

Tecnológica Vol. I, N. 2, Guayaquil, Mayo 1977
y Revista Latinoamericana de Geotecnia, Vol.
IV, N. 2, Caracas, Abril - Junio 1977

PELIGRO DE LAS VIBRACIONES DEBIDAS A LAS EXPLOSIONES

Por: Gianfranco Perri

RESUMEN.—

El presente trabajo constituye un intento de presentar, con una visión sencilla y concisa, los actuales conocimientos teóricos y prácticos, sobre el problema de las vibraciones que se transmiten en el terreno, debido a las explosiones de una carga. En particular, se examinarán los aspectos de este fenómeno, ligados a los efectos que las vibraciones producen sobre las estructuras, con el fin de presentar criterios prácticos que puedan ayudar al técnico que encuentra en su trabajo la necesidad de emplear notables cargas de explosivos.

1.— NATURALEZA DEL PROBLEMA.

Entre los diversos efectos que una explosión crea en el medio circundante al lugar de la misma, se examinan los producidos por las vibraciones que siempre se presentan y propagan al momento de la explosión de una carga.

Se trata de establecer la naturaleza y magnitud de tales vibraciones, para, luego, analizar los diferentes factores que, sobre tal naturaleza y magnitud, tienen la mayor influencia, y para buscar, esencialmente, las relaciones seguramente existentes entre la magnitud de las vibraciones, la cantidad de carga explosiva, y la distancia entre el lugar de la explosión y el lugar donde se considera el efecto de la misma. El otro aspecto del problema es el de analizar los efectos que las vibraciones del terreno producen sobre las estructuras existentes, con el fin de determinar el grado de vibración del terreno que puede ser tolerado por los diferentes tipos de estructuras, sin sufrir daño.

Sobre estas bases se han desarrollado estudios de diferentes autores, que han dado diferentes criterios, más o menos prácticos, para la determinación de la distancia mínima y carga máxima de seguridad en las explosiones cercanas a obras. Sobre la base de estos estudios y estas deducciones, se han desarrollado, en diferentes países, reglamentaciones y normas que establecen los valores límites de la carga en función de la distancia.

Manuscrito recibido el 7 de Diciembre de 1976.

Dr. Ing. Gianfranco Perri, profesor de Mecánica de Rocas y Geotecnia, de la ESPOL, y profesor del Instituto de Investigaciones y Estudios Avanzados de la Universidad de Guayaquil.

Paralelamente a todo esto y debido a las exigencias siempre más fuertes de emplear carga explosiva grande y en lugares cercanos a construcciones (hoy en día, es común el uso de carga de explosivos para diferentes trabajos, en pleno centro urbano), se han desarrollado estudios y experimentaciones, con el fin de encontrar técnicas particulares de voladura que permitan, al mismo tiempo, empleo de cargas explosivas fuertes y vibraciones muy reducidas de los terrenos circundantes a la explosión (prácticamente, se trata del uso de la técnica de los retardos o micro-retardos).

2.- CARACTERISTICAS DE LAS VIBRACIONES.

En la explosión de una carga puesta entre la roca, se obtiene, sucesivamente a partir de la carga:

Una zona en la cual la acción de los gases desarrollados destruye la estructura del sólido, transformándolo en polvo.

Una zona en la cual, la roca, solicitada más allá de su límite de rotura, está sujeta a una notable fracturación; y,

Una zona de deformaciones permanentes.

A una distancia mayor, las deformaciones producidas son menores que el límite de elasticidad y la ola explosiva se transforma en olas elásticas que se propagan en el medio, atenuándose en la distancia.

El movimiento oscilatorio de las partículas del terreno, producido por las olas sísmicas, es definido, en cada punto, como un vector de amplitud y orientación variable en el tiempo, vector que representa el desplazamiento, o la velocidad, o la aceleración del punto.

Es prácticamente imposible deducir, teóricamente y de manera exacta, las características de las vibraciones producidas por una explosión en un determinado medio. Esencialmente porque, primero, todavía no es conocido perfectamente el mecanismo de las explosiones; y, segundo, porque las propiedades físicas y elásticas de las rocas son, generalmente, variables y, además, sus distribuciones en el espacio y sus valores son, a menudo, inciertos.

Por todo esto, los estudios de las vibraciones en el terreno son efectuados, esencialmente, sobre bases experimentales; o sea, midiendo con instrumentos adecuados y registrando los componentes del desplazamiento, o de la velocidad, o de la aceleración, y obteniendo los llamados sismogramas o vibrogramas, y oscilogramas (Fig. 1), que dan, también, los valores de las frecuencias de las vibraciones.

Dado que, para pasar desde la explosión a los daños que ella puede provocar, se tiene que usar un proceso muy aproximado, que puede ser descrito solamente en líneas generales, para el estudio de las vibraciones se justifica plenamente, la adopción de un esquema muy simplificado, el cual considera las vibraciones como

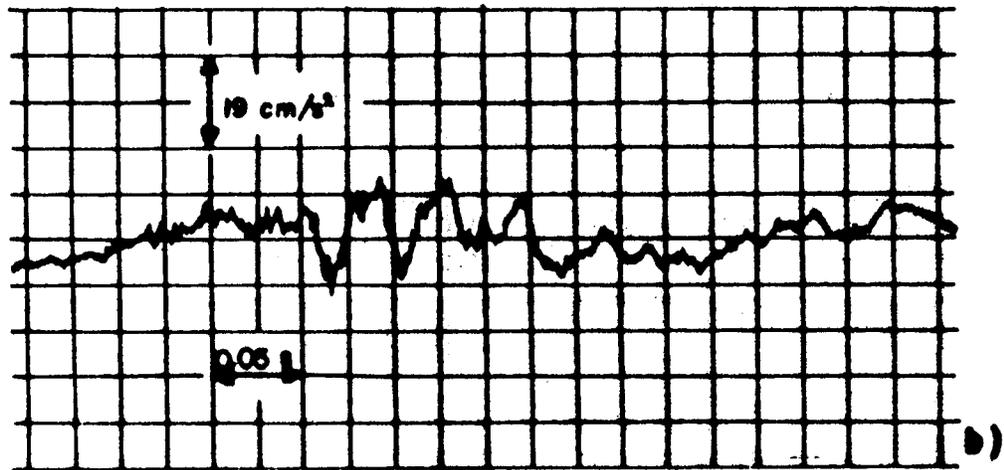
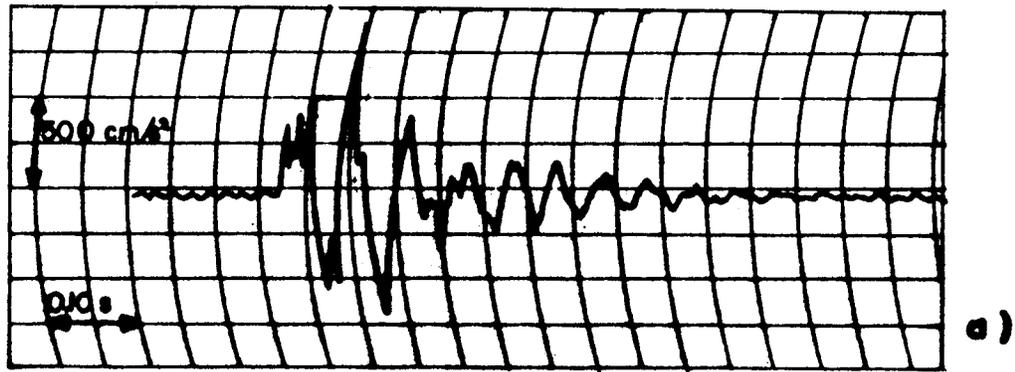


Fig. 1 (a) Sismograma obtenido en pruebas sobre terreno margoso, relacionado con la explosión de 0.1 Kg de carga a una distancia aproximada de 3 m. Los valores obtenidos son: $a_0 = 780 \text{ cm/s}^2$ y $f = 20 \text{ c/s}$.

(b) Sismograma relacionado con una explosión en una cantera, obtenido a una distancia aproximada de 400 m. Los valores obtenidos son $a_0 = 11 \text{ cm/s}^2$ y $f = 25 \text{ c/s}$.

sinusoidales.

Se puede de esta manera expresar, fácilmente, en términos analíticos, el fenómeno. Para el desplazamiento A , se obtiene:

$$A = A_0 \text{ sen } (2 \pi f t) \quad (1)$$

en donde,

t = tiempo

f = frecuencia de las vibraciones

Fórmulas similares son válidas para la velocidad V y la aceleración a . En consecuencia, A_0 , V_0 , a_0 resultan ligados por las conocidas relaciones:

$$V_0 = 2 \pi f A_0 \quad (2)$$

$$a_0 = 2 \pi f V_0 = 4 \pi^2 f^2 A_0 \quad (3)$$

Esto quiere decir que si se mide , o se conoce , dos de los cuatro parámetros que caracterizan una vibración, se puede deducir los otros dos, y, para tal fin, se ha construido nomografías (Fig. 2) que ilustran las relaciones entre frecuencia, aceleración, velocidad y amplitud, donde las cantidades buscadas se encuentran trazando una línea recta.

La frecuencia de las vibraciones es función, principalmente, de las características del medio en el cual se propagan, y parece que, a cada formación rocosa, corresponde una frecuencia característica.

Los valores numéricos de la frecuencia varían desde tres ciclos por segundo, a algunos centenares; y, medianamente, desde 5 a 80 c/s, donde vibraciones a baja frecuencia se encuentran en terrenos incoherentes y vibraciones a alta frecuencia, en rocas compactas.

La amplitud de las vibraciones es función, principalmente, de la cantidad de explosivo y de la distancia al punto de explosión, a más de las características del medio en el cual se propagan.

Por supuesto, la amplitud resulta ser directamente proporcional a la cantidad de carga e inversamente proporcional a la distancia, mediante relaciones que no resultan lineales. Si se considera la naturaleza del terreno, la amplitud es mayor, en iguales condiciones, sobre un terreno incoherente que sobre uno compacto.

Para lo que se refiere a la velocidad y aceleración, estando estas ligadas, analíticamente, a la frecuencia y amplitud, es fácil deducir el comportamiento correspondiente.

Es interesante notar que, siendo la frecuencia y la amplitud influenciadas de manera opuesta por la naturaleza del medio, transmisor; y, siendo la velocidad proporcional al producto de amplitud y frecuencia, parece que la velocidad fuese

ticos, el
)
 ón a. En
 ones:
)
)
 rámetros
 tal fin, se
 ecuencia,
 uer
 racterís-
 n rocosa,
 segundo,
 es a baja
 ecuencia,
 ntidad de
 sticas del
 cantidad
 s que no
 mayor, en
 mpacto.
 ligadas,
 miento

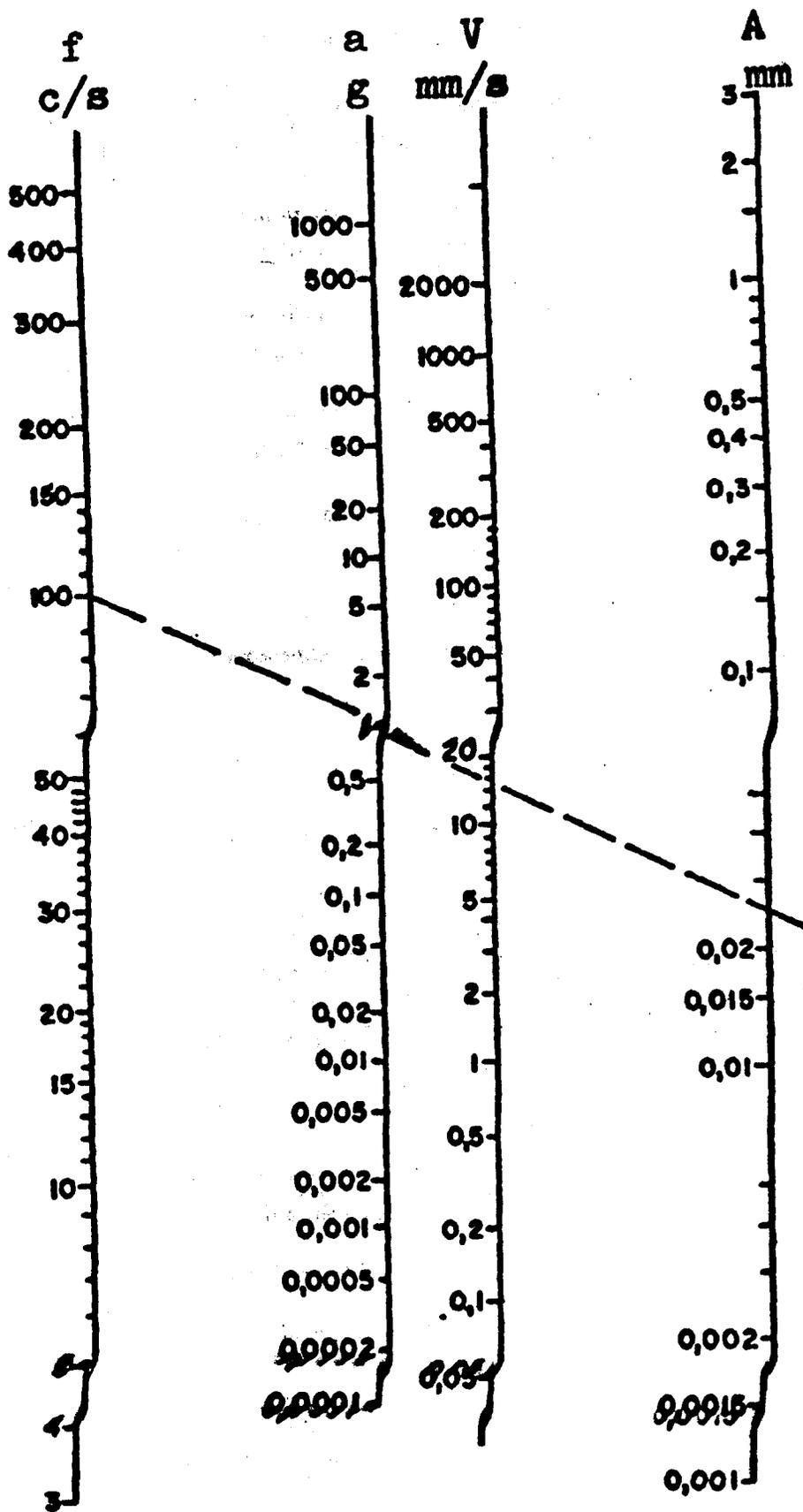


Fig. 2 Nomografía que relaciona la frecuencia f , la aceleración a , la velocidad de vibración V y la amplitud A . Ejemplo: Para $f = 100$ c/s y $A = 0.025$ mm, la línea recta trazada nos indica que $V = 15$ mm/s y $a = 1$ g.

adas de
 locir
 d fu

relativamente independiente de la naturaleza de los terrenos.

Diferentes autores han intentado, sobre la base de datos experimentales expresar de manera analítica, o sea mediante fórmulas, las relaciones antes mencionadas, existentes entre las características de las vibraciones (f , A_0 , V_0 , a_0) y la distancia de la explosión y cantidad de carga, teniendo, a su vez, en cuenta la diferente naturaleza de las formaciones rocosas interesadas.

Siguen algunas de estas relaciones, donde la carga explosiva Q está dada en Kg, la distancia R en m, la frecuencia en c/s, A_0 en mm, V_0 en cm/s, y a_0 en cm/s².

$$A_0 = K Q^{2/3} (0.03e^{-0.00472R} + 0.00043) \quad (4)$$

es la relación del U. S. Bureau of Mines (1942), que resume el resultado de una larga serie de medidas de vibraciones producidas en la superficie por explosiones de cantera ($e = 2,718$).

Tal fórmula es aplicable sólo entre los siguientes valores de Q y R :

Q		R		
4.5	—	30	—	300
45	—	30	—	1800
450	—	150	—	1800

El coeficiente K vale 1 para cobertura detrítica hasta 10 o 15 metros de profundidad, 3 para cobertura más profunda, y 0.1 para roca compacta.

En cambio, para explosiones muy profundas, la fórmula propuesta es

$$A_0 = 0.31 (Q/R)^{1/2} \quad (5)$$

que tiene validez en la formación rocosa en donde se produce la explosión, y entre los límites para Q , de 9 a 90 y para R , de 90 a 450.

Según Morris (1950), que propone una fórmula similar:

$$A_0 = K (Q/R)^{1/2} \quad (6)$$

el coeficiente K vale, en base a pruebas experimentales, desde 0.35 para roca compacta, hasta 4.5; con un valor mediano, entre todas las pruebas, de 1.2.

Según Crandell (1949), en base a datos experimentales obtenidos en excavaciones de túneles, vale la relación:

$$A_0 = K (Q/R)^2 \quad (7)$$

que tiene validez para Q de 0.5 a 45 y R de 7 a 75. K varía entre 1 y 4, según que la roca sea más compacta o detrítica.

En realidad, la relación originaria de Crandell no es expresada en función de A_0 , sino de la razón a^2/t^2 , que él juzga como característica de la capacidad de daño.

Por las mismas razones, existen en la literatura toda una serie de relaciones que están expresadas en función de la velocidad de las partículas.

El ruso Kirillov (1963), para evaluar la velocidad de las vibraciones del terreno, nombra una fórmula en la cual V_0 es independiente de la naturaleza del medio rocoso de propagación:

$$V_0 = (Q/R^3)^{1/2} \quad (8)$$

Ambraseis y Hendron (1967) dan fórmulas para estimaciones de velocidad de las partículas, que tienen validez para voladura de retardo y que derivan de la elaboración de numerosos datos experimentales recogidos en diferentes canteras de explotación:

$$V_0 = 210 (R/Q^{1/3})^{-1.6} \quad (9)$$

para el caso en que $R/Q^{1/3}$ sea mayor de 4, o si no

$$V_0 = 1170 (R/Q^{1/3})^{-2.8} \quad (10)$$

Por supuesto, no todos los autores están de acuerdo sobre el hecho de que la velocidad de las vibraciones sea independiente de las características del medio rocoso; y, por ejemplo, Medvedev (1963) da la siguiente relación:

$$V_0 = \left(\frac{gQ}{d c T R^3} \right)^{1/2} 7.5 \times 10^4 \quad (11)$$

deducida desde un estudio sobre el terreno con explosiones de altas cargas subterráneas en minas (1000 - 20000 Kg).

En la fórmula:

- g = gravedad en cm/s^2
- d = peso específico de la roca en Kg/m^3
- c = velocidad de propagación de las olas elásticas transversales en m/s.
- T = período de las vibraciones en segundos.

3.— EVALUACION DEL DAÑO SOBRE LAS ESTRUCTURAS.

Se trata ahora de afrontar el objeto más importante del problema, o sea, se trata de establecer si una vibración, que se supone conocida, causa daño o no a una determinada estructura. Todavía, sin embargo, no existe un método de cálculo para determinar analíticamente el efecto de las vibraciones, teniendo en

cuenta los numerosos factores que intervienen en el fenómeno (intensidad de las vibraciones, tipo de estructura, tensiones pre-existentes, geometría, etc.).

Por esta razón, todos los estudios hechos en este campo han sido, esencialmente, experimentales y con el intento de establecer criterios empíricos de daño, basados en la asunción de determinados índices característicos de las vibraciones, y relacionándolos con los daños eventualmente producidos. El problema ha sido, entonces, el de individualizar cuál de los diferentes parámetros de una vibración (A_0 , f , V_0 , a_0) está mejor relacionado con los daños que se producen en una estructura.

En el Boletín 656 del U. S. Bureau of Mines, los autores Nicholls, Johnson y Duvall (1970), presentan un estudio completo sobre el problema de los efectos de las vibraciones de explosiones sobre las estructuras. Tales autores, por el examen de todos los estudios hechos en el campo, y con numerosos datos experimentales recogidos por ellos mismos, concluyen que el mejor parámetro es la velocidad de vibración de las partículas del terreno.

Para llegar a esta conclusión, se ha hecho un estudio estadístico sobre los datos publicados junto a datos recogidos en los experimentos; en particular, se ha considerado los datos publicados de Thoenen y Windes (1942); los de Langefors, Kihlstrom y Westerbert (1958); y los de Edwards y Northwood (1960).

Los resultados de las mediciones experimentales están representados gráficamente sobre un plano de ejes cartesianos. Sobre el eje vertical están los valores medidos de la amplitud de las vibraciones; y, sobre el eje horizontal, los valores medidos de las frecuencias de las vibraciones.

Los diferentes resultados están agrupados en tres categorías:

- a) daño grave (grandes grietas),
- b) daño ligero (agrietamiento), grietas pequeñas; y,
- c) daño no perceptible.

Sobre esta representación de los datos, se ha trazado la línea interpoladora y se ha calculado la desviación estándar. La línea interpoladora con pendiente -1 es la línea de la velocidad constante, la línea con pendiente -2 es la de aceleración constante, y la de pendiente 0 es la de la amplitud constante. Los datos de Thoenen y Windes dan, para la línea de daño grave, una pendiente de -1.22 y, para la línea de daño ligero, una pendiente de -2.00 ; todos con una dispersión, o sea con una desviación estándar muy elevada. Los datos de Langefors, Kihlstrom y Westerbert dan, para la línea de daño ligero, una pendiente de -0.93 con una dispersión bastante pequeña. Finalmente, los datos de Edwards y Northwood dan una pendiente de -0.64 , para daño grave, y una de -0.83 , para daño ligero, con una dispersión intermedia entre las dos precedentes.

En la Fig. 3 están resumidos todos los datos antes mencionados, y deducidos mediante estudio estadístico; el resultado del conjunto es que, tanto la línea de daño grave, como la de daño ligero, tienen una pendiente de -1.00 .

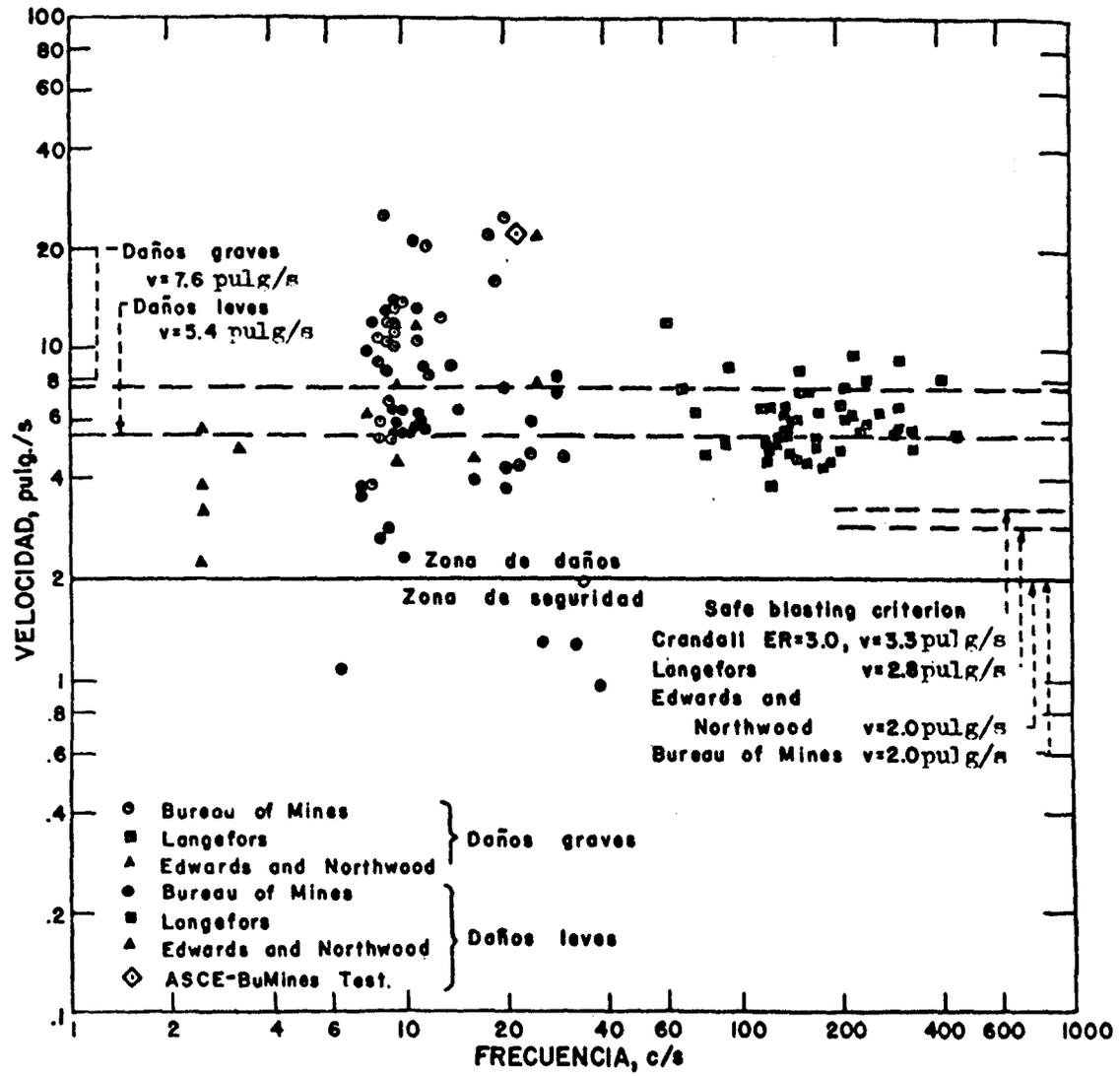


Fig. 3 Relación entre la amplitud de las vibraciones y la frecuencia de las mismas. Aquí se dá una representación conjunta de todos los datos examinados por el BUREAU OF MINES y una recomendación sobre el criterio de seguridad.

Esto es lo que hace decir que el parámetro de las vibraciones que mejor se relaciona con los daños producidos sobre estructuras, es la velocidad de las partículas del terreno, aún más que su aceleración o su desplazamiento.

Por lo que se refiere a los valores numéricos correspondientes a la velocidad, se calcula que, la línea de daño grave, es la línea de velocidad igual a 7.6 pulg/s.; y, la de daño ligero, es la de velocidad igual a 5.4 pulg/s. Si se divide todo el campo en dos zonas —una de seguridad, como ha sido propuesto por Douwall y Fogelson—, se puede asumir la velocidad de 2 pulg/s. (Fig. 4), como la velocidad razonablemente de separación entre las dos zonas.

En efecto, los estudios antes mencionados muestran que el 94 o/o de los casos de daño ligero, y todos los casos de daños graves, han sucedido para valores de la velocidad de vibración de las partículas de terreno, mayores de 2 pulg/s.

Para fines prácticos, el paso siguiente es aquél de poner directamente en relación los niveles de daño, con la cantidad de carga y distancia desde el lugar de la explosión; estos últimos son, en efecto, los datos más directamente medibles y evaluables. A tal fin, puede ser suficiente emplear una de las relaciones existentes (8, 9, 10, 11) entre velocidad de las vibraciones, carga y distancia.

Ambrasels y Hendron, por ejemplo, dan una nomografía que ilustra la variación de la velocidad radial máxima de las partículas, con la distancia y la carga de explosivos (Fig. 5).

Otros autores, como Langefors y Kihlstrom, en cambio, sobre una nomografía que lleva los mismos ejes, trazan las líneas de igual valor de la razón $Q/R^{3/2}$, que ellos llaman *nivel de carga*, y que toman como parámetro práctico para la evaluación del daño (Fig. 6).

Las relaciones entre el nivel de carga y los daños observados, se dan en la tabla que sigue, en donde aparece, además, una relación no determinada concluyentemente, entre el nivel de carga y la velocidad de vibración en roca dura:

$Q/R^{3/2}$ (Kg/m ^{3/2})	V (cm/s)	Descripción del daño en casos normales.
0.008	3	Caída del yeso, no hay grietas.
0.015	5	No hay evidencia de grietas.
0.03	7	No hay grietas notables.
0.06	10	Grietas insignificantes.
0.12	15	Grietas.
0.25	22	Grandes grietas.
0.50	30	Caída de piedras en galerías.
1.000	—	Grietas en las rocas.

Los científicos del Bureau of Mines, en el trabajo antes mencionado (1970), opinan que, el primero y mejor método para evaluar el valor de la velocidad de

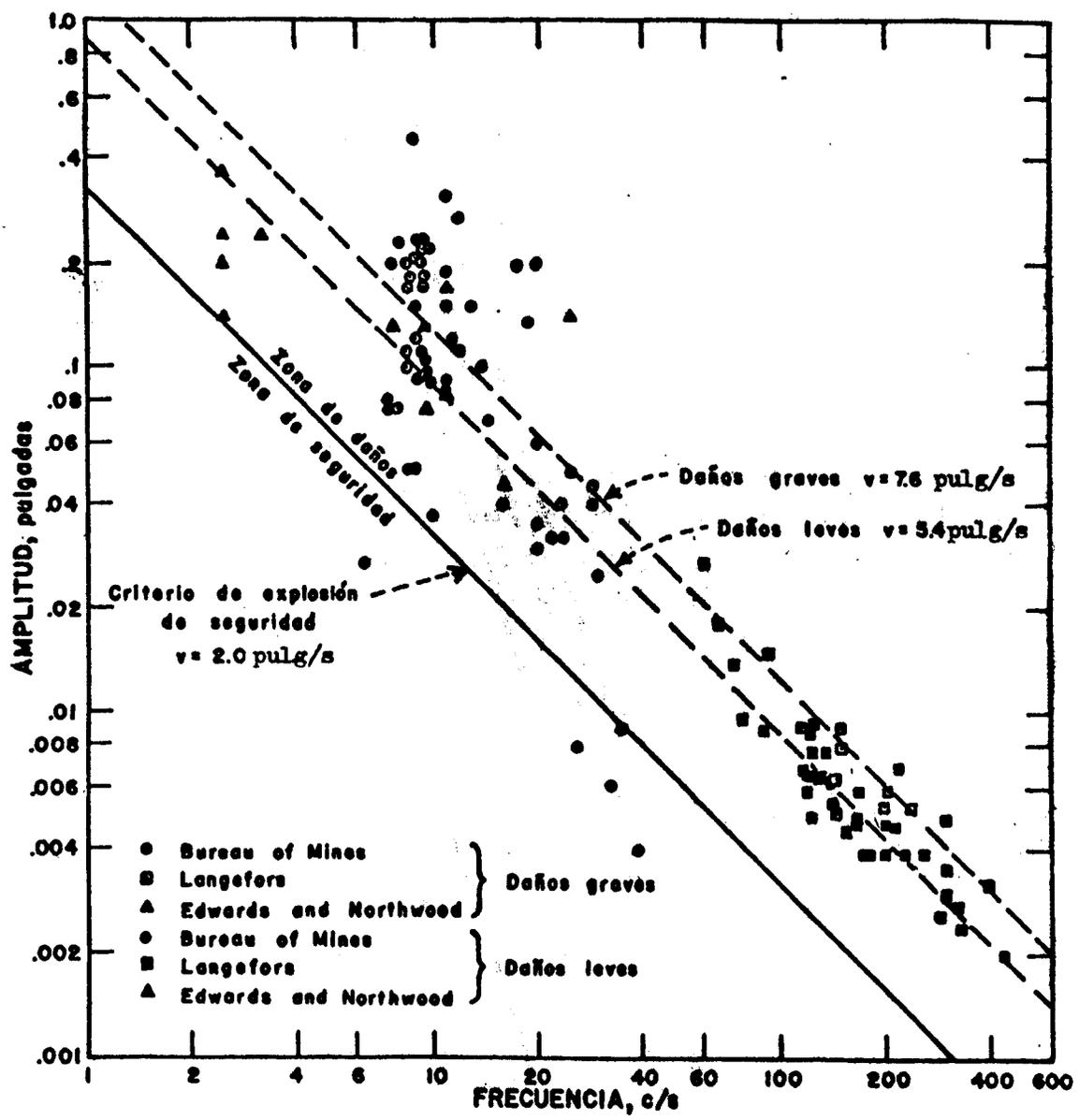


Fig. 4 Relación entre la velocidad de vibración y la frecuencia.

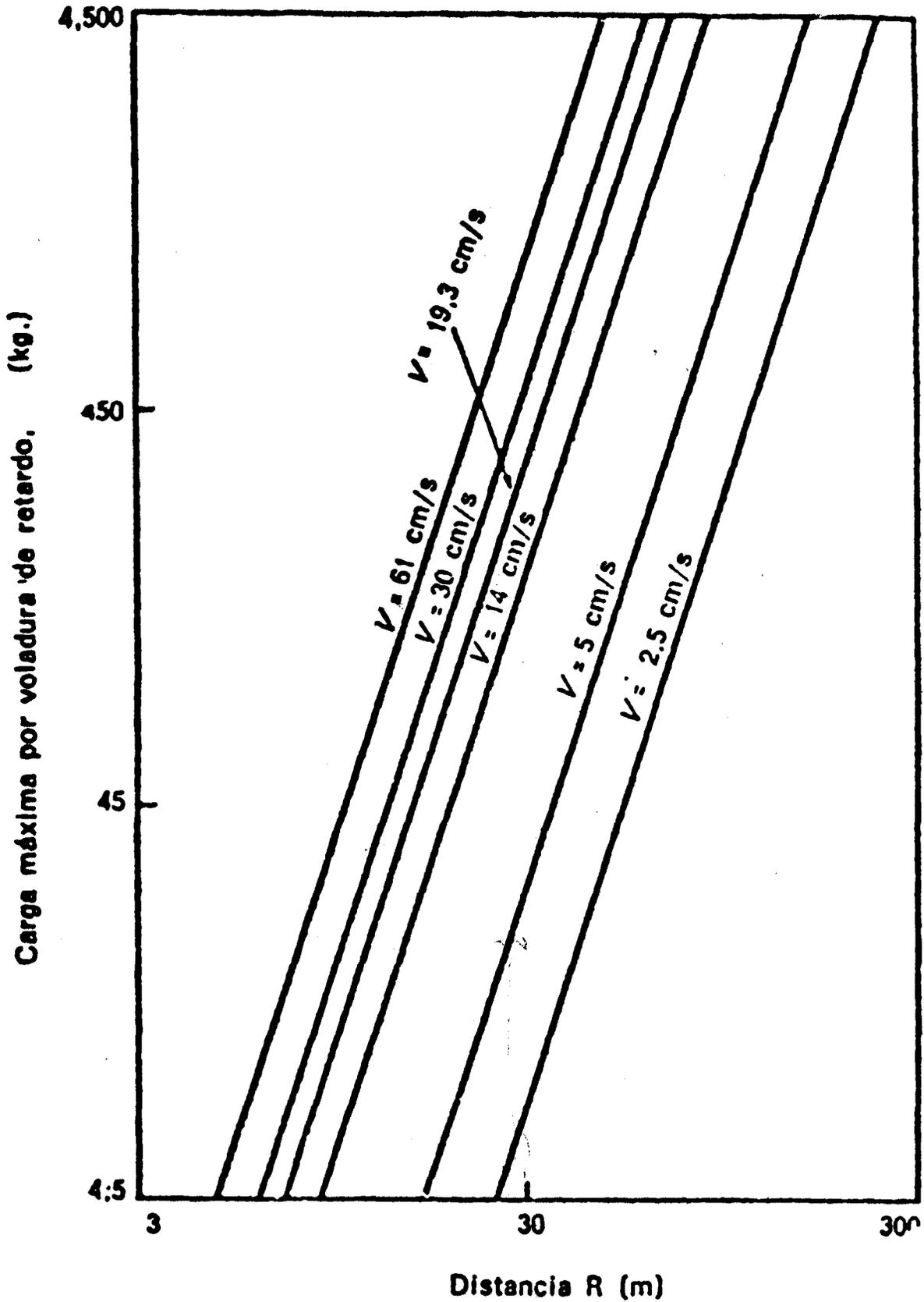


Fig. 5 Variación de la velocidad radial máxima de las partículas con la distancia y las carga de explosivos.

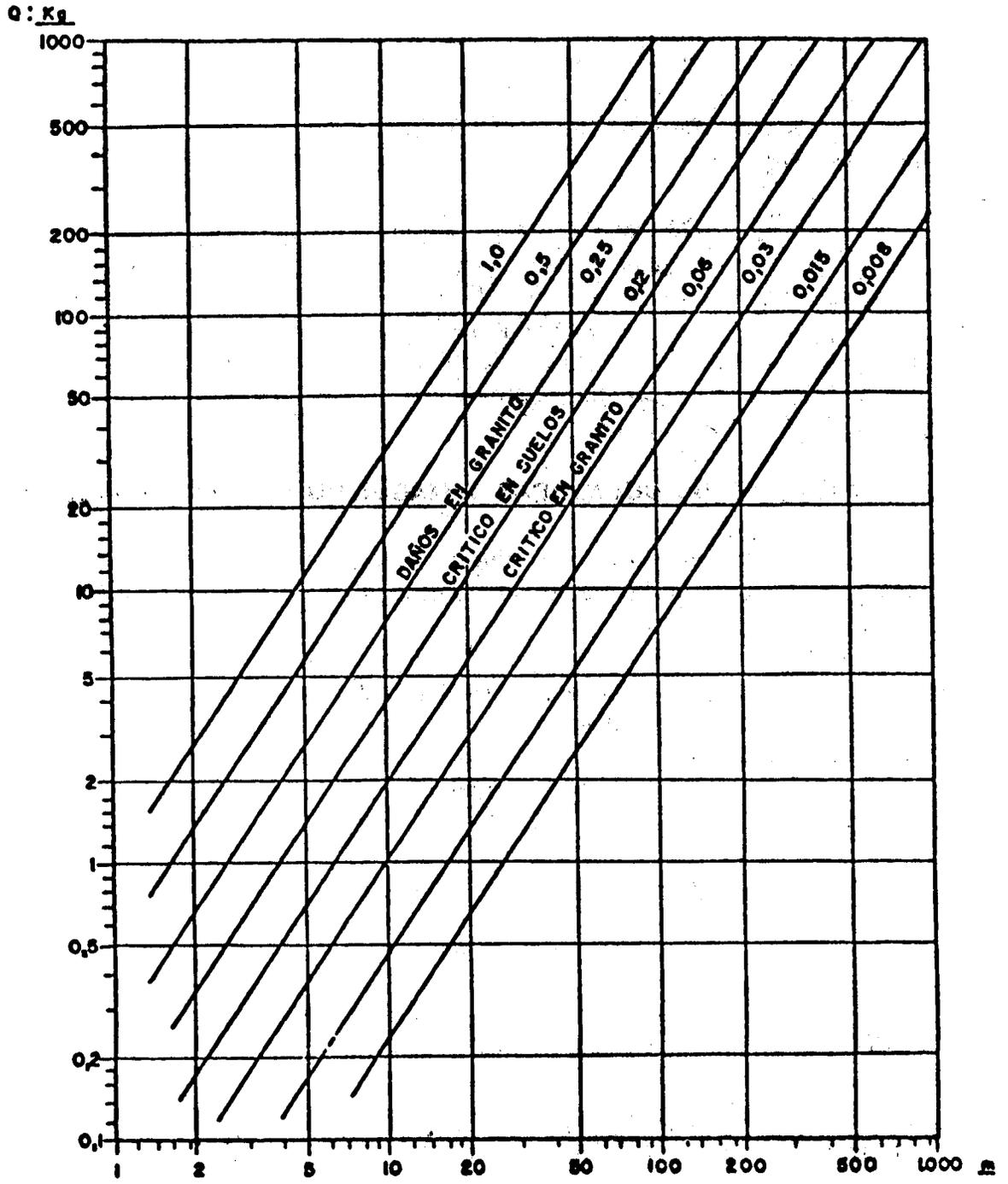


Fig. 6 Carga Q en función de la distancia R , para distintos niveles de carga $Q/R^{3/2}$ entre 1.0 y 0.008.

vibración a diferentes distancias y con diferentes cantidades de cargas, es el de emplear la debida instrumentación para determinar, en cada caso específico, los valores de los coeficientes numéricos que componen las relaciones analíticas entre velocidad, carga y distancia.

El segundo método aconsejado es utilizar los datos experimentales existentes, que han elaborado construyendo una serie de nomografías, en las cuales están indicadas las relaciones entre velocidad de vibración y razón $Q/R^{1/2}$ para diferentes tipos de rocas.

En la Fig. 7 están representados, conjuntamente, todos los datos experimentales tomados en cuenta en el estudio de ellos, y se ha trazado, además, una línea que representa la envolvente límite de todos los datos; es así que los autores pueden afirmar que, un valor de $50 \text{ lb/pla}^{1/2}$ para $Q/R^{1/2}$, representa un límite arriba del cual son muy pocas las probabilidades de encontrar niveles de vibraciones peligrosas para las estructuras, niveles que se excedan sobre el límite de 5 cm/s para la velocidad de vibración.

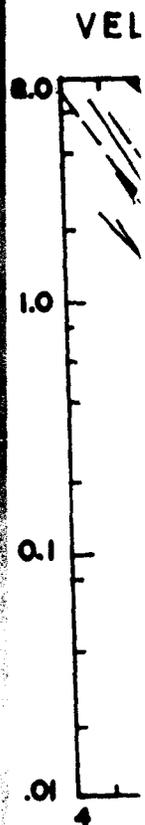
4.— TECNICAS DE VOLADURAS Y MAGNITUD DE LAS VIBRACIONES.

Hasta ahora no se ha hecho ninguna observación acerca de las técnicas de voladuras, sino, simplemente, se ha tomado en cuenta la cantidad de carga explosiva.

Mucha importancia tienen, en cambio, sobre la propagación de las vibraciones, todos aquellos parámetros técnicos que caracterizan a los varios tipos de voladuras, como, principalmente, el tipo explosivo, el tipo de barrenos, la distribución geométrica de ellos y de las cargas en ellos, el tipo de encendido, el uso de retardos, etc.

Muchos autores han investigado sobre estos temas y han propuesto una numerosa serie de relaciones empíricas y teóricas, entre las características de las vibraciones y los antedichos parámetros de voladura; aquí conviene tomar en cuenta aquellas conclusiones que se refieren a la influencia que las técnicas de voladura tienen sobre la velocidad de las vibraciones, dado que ésta parece ser la mejor relacionada con los daños, según lo antes comentado.

Entre todos los mencionados, el empleo de los retardos es, sin embargo, el factor que mayor influencia tiene sobre la magnitud de las vibraciones producidas por la explosión; y, por esto, en los años 40 y 50, las técnicas de los retardos o micro-retardos se han, prácticamente, generalizado en las aplicaciones técnicas. Se trata, como se sabe, de subdividir la carga total en diferentes huecos distribuidos en un dado volumen de roca; el tamaño de las vibraciones se reduce, haciendo explotar los barrenos, o grupos de barrenos, progresivamente; a intervalos de tiempo (retardo) más o menos largos, el uno del otro. Las nuevas variables asociadas al empleo de las técnicas de los retardos son, por lo tanto, el número de intervalos de retardos, el tiempo de intervalo, y el número de barrenos por cada retardo. Los retardos normales tienen valores no menores a los 0.5 s ; la introduc-



VELOCIDAD (pulg./s).

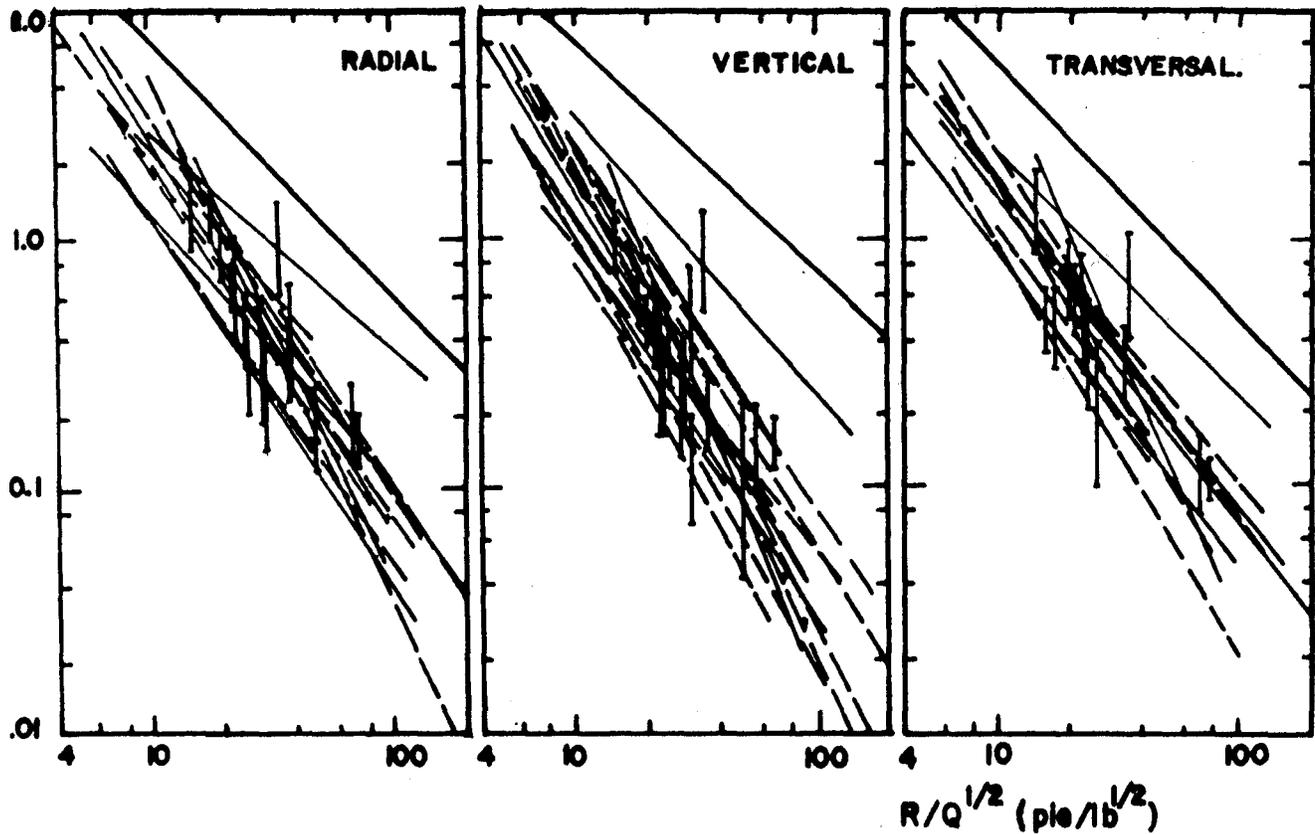


Fig. 7 Relación entre la velocidad de vibración V y la distancia R para la raíz cuadrada de la carga Q. Esta es una representación conjunta de todos los datos examinados por el BUREAU OF MINES.

ción de las voladuras de micro-retardos del orden de 1 a 100 ms ha producido una revolución en las técnicas, haciendo posible dominar los problemas de las vibraciones y aumentar la magnitud de las pegas.

Los autores del Boletín 656 antes mencionado, en base a sus experiencias, concluyen en el informe que "en primera aproximación no se introducen significativos errores, si se comparan los niveles de las vibraciones producidas por la explosión instantánea de una dada cantidad de carga, con aquellos producidos con una voladura de retardo en donde, por cada retardo, explota una carga igual a la instantánea".

Desde un punto de vista teórico puede decirse que, siendo solamente pocas (en general tres) las oscilaciones relativas a una explosión que tienen amplitud notable y, dado que la posibilidad de efectos dañinos está ligada esencialmente a ellas, la peligrosidad de la explosión está limitada a un intervalo de tiempo de $3T$. Como puede ocurrir, empleando micro-retardos, la estimación del tamaño de las vibraciones resultantes se complica, estando éstas en función de las diferentes maneras posibles de interferencia entre las oscilaciones de la explosión de cada retardo.

Para las aplicaciones prácticas, muy común es el uso de reglas de cálculo empíricas. Morris (1956) propone el criterio de la interferencia, basado sobre la hipótesis de que la vibración resultante pueda ser considerada como la suma de oscilaciones sinusoidales, teniendo todas la misma frecuencia pero diferentes fases. Según tal criterio, si el intervalo de retardo es igual a un número entero de períodos de oscilación, hay cooperación entre las explosiones y los efectos se suman; si, por ejemplo, el tiempo de retardo es igual al período, cooperan tres explosiones sucesivas; si es dos veces el período, cooperan dos explosiones, etc. Si, en cambio, el retardo es igual a un número impar de semiperíodos, las vibraciones de cada explosión se extinguen o se debilitan entre ellas.

Hay, sin embargo, muchas críticas a tal método, que, para empezar, está fundado sobre hipótesis que no son verdaderas en la práctica; en efecto, las oscilaciones del terreno no son sinusoidales y sus componentes no se suman algebraicamente; además, el mecanismo de la explosión es diferente entre una carga instantánea y cargas distribuidas en el tiempo; finalmente, es indispensable conocer con mucha exactitud el valor de T , o sea, de la frecuencia de vibración, factor que es muy variable y deducible exactamente sólo por vía experimental en cada caso.

De mejor aprovechamiento parece ser la regla de los dos tercios, enunciada por Fish (1951), según la cual, el efecto sísmico de muchas explosiones retardadas, no es mayor de aquél debido a la explosión instantánea de una carga, si la carga de cada explosión no es mayor de $2Q/3$.

Tseitlin y Ershov (1963) han confirmado la validez de esta regla en numerosas experiencias, aunque han indicado que es necesario que el intervalo del retardo no sea demasiado inferior al período de oscilaciones.

5.— CONCLUSIONES.

El presente estudio permite hacer las siguientes consideraciones:

1. La gran mayoría de los autores está de acuerdo en el hecho de que, la característica de las vibraciones mejor relacionable con los daños producidos sobre las varias estructuras, es la velocidad; y, para los que se refieren a la escala de daños —aunque las opiniones no siempre coinciden—, puede afirmarse que un valor aceptable es el de 5 cm/s, como límite de seguridad empleable en la mayoría de las situaciones.

2. Hay muchas relaciones empíricas-experimentales, que ligan los principales parámetros de las vibraciones, amplitud, velocidad y aceleración, y frecuencia, con el tamaño de las cargas explosivas y la distancia desde el lugar de la explosión; en estas fórmulas aparecen, a menudo, coeficientes numéricos (no siempre determinados) que permiten tomar en cuenta las características del medio en el cual se propagan las vibraciones, y las características técnicas de las voladuras. Existen, además muchas representaciones gráficas de las relaciones en mención, algunas de las cuales son obtenidas por vía exclusivamente experimental. Finalmente, lo mejor sería medir, cada vez, el valor de la velocidad de vibración en el campo, con la adecuada instrumentación.
3. Entre los varios factores técnicos que caracterizan el tipo de voladura, el empleo de las técnicas de los retardos es aquél que mayor incidencia tiene sobre la naturaleza de las vibraciones producidas; entre los autores, los más optimistas afirman que el efecto de los retardos es tal, que una voladura de retardo produce vibraciones de amplitud igual a aquéllas producidas por una carga instantánea, del peso de la carga más grande que explota por cada intervalo; otros afirman que, aunque seguramente hay reducción de vibraciones, tal reducción no es lineal. Para Fish, por ejemplo, si Q_e es la cantidad límite de explosivos admitida para una explosión instantánea, la cantidad máxima de explosivo empleable en una voladura hecha por N grupos de explosiones iguales, es : $Q = 2NQ_e/3$.

6.— PROBLEMAS PRACTICOS.

Por todo lo dicho en este trabajo, resulta evidente que, desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas, existen diferentes maneras de abordar el problema de, por ejemplo, diseñar una voladura teniendo en cuenta las exigencias de no producir daños a determinadas estructuras que se encuentran en las cercanías de la explosión. Resulta claro, además, que un notable grado de incertidumbre está ligado a las varias fórmulas y a los varios criterios; y que resultados muy diferentes pueden obtenerse, según la fórmula o criterio que se emplea. En la mayoría de los casos, se averiguará que se está trabajando, o se puede trabajar, en zona completa de seguridad; en algún caso, puede ser que quede una duda y, entonces, la conciencia del riesgo; en determinadas condiciones, finalmente, podría ser conveniente aceptar e incluir en el balance general de una obra, los efectos dañinos, probables o ciertos.

En los casos en los cuales no hay posibilidad de realizar medidas sísmicas para el reconocimiento de las características de vibración, puede fijarse la cantidad límite de carga, mediante uno de los criterios antes mencionados; por ejemplo, para una dada distancia R, la cantidad de carga Q puede calcularse estableciendo el nivel de daño aceptable con la nomografía de la figura 6, o estableciendo la velocidad de vibración aceptable con las nomografías de las figuras 5 o 7.

Cuando la importancia técnica o económica del trabajo lo requiera, resulta mejor efectuar las mediciones debidas, con el fin de averiguar el tamaño de las características de vibración en las cercanías de las estructuras a preservarse y, esta

vez, establecer, directamente, los valores límites de las cargas explosivas.

Finalmente, en los casos en los cuales la cantidad de carga Q que es necesario aplicar, es mayor del límite Q_1 deducido con los cálculos antes dichos, tiene que subdividirse Q en n cargas parciales $q < Q_1$; con micro-retardos, siguiendo, por ejemplo, la regla de los 2/3, deberá ser $q < Q_1^{2/3}$, empleando un retardo del orden del período de las oscilaciones. Este factor puede ser estimado en base a las características litológicas locales.

El conjunto de las vibraciones producidas por explosiones y de los efectos dañinos con ellas relacionados, ha sido examinado en base a los conocimientos hasta hoy en día adquiridos. El estado actual de tales conocimientos es aún incompleto, y muchos temas de investigación faltan ser profundizados, sea desde el punto de vista teórico, sea desde el experimental. Se trata de estudiar el mecanismo de las rocas sobre las características de las vibraciones; o, finalmente, la peligrosidad de las vibraciones mismas.

Muchos estudiosos y equipos de estudiosos siguen estudiando y experimentando en todo el mundo, los problemas de las vibraciones debidas a las explosiones; y, ciertamente, continuas y nuevas contribuciones llegarán para aumentar los conocimientos en este interesante campo.

BIBLIOGRAFIA

- L. Aguilera, "Vibraciones y Daños causados por Voladuras", *Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos*, vol. 2, num. 3, Dic. 1967.
- N. Ambraseis y J. Hendron, *Rock Mechanics in Engineering Practice*, por Stagg y Zienkiewicz, J. Wiley & Sons, 1963.
- U. Langefors y B. Kihlstrom, *Rock Blasting*, J. Wiley & Sons, 1963.
- R. Nicholls, F. Johnson e I. Duvall, "Blasting Vibrations and their Effects on Structures", *Boletín 656 del Bureau of Mines*, U. S. A., 1970.
- G. Ratti, "Sugli effetti delle vibrazioni prodotte da esplosioni", *Bolletino della A. M. S.*, vol. 3, nums. 3-4, Dic. 1966.