

CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA ALTURA IDEAL DE BANCADA EM DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVO

RESUMO

Aproveitando o tema de uma das aulas ministradas no curso de Pós-graduação de Engenharia de Minas (EP-USP) e considerando a importância da determinação da altura ideal de bancadas subvertidas em mineração a céu aberto, com o objetivo de maximizar a eficiência de desmonte de rocha com explosivo.

Confrontando essa altura com a altura crítica de explosão de veículos de perfuração no caso de mineração a céu aberto, é possível determinar convenientemente a altura ideal de bancadas subvertidas em mineração a céu aberto.

Eng.^o João Marcos de Arruda Corsini
RUPTURITA S.A. EXPLOSIVOS/EPUSP

Coordenador:
Dr. Carlos Dinis da Gama
IPT / EPUSP

— RESUMO —

Aproveitando o tema de um seminário do curso de pós-graduação de Dinâmica das Rochas (EP-USP) o autor analisa teoricamente o problema da fixação da altura ótima de bancadas submetidas ao desmonte por explosivos, com o objetivo de maximizar a eficiência destes.

Confrontando essa análise com os critérios práticos habituais (baseados na velocidade de perfuração ou na remoção do material detonado) conclui-se que é possível determinar convenientemente, para cada caso, a altura ideal de bancada, que corresponde ao menor custo de desmonte.

I INTRODUÇÃO

Antigamente, os serviços de desmonte de rocha com explosivos, particularmente aqueles em pedreiras, eram realizados em bancadas de grande altura. Acreditava-se que com maiores alturas obtinha-se maiores produções, com menores gastos de limpeza, decapagem e preparação da pedreira.

Talvez, na época, essa condição fosse prioritária, uma vez que não se dispunha dos equipamentos de grande capacidade e alto grau de aperfeiçoamento técnico como se tem hoje em dia. Dessa forma, era imperioso que se conseguisse grandes volumes de rocha com um mínimo de limpeza e preparação da jazida.

Com o passar dos anos, sentiu-se que a bancada de grande altura gerava altos custos de perfuração, grandes dificuldades na remoção do material detonado, além da insuficiente fragmentação que exigia a realização de onerosos fogos secundários (“fogachos”).

No intuito de atenuar essas deficiências, passou-se a aproveitar desníveis naturais na jazida, numa tentativa de introduzir menores alturas de bancada. Essa solução, no entanto, não foi totalmente satisfatória, pois criou diversificação de alturas de bancada, impossibilitando assim, a padronização dos esquemas de fogo. Ainda hoje constatamos, nas pedreiras mais antigas, vestígios desse procedimento. (Bancada de diversas alturas e inclinações variadas).

Mais recentemente, com os recursos dos modernos equipamentos, das novas técnicas de detonação e dos conceitos de otimização dessas operações, observou-se que para cada uma das etapas do desmonte com explosivos, existiam alturas ideais de bancada com as quais se atingiam resultados ótimos. Assim, a partir dessas observações, formularam-se critérios, de caráter prático, para estimar essas alturas.

Paralelamente a estes, com a evolução da Teoria da Dinâmica de Rochas, desenvolveu-se critério teórico para determinação das alturas, mínima e máxima, de uma bancada, em função das características físicas da rocha e do explosivo empregado.

A seguir, apresentamos alguns dos critérios práticos que visam otimizar as principais etapas do desmonte, e do critério teórico que fundamenta-se na condição de garantir máximo rendimento no trabalho realizado pelo explosivo.

II. CRITÉRIOS PRÁTICOS

II. 1. CRITÉRIO DA VELOCIDADE DE PERFURAÇÃO

Em um projeto de desmonte com explosivos, quando do estabelecimento da altura da bancada, é fundamental, termos conhecimentos da influência que a rocha exerce sobre a velocidade de perfuração do equipamento empregado.

Sabe-se que a velocidade de perfuração de uma rocha é função, inicialmente, de sua dureza e resistência mecânica e que, posteriormente, essa velocidade inicial vai sofrendo decrementos sucessivos, causados principalmente, pela abrasividade da rocha que diminui gradativamente o poder de corte da ferramenta ("bit") e pela perda de energia, também gradativa, sob a forma de energia de deformação das hastes de perfuração, à medida que se aumenta a profundidade do furo.

Como ilustração dos conceitos, acima apresentados, vemos, na Fig. 1, gráfico da variação da velocidade de perfuração com o tempo, resultado de investigações feitas pelo Prof. Mello Mendes (1) do Instituto Superior Técnico de Lisboa, e na Fig. 2, gráfico da variação da velocidade de perfuração com a profundidade do furo, resultado de medições que tivemos oportunidade de fazer em nosso trabalho de campo, em uma pedreira, na região de Cumbica (São Paulo).

Por esse gráficos podemos ver claramente que, do ponto de vista de economia e eficiência, é muito mais interessante que se realize perfurações de menor altura, ainda que se tenha que efetuar mais operações de posicionamento do equipamento.

Outro conceito prático, que deve ser considerado, ao definir a altura de uma bancada, é o de fazer coincidir o término da perfuração de um furo com a interrupção desta para afiação da ferramenta de corte ("bit"). Em rochas abrasivas, por exemplo, a cada 10 - 12 m tem-se que efetuar a afiação da coroa de perfuração, e, dessa forma, se a altura da bancada for igual ou sub-múltiplo desse valor, evitamos a perda de tempo de retirar a cora "cega" e introduzir outra afiada no mesmo furo.

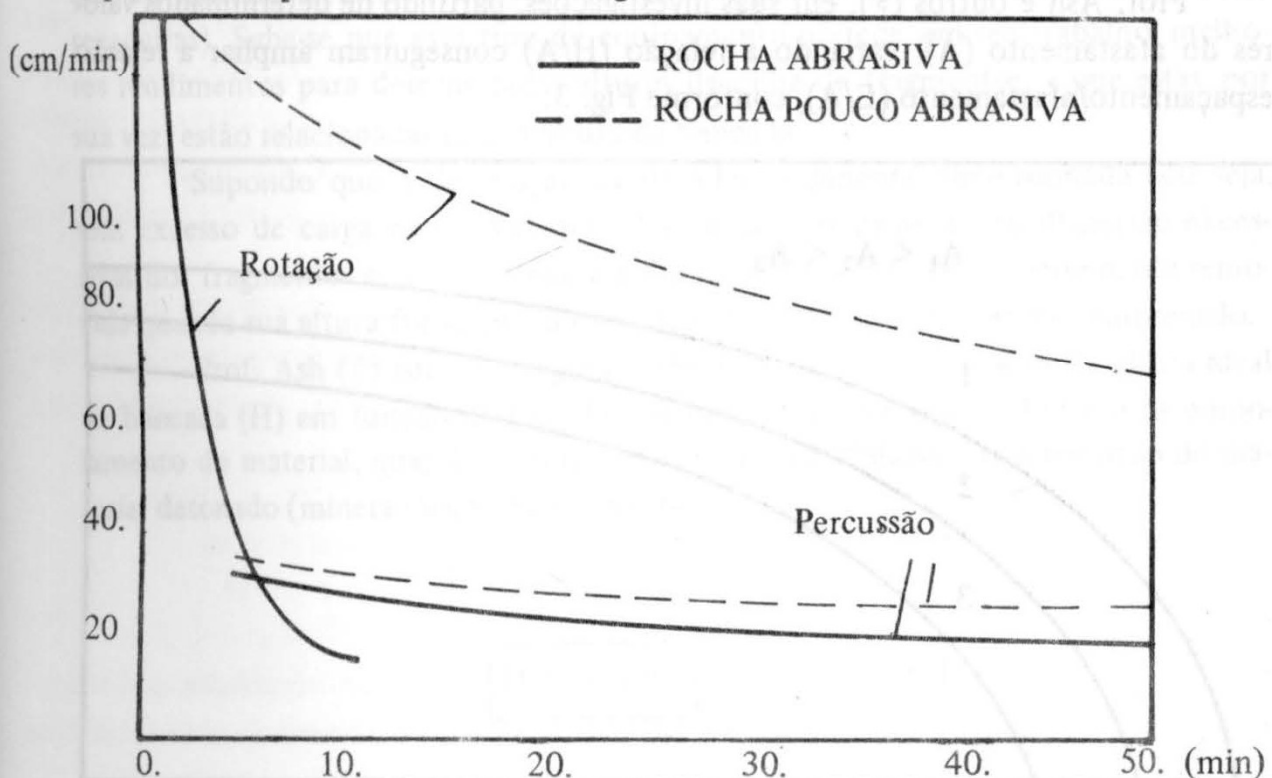


Fig. 1

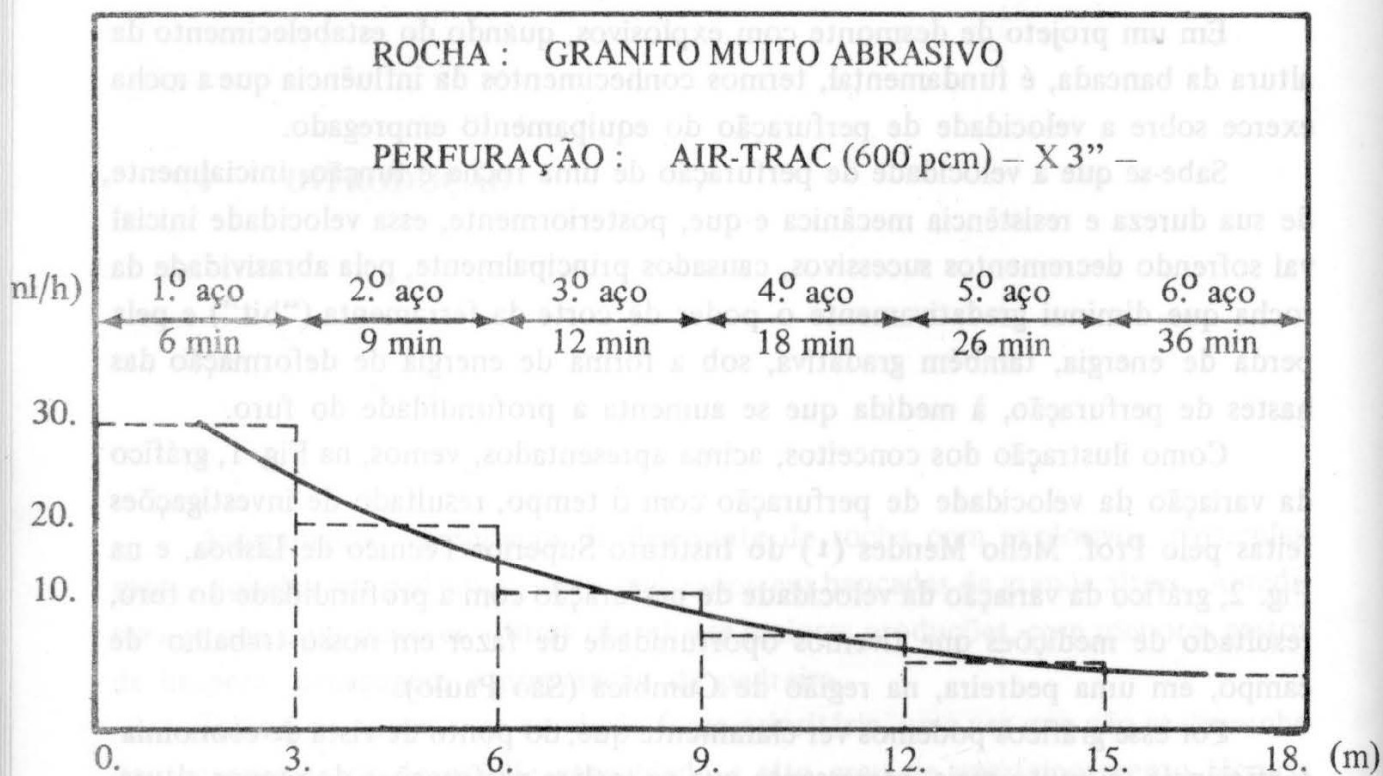


Fig. 2

II.2. CRITÉRIO DA DETONAÇÃO

A eficiência de uma detonação é função de diversas variáveis (15 a 20 aproximadamente) sendo, a altura da bancada (H), uma delas.

Existem inúmeros trabalhos publicados (2) (3) (4), que nos orientam no projeto de esquemas de fogo, em função das alturas da bancada.

Prof. Ash e outros (5), em suas investigações, partindo de determinados valores do afastamento (A), variando a relação (H/A) conseguiram ampliar a relação espaçamento/afastamento (E/A), conforme Fig. 3:

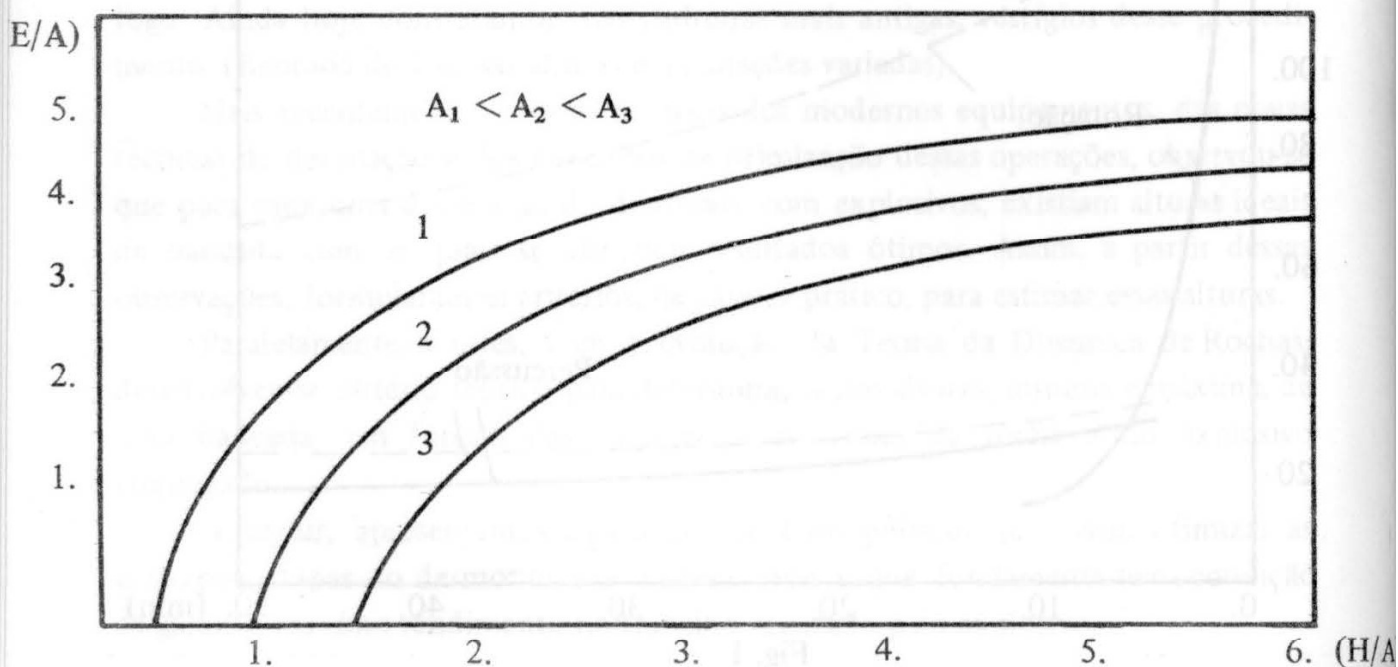


Fig. 3

Em nosso trabalho, acompanhando detonações em Granito, com Slurry, em perfurações de 3", adotando afastamento $A = 3,00$ m, notamos que a partir de determinada altura, somos obrigados a reduzir a relação (E/A) para garantir a mesma fragmentação do material. Nossas conclusões estão na Fig. 4, que nos mostram que, ao contrário das investigações feitas em laboratório, com corpos de prova perfeitamente elásticos, contínuos e isotrópicos, no campo, ao detonarmos maciços não perfeitamente elásticos, anisotrópicos e descontínuos, somos obrigados, a partir de uma determinada altura de bancada, a reduzir a relação (E/A) para garantir a mesma fragmentação do material, e evitar insuficiências de corte ao nível da praça e do lançamento do material fragmentado.

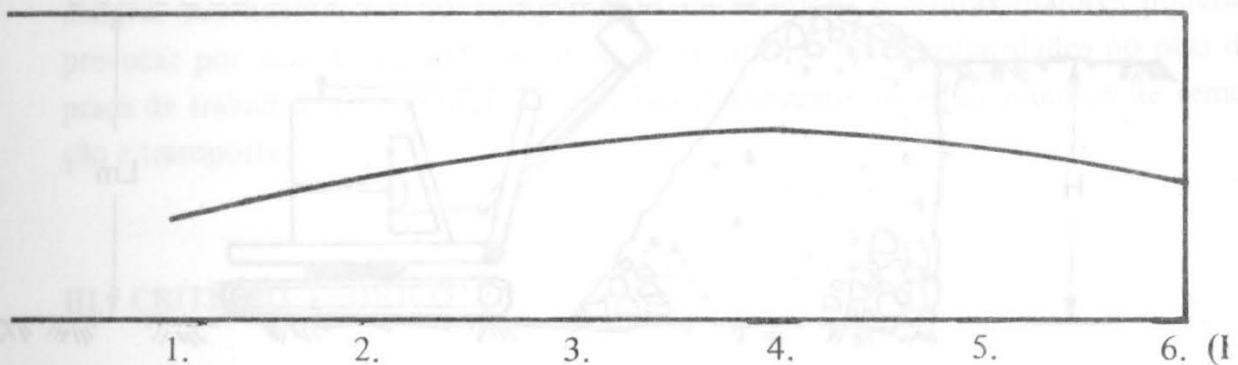


Fig. 4

II.3. CRITÉRIO DA REMOÇÃO DO MATERIAL DETONADO

Nas operações de desmonte com explosivos, comumente realizadas, a remoção do material detonado é feita por meio de pás-mecânicas (escavadeiras ou carregadeiras). Sabe-se que este tipo de equipamento oferece, em seu trabalho, melhores rendimentos para determinadas alturas da pilha de fragmentos, e que estas, por sua vez, estão relacionadas com a altura da bancada.

Supondo que a detonação esteja adequadamente dimensionada (ou seja, sem excesso de carga explosiva), não deverá ocorrer projeção ou dispersão excessivas dos fragmentos e, dessa forma, a pilha formada será mais eficientemente removida quando sua altura for igual à altura ideal de carga do equipamento empregado.

Prof. Ash (§) sugere a seguinte fórmula para determinação da altura ideal de bancada (H) em função do tipo de desmonte a ser executado, do fator de empolamento do material, quando se emprega escavadeira ("Shovel") na remoção do material detonado (minerações principalmente).

$$H = L_m \cdot S_f^x$$

onde,

- H — altura da bancada
 L_m — altura máxima de carga da escavadeira.
 S_f — Fator de empolamento do material.
 x — 1/2 ou 1/3 para desmontes, respectivamente, confinados (“box cut”) ou cantos livres (“corner cut”).

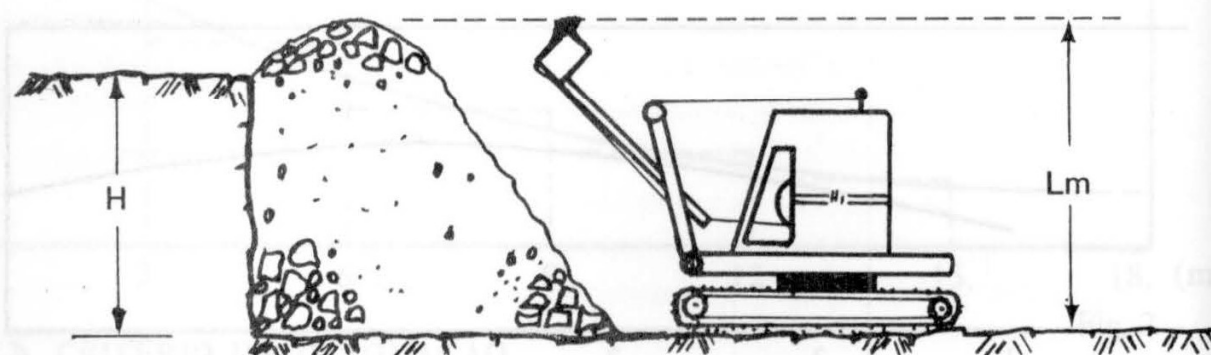


Fig. 5

No caso da remoção do material ser feita com pás-carregadeiras sobre esteiras ou pneus (pedreiras ou pequenas obras) não se pode aplicar o critério acima, pois a altura ideal de carga desse tipo de equipamento é bem inferior à altura de bancada normalmente adotada. Nesse caso costuma-se realizar detonações de apenas uma linha de furos por vez, aplicando maiores cargas explosivas, para garantir melhor espalhamento dos fragmentos.

Langefors (2) apresenta, em gráfico, a distância do centro de gravidade da pilha de fragmentos em função do excesso de carga explosiva empregada, para um desmonte de uma linha de furos com o uso de micro-retardos, considerando como carga mínima a razão de 160 g/m³.

Excesso de carga (kg/m ³)	0	0,10	0,20	0,30
Distância do CG (m)	0	6.	12.	18.

Como altura ideal de carga desse tipo de equipamento (pás-carregadeiras) a prática recomenda que esta seja da ordem de 1,5 vezes a altura de sua caçamba na posição de enchimento, conforme Fig. 6.

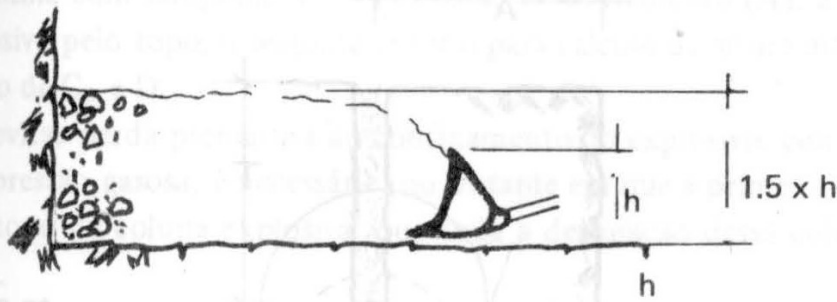


Fig. 6

Podemos acrescentar ainda que alturas menores que a recomendada exigirão maiores movimentações do equipamento de remoção e alturas maiores poderão provocar por ocasião da detonação, o aparecimento de irregularidades no piso da praça de trabalho, dificultando assim a movimentação dos equipamentos de remoção e transporte.

III. CRITÉRIO TEÓRICO

A velocidade de detonação (D) dos explosivos comerciais, em condições normais de trabalho no campo, varia entre 2.000 e 6.000 m/s, e a velocidade de propagação (C_p) de uma onda longitudinal em uma rocha (6) dada pela fórmula,

$$C_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad \text{onde}$$

E — módulo de elasticidade dinâmica

ν — Coeficiente de Poisson da rocha

ρ — massa específica da rocha

é da ordem de 3.000 a 5.000 m/s.

A forma da frente da onda longitudinal que se propaga pela rocha, por ocasião de uma detonação, é função de ambas C_p e D, conforme Fig. 7, para uma iniciação da coluna explosiva pelo topo. (procedimento mais frequente.).

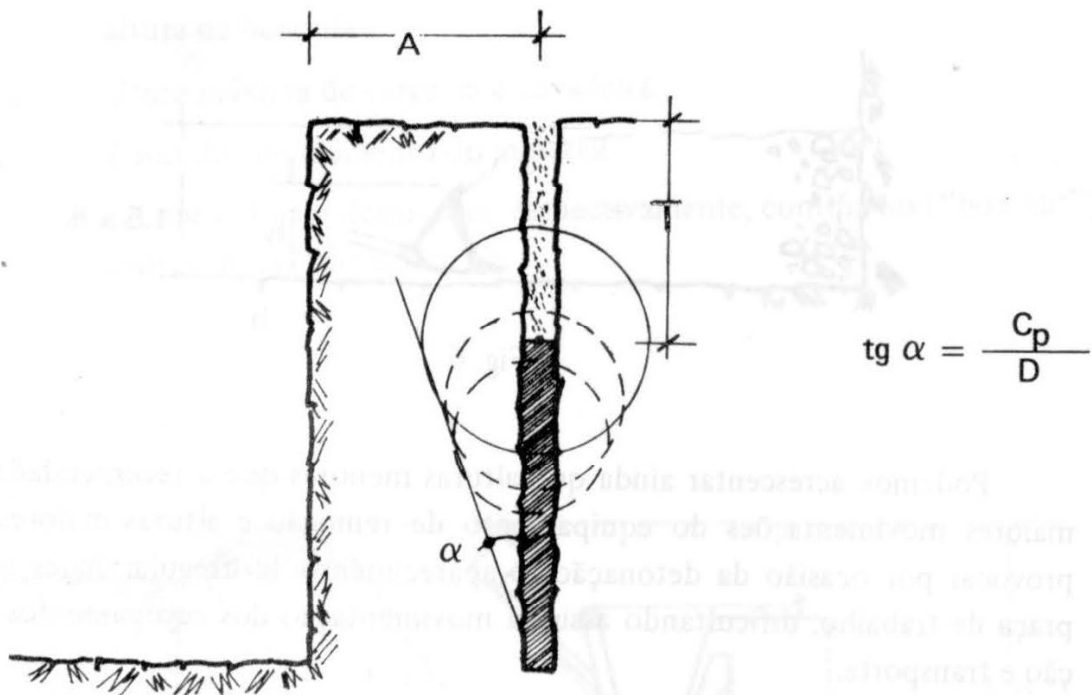
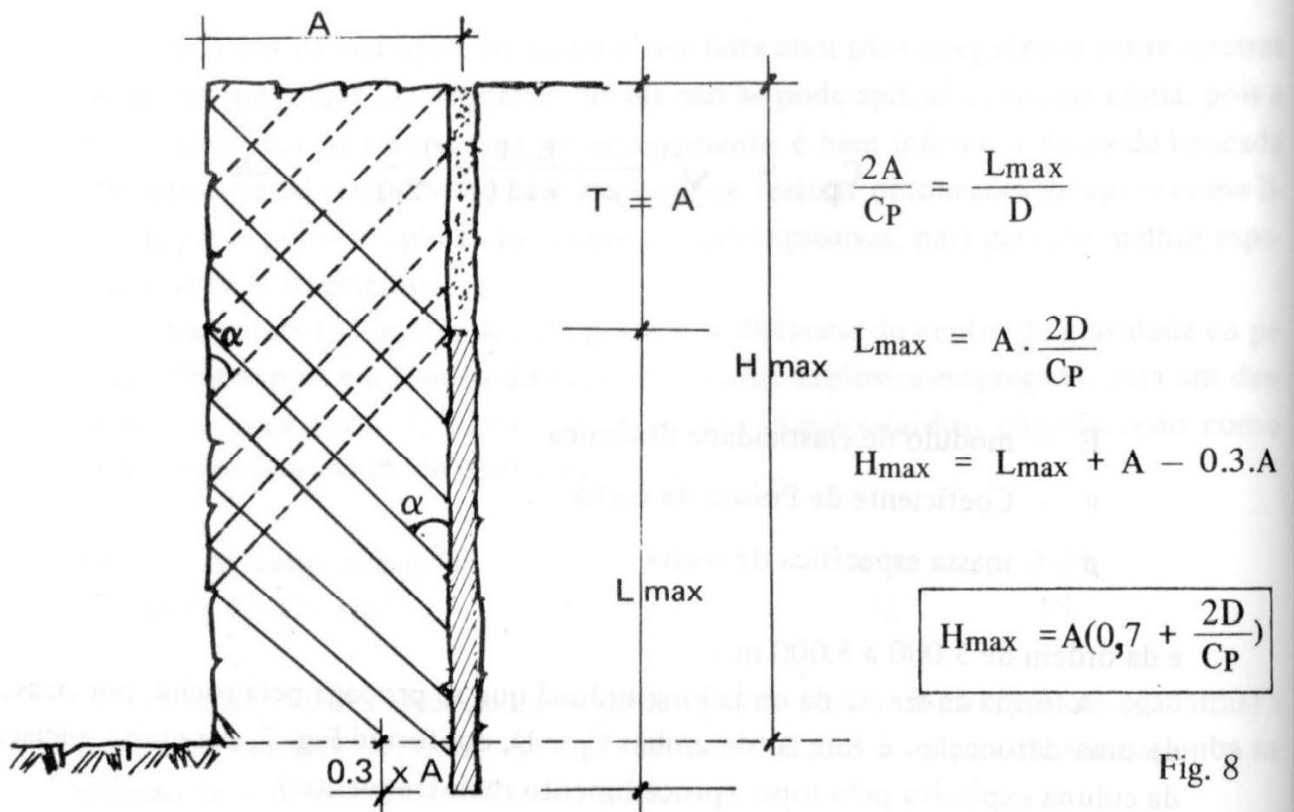


Fig. 7

Assim, as ondas longitudinais de compressão geradas, incidirão na face livre da bancada com um ângulo de incidência $i = \alpha$ e se refletirão sob a forma de ondas longitudinais e transversais de tração, que retornando da face livre para o interior da bancada causarão o aparecimento de sucessivas fraturas.



Com base nessa sucessão de acontecimentos o Prof. Ash (4) estabeleceu para um furo de mina com tamponamento (T) igual ao afastamento (A), e iniciação da coluna explosiva pelo topo, o seguinte critério para cálculo da altura máxima do furo, em função de C_p e D:

“Para evitar perda prematura do confinamento do explosivo, com consequente perda de pressão gasosa, é necessário, no instante em que a primeira onda refletida atingir o topo da coluna explosiva, que toda a detonação dessa coluna tenha se completado”.

Por outro lado, para evitar o efeito de cratera (quando o explosivo trabalha para cima) define-se também, a altura mínima da bancada, para uma detonação com afastamento A e tamponamento $T = A$, e altura de carga $J = 0.3 \times A$ como sendo:

$$H_{\min} = T + J = 1.3 A$$

IV. CONCLUSÕES

Ao procedermos um estudo para determinação da altura de bancada em um desmorte com explosivos, aplicando os critérios acima apresentados, é certo que para cada uma das etapas encontraremos um valor da altura ideal de trabalho. Dessa forma, precisaremos fazer, em seguida, uma análise conjunta para definir a altura ótima final.

Como ilustração, apresentamos os resultados da análise conjunta feita para a pedreira, que estudamos, na região de Cumbica (São Paulo), com as seguintes condições de trabalho:

Rocha	Granito (muito abrasivo) $C_p = 3.000 \text{ m/s}$ $\rho_R = 3.0 \text{ t/m}^3$
Explosivo	Slurry (Preço – Cr\$ 10,00/kg) $D = 6.000 \text{ m/s}$ $\rho_E = 1,5 \text{ g/cm}^3$
Perfuração	Air-Trac com Compressor Port. (600 pcm) Coroa de perfuração de 3" (em X) Custo total final horário do equipamento (M.O., Comb., Mat.Extens., L.Soc., etc.) Cr\$ 200,00/hora Velocidade de Perfuração (conforme gráfico Fig. 2)

Tempo de Posic. da Perfuratriz — 3 min.

Tempo de Acoplam/Desacopl. Haste — 0,5 min.

Remoção

Pá-carregadeira sobre pneus

Capacidade da Caçamba — $3,0 \text{ m}^3$

Altura da Caçamba — 1,80 m

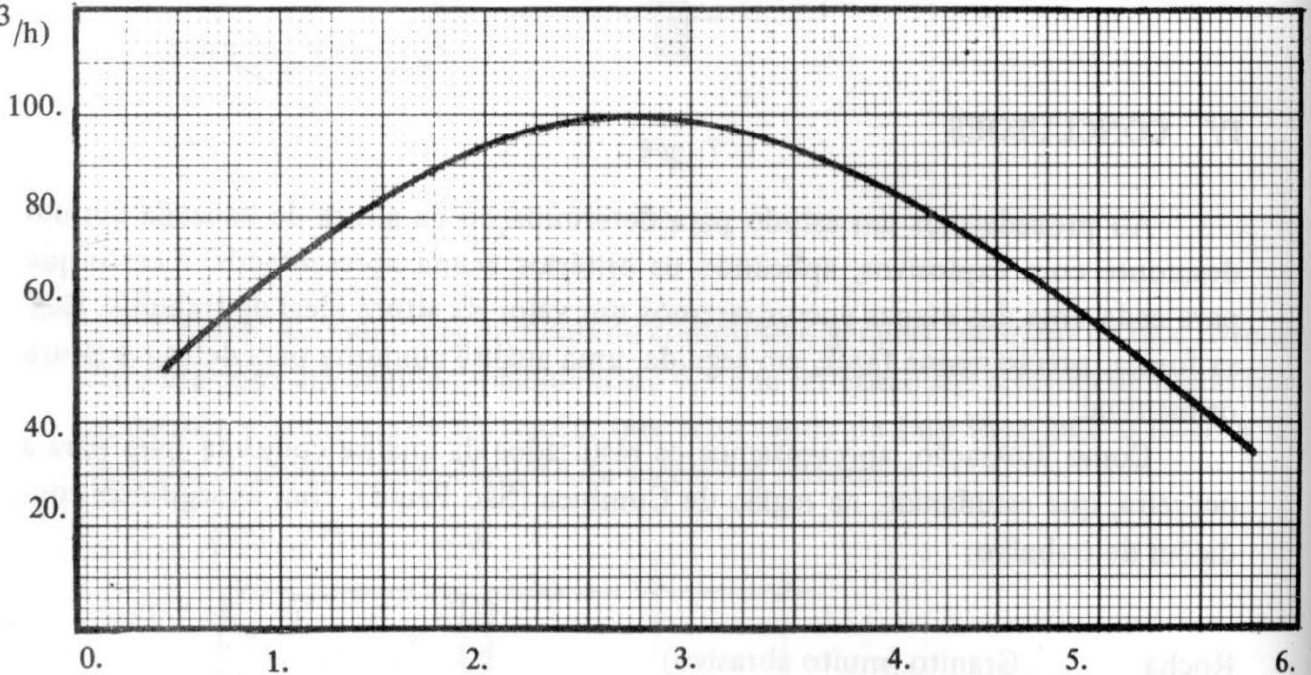
Altura ótima de carga — 2,70 m

Custo horário total — Cr\$ 100,00/h

Produção — conforme gráfico abaixo

Produção

(m^3/h)



Altura da Pilha

Fig. 9

1. Aplicando o critério teórico, com os dados do problema determinamos,

$$H_{\max} \cong 18,00 \text{ m}$$

$$H_{\min} \cong 3,00 \text{ m}$$

2. Aplicando o critério da detonação, para alturas de bancada de 3,00 a 18,00 m, obtemos a seguinte tabela,

H (m)	A (m)	H/A	E (m)	VOLUME P.FURO	CARGA P. FURO (kg)	RAZÃO DE CARGA (kg/m ³)	CUSTO (Cr\$/m ³)
3.	2.4	1.25	2.4	17.3	6.00	0.346	3.46
6.	3.	2.	4.2	75.6	24.00	0.313	3.13
9.	3.	3.	5.1	137.5	39.00	0.285	2.85
12.	3.	4.	5.7	205.0	54.00	0.263	2.63
15.	3.	5.	5.1	230.0	72.00	0.313	3.13
18.	3.	6.	4.2	227.0	90.00	0.396	3.96

3. Aplicando o critério da velocidade de perfuração para as alturas de 3,00 a 18,00 m, com os dados do problema e com os volumes por furo fornecidos pela tabela anterior, obtenemos:

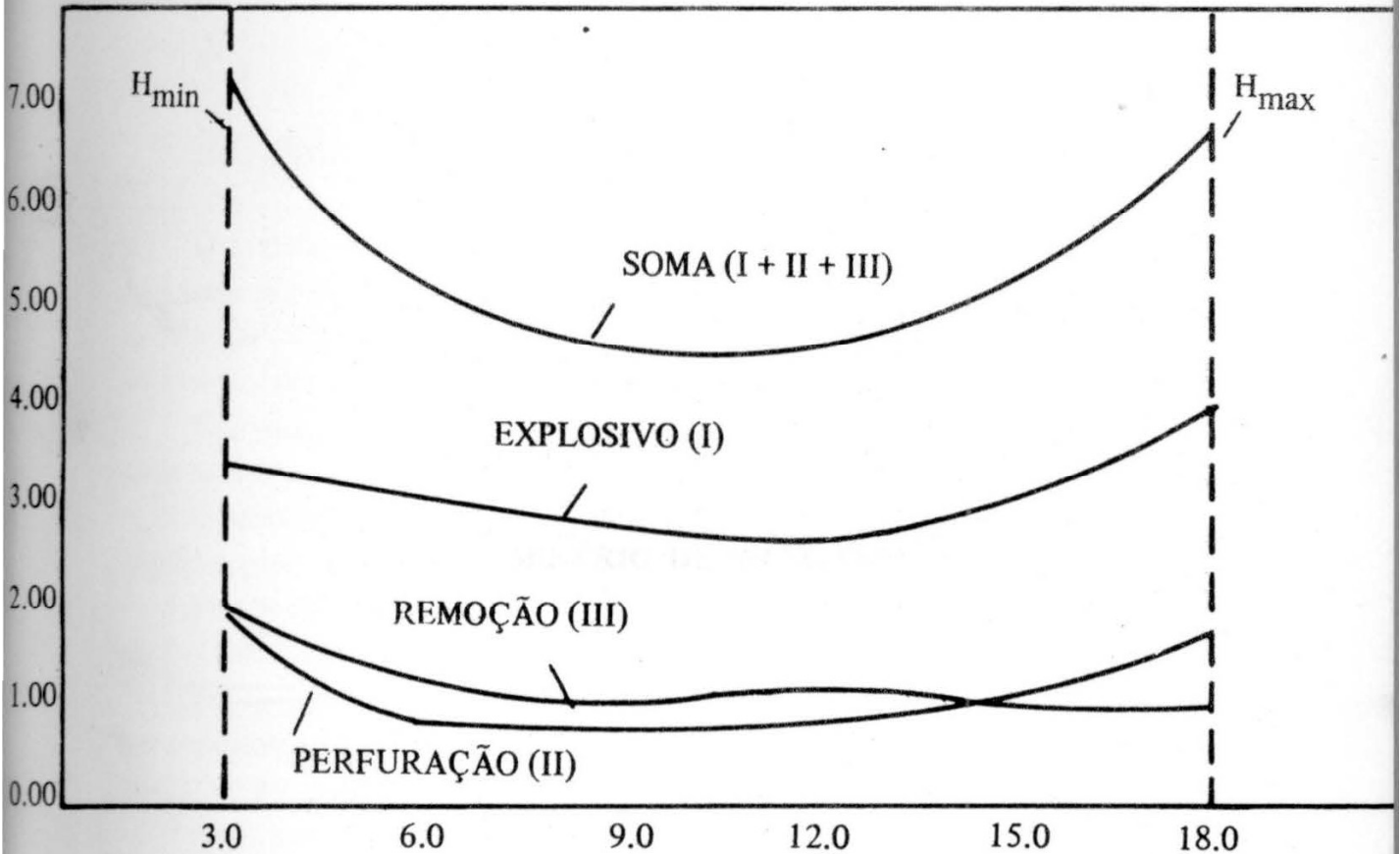
H (m)	Tempo		CUSTO P. FURO (Cr\$/furo)	CUSTO P. METRO (1) (Cr\$/ML)	VOLUME P. FURO (m ³)	RAZÃO PERF. (2) (ml/m ³)	CUSTO (1) x (2) (Cr\$/m ³)
	(min)	(h)					
3.	10.	0.166	33.30	11.10	17.30	0.174	1.93
6.	20.	0.333	66.60	11.10	75.60	0.079	0.88
9.	33.	0.555	111.00	12.30	137.50	0.065	0.80
12.	52.	0.866	172.20	14.40	205.00	0.058	0.83
15.	79.	1.320	264.00	17.75	230.00	0.065	1.15
18.	116.	1.940	388.00	21.50	227.00	0.079	1.70

4. Aplicando o critério da remoção do material detonado para o caso de utilização de pá-carregadeira, admitindo fator de empolamento do material $S_f = 50\%$, supondo forma triangular para secção transversal da pilha de fragmentos com início à distância $D_i = 3.D_{CG}$ (distância do centro de gravidade da pilha à face da bancada) obtemos,

H (m)	Razão de Carga (kg/m^3)	Excesso (>160) (kg/m^3)	Dcg (m)	D_i ($3 \times D_{cg}$) (m^2)	Área sec. tran. Pilha (m^2)	h_{\max} (m)	$h_{\text{med.}}$ ($2/3h_{\max}$) (m)	PRO- DU- ÇÃO (m^3/h)	CUS- TO ($\text{Cr}\$/\text{m}^3$)
3.	0.346	0.186	11.20	33.60	10.80	0.64	0.43	50.0	2.00
6.	0.313	0.153	9.15	27.45	27.00	1.98	1.32	79.0	1.26
9.	0.285	0.126	7.00	21.00	40.50	3.80	2.53	99.0	1.01
12.	0.263	0.103	6.20	18.60	54.00	5.80	3.90	87.0	1.15
15.	0.313	0.153	9.15	27.45	67.00	4.90	3.26	96.0	1.04
18.	0.396	0.236	14.10	42.30	81.00	3.90	2.60	99.0	1.01

Somando os valores obtidos através da aplicação de cada um dos critérios e lançando-os em gráfico, teremos condições de estabelecer a altura final ótima para esse desmonte.

ALTURA H (m)	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0	18.0
Explosivo ($\text{Cr}\$/\text{m}^3$)	3.46	3.13	2.85	2.63	3.13	3.96
Perfuração ($\text{Cr}\$/\text{m}^3$)	1.93	0.88	0.80	0.83	1.15	1.70
Remoção ($\text{Cr}\$/\text{m}^3$)	2.00	1.26	1.01	1.15	1.04	1.01
SOMA ($\text{Cr}\$/\text{m}^3$)	7.39	5.27	4.66	4.61	5.32	6.67

(Cr\$/m³)

Por esse gráfico verificamos que para cada etapa do desmonte (perfuração, detonação e remoção) existe uma altura ideal de bancada, em função do critério aplicado.

Através da análise dos custos totais, feita para cada altura de bancada em estudo, determinamos pela curva SOMA, entre as alturas ideais, a altura ótima de bancada, ou seja, aquela que nos proporcionará a maior eficiência no desmonte e o menor custo específico.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Mello Mendes, F. (1967-68) – Mecânica de Rochas – Edição da AEIST – Lisboa
- (2) Langefors, U and Kihlstrom, B (1963) – The Modern Technique fo Rock Blasting. J. Wiley & Sons Inc. NY
- (3) Gama, CD. – Otimização do Arranque de Rochas com Explosivos. Memoria MI-4 – Univ. de Luanda. Angola.
- (4) Ash, R.L. (1968) – The Design of Blasting Rounds. In Surface Mining. Ed. E.F. Pfleider. AIME. NY.
- (5) Ash, R.L. Konya, C.J. and Rollins, R.R. (1969) – Enhancement Effects from simultaneously Fired Explosive Charges. AIME – Mining Transactions Vol. 244 – pp 427-435. NY.
- (6) Kolsky, H. – Stress waves in solids (1963) Dover Publ. Inc. – NY.