

Sessão dia 02/08/1976

O SR. COORSINI

A primeira  
de Arruda Corsini  
explosivos".

Este assunto  
temas que mais  
sendo investigado  
quer, e principalmente  
engenheiro que faz  
em torno desse  
explosão. Como  
à sua apresenta  
fazendo uso de

Prevenimos a  
período, estaremos  
nos. Portanto, e

O ENG. JOÃO MARCOS

Nos pretendemos

### **"CONTROLE DE VIBRAÇÕES EM DESMONTES COM EXPLOSIVOS"**

Todas essas  
de vibrações e nós  
em uma extensa  
que facilita aos  
reverter a essas

INTRODUÇÃO

Quando falamos  
erros, naturalmente  
seus habitantes ou  
não danos a popula

Porém, a experi  
nações em todos  
na vez que o nível  
eficiência do trabalho  
seja desenvolvida p

Assim, sempre  
se preocupar em red  
contribuindo para a  
adquirindo a efici

**Expositor:**

**Eng. João Marcos de A. Corsini  
RUPTURITA S.A. EXPLOSIVOS**

**Coordenador:**

**Dr. Carlos Diniz da Gama  
EPUSP/IPT**

*O SR. COORDENADOR — Dr. Carlos Diniz da Gama — DMGA—IPT.*

A primeira conferência desta tarde será proferida pelo Eng. João Marcos de Arruda Corsini sobre o tema “Controle de Vibrações em Desmontes com explosivos”.

Este assunto, como todos tiveram oportunidade de ver é um dos problemas que mais interesse, quer sob o ponto de vista científico, uma vez que está sendo investigado e pesquisado em diversos países, ao nível mais avançado, quer, e principalmente, sob o ponto de vista prático, uma vez que interessa ao engenheiro que faz o projeto de um desmonte, assegurar-se de que o ambiente em torno desse desmonte vai ficar protegido contra os efeitos secundários da explosão. Como terão a oportunidade de ver, o enfoque que o Eng. Corsini dará à sua apresentação é baseado na experiência prática que possui e também fazendo uso de conceitos teóricos atualizados.

Prevemos a duração de cerca de 45 minutos para esta palestra e após este período, estaremos à disposição para perguntas e uma discussão sobre este tema. Portanto, eu passo a palavra ao Sr. Eng. Corsini.

### *O ENG. JOÃO MARCOS DE ARRUDA CORSINI*

Nós pretendemos apresentar alguma coisa que traga informações principalmente de caráter prático para todos aqueles que, por acaso, ou em seu trabalho realizam operações de desmonte de rocha.

Todas essas informações estão fundamentadas na teoria relativa à parte de vibrações e nós não pretendemos aprofundar-nos nesta parte teórica porque é muito extensa vamos nos dedicar mais à parte de aplicação em si, de tal forma que facilite aos senhores quando forem executar algum serviço de desmonte recorrer a essas informações.

### *I. INTRODUÇÃO*

Quando falamos em controlar as vibrações em um desmonte com explosivos, naturalmente, associamos a idéia da realização de detonações em locais habitados ou construídos, onde cuidados extras devem ser tomados para evitar danos a população e instalações existentes. (“Desmonte Cuidadoso”)

Porém, a experiência nos mostra que devemos observar o nível de vibrações em todas operações de desmonte de rocha, seja ele cuidadoso ou não, uma vez que o nível de vibrações oriundo de uma detonação é fator indicativo da eficiência do trabalho que o explosivo realiza, ou seja, das condições com que a energia desenvolvida pelo explosivo está sendo transmitida para a rocha.

Assim, sempre que realizarmos um desmonte com explosivos deveremos nos preocupar em reduzir a um mínimo o nível de vibrações. Estaremos, não só contribuindo para a preservação do meio ambiente mas, ao mesmo tempo, melhorando a eficiência do trabalho que realizamos.

## II. FATORES QUE AFETAM O NÍVEL DE VIBRAÇÕES

O nível de vibrações produzido pela detonação de uma carga explosiva é definido, como veremos adiante, por funções do tipo,

$$V = k \cdot \frac{Q^m}{R^n}$$

onde,

V = velocidade de vibração das partículas.

Q = carga explosiva detonada por espera mínima de 8 MS (oito mili-segundos).

R = distância do ponto da detonação ao ponto de medida das vibrações.

K, m e n = parâmetros característicos da rocha em observação, determinados experimentalmente.

Dessa forma, depois de obtidos os parâmetros  $k$ ,  $m$  e  $n$  bastará entrar com os valores de Q e R, na relação acima, para calcularmos o nível V de vibrações produzido pela carga Q a uma distância R do ponto da detonação.

Assim, vemos que, teoricamente, para diminuir o nível de vibrações V em um determinado ponto distante R do ponto da detonação teremos que, forçosamente, reduzir o valor Q da carga por espera. Mas, na realidade, existem outros fatores, além da carga Q e da distância R, que afetam o nível de vibrações produzido pela detonação de uma carga explosiva. Tais fatores regem as condições de transmissão, para a rocha, da energia desenvolvida pelo explosivo e, quando combinados adequadamente, reduzem em muito o nível de vibrações produzido pela detonação. Entre eles podemos citar:

1. *Explosivo* — A escolha do explosivo para desmontar uma rocha deve ser feita, sempre, em função das características mecânicas dessa rocha.

Os explosivos diferem em densidade, velocidade de detonação, energia, etc., e cada um se adapta melhor a determinado tipo de rocha.

Essa adaptabilidade explosivo-rocha foi quantificada pelo U.S. Bureau of Mines através da grandeza denominada "Impedância Característica", do explosivo ou da rocha, definida pelas relações:

$$I_{\text{exp.}} = \rho_{\text{exp.}} \times D$$

$$I_r = \rho_r \times C_p$$

onde,

$\rho_{exp.}$  = densidade do explosivo ( $g/cm^3$ )

$D$  = velocidade de detonação do explosivo (km/s)

$\rho_r$  = densidade da rocha ( $g/cm^3$ )

$C_p$  = velocidade da onda longitudinal na rocha dada em (km/s) e definida pela reação abaixo:

$$C_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho_r \cdot (1 + \mu) (1 - 2\mu)}} \quad \text{onde,}$$

$E$  = Módulo de Elasticidade da Rocha

$\mu$  = Coeficiente de Poisson.

A partir dessa grandeza, e com base em uma série de investigações o U.S. Bureau of Mines enunciou o seguinte princípio: "Quanto maior for a Impedância Característica do Explosivo ou quanto mais próximo esta estiver da Impedância Característica da Rocha maiores quantidades de energia do explosivo serão absorvidas pela rocha".

Portanto, com esse princípio temos a possibilidade de reduzir o nível de vibrações em uma detonação através da escolha do tipo adequado de explosivo.

2. *Fatores Geométricos* — São os parâmetros que definem um plano de fogo. Os principais são: Diâmetro dos furos, Afastamento dos furos, Espaçamento entre furos, Altura da bancada e Razão de Carregamento. Podemos calculá-los, a partir do tipo de explosivo escolhido, através de fórmulas empíricas e depois ajustá-los em função dos resultados observados nas primeiras detonações. Exercem grande influência no desempenho de um desmonte e podemos admitir, como regra geral, que: "A combinação dos fatores geométricos que proporciona a melhor fragmentação da rocha detonada é, seguramente, a que produz menores intensidades de vibrações nas vizinhanças".

3. *Esquema de Detonação* — A detonação dos diversos furos de mina, em um desmonte de rocha, tem sido feita com a técnica de micro-retardos que oferece resultados altamente positivos no que diz respeito a redução de vibrações. Os micro-retardos separam as frentes de pressão fazendo com que a fragmentação da rocha se dê por meio de uma série de eventos independentes.

Na prática observamos que a aplicação desta técnica intensifica a fragmentação da rocha e reduz apreciavelmente a dispersão de energia sob a forma de vibrações.

### III. CRITÉRIOS DE CONTROLE DE VIBRAÇÕES

Diversos estudiosos formularam critérios para relacionar a intensidade das vibrações com os danos causados a estruturas e instalações próximas ao local das detonações de cargas explosivas.

Todos colocaram o nível de vibrações em função da quantidade de explosivo detonada por espera (mínima de 8 MS) e da distância do ponto da detonação ao ponto de medição dessas vibrações.

Basicamente, são três os critérios: Critério da Aceleração de Partícula, Critério da Relação Energética e Critério da Velocidade de Partícula. Este último, cujo modelo matemático mais se aproximou dos resultados das investigações experimentais, tem sido adotado, com pequenas variações, no mundo inteiro.

1. *Critério da Aceleração de Partícula* — Introduzido com base em ensaios realizados pelo U.S. Bureau of Mines em 1942. Consiste em comparar-se a aceleração máxima das partículas de uma estrutura, dada pela relação

$$a_{\max} = 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot A$$

onde,

$f$  = frequência da vibração em (ciclos/s)

$A$  = amplitude da vibração em (mm),

com a aceleração da gravidade  $g$  (9,81 m/s<sup>2</sup>). Estabelece, tal critério, que valores da aceleração de partícula inferiores a 0,1 g são seguros, valores entre 0,1 e 1 g são indicativos de precaução e valores superiores a 1 g são danosos.

Este critério, apesar de impreciso por admitir o movimento vibratório como senoidal, é ainda aceito quando estudamos as vibrações a pequenas distâncias do ponto da detonação. Como exemplo podemos citar o dos fabricantes de Computadores Eletrônicos que especificam o valor de até 0,25 g como sendo seguro para seus componentes, quando submetidos a vibrações por detonações.

2. *Critério de Crandell ou da Relação Energética* — Caracterizado pela relação de proporcionalidade entre a energia de vibração transmitida às estruturas e os danos causados às mesmas. Crandell definiu esta relação como sendo

$$RE = (3,29 \cdot f \cdot A)^2$$

onde,

$f$  = frequência da vibração em (ciclos/s)

$A$  = amplitude da vibração em polegadas.

Estipula que valores de RE inferiores a 3 são seguros, valores entre 3 e 6 são indicativos de precaução e valores acima de 6 são danosos.

3. *Critério da Velocidade de Partícula* — Proposto na última década por suecos (Lanfors) e americanos (USBM), este critério considera a velocidade

de vibração das partículas como fator indicativo da segurança das estruturas vizinhas às detonações.

Estabelece que valores da velocidade de partícula menores que 5 cm/s são seguros, valores entre 5 e 10 cm/s indicam precaução e valores maiores que 10 cm/s são danosos.

Neste critério a velocidade de partícula é dada, segundo Langefors, pela relação

$$V = k \cdot \sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}}$$

onde,

V = velocidade de partícula em (mm/s)

Q = carga explosiva/espera (kg)

R = distância em metros (m)

K = constante da rocha = 400 para o granito sueco (hard Swedish rock).

e, segundo o U.S. Bureau of Mines, pela relação

$$V = H \cdot \left( \frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-B}$$

onde,

V = velocidade de partícula em (pol/s)

R = distância em pés (ft)

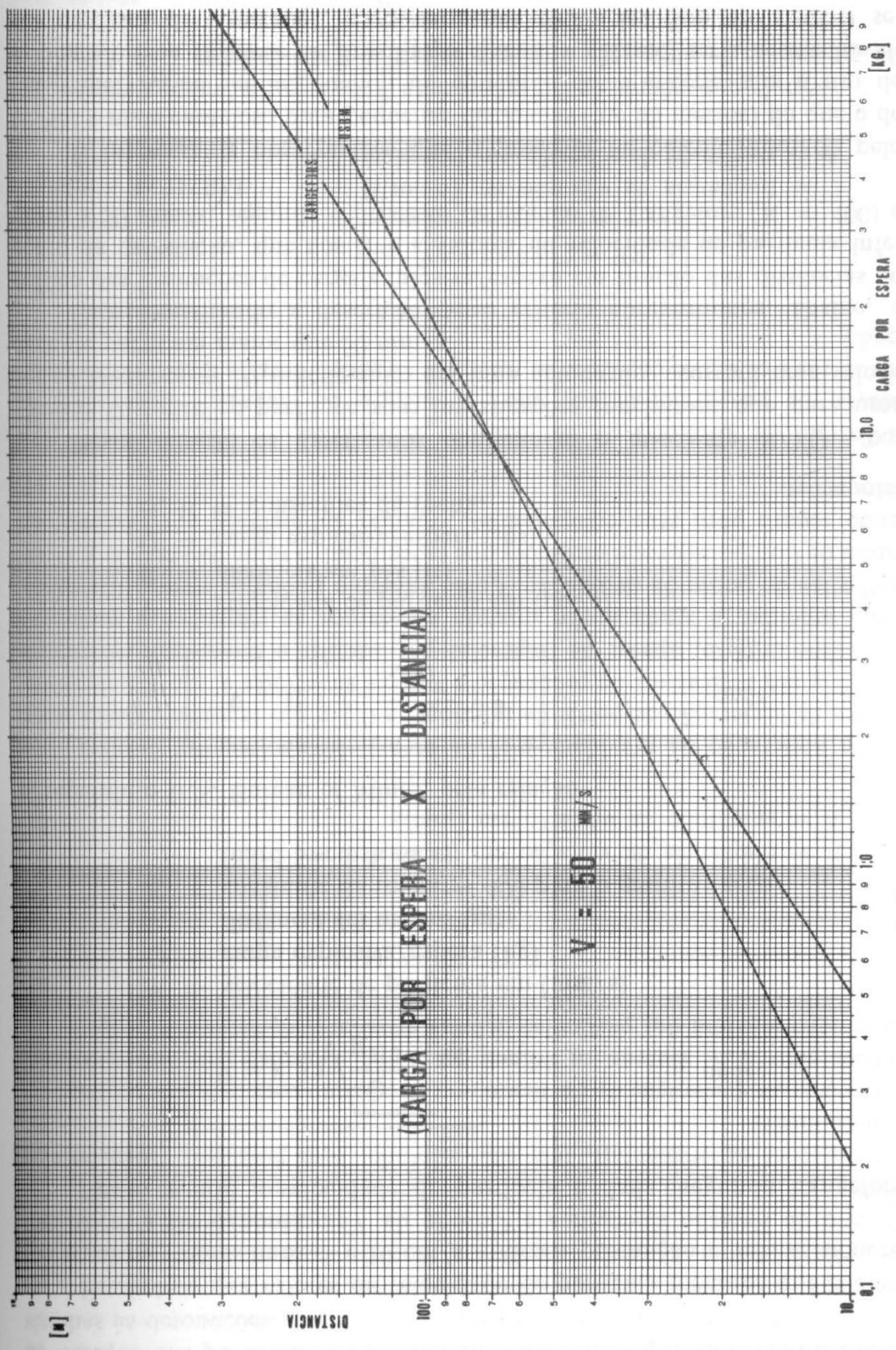
Q = carga explosiva/espera (lbs)

H, B = constantes da rocha.

Nessa relação os americanos denominam o quociente  $R/\sqrt{Q}$  por "Scaled Distance" e partir de suas investigações concluíram que para uma Scaled Distance = 50 dificilmente, em uma detonação, ocorrerá uma velocidade de partícula maior que 50 mm/s.

Complementando a descrição desse critério apresentamos, abaixo, o gráfico das limitações de carga explosiva/espera em função das distâncias ao ponto da detonação, que nos leva a valores da velocidade de partícula inferiores a 50 mm/s, segundo o processo de cálculo de Langefors (K = 400) e também o do USBM.

É interessante observarmos que o processo de cálculo adotado pelo USBM é mais cauteloso para pequenas distâncias (até 65 metros) do que o de Langefors. Assim sendo, quando da aplicação deste critério sem o uso de sismógrafo (sua validade no Brasil será discutida adiante) seria aconselhável, por medidas de segurança, para pequenas distâncias (até 65 metros) seguirmos a curva do USBM e para distâncias maiores seguirmos a curva de Langefors.



#### IV. APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DA VELOCIDADE DE PARTÍCULA NO BRASIL

A validade da aplicação do Critério da Velocidade de Partícula no Brasil pode ser questionada, basicamente, em dois pontos:

- 1º) Seria o limite  $V = 50$  mm/s seguro para nossas estruturas?
- 2º) Seria o limite  $V = 50$  mm/s seguro para nossas rochas?

Com relação ao primeiro acreditamos que se o nível de  $V = 50$  mm/s é seguro, para estruturas em outros países, também o seja para as nossas uma vez que nossas construções são executadas, de modo geral, de acordo com Normas Técnicas internacionais. Com relação ao segundo sabemos que nossas rochas não possuem, em média, a mesma qualidade que, por exemplo, o granito sueco. Assim, acreditamos que se deva fazer para cada rocha, onde tenhamos que executar serviços de desmonte com explosivos, uma avaliação prévia de sua qualidade. Essa avaliação pode ser feita, por exemplo, a partir da curva de resistência a compressão do material. Sabe-se que a deformação radial de um material ( $\epsilon_r$ ) pode ser colocada em função da velocidade radial de partícula, a que ele está submetido, e da velocidade de propagação da onda longitudinal, pela relação:

$$\epsilon_r = \frac{V_r}{C_p}$$

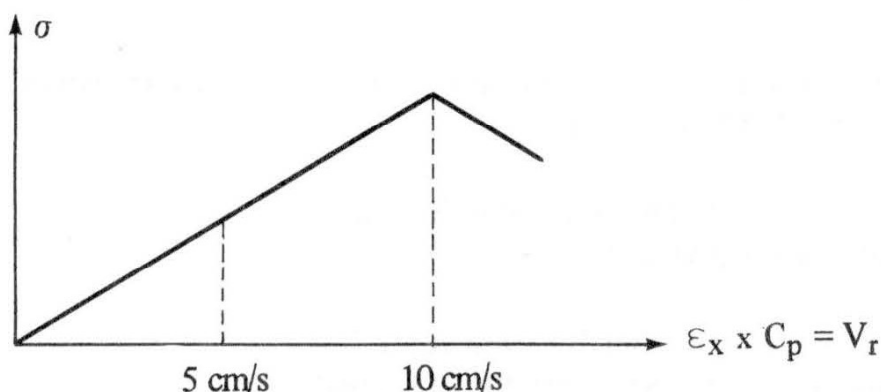
onde,

$\epsilon_r$  = deformação radial do material

$V_r$  = velocidade radial de partícula

$C_p$  = velocidade de propagação da onda longitudinal, conforme pag. 4.

Assim, conhecendo a curva de resistência de uma determinada rocha poderemos relacionar sua resistência a compressão com a velocidade radial de partícula,





e avaliar a velocidade de partícula segura com a qual poderemos realizar nossas detonações.

Finalizando, restaria-nos verificar a questão da tabela carga por espera  $\times$  distância. Podemos utilizar, com segurança, as tabelas de carga por espera  $\times$  distância calculadas por LANGEFORS ou pelo USBM com base nas características de outras rochas, ao que nos parece, mais elásticas? Acreditamos que sim. Em nosso trabalho de campo temos feito registros sismográficos de inúmeras detonações, nos mais variados tipos de rocha, e até hoje não observamos valores que ultrapasassem o valor de  $V = 50$  mm/s nos casos onde a carga explosiva foi calculada em função da distância pelas mencionadas tabelas.

## V. CONCLUSÕES

1. A observação dos níveis de vibrações em um desmonte de rocha pode nos dar informações sobre o desempenho do explosivo ou sobre a eficiência, em geral, do trabalho que realizamos.
2. Quando os níveis de vibração observados estão ultrapassando os limites considerados seguros, para determinada rocha, antes de reduzirmos a carga por espera devemos verificar se o explosivo escolhido é adequado para a rocha e se o nosso Plano de Fogo está bem dimensionado.
3. O Critério da Velocidade de Partícula pode ser aplicado às rochas brasileiras desde que façamos uma avaliação prévia, em função da qualidade da rocha, do nível em que vamos limitar as vibrações.
4. As tabelas de limitação de carga por espera em função da distância, confeccionadas por Langefors ou pelo USBM com base nas características de rochas elásticas, podem ser aplicadas em nossos trabalhos de desmonte de rocha uma vez que nossas rochas, normalmente, oferecem condições desfavoráveis de propagação de ondas.

## VI. BIBLIOGRAFIA

GAMA, CD. "Otimização do Arranque de Rochas com Explosivos"  
Memória MI-4. LUANDA 1971

GAMA, CD. "Curso de Dinâmica das Rochas"  
Notas de Aula. SÃO PAULO 1975

LEET, LD. "Vibrations from Blasting Rock"  
Harvard Univ. Press. MASSACHUSETTS 1960.

LEET, LD. "Effects Produced by Blasting Rock"  
Hercules Incorporated. 1971.

GUSTAFSSON, R. "Swedish Blasting Technique"  
SPI, Gothenburg, Sweden 1973.

STAGG-ZIENKIEWICZ. "Mecanica de Rocas en la Ingenieria Practica"  
Editorial Blume. MADRID 1970.

DUVALL-DEVINE. "Avoiding Damage by Air Blasts and Ground Vibra-  
tions from Blasting". in Surface Mining.  
E. Pfeider. NEW YORK 1972.

## DEBATES

*PERGUNTA* — DO PROF. João de Deus de Oliveira  
Universidade Federal de Pernambuco.

Em que se baseiam esses dados experimentais obtidos que V. Sa. explanou na sua tese. Estes dados são meramente dados estatísticos dos países em apreço, ou foram analisados aqui mesmo em São Paulo? (No grande Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo).

*RESPOSTA* — Este gráfico que apresentamos foi baseado nas pesquisas desenvolvidas tanto por suecos, quanto por americanos em rochas de seus países, e pelos resultados que nós vimos eles se aproximam de certa forma, apenas com variações pequenas. No Brasil, nós tivemos oportunidade de verificar a validade desse gráfico. Fizemos ensaios não só em São Paulo, mas na Bahia, em Paulo Afonso, e no Sul, Rio Grande do Sul, Paraná, Triângulo Mineiro e de maneira geral, podemos afirmar que os resultados medidos nessas experiências sempre resultaram em níveis de vibração inferiores aos previstos pelos gráficos determinados por americanos e suecos. Foi com base nessas experiências, que então concluímos a viabilidade da aplicação dessa tabela no Brasil, sem a utilização de sismógrafos.

*O COORDENADOR* — Dr. Carlos Diniz da Gama

Apenas em relação à pergunta sobre os trabalhos desenvolvidos no IPT, relativa à dinâmica. Os parâmetros mecânicos que caracterizam o comportamento dinâmico são medidos através de ensaios específicos. Nomeadamente, os ensaios de determinação da velocidade mencionados pelo conferencista e também aos parâmetros Alfa E Beta de atenuação das ondas através do maciço rochoso existem diversas determinações feitas não só em ambiente urbano, mas também em pedreiras.

Em relação a essa pequena objeção sobre o tipo de rocha, de maneira nenhuma se pode concluir que as rochas brasileiras são piores do que as suecas ou vice-versa. Os ambientes em que se localizam a maior parte dos desmontes de rocha que tenham levantado problemas de medição, de vibrações, são caracterizados ou por capeamentos, portanto massas de intemperismo, ou maciços basálticos, onde normalmente se constroem as grandes barragens brasileiras, de forma que essas rochas, segundo nossas determinações, possuem não só velocidade sônica menor que o famoso granito sueco, mas também coeficientes de atenuação inferior ao dessas rochas suecas. Daí, a conclusão muito certa de que ao utilizarmos os critérios de carga-distância válidos nos EE.UU. ou na Suécia, com implicação no Brasil, poderemos considerar que para as mesmas distâncias os coeficientes de atenuação das rochas, aqui no

Brasil, nos asseguram níveis de vibração inferiores àqueles que, na Suécia, seriam susceptíveis de causar dano estrutural.

Não havendo mais perguntas, agradecemos mais uma vez ao Eng. Corsini e damos por encerrada a sessão. Teremos agora um intervalo.

Obrigado