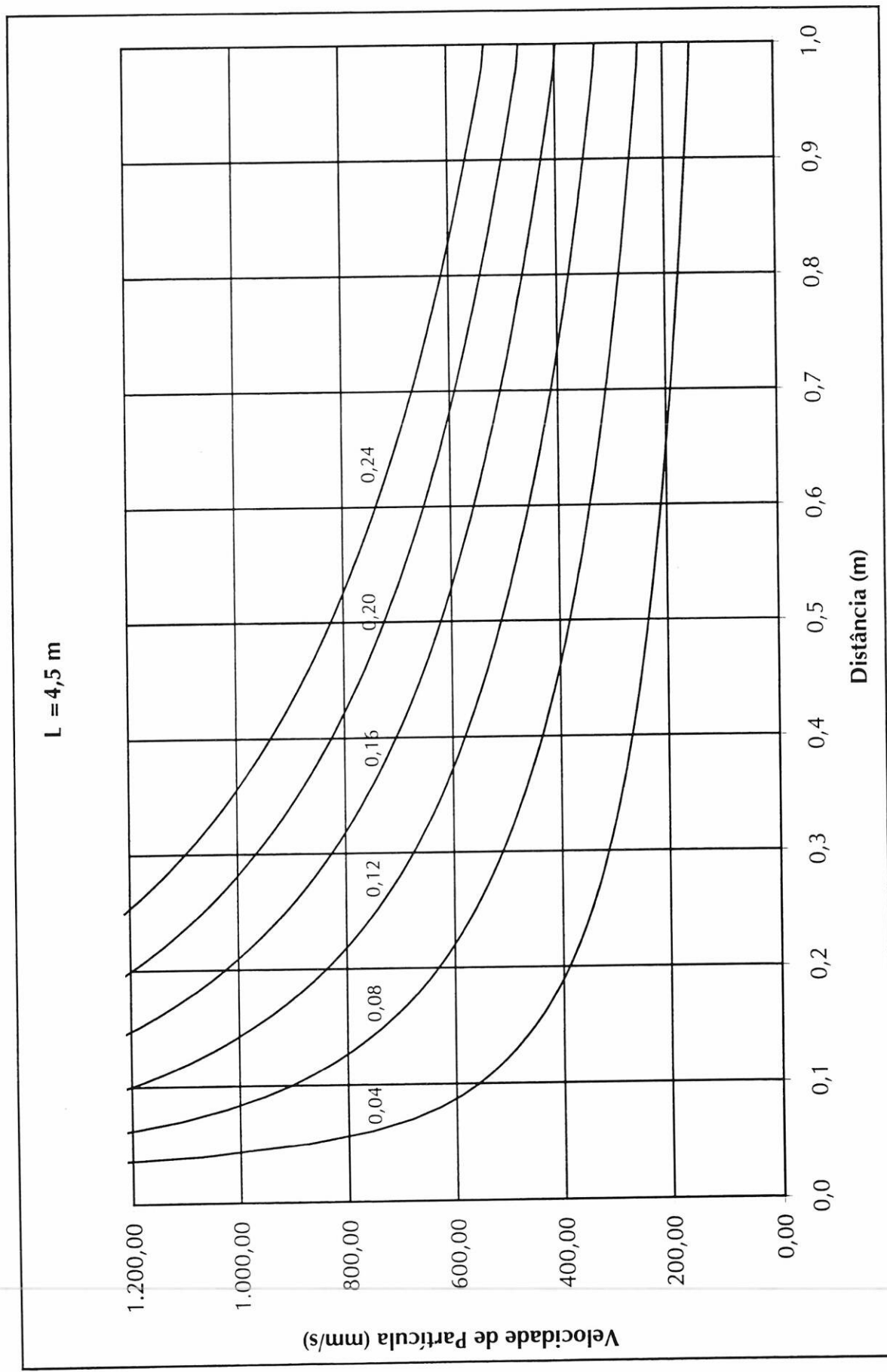


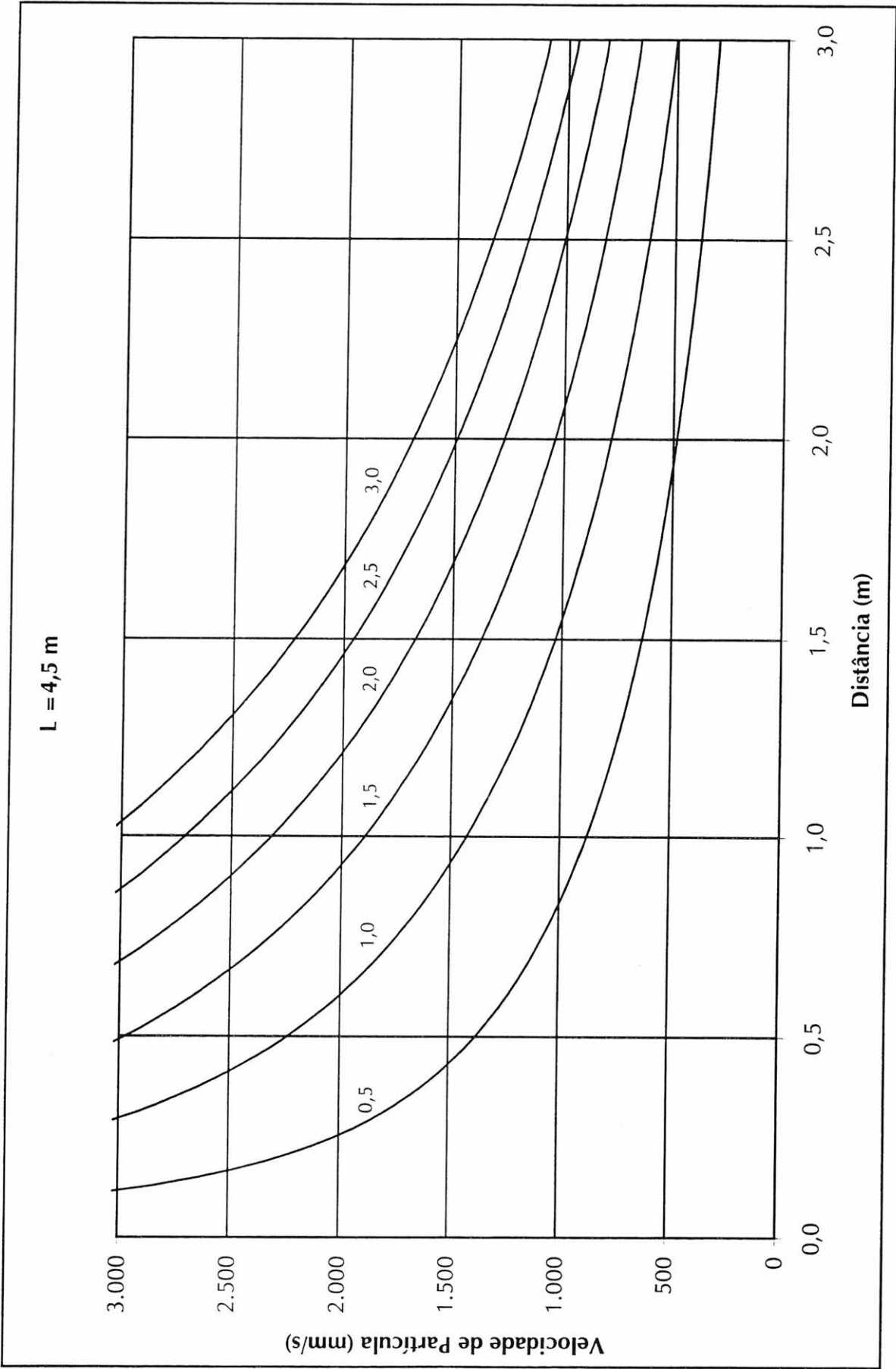












BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PMI/001 - Características Geométricas da Escavação Mecânica em Mineração: Exemplo de Escavadora de Caçamba de Arraste - ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/002 - Prospecção Geoquímica Experimental na Ocorrência de Ouro Tapera Grande - PAULO BELJAVSKIS, HELMUT BORN
- BT/PMI/003 - Estudo de Processo de Dupla Flotação visando o Beneficiamento do Minério Carbonático de Fosfato de Jacupiranga - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/004 - Desenvolvimento de um Equipamento Não-Convencional em Beneficiamento Mineral: A Célula Serrana de Flotação Pneumática - RICARDO NEVES DE OLIVEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/005 - Aluste de Modelos Empíricos de Operação de Ciclonas - HOMERO DELBONI JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/006 - Contribuição ao Estudo dos Explosivos Permissíveis - AMILTON DOS SANTOS ALMEIDA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/007 - Contribuição ao Dimensionamento de Pilares em Minas Subterrâneas de Manganês - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/008 - Exploração Mineral: Conceitos e Papel do Estado - LUIZ AUGUSTO MILANI MARTINS, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/009 - Otimização do Projeto de Pátios de Homogeneização através do Método da Simulação Condicional - FLAVIO MOREIRA FERREIRA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/010 - Considerações Gerais sobre Desmonte de Rocha: Análise de Custo - Índice de Produtividade e Otimização da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/011 - Aglomeração de Rejeitos de Fabricação de Brita para sua Reciclagem - ARTHUR PINTO CHAVES, BRADDLEY PAUL
- BT/PMI/012 - Método de Dimensionamento de Peneiras para a Classificação Granulométrica de Rochas ou Minérios - FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/013 - Processo de Beneficiamento para Obtenção de uma Carga Mineral Nobre a partir do Fosfogesso - WALTER VALERY JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/014 - Estudo da Carboxi-Metil-Celulose como Aglomerante para Pelotização - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/015 - A Influência do Amido de Milho na Eficiência de Separação Apatita/Minerais de Ganga Via Processo Serrana - LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/016 - Beneficiamento de Crolita Natural - Estado da Arte - HENRIQUE KAHN, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/017 - Estudo da Variação do Índice Energético Específico - W_i , segundo a Granulometria do Ensaio, Obtida através de um Moinho de Bolas Padrão, em Circuito Fechado - MARIO SHIRO YAMAMOTO, FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/018 - Fluorita - FERNANDO FUJIMURA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/019 - O Aproveitamento de Recursos Minerais: Uma Proposta de Abordagem a Nível Nacional - CELSO PINTO FERRAZ, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/020 - Comparação de duas Metodologias - A de Bieniawski e a de Panek, para Dimensionamento de Tirantes em Galerias Subterrâneas de Seção Retangular em Camadas Estratificadas - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/021 - Caracterização de Maços Rochosos através de Envolvimentos de Resistência por Tratamento Estatístico utilizando Dados de Laboratório do IPT Simulando Condições Geotécnicas do Maço - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/022 - Avaliação de Impactos Ambientais na Mineração de Combustíveis Fósseis Sólidos - GILDA CARNEIRO FERREIRA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/023 - O Lado Nocivo do Elemento Quartzo no Desgaste Abrasivo de Mandíbula de Britadores - FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/024 - Conceitos Básicos de Iluminação de Minas Subterrâneas - SÉRGIO MEDICI DE ESTON, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/025 - Sistema Computadorizado para Ajuste de Balanço de Massas e Metalúrgico - ANTONIO CARLOS NUNES, ARTHUR PINTO CHAVES

- BT/PMI/026 - Caracterização Mineralógica/Tecnológica das Apatitas de alguns Depósitos Brasileiros de Fosfato - SARA LAIS RAHAL LENHARO, HELMUT BORN
- BT/PMI/027 - Classificação de Maciços quanto à Escarificabilidade - GUILHERME DE REZENDE TAMMERIK, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/028 - Análise Comparativa de Métodos de Amostragem de Depósitos Auríferos - FÁBIO AUGUSTO DA SILVA SALVADOR, HELMUT BORN
- BT/PMI/029 - Avaliação da Qualidade de Corpos Moedores para o Minério Fosfático de Tapira - MG - GERALDO DA SILVA MAIA, JOSÉ RENATO B. DE LIMA
- BT/PMI/030 - Contribuição ao Estudo da Cominuição Inicial à Partir da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/031 - Análises Químicas na Engenharia Mineral - GIULIANA RATTI, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/032 - Usos Industriais da Atapulga de Guadalupe (PI) - SALVADOR LUIZ MATOS DE ALMEIDA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/033 - Minerais Associados às Apatitas: Análise de sua Influência na Produção de Ácido Fosfórico e Fertilizantes Fosfatados - ROBERTO MATTIOLI SILVA, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/034 - Beneficiamento dos Caulins do Rio Capim e do Jari - ADÃO BENVINDO DA LUZ, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/035 - Dimensionamento de Suportes em Vias Subterrâneas - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/036 - Estudos da Modelagem Matemática da Moagem com Seixos para Talco de Diversas Procedências - MARIO VALENTE POSSA, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/037 - Mecânica de Rochas Aplicada ao Dimensionamento do Sistema de Atirantamento em Minas Subterrâneas - LEONCIO TEÓFILO CARNERO CARNERO
- BT/PMI/038 - Geometria de Minas a Céu Aberto: Fator Crítico de Sucesso da Indústria Mineral - FÁBIO JOSÉ PRATI, ANTÔNIO JOSÉ NAGLE
- BT/PMI/039 - Substituição do Aço por Polímero e Compósitos na Indústria Automobilística do Brasil: Determinantes e Consequências para o Mercado de Minério de Ferro - WILSON TRIGUEIRO DE SOUSA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, ANTONIO JOSÉ NAGLE
- BT/PMI/040 - Aplicação de uma Metodologia que Simule em Moinho de Laboratório Operações Contínuas de Moagem com Seixos para Talco - REGINA COELI CASSERES CARRISSO, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/041 - A Indústria Extrativa de Rochas Ornamentais no Ceará - FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL, ANTONIO STELLIN JÚNIOR
- BT/PMI/042 - A Produção de Fosfato no Brasil: Uma Apreciação Histórica das Condicionantes Envolvidas - GILDO DE A. DE SÁ C. DE ALBUQUERQUE, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/043 - Flotação em Coluna - Estado de Arte - JULIO CESAR GUEDES CORREIA, LAURINDO SALIES LEAL FILHO
- BT/PMI/044 - Purificação de Talco do Paraná por Flotação e Alvejamento Químico - IVAN FALCÃO PONTES, LAURINDO SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/045 - Pequena Empresa - A Base para o Desenvolvimento da Mineração - GILSON EZEQUIEL FERREIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/046 - Máquinas de Flotação - ROGÉRIO CONTATO GUIMARÃES, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/047 - Aspectos Tecnológicos do Beneficiamento do Carvão de Candiota (RS) - ANTONIO RODRIGUES DE CAMPOS, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/048 - Efeito das Dimensões de Provetas no Dimensionamento de Espessadores - ELTON AZEVEDO MASINI, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/049 - Água no Processamento Mineral - RODICA MARIA TEODORESCU SCARLAT, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/050 - Drenagens Ácidas do Estéril Piiritoso da Mina de Urânio de Poços de Caldas: Interpretação e Implicações Ambientais - VICENTE PAULO DE SOUZA, LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ
- BT/PMI/051 - "Caracterização Tecnológica de Minérios Auríferos. Um Estudo de Caso: O Minério Primário da Jazida de Salamangone, AP." - MARIA MANUELA MAIA LÉ TASSINARI, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/052 - Ensino de Engenharia de Minas - WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/053 - Redistribuição de Tensões e Desenvolvimento da Zona Clástica em Túneis Circulares - FERNANDO FUJIMURA

BT/PMI/054 - Projeto de Barragem para Reservação de Mistos de Minerais Pesados Rejeitados pelo Beneficiamento de Cassiterita na Mina do Pitanga - MARCELO PIMENTEL DE CARVALHO, EDER DE SILVIO, LINDOLFO DE SILVIO

BT/PMI/055 - A Segurança e a Organização do Trabalho em uma Mineração Subterrânea de Carvão da Região de Criciúma - Santa Catarina - DORIVAL BARREIROS, WILDOR THEODORO HENNIÉS

BT/PMI/056 - Diagnóstico de Lixiviação para Minérios de Ouro - VANESSA DE MACEDO TORRES, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/057 - O Estado da Arte em Tratamento de Minérios de Ouro - RONALDO DE MOREIRA HORTA, ARTHUR PINTO CHAVES

