

PERICOLI DA VIBRAZIONI DOVUTE ALLE ESPLOSIONI

Gianfranco Perri

Il presente lavoro ha lo scopo di presentare, con una visione semplice e concisa, le attuali conoscenze teoriche e pratiche sul problema delle vibrazioni che si trasmettono nel terreno a causa di esplosioni di cariche. In particolare si esamineranno gli aspetti di questo fenomeno legati agli effetti che le vibrazioni producono sopra le strutture, al fine di presentare criteri pratici che possano agevolare il tecnico che si trovi nella necessità di impiegare, per il suo lavoro, cariche notevoli di esplosivo.

1 — Natura del problema

Fra i diversi effetti che un'esplosione produce nel mezzo circostante, sono esaminati quelli prodotti dalle vibrazioni che sempre nascono e si propagano al momento dell'esplosione di una carica.

Si tratta di stabilire il tipo e l'ampiezza di tali vibrazioni per analizzare i differenti fattori che hanno la maggior influenza su tali caratteristiche al fine di ottenere le relazioni sicuramente esistenti fra l'ampiezza delle vibrazioni, la quantità di carica esplosiva e la distanza fra il luogo dell'esplosione e quello ove si considera il suo effetto. L'altro aspetto del problema è quello di analizzare gli effetti che le vibrazioni producono sopra le strutture esistenti al fine di determinare il grado di vibrazione del terreno che può essere tollerato dai diversi tipi di strutture senza subire danni.

Su queste basi sono stati sviluppati studi di vari autori che hanno fornito criteri differenti, più o meno pratici, per determinare la distanza minima e la carica massima di sicurezza per le esplosioni vicine a opere. Sulla base di tali studi e deduzioni sono stati sviluppati nei vari Paesi regolamenti e norme che stabiliscono i valori limite della carica in funzione della distanza.

Parallelamente a tutto ciò e in conseguenza delle sempre maggiori esigenze di impiegare grandi cariche esplosive in vicinanza di opere (oggi è diffuso l'impiego di esplosivo per lavori diversi in pieno centro urbano), sono stati condotti studi ed esperienze al fine di elaborare tecniche particolari di volata che permettano allo stesso tempo l'impiego di grosse cariche e vibrazioni molto ridotte nei terreni circostanti l'esplosione (si tratta in pratica dell'uso della tecnica dei ritardi e microritardi).

2 — Caratteristiche delle vibrazioni

Nell'esplosione di una carica posta nella roccia si ottengono in successione, a partire dalla carica: una zona in cui l'azione dei gas sviluppati distrugge la struttura del solido trasformandolo in polvere; una zona in cui la roccia, sollecitata oltre il suo limite di rottura, è soggetta ad una notevole fratturazione; una zona di deformazioni permanenti.

Ad una distanza maggiore le deformazioni prodotte sono inferiori al limite di elasticità; l'onda esplosiva si trasforma in onda elastica che si propaga nel mezzo attenuandosi con la distanza.

Il movimento oscillatorio delle particelle di terreno, prodotto dalle onde sismiche, è definito in ogni punto come un vettore di ampiezza e orientazione variabile nel tempo, che rappresenta lo spostamento, o la velocità, o l'accelerazione del punto.

E' praticamente impossibile dedurre teoricamente ed in modo esatto le caratteristiche delle vibrazioni prodotte da un'esplosione in un determinato mezzo. Essenzialmente perchè, innanzitutto non è perfettamente noto il meccanismo delle esplosioni ed inoltre perchè le proprietà fisiche ed elastiche delle rocce sono generalmente variabili e per di più le loro distribuzioni nello spazio ed i loro valori sono spesso incerti.

Per tutto ciò gli studi delle vibrazioni nel terreno sono svolti essenzialmente su basi sperimentali, cioè misurando con strumenti adeguati e registrando le componenti dello spostamento, o della velocità, o dell'accelerazione e ottenendo i cosiddetti sismogrammi, o vibrogrammi, od oscillogrammi (fig. 1); gli stessi forniscono anche i valori delle frequenze delle vibrazioni.

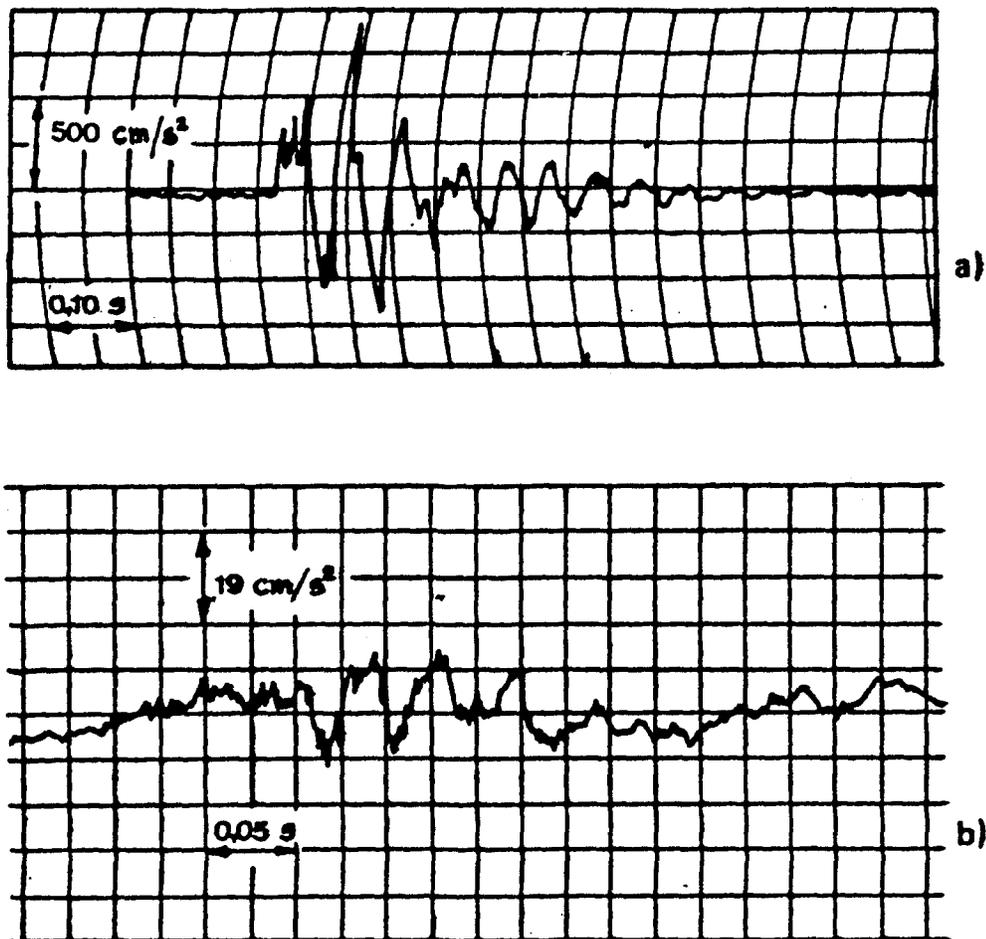


Fig. 1 - a) Sismogramma ottenuto in prove su terreni marnosi, mediante l'esplosione di 0,1 kg di carica ad una distanza di circa 3 m. I valori ottenuti sono: $a_0 = 780 \text{ cm/s}^2$ e $f = 20$ cicli/s.
b) Sismogramma relativo ad un'esplosione in cava, ottenuto ad una distanza approssimativa di 400 m. I valori ottenuti sono $a_0 = 11 \text{ cm/s}^2$ e $f = 25$ cicli al secondo (da Ratti, 1966)

Poichè per passare dall'esplosione ai danni che essa può provocare si deve adottare un procedimento molto approssimativo che può essere descritto soltanto nelle sue linee generali, si giustifica pienamente l'adozione, per lo studio delle vibrazioni, di uno schema molto semplificato in cui si considerano le vibrazioni come sinusoidali.

In questo modo si può facilmente esprimere il fenomeno in termini analitici; per lo spostamento "A" si ottiene:

$$A = A_0 \cdot \sin \pi f t \quad (1)$$

ove "t" è il tempo e "f" la frequenza delle vibrazioni; formule simili sono valide per la velocità "V" e per l'accelerazione "a". Conseguentemente "A₀", "V₀" e "a₀" risultano correlati dalle note relazioni:

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

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

Ciò vuol dire che se si misurano o si conoscono due dei quattro parametri che caratterizzano una vibrazione, si possono ricavare gli altri due e a questo proposito si sono costruiti abachi (fig. 2) che illustrano le relazioni tra la frequenza, l'accelerazione, la velocità e l'ampiezza, ove le quantità cercate si ottengono tracciando una linea retta.

La frequenza delle vibrazioni è funzione principalmente delle caratteristiche del mezzo in cui esse si propagano e sembra che a ciascuna formazione rocciosa corrisponda una frequenza caratteristica.

I valori numerici della frequenza variano da 3 cicli al secondo ad alcune centinaia, e mediamente da 5 a 80 cicli/s, ove le vibrazioni a bassa frequenza si incontrano in terreni incoerenti e quelle ad alta frequenza in rocce compatte.

L'ampiezza delle vibrazioni è funzione principalmente della quantità di esplosivo e della distanza dal punto di esplosione più che dalle caratteristiche del mezzo in cui si propagano.

Ovviamente, l'ampiezza risulta essere direttamente proporzionale alla quantità di carica e inversamente proporzionale alla distanza secondo relazioni analitiche non lineari. Per ciò che invece si riferisce alla natura del terreno, l'ampiezza, a parità di altre condizioni, è maggiore in un terreno incoerente piuttosto che in uno compatto.

Infine, per ciò che si riferisce alla velocità e accelerazione, essendo esse legate analiticamente alla frequenza e ampiezza, è facile dedurre il corrispondente comportamento.

E' interessante notare che essendo la frequenza e la ampiezza influenzate in modo opposto dalla natura del mezzo in cui si trasmettono le onde, ed essendo la velocità proporzionale al prodotto dell'ampiezza per la frequenza, sembra che la velocità sia relativamente indipendente dalla natura dei terreni.

Diversi autori hanno tentato, sulla base di dati sperimentali, di esprimere in maniera analitica le relazioni, prima menzionate, esistenti tra le varie caratteristiche delle vibrazioni (f, A₀, V₀, a₀), la distanza dell'esplosione e la quantità di carica, tenendo peraltro conto della differente natura delle formazioni rocciose interessate.

Ecco ora alcune di queste relazioni, ove la carica esplosiva "Q" è espressa in kg, la distanza "R" è in m, la frequenza in cicli/s, "A₀" in mm, "V₀" in cm/s, "a₀" in cm/s²:

$$A_0 = K \cdot Q^{2/3} (0,03 \cdot e^{-0,00472 \cdot R} + 0,00043) \quad (4)$$

è la relazione del US Bureau of Mines (1942) che riassume i risultati di un'ampia serie di

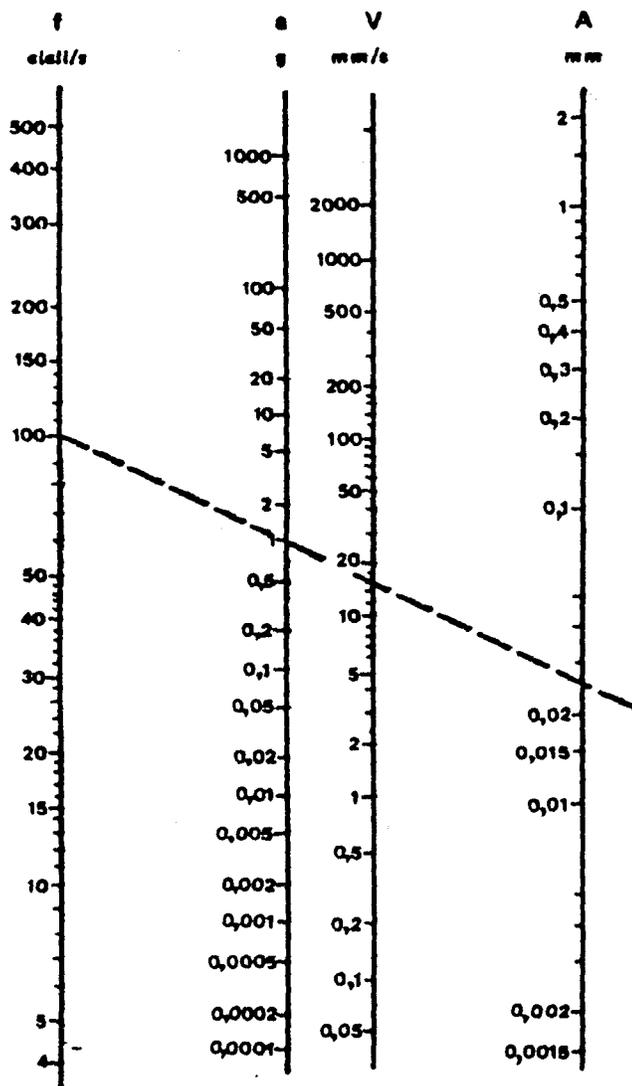


Fig 2 - Nomogramma che pone in relazione la frequenza "f", l'accelerazione "a", la velocità di vibrazione "V" e l'ampiezza "A". Esempio: per $f = 100$ cicli/s e $A = 0,025$ mm, la linea retta tratteggiata indica che $V = 15$ mm/s e $a = 1$ g (da Langefors e Kihlstrom, 1963)

misure superficiali di vibrazioni prodotte in superficie da esplosioni ($e = 2,718$).

Tale formula è applicabile solo tra i seguenti valori di "Q" e "R":

Q	R
4,5 - 45	30 - 300
45 - 450	30 - 1800
450 - 6750	150 - 1800

Il coefficiente "K" vale 1 per coperture detritiche fino a 10 - 15 m di profondità, 3 per coperture di maggior potenza e vale 0,1 per roccia compatta.

Invece per esplosioni molto profonde la formula proposta è:

$$A_0 = 0,31 \left(\frac{Q}{R}\right)^{1/2} \quad (5)$$

valida nella formazione rocciosa in cui avviene l'esplosione e fra i limiti di $Q = 9-90$ e $R = 90-450$.

Secondo Morris (1950), che propone una formula simile, si ha:

$$A_o = K \left(\frac{Q}{R}\right)^{1/2} \quad (6)$$

In base a prove sperimentali, il coefficiente K vale da 0,35, per rocce compatte, fino a 4,5, con un valore medio di 1,2, calcolato fra tutte le prove.

Secondo Crandell (1949), in base a dati sperimentali ottenuti in scavi di gallerie, vale la relazione:

$$A_o = K \left(\frac{Q}{R}\right)^2 \quad (7)$$

valida per $Q = 0,5-4,5$ e $R = 7-75$; "K" varia fra 1 e 4 secondo che la roccia sia compatta o detritica.

In realtà la relazione originaria di Crandell non è espressa in funzione di A_o , ma del rapporto a^2/f^2 dall'autore considerato come la caratteristica di capacità di danno.

Per le stesse ragioni esiste nella letteratura tutta una serie di relazioni espresse in funzione della velocità delle particelle.

Il russo Kirillov (1963) per valutare la velocità delle vibrazioni del terreno propone una formula in cui " V_o " è indipendente dalla natura del mezzo roccioso di propagazione:

$$V_o = 200 \cdot \left(\frac{Q}{R^3}\right)^{1/2} \quad (8)$$

Ambraseis e Hendron (1967) propongono formule per la stima della velocità delle particelle valide per volate con ritardo e che derivano dall'elaborazione di numerosi dati sperimentali raccolti in diverse coltivazioni a giorno:

$$V_o = 210 \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-1,6} \quad (9)$$

nel caso che $R/\sqrt[3]{Q}$ sia maggiore di 4; altrimenti per valori inferiori:

$$V_o = 1170 \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-2,8} \quad (10)$$

Ovviamente, non tutti gli autori sono d'accordo sul fatto che la velocità delle vibrazioni sia indipendente dalle caratteristiche del mezzo roccioso; per esempio Medvedev (1963) dà la seguente relazione:

$$V_o = \left(\frac{g \cdot Q}{d \cdot c \cdot T \cdot R^3}\right)^{1/2} \cdot 7,5 \cdot 10^4 \quad (11)$$

dedotta da uno studio sperimentale, con l'impiego di cariche elevate (1.000 – 20.000 kg) sotterranee, in miniera; nella formula "g" è la costante di gravità in cm/s^2 , "d" è il peso specifico della roccia in kg/m^3 , "c" è la velocità di propagazione delle onde elastiche trasversali in m/s, e "T" è il periodo delle vibrazioni in s.

3 – Valutazione del danno sulle strutture

Si tratta ora di affrontare l'aspetto più importante del problema, cioè stabilire se una vibrazione, che si suppone nota, causa danno o no su una determinata struttura. Tuttavia non esiste ancora un metodo di calcolo per determinare analiticamente l'effetto delle vibrazioni tenendo conto dei numerosi fattori che intervengono nel fenomeno

(l'intensità delle vibrazioni, tipo di struttura, tensioni preesistenti, geometria, ecc.).

Per questa ragione tutti gli studi fatti in questo campo sono stati essenzialmente sperimentali ed hanno avuto l'intento di stabilire criteri empirici di danno, basati sull'assunzione di determinati indici caratteristici delle vibrazioni e ponendoli in relazione con i danni eventualmente prodotti. Il problema è stato inoltre quello di individuare quale dei vari parametri di una vibrazione (A_0 , f , V_0 , a_0) è più strettamente legato ai danni che si producono in una struttura.

Nel Bollettino n. 656 del U.S. Bureau of Mines, gli autori Nicholls, Johnson e Duvall (1970) presentano uno studio completo sul problema degli effetti delle vibrazioni da esplosioni su strutture. Gli autori, dopo un esame di tutti gli studi effettuati sull'argomento, e con numerosi dati sperimentali raccolti da loro stessi, concludono che il parametro più importante è la velocità di vibrazione delle particelle del terreno.

Per giungere a questa conclusione è stato fatto uno studio statistico sui dati pubblicati e su quelli raccolti nelle sperimentazioni, in particolare sono stati considerati i dati pubblicati da Thoenen e Windes (1942), da Langefors, Kihlstrom e Westerberg (1958), e da Edwards e Northwood (1960).

I risultati delle misure sperimentali sono rappresentati graficamente in un piano cartesiano: sull'asse verticale si trovano i valori misurati dell'ampiezza delle vibrazioni, sull'asse orizzontale i valori misurati della frequenza delle vibrazioni; i vari risultati sono raggruppati in tre categorie:

- a) danno grave (grandi fessure);
- b) danno leggero (fessuramento - piccole fessure);
- c) danno non percettibile.

Sopra questa rappresentazione dei dati è stata tracciata la linea interpolatrice e si è calcolata la deviazione standard. La linea interpolatrice con pendenza -1 è la linea della velocità costante; la linea con pendenza -2 è quella d'accelerazione costante; quella con pendenza 0 è quella dell'ampiezza costante. I dati di Thoenen e Windes danno per la linea di danno grave una pendenza di $-1,22$ e per la linea di danno leggero una pendenza di $-2,0$; tutti con una dispersione, cioè una deviazione standard molto elevata; i dati di Langefors, Kihlstrom e Westerberg danno per la linea di danno leggero una pendenza di $-0,93$ con una dispersione abbastanza piccola; infine i dati di Edwards e Northwood danno una pendenza di $-0,64$ per danno grave e una di $0,83$ per danno leggero con una dispersione intermedia fra le due precedenti.

Nella fig. 3 sono raccolti tutti i dati menzionati e dedotti attraverso uno studio statistico; il risultato dello studio è che tanto la linea di danno grave come quella di danno leggero hanno una pendenza di $-1,00$.

Ciò fa affermare che il parametro delle vibrazioni maggiormente legato ai danni prodotti sulle strutture è la velocità delle particelle del terreno, piuttosto che la loro accelerazione o lo spostamento.

Per ciò che si riferisce ai valori numerici corrispondenti alla velocità, si calcola che la linea di danno grave è quella di velocità uguale a $7,6$ in/s e quella di danno leggero $5,4$ in/s. Se si divide tutta l'area solamente in due zone, una di danno e una di sicurezza, come è stato proposto da Douwall e Fogelson, si può assumere la velocità di 2 in/s (fig. 4) come la reale velocità di separazione fra le due zone.

In effetti gli studi menzionati mostrano che il 94% dei casi di danno leggero e tutti i casi di danno grave si sono manifestati per valori di velocità di vibrazione delle particelle di terreno maggiori a 2 in/s.

Ai fini pratici il passo seguente è quello di porre direttamente in relazione i livelli di danno con la esplosione; questi ultimi sono in effetti i due dati più direttamente misurabili e valutabili.

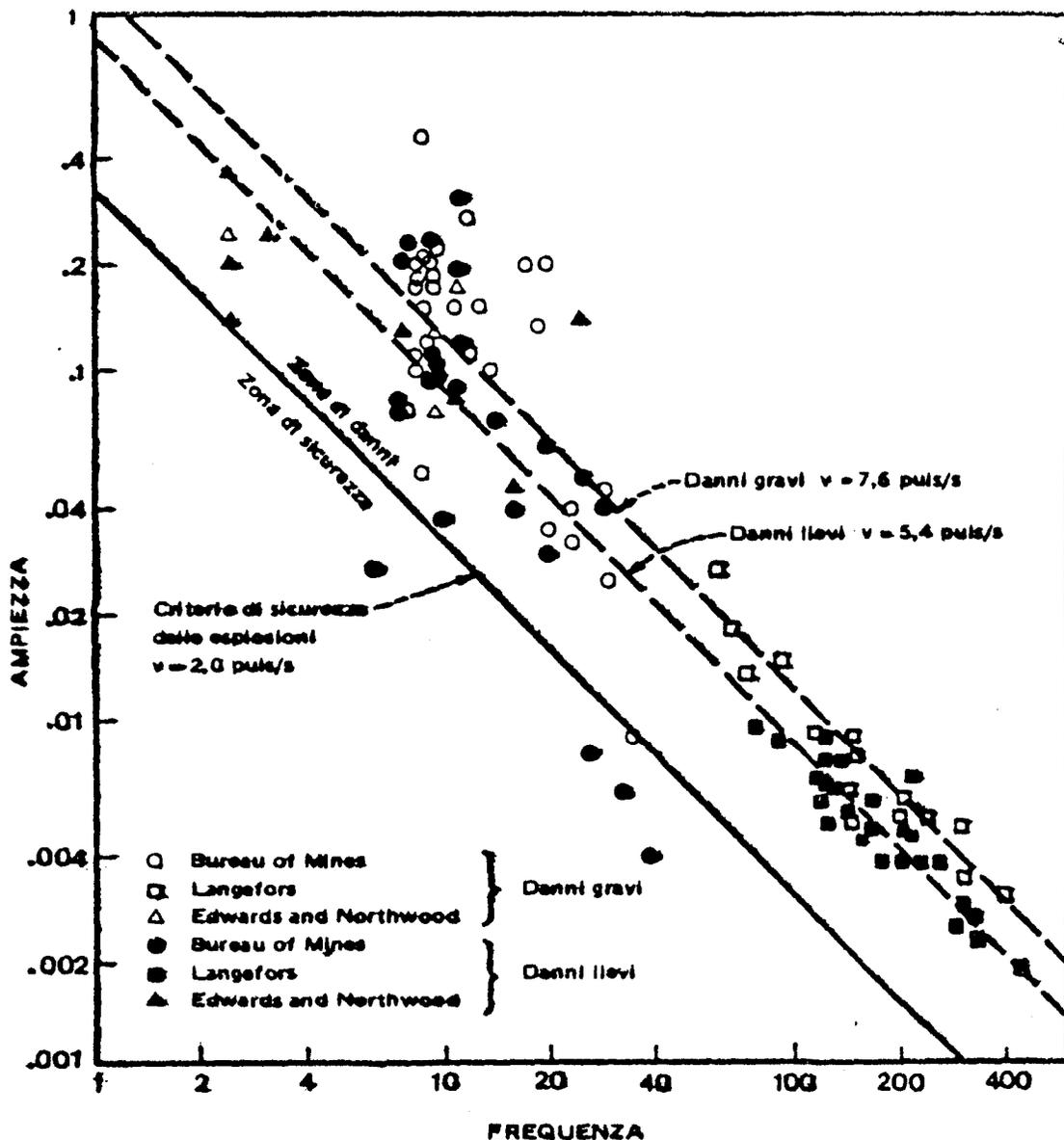


Fig. 3 - Relazione fra l'ampiezza delle vibrazioni e la loro frequenza; rappresentazione di tutti i dati esaminati dal Bureau of Mines e raccomandazione sul criterio di sicurezza (da Nicholls, Johnson e Duvall, 1970)

A questo fine può essere sufficiente impiegare una delle relazioni esistenti (8, 9, 10, 11) fra velocità delle vibrazioni, carica e distanza.

Ambraseis e Hendron per esempio forniscono un abaco che illustra la variazione della velocità radiale massima delle particelle con la distanza e la carica di esplosivo (fig. 5).

Altri autori come Langefors e Kihlstrom invece, su un abaco che porta gli stessi assi, tracciano le linee di ugual valore del rapporto $(Q/R)^{3/2}$, che essi chiamano livello di carica e che assumono come parametro pratico per la valutazione del danno (fig. 6); le relazioni fra il livello di carica e i danni osservati sono date nella tabella seguente in cui appare inoltre una relazione, non determinata completamente, fra il livello di carica e la velocità delle vibrazioni in roccia dura:

$(Q/R)^{3/2}$ [(kg/m) ^{3/2}]	V [cm/s]	Descrizione del danno in casi normali
0,008	3	Caduta di intonaci, nessuna fessura
0,015	5	Fessure non evidenti
0,03	7	Fessure poco apprezzabili
0,06	10	Fessure poco significative
0,12	15	Fessure
0,25	22	Grandi fessure
0,50	30	Caduta di pietre in galleria
1,00	--	Fessure nella roccia

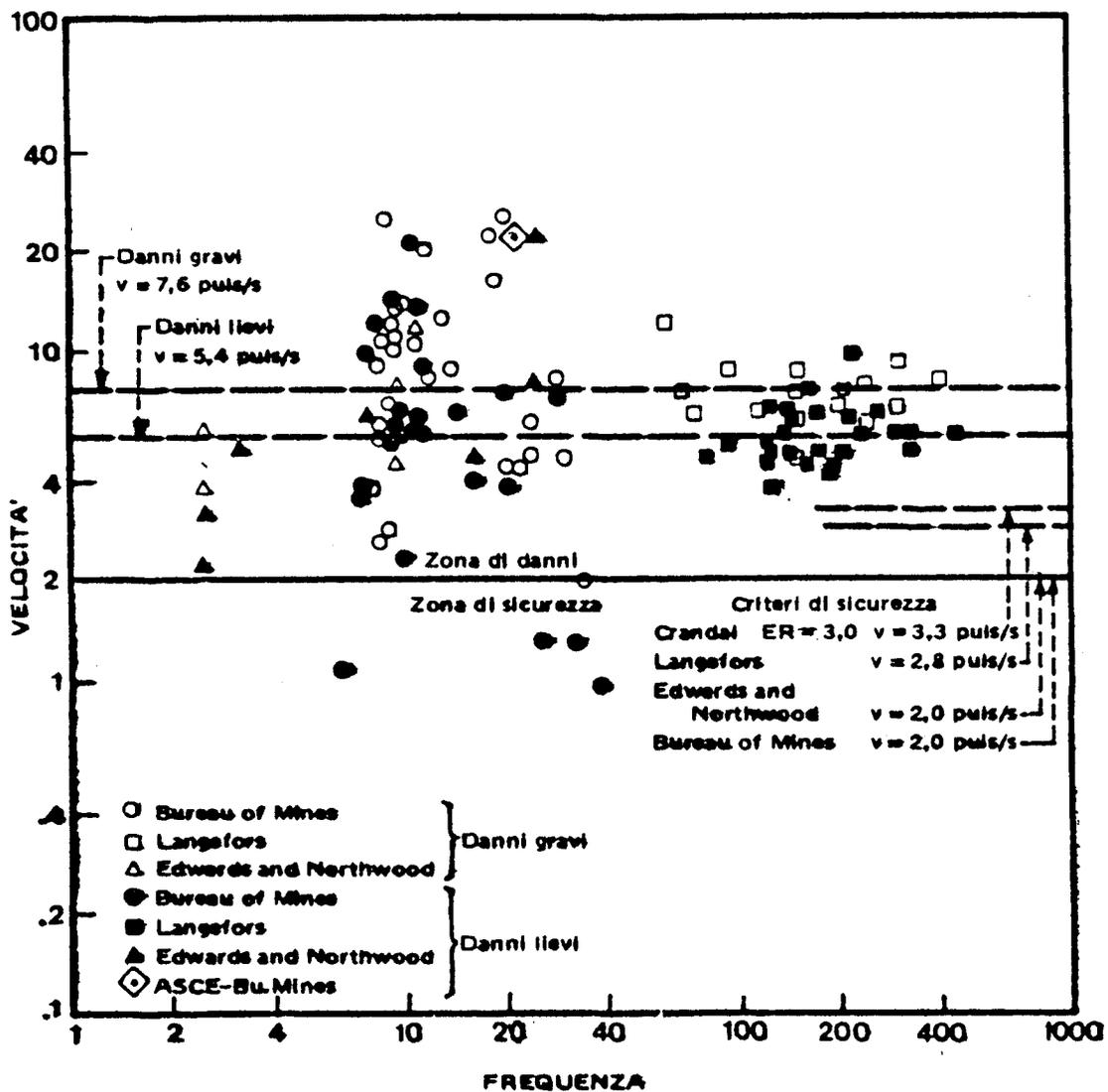


Fig. 4 - Relazione fra la velocità delle vibrazioni e la frequenza (da Nicholls, Johnson e Duvall, 1970)

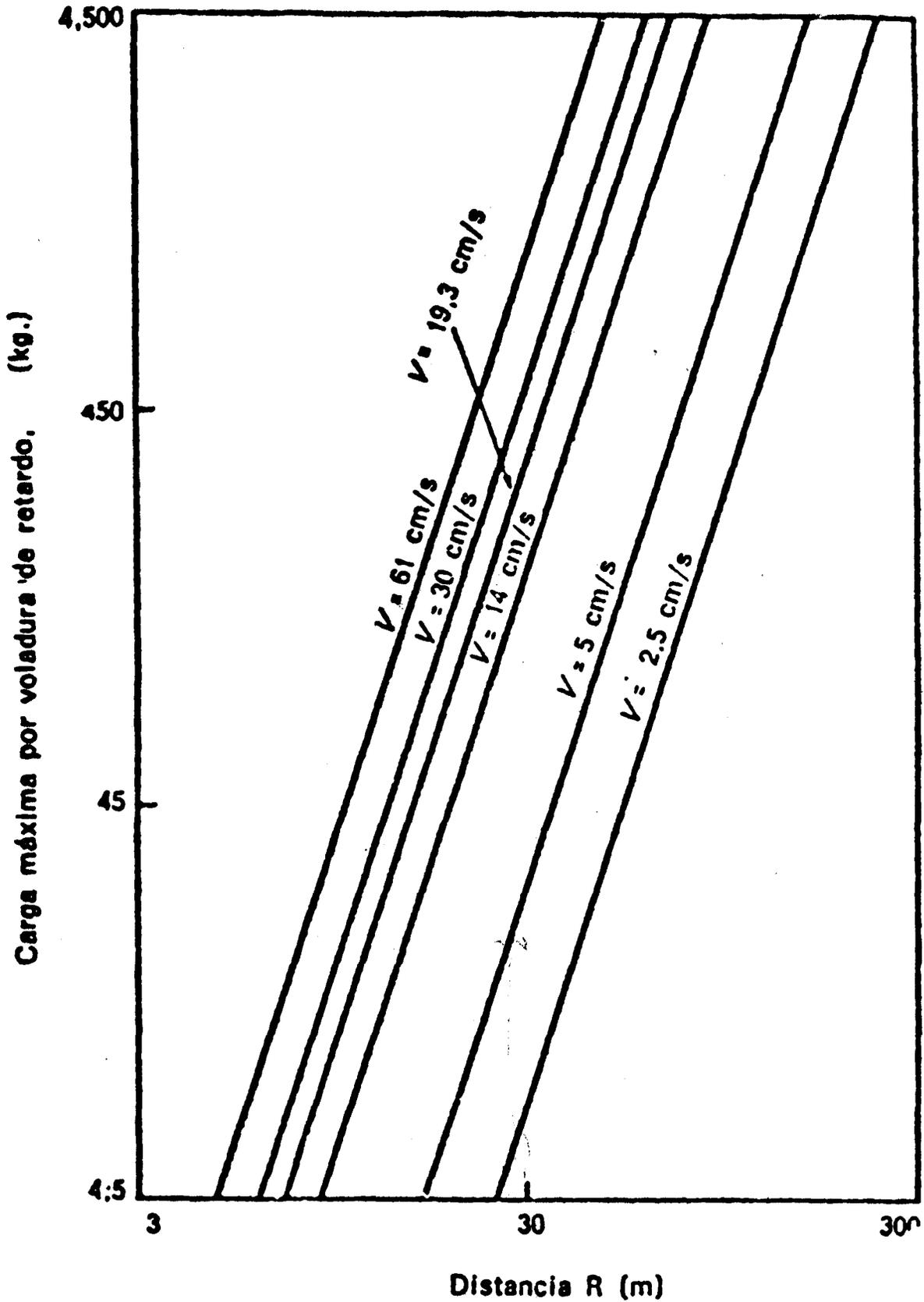


Fig. 5 Variación de la velocidad radial máxima de las partículas con la distancia y las carga de explosivos.

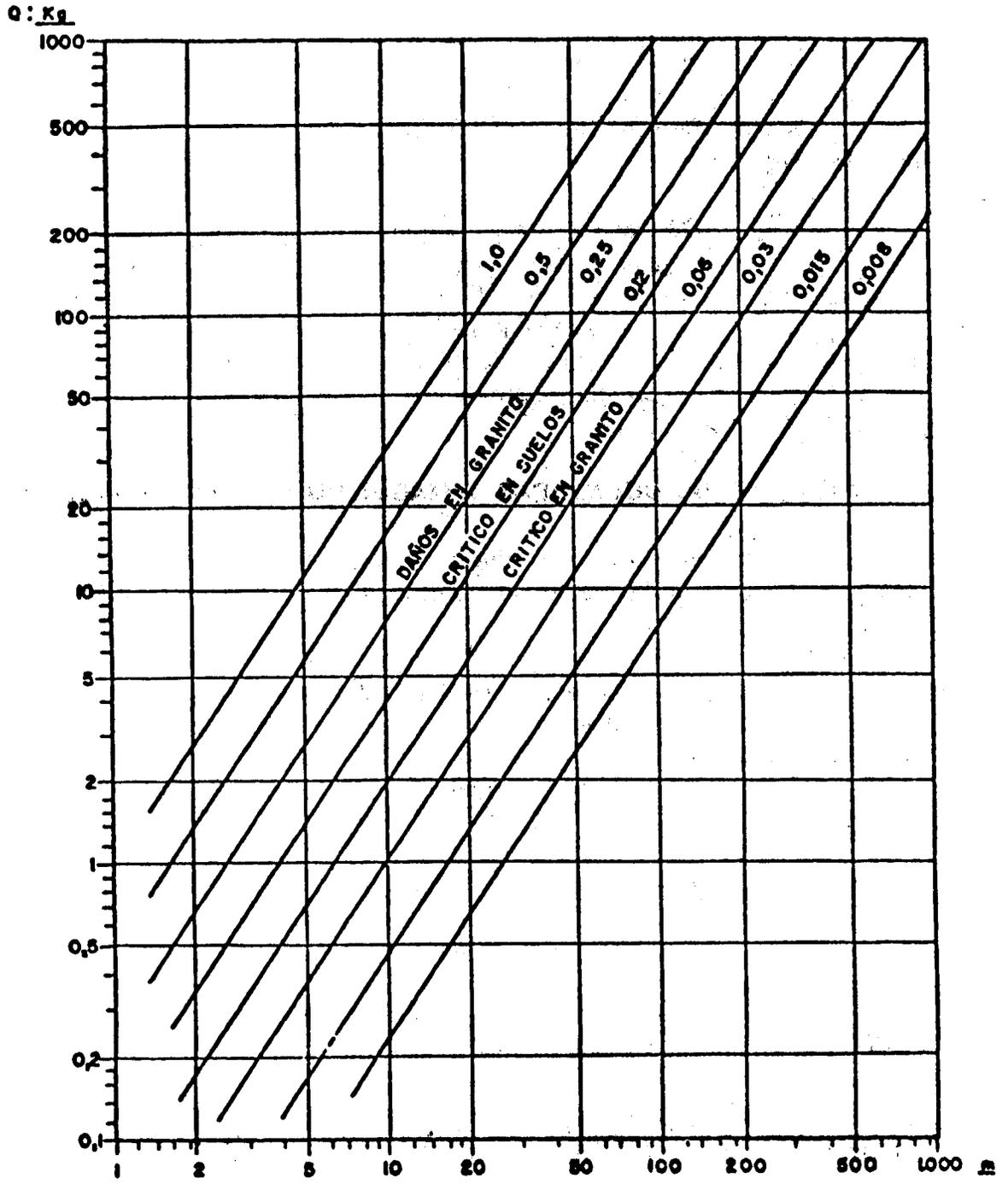


Fig. 6 Carga Q en función de la distancia R , para distintos niveles de carga $Q/R^{3/2}$ entre 1.0 y 0.008.

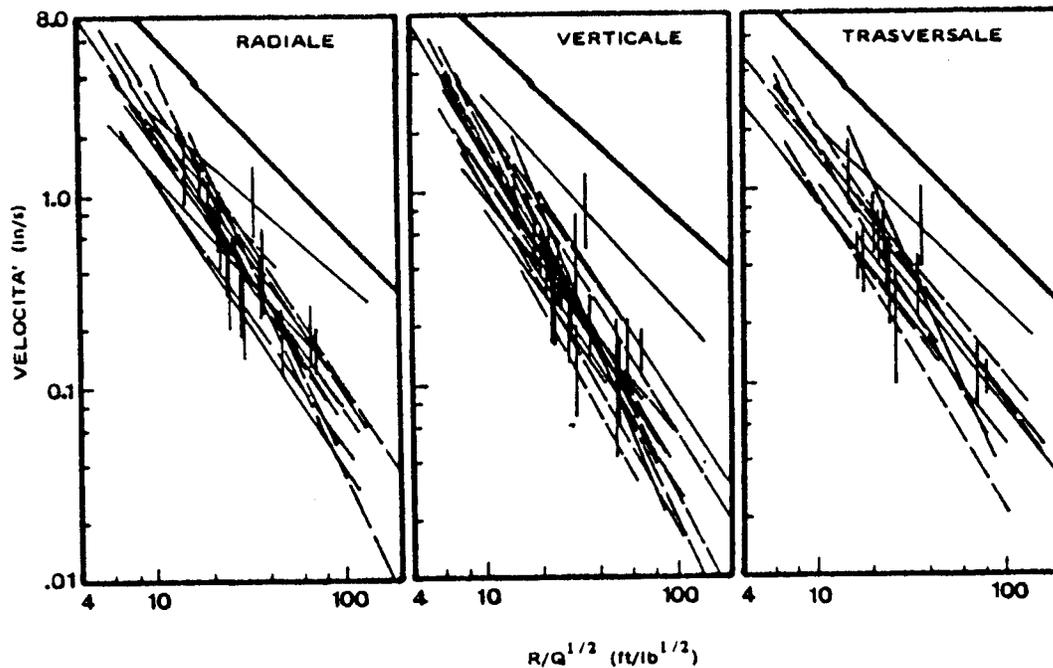


Fig 7 - Relazione tra la velocità delle vibrazioni e la radice quadrata del rapporto tra distanza e carica; rappresentazione di tutti i dati esaminati dal Bureau of Mines (da Nicholls, Johnson e Duvall, 1970)

Gli studiosi del Bureau of Mines, nel lavoro prima menzionato (1970), ritengono che il primo e miglior metodo per valutare il valore della velocità di vibrazione a differenti distanze con diverse quantità di carica, è quello di impiegare gli strumenti opportuni per la determinazione in ciascun caso specifico dei valori dei coefficienti numerici che compaiono nelle relazioni analitiche fra velocità, carica e distanza.

Il secondo metodo consigliato è quello di utilizzare i dati sperimentali esistenti e che essi hanno elaborato costruendo una serie di abachi in cui sono indicate le relazioni fra velocità di vibrazione e rapporto $(Q/R)^{1/2}$ per differenti tipi di roccia.

Nella fig. 7 sono rappresentati congiuntamente tutti i dati sperimentali presi in considerazione nello studio e si è tracciata inoltre una linea limite di tutti i dati; pertanto gli autori possono affermare che un valore di $50 \text{ (ft/lb)}^{1/2}$ per $(Q/R)^{1/2}$ rappresenta un limite sopra il quale sono molto poche le probabilità di incontrare livelli di vibrazione pericolosi per le strutture, cioè che superino il limite di 5 cm/s nella velocità di vibrazione.

4 - Tecniche di volata e grandezza delle vibrazioni

Fino ad ora non è stata fatta alcuna osservazione riguardo alle tecniche di volata, ma si è semplicemente preso in considerazione la quantità di carica esplosiva.

Molta importanza hanno invece sulla propagazione delle vibrazioni tutti quei parametri tecnici che caratterizzano i vari tipi di volata, come, soprattutto, il tipo di esplosivo, il tipo di fori, la loro distribuzione geometrica e quella delle cariche in essi, il tipo di innesco, l'uso di ritardi, ecc.

Molti autori hanno studiato questi argomenti ed hanno proposto un'ampia serie di

relazioni empiriche e teoriche fra le caratteristiche delle vibrazioni ed i suddetti parametri di volata; ora conviene tener conto delle conclusioni che si riferiscono all'influenza che le tecniche di volata esercitano sulla velocità delle vibrazioni dato che questa sembra essere la più legata con i danni, secondo quanto prima illustrato.

Fra tutti i fattori menzionati, l'uso di ritardi è senza dubbio quello che maggiormente influenza l'ampiezza delle vibrazioni prodotte dalle esplosioni ed è perciò che negli anni '40-'50 le tecniche dei ritardi o microritardi si sono praticamente generalizzate nelle applicazioni tecniche. Si tratta, com'è noto, di suddividere la carica totale in vari fori distribuiti in un dato volume di roccia; la grandezza delle vibrazioni si riduce facendo esplodere le cariche, o i gruppi di cariche, progressivamente, a intervalli di tempo (ritardi) più o meno grandi. Le nuove variabili associate all'impiego delle tecniche dei ritardi sono pertanto, il numero di intervalli di ritardo, il tempo di intervallo, ed il numero di cariche per ogni ritardo. I normali ritardi hanno valori non inferiori a 0,5 s; l'introduzione delle volate a microritardi, dell'ordine di 1-100 ms, ha prodotto una rivoluzione nella tecnica essendo possibile dominare i problemi delle vibrazioni e aumentare l'entità dell'esplosione.

Gli autori del citato Bollettino 656, in base alle loro esperienze concludono con le parole *"in prima approssimazione non si introducono errori significativi se si paragonano i livelli delle vibrazioni prodotte dall'esplosione istantanea di una data quantità di carica, con quelli prodotti con una volata a ritardi in cui per ogni ritardo esplode una carica uguale a quella istantanea"*.

Da un punto di vista teorico si può dire che, essendo poche (generalmente 3) le oscillazioni relative ad una esplosione che hanno ampiezza notevole, e dato che la possibilità di effetti dannosi è legata specialmente ad esse, risulta che la pericolosità di un'esplosione è limitata ad un intervallo di tempo pari a $3T$, essendo T il periodo delle oscillazioni.

Ne consegue che se il tempo di ritardo è maggiore di $3T$, non c'è alcuna cooperazione tra le esplosioni successive, come detto prima, e che, in una successione di esplosioni con ritardi, possono cooperare solamente quelle esplosioni distribuite in un intervallo di tempo uguale a $3T$. Quando il tempo di ritardo è inferiore a $3T$, come può avvenire impiegando microritardi, la stima dell'ampiezza delle vibrazioni risultanti si complica essendo essa funzione dei differenti possibili modi di interferenza fra le oscillazioni delle esplosioni di ciascun ritardo.

Per le applicazioni pratiche è molto comune l'uso di regole di calcolo empirico; Morris (1956) propone il criterio di interferenza basato sull'ipotesi che la vibrazione risultante possa essere considerata come la somma di oscillazioni sinusoidali tutte di ugual frequenza ma con differenti fasi. Secondo questo criterio, se l'intervallo di ritardo è uguale a un numero intero di periodi di oscillazione c'è cooperazione fra le esplosioni e gli effetti si sommano; se per esempio il tempo di ritardo è uguale al periodo, cooperano tre esplosioni successive, se è due volte il periodo cooperano due esplosioni, ecc. Se invece il ritardo è uguale ad un numero dispari di semiperiodi, le vibrazioni di ogni esplosione si estinguono o si compensano tra di loro.

Vengono fatte però molte critiche a questo metodo che innanzitutto è basato su ipotesi che in pratica non sono vere; in effetti le oscillazioni del terreno non sono sinusoidali e le sue componenti non si sommano algebricamente, inoltre il meccanismo dell'esplosione è diverso fra una carica istantanea e cariche distribuite nel tempo; infine è indispensabile conoscere con molta esattezza il valore T , cioè della frequenza di vibrazione, fattore questo che è molto variabile e deducibile esattamente solo per via sperimentale, caso per caso.

Di miglior utilizzazione sembra essere la regola dei due terzi esaminata da Fish (1951) secondo la quale l'effetto sismico di molte esplosioni ritardate non è maggiore di quello dovuto all'esplosione istantanea di una carica "q", se la carica di ciascuna esplosione non è maggiore di $2q/3$.

Tsetlin e Ershov (1963) hanno confermato la validità di questa regola in numerose esperienze, sebbene abbiano indicato che è necessario che il ritardo non sia molto inferiore al periodo delle oscillazioni.

5 – Conclusioni

Il presente studio, in conclusione, permette di fare le seguenti considerazioni:

- a) La maggioranza degli autori è d'accordo sul fatto che la caratteristica delle vibrazioni che meglio può essere messa in relazione con i danni prodotti sulle diverse strutture è la velocità; e per ciò che riguarda la scala dei danni, sebbene le opinioni non siano sempre coincidenti, si può affermare che un valore accettabile come limite di sicurezza, impiegabile nella maggioranza dei casi, è quello di 5 cm/s.
- b) Esistono molte relazioni empirico-sperimentali che legano i principali parametri delle vibrazioni: ampiezza, velocità, accelerazione e frequenza con l'entità della carica esplosiva e la distanza dal luogo dell'esplosione; in queste formule appaiono spesso coefficienti numerici (non sempre determinati) che permettono di tener conto delle caratteristiche del mezzo in cui si propagano le vibrazioni e delle caratteristiche delle tecniche delle volate. Esistono inoltre molte rappresentazioni grafiche delle relazioni menzionate, una delle quali ottenuta esclusivamente per via sperimentale; infine la cosa migliore sarebbe, di volta in volta, misurare il valore della velocità di vibrazione con gli strumenti adeguati.
- c) Fra i vari fattori tecnici che caratterizzano il tipo di volata, la tecnica dei ritardi è quella che ha la maggiore influenza sul tipo di vibrazioni prodotte; i più ottimisti fra gli autori affermano che l'effetto dei ritardi è tale che una volata con ritardi produce vibrazioni di ampiezza uguale a quelle prodotte da una carica istantanea di peso pari alla carica più grande che esplose per ogni ritardo; altri autori affermano che sebbene si abbia sicuramente una riduzione di vibrazioni, tale riduzione non è però così accentuata; per Fish, per esempio, se " Q_e " è la quantità limite di esplosivo ammesso per un'esplosione istantanea, la quantità massima di esplosivo impiegabile in una volata composta da "N" gruppi di esplosioni uguali è $Q = 2NQ_e/3$.

6 – Problemi pratici

Per tutto quanto esposto nel presente studio risulta evidente che dal punto di vista delle applicazioni pratiche esistono diversi modi di affrontare il problema di, per esempio, progettare una volata tenendo conto dell'esigenza di non produrre danni a determinate strutture che si trovano nelle vicinanze dell'esplosione. Risulta inoltre chiaro che un notevole grado di incertezza rimane legato alle varie formule e criteri, e che si possono ottenere risultati molto diversi, secondo la formula o il criterio che si è deciso di impiegare. Nella maggioranza dei casi si verificherà che si sta lavorando o si può lavorare in una zona di completa sicurezza; in qualche caso può essere che permanga un dubbio e quindi la coscienza del rischio; in determinate condizioni, infine, potrebbe essere opportuno accettare di includere nel bilancio generale di un'opera gli effetti dannosi, probabili o certi.

Nei casi in cui non si possono realizzare misure sismiche per il riconoscimento delle caratteristiche di vibrazione, si può fissare la quantità limite di carica mediante uno dei criteri prima menzionati, per esempio, per una data distanza "R", la quantità di carica "Q" si può calcolare stabilendo il livello di danno accettabile, mediante l'abaco di fig. 6 o, stabilendo la velocità di vibrazione accettabile, con l'abaco di fig. 5 o con quelli di fig. 7.

Quando l'importanza tecnica o economica del lavoro lo richiedono, sarebbe più opportuno effettuare le necessarie misure al fine di conoscere l'entità delle caratteristiche di vibrazione nelle vicinanze delle strutture da proteggere e quindi stabilire direttamente i valori limite delle cariche esplosive.

Infine, nei casi in cui la quantità di carica "Q" che è necessario applicare è maggiore del limite " Q_1 ", dedotto con i calcoli indicati, si deve suddividere "Q" in "n" cariche parziali $q < Q_1$, con microritardi; secondo, per esempio, la regola dei 2/3, dovrà essere $q < Q_1 \cdot 2/3$, con l'impiego di un ritardo dell'ordine del periodo delle oscillazioni. Questo fattore può essere stimato in base alle caratteristiche litologiche locali.

---oooOooo---

L'insieme delle vibrazioni prodotte dalle esplosioni e degli effetti dannosi ad esse relativi, sono stati esaminati in base alle conoscenze acquisite sino ad oggi.

Lo stato attuale di tali conoscenze è però ancora incompleto e molti temi di ricerca devono essere approfonditi sia dal punto di vista teorico, sia da quello sperimentale. Si tratta di studiare sia il meccanismo di formazione delle onde elastiche, sia l'effetto delle proprietà fisico-meccaniche delle rocce sulle caratteristiche delle vibrazioni, sia, infine la pericolosità delle vibrazioni stesse.

Molti studiosi ed équipes di studiosi stanno indagando e sperimentando in tutto il mondo i problemi delle vibrazioni dovute alle esplosioni e, certamente, continui e nuovi contributi giungeranno per aumentare le conoscenze in questo interessante campo.

BIBLIOGRAFIA

1. - U. LANGEFORS, B. KIHLMSTROM: Rock blasting. John Wiley and Sons, 1963
2. - G. RATTI: Sugli effetti delle vibrazioni prodotte da esplosioni. Bollettino della A.M.S., A. III, No. 3-4, Dicembre 1966
3. - L. AGUILERA: Vibraciones y daños causados por voladuras - Boletín de la Sociedad Ven. de Geólogos V. II No. 3, Diciembre 1967
4. - N. AMBRASEIS, J. HENDRON: in ROCK MECHANICS IN ENGINEERING PRACTICE: di Stagg e Zienkiewicz. John Wiley, 1968
5. - R. NICHOLLS, F. JOHNSON, I. DUVALL: Blasting vibrations and their effects on structures. Bulletin 656 del Bureau of Mines of USA, 1970