



ITA/AITES
International Tunnelling Association
Association Internationale des Travaux en Souterrain



SIG
Società Italiana Gallerie

Congresso Internazionale su «Grandi Opere Sotterranee»
International Congress on «Large Underground Openings»
Congrès International sur «Grands Ouvrages en Souterrain»

Firenze, Italy, 8-11 giugno 1986

C. IANNIELLO - G. CEPPI
P. LUNARDI - G. SIOTTO

**Vibrazioni indotte dallo scavo della galleria
Capo Verde a Sanremo**

ESTRATTO / REPRINT / TIRE A PART



VOLUME II

ATTI - PROCEEDINGS - COMPTES RENDUS

VIBRAZIONI INDOTTE DALLO SCAVO DELLA GALLERIA CAPO VERDE A SANREMO

C. IANNIELLO Dr.Ing. F.S.1a Unità Speciale
 G. CEPPI Dr.Ing. Cogefar S.p.A.
 P. LUNARDI Prof. Ing. Università di Firenze
 C. SIOTTO Dr.Geol. Cogefar S.p.A.

1. INTRODUZIONE

Lo scavo di gallerie in zone urbane o comunque interessate da costruzioni civili od industriali, può essere eseguito senza particolari difficoltà tecniche anche con l'impiego di esplosivi, controllando i livelli delle vibrazioni indotte con adeguati strumenti di misura e dimensionando opportunamente le cariche per restare entro i limiti di sicurezza.

Esistono numerosi esempi, sia in Italia che all'estero, di gallerie scavate interamente o parzialmente col sistema tradizionale in aree urbane, a volte anche a pochi metri dalle case.

La galleria Capo Verde costituisce un esempio, di certo non frequente, di una galleria scavata interamente a piena sezione (95 m²), per un tratto di oltre 3 km col metodo tradizionale e col costante controllo strumentale delle vibrazioni per un periodo di tempo di oltre 4 anni.

2. SCAVO DELLA GALLERIA CAPO VERDE NELLA ZONA DI SANREMO (*)

La galleria Capo Verde è compresa nella tratta tra S. Lorenzo al Mare ed Ospedaletti del nuovo tracciato per il raddoppio della linea ferroviaria Genova-Ventimiglia.

La necessità di consentire il transito di convogli ad alta velocità ha comportato inevitabilmente, a causa delle particolari caratteristiche morfologiche della regione, lo spostamento a monte di notevoli tratti della linea, da eseguire per oltre il 90% in galleria.

La galleria Capo Verde collega la stazione di Arma di Taggia con la fermata in sotterraneo di Sanremo (550 m di lunghezza per una sezione massima di 185 m²).

Lungo quasi tutto lo sviluppo del tracciato

(*) Per ulteriori informazioni si rimanda all'articolo di Leonardi ed altri: Problemi tecnici di costruzione in sotterraneo del nuovo tratto di linea ferroviaria in Liguria fra S. Lorenzo al Mare ed Ospedaletti.

(5367 m) sono presenti in superficie abitazioni, serre e capannoni industriali, spesso costruiti oltre trent'anni fa, di frequente in cattivo stato di conservazione anche a causa di locali instabilità del terreno o di cattiva esecuzione delle fondazioni.

In particolare il tratto dalla finestra di Valle Armea alla stazione in sotterraneo si sviluppa sotto coperture inferiori a 180 m e per quasi due terzi inferiori a 100 m, in zone densamente costruite.

La galleria di accesso alla fermata in sotterraneo (80 m² di sezione e 400 m di lunghezza) è stata scavata sempre con l'impiego di esplosivo pur essendo situata sotto il centro di Sanremo ad una profondità variabile da 100 m fino a pochi metri.

2.1. Geologia

Tutta la zona interessata dallo scavo del tratto di galleria cui sono state estese le indagini e il controllo delle vibrazioni è interessata da un'unica unità litostratigrafica: la formazione del Flysch ad Helmitoidi, costituita da depositi marini di notevole profondità attribuiti al Cretaceo sup. Eocene.

Questa formazione è caratterizzata da una ritmica ripetizione di argilloscisti, marne, arenarie e calcari marnosi in genere stratificati, di spessore variabile da pochi cm ad alcuni dm, talora con termine di passaggio da un litotipo ad un altro.

Le caratteristiche meccaniche sono estremamente variabili, anche nell'ambito di un medesimo litotipo, sia a causa di processi di alterazione in superficie, sia per il maggiore o minore grado di fratturazione conseguente alle intense sollecitazioni orogenetiche.

L'effetto dovuto a queste ultime è infatti legato ai rapporti percentuali tra i materiali plastici e quelli più spiccatamente litoidi. Prevalendo gli argilloscisti e le marne, si ha quindi una maggior presenza di pieghe, sovente a cortissimo raggio, con nette tracce di laminazione e superfici di faglia spesso di difficile individuazione nelle zone maggiormente tettonizzate.

Al contrario, quando si ha una maggiore percentuale di calcari marnosi ed arenaria, è possibile notare una stratificazione più regolare con discontinuità marcate e superfici di fratturazione più nette.

Queste variazioni sia della distribuzione dei diversi litotipi, sia dell'assetto strutturale, piuttosto frequenti e irregolari, rilevabili a volte gradualmente ma spesso in maniera brusca nell'ambito di pochi metri, rendono praticamente impossibile la ricostruzione delle caratteristiche litologiche e strutturali di dettaglio tra la galleria e la superficie.

3. STUDI PRELIMINARI E SCELTA DELLE METODOLOGIE DI CONTROLLO

Sul fenomeno delle vibrazioni provocate da esplosivi nel sottosuolo e sui possibili loro effetti sulle strutture, sono stati pubblicati numerosi studi in Italia e, soprattutto all'estero, aventi sostanzialmente due obiettivi:

- determinare una correlazione tra i livelli di vibrazione e le possibilità di causare danni alle strutture;
- individuare o verificare una legge che consenta di correlare l'entità delle vibrazioni con la distanza, l'energia liberata dall'esplosione e le caratteristiche geologiche e strutturali del mezzo di trasmissione delle vibrazioni.

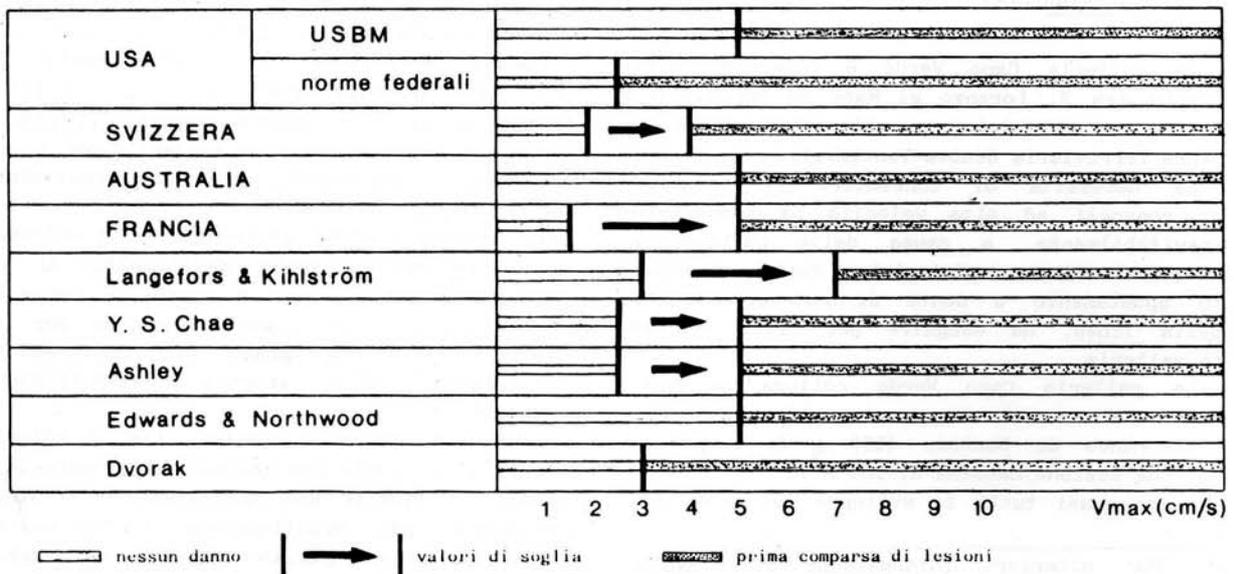
3.1. Correlazione tra vibrazioni e danni

Per quanto riguarda il primo punto, tutte le osservazioni fatte su edifici durante il brillamento di mine, hanno condotto a

notevoli diversità di vedute tra i vari sperimentatori. In effetti, data la complessità del problema, non è stato mai possibile condurre una campagna di sperimentazioni che consentisse di estendere le indagini entro margini di variabilità sufficientemente ampi. Conseguentemente le normative estere (in Italia non esiste una regolamentazione in materia) e i suggerimenti dati si basano su situazioni particolari o derivano da tentativi di sintesi di diversi studi. La tabella allegata (tab. 1) è solo un esempio delle diversità di vedute che, sebbene molto meno accentuate rispetto agli anni passati, tuttora esiste.

Esistono tuttavia dei concetti comuni ormai acquisiti dalla maggioranza degli studiosi:

- la velocità di vibrazione è il parametro base da correlare, con criteri probabilistici, ai danni degli edifici. E' tendenza comune perciò, fissare un valore limite della velocità di vibrazione, in funzione del tipo di edificio e del suo stato di conservazione e controllare che durante i lavori tale limite non sia superato;
- la pericolosità delle vibrazioni per una struttura dipende inoltre dalla loro frequenza. E' stato osservato infatti che per le frequenze più alte (generalmente oltre i 60 Hz) le strutture possono tollerare livelli di vibrazione più elevati;
- la soglia di percezione umana è decisamente inferiore al limite di pericolosità per le strutture, quindi non è da sottovalutare il problema legato al disagio e alle preoccupazioni indotte nella popolazione, il più delle volte non giustificati da un potenziale pericolo.



Tab. 1 - Tabella comparativa di alcuni valori limite della velocità di vibrazione.

3.2. Ricerca di una legge di propagazione

Riguardo al secondo punto si può notare che, in senso generale, la velocità di vibrazione è direttamente proporzionale al quantitativo di esplosivo fatto brillare simultaneamente e indirettamente proporzionale alla distanza.

Non è possibile determinare una legge di smorzamento generica che consenta di prevedere le velocità di vibrazione in funzione delle cariche simultanee e delle distanze in quanto subentrano diversi fattori quali: modalità di caricamento, numero dei detonatori della carica simultanea, tipo e caratteristiche del terreno, tutti estremamente variabili e difficilmente valutabili a priori.

Generalmente viene indicata una formula sperimentale del tipo:

$$V = K \cdot Q^n \cdot D^m$$

con:

V = velocità di vibrazione

Q = carica di esplosivo fatta detonare simultaneamente

D = distanza della struttura dal punto di esplosione

K, n, m = coefficienti che dipendono dalle caratteristiche delle esplosioni e del terreno attraversato dalle vibrazioni

Noti V, Q e D è consigliabile cercare di ricavare sperimentalmente i valori dei coefficienti K, n e m. E' opportuno quindi effettuare delle esplosioni di prova e rilevare direttamente le conseguenti velocità di vibrazione a diverse distanze.

3.3. Strumenti di controllo

Per il rilevamento dei dati si decise di adottare, dopo un'accurata ricerca, un tipo di strumentazione che consentisse di registrare su carta i grafici completi della velocità di vibrazione scomposta in tre componenti ortogonali.

Il sismografo adottato, tipo VS 1600 della Sprengnether, ha inoltre la possibilità di funzionamento automatico con batterie proprie. Può quindi essere lasciato sul posto e rilevare in continuazione le velocità di vibrazione, conservando sempre in memoria il valore massimo di tutti gli eventi captati e l'ora e i minuti in cui si è verificato. Nel caso la velocità superi un prefissato valore di soglia, lo strumento registra automaticamente su carta il relativo vibrogramma. Sono stati costantemente impiegati da tre a sei strumenti di questo tipo.

3.4. Valutazioni preliminari

Sulla base della documentazione tecnica disponibile si decise di impostare i lavori secondo il seguente programma:

1^a fase:

a) rilevamento sperimentale delle velocità di vibrazione in funzione delle cariche e delle distanze, in una zona interessata da scarse abitazioni a distanze non ritenute pericolose;

b) elaborazione dei dati, definizione di una legge di smorzamento caratteristica della zona e dimensionamento delle volate in funzione delle distanze.

2^a fase:

scavo nelle zone più delicate con volate controllate in funzione dei dati sperimentali, con costante rilevamento strumentale delle vibrazioni ed eventuale correzione degli schemi di tiro.

Durante lo svolgimento della prima fase, si ritenne opportuno non superare i 2 cm/s per tutti i tipi di costruzione.

4. PRIMI RILEVAMENTI, VERIFICHE E AFFINAMENTO DELLE METODOLOGIE DI CONTROLLO

4.1. Primi rilevamenti e verifiche

Durante la prima fase, durata circa sei mesi, sono state raccolte oltre 600 registrazioni di eventi singoli, generalmente registrati con tre sismografi ubicati in superficie a diverse distanze dal fronte di avanzamento.

I dati relativi ad ogni singolo evento sono:

- carica istantanea: quantità di esplosivo (in g), numero dei detonatori, tipo di esplosivo, ubicazione delle cariche sul fronte di scavo;
- distanza tra fronte di scavo e luogo di registrazione;
- caratteristiche geostrutturali del fronte di scavo e del luogo di registrazione.

Nella tabella 2 e negli istogrammi di figg. 1-2 sono riportati i campi di variabilità dei dati raccolti relativamente alle cariche istantanee, alle distanze ed alle velocità.

E' stato impiegato esplosivo del tipo Gelatina 2 e Profil x innescato con detonatori elettrici ritardati di mezzo secondo. Sono stati utilizzati anche detonatori Nonel, ma non è stata riscontrata una differenza significativa per quanto riguarda le vibrazioni. Per un primo tentativo di interpretazione si è cercato di verificare la legge di smorzamento

$$V = K \cdot Q^n \cdot D^m$$

introducendo come valori dei parametri n e m rispettivamente β e $-\beta/2$ in accordo con quanto più frequentemente indicato in altre esperienze, rimandando eventualmente ad una fase successiva la ricerca dei valori ottimali di n e m.

	RIMORA			Cariche ritardate				TOTALE
	TO	Rit.	Totale	Corona	Angolo	Interm.	Totale	
n° punti	37	53	90	103	123	323	549	639
V max	2,16	4,20	4,20	3,36	3,32	3,60	3,60	4,20
V min	0,24	0,12	0,12	0,48	0,06	0,12	0,06	0,06
D max	267	259	267	224	221	205	224	267
D min	42	32	32	32	32	32	32	32
Q max	18,0	13,5	18,0	25,5	15,0	40,5	40,5	40,5
Q min	1,5	1,5	1,5	0,6	3,0	0,8	0,6	0,6
D/√Q max	3,85	3,34	3,85	6,38	3,30	4,55	6,38	6,38
D/√Q min	0,63	0,32	0,32	0,22	0,29	0,19	0,19	0,19
K	0,89	0,65	0,78	0,56	0,49	0,46	0,48	0,52
β	-0,92	-1,48	-1,07	-0,88	-1,08	-0,99	-0,97	-0,94
R ²	0,65	0,71	0,61	0,44	0,33	0,44	0,41	0,40

Tab. 2 - Tabella riepilogativa dei dati rilevati tra le progr. 675 e I071.

L'equazione sopra indicata diventa quindi:

$$V = (D/\sqrt{Q})$$

ossia:

$$\log V = \log K + \log (D/\sqrt{Q})$$

In questo modo è possibile determinare i parametri K e β col metodo della regressione lineare e di stimare il grado di approssimazione della retta di interpolazione in base al coefficiente di correlazione R².

La retta di regressione e il coefficiente di correlazione sono stati calcolati:

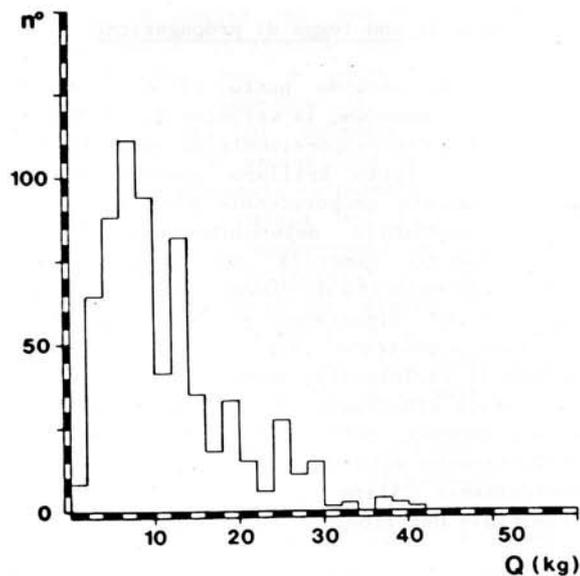
- per ognuno dei tre sismogrammi relativi ad una volata (10 cariche con D costante);
- per i tre sismogrammi di una volata (10 cariche a 3 diverse D).

Da questo primo esame si è potuto riscontrare nell'ambito delle singole registrazioni (10 cariche con D costante) una forte dispersione dei risultati con coefficienti di correlazione generalmente molto bassi, talora molto prossimi a 0.

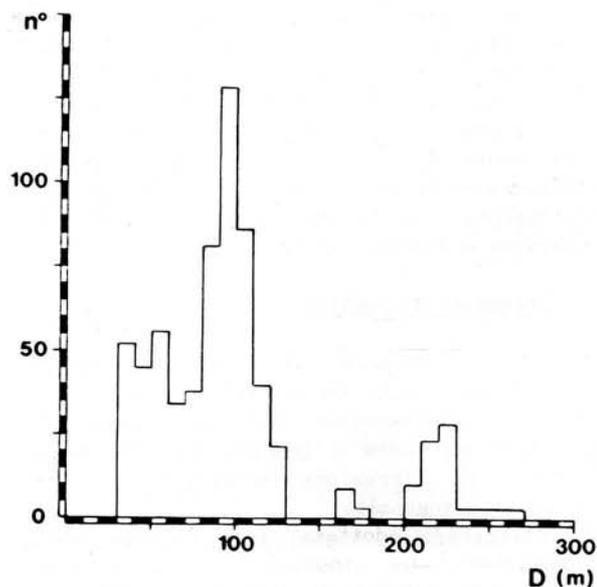
Esaminando i dati relativi ad un'unica volata registrati con i tre strumenti (1 serie di 10 cariche a tre diverse D, quindi 30 punti significativi) la dispersione tende a diminuire a volte con notevole aumento del R².

Dall'esame delle singole volate è risultato quindi evidente come, da un punto di vista globale, la legge di smorzamento indicata, mal si adatta alla situazione in esame.

Per un certo numero di volate è stata inoltre calcolata la regressione lineare introducendo nuovi valori dei parametri n e m. Non è stata trovata una coppia di valori che desse sistematicamente dei coefficienti di correlazione significativamente superiori. La notevole variazione dei parametre



- Fig. 1 - prima fase - Distribuzione delle cariche istantanee Q.



- Fig. 2 - prima fase - Distribuzione delle distanze D.

tri K e β calcolati per ogni volata, ha inoltre evidenziato come essi dipendessero in maniera determinante dalle caratteristiche strutturali della zona di generazione e di trasmissione.

Si è potuto infatti notare in più occasioni come la velocità di vibrazione, rilevata in uno stesso punto in superficie, tendesse a diminuire nonostante l'avvicinarsi del fronte di scavo, a volte per la presenza di zone di taglia particolarmente importanti, per poi ritendere agli stessi valori una

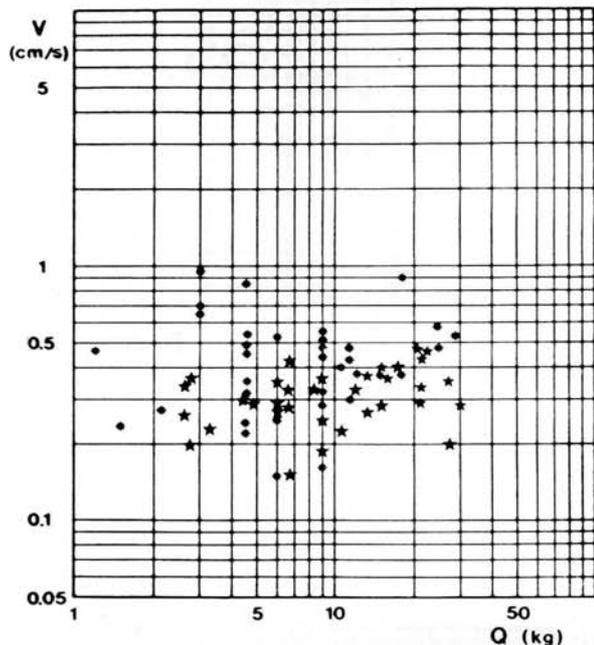
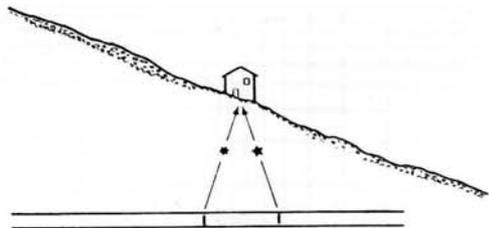


Fig. 3 - Diagramma delle V in funzione delle Q. con D praticamente costante.

volta attraversate queste zone.

Un altro esempio rappresentativo di questo comportamento anomalo può essere fornito dai rilevamenti effettuati in una medesima abitazione durante il passaggio dello scavo a $80 \div 100$ m di distanza. Estrapolando da tutte le coppie di valori quelle rilevate ad una distanza compresa tra 97 e 101 m (quindi praticamente con D costante) e riportando su un diagramma le V in funzione delle sole cariche istantanee Q (fig. 3), si evidenzia come, in questo specifico caso, non esiste una proporzionalità diretta tra V e Q o, quanto meno, come questa proporzionalità sia intimamente legata ad altri fattori non identificati. I dati rilevati durante lo scavo della galleria tra le progr. 675 e 1071, dalla finestra di Valle Armea sono stati riportati in diagrammi logaritmici (figg. 5 + 12) suddividendoli in funzione della ubicazione delle cariche sul fronte di avanzamento nei seguenti gruppi:

- cariche di rinora a) tempi 0
b) ritardi 0,5 s
- cariche di corona

- cariche d'angolo
- cariche intermedie

Le considerazioni che si possono fare considerando questi dati riguardano perciò una zona sufficientemente estesa per poter essere considerata rappresentativa delle caratteristiche medie del Flysch (vedere istogrammi delle distribuzioni delle cariche e delle distanze).

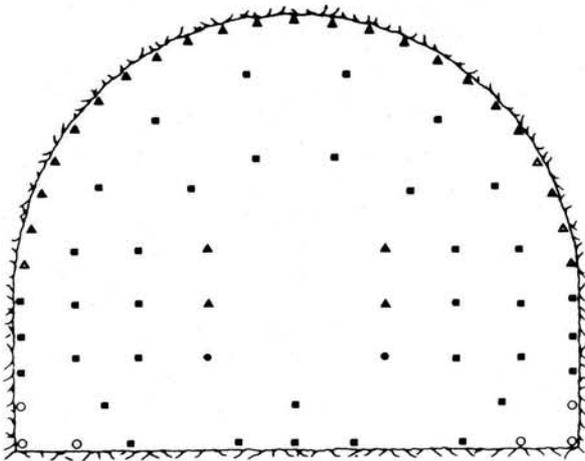
Da un punto di vista globale si può osservare come le cariche di rinora (in particolare quelle innescate coi tempi 0) provochino velocità di vibrazione generalmente più elevate rispetto alle altre cariche. Per queste cariche è stato inoltre calcolato un coefficiente di correlazione R^2 più elevato e un coefficiente K nettamente più alto rispetto alle altre cariche.

E' stato inoltre osservato come, calcolando la regressione lineare per cariche dello stesso ordine di grandezza (in pratica con la sola D variabile) le cariche più alte tendessero a causare vibrazioni relativamente più basse, con uno smorzamento maggiore alle distanze più alte (figg. 13-14-15).

4.2. Dimensionamento delle volate

Poiché non è stato possibile individuare una legge di smorzamento accettabile, si decise in fase operativa di basarsi sulle seguenti considerazioni:

- durante la fase sperimentale, condotta senza particolare riguardo al dimensionamento delle cariche, solo nell'8% dei casi sono state rilevate velocità di vibrazione superiori a 2 cm/s. Nel 31% dei casi le V sono state superiori a 1 cm/s.
 - Considerando solo i rilevamenti effettuati a distanze superiori o uguali a 70 m (copertura minima per la galleria Capo Verde nella zona di Sanremo) le V superiori a 2 cm/s sono state pari all'1% e le V superiori a 1 cm/s pari all'11%.
 - La variazione di V tra due volate consecutive non è mai stata tale da far rilevare valori superiori a 2 cm/s, se nella volata precedente la V era inferiore a 1 cm/s.
 - Tutte le V calcolate in fase sperimentale rappresentavano valori cautelativi nel senso che erano state rilevate dalla somma vettoriale dei massimi delle tre componenti, solo raramente rilevabili nel medesimo istante.
- Si decise quindi, per la fase operativa, di controllare le vibrazioni nel seguente modo:
- eliminare i detonatori coi tempi 0;
 - diminuire al massimo le cariche istantanee di rinora;
 - distribuire i quantitativi di esplosivo delle altre cariche, utilizzando tutti i



- Cariche di Rinora Tempo 0
- ▲ Cariche di Rinora Ritardate
- ▲ Cariche di Corona
- Cariche d'Angolo
- Cariche Intermedie

Fig. 4 - Suddivisione delle cariche sul fronte di scavo.

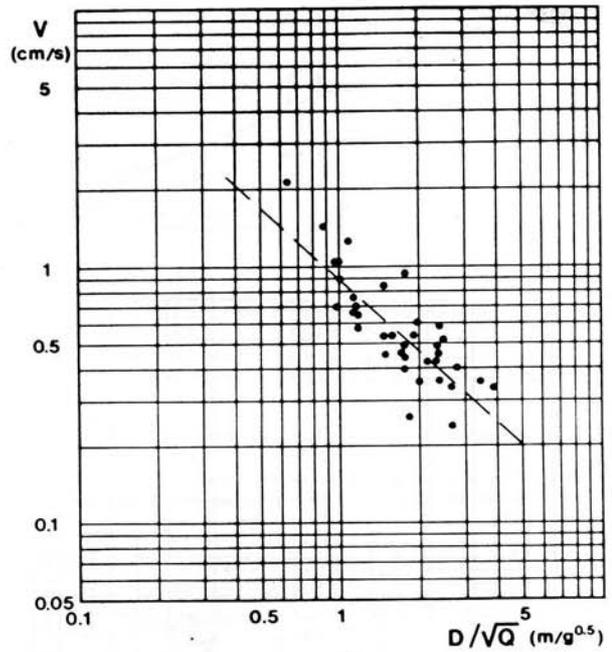


Fig. 5 - Cariche di Rinora Tempo 0.

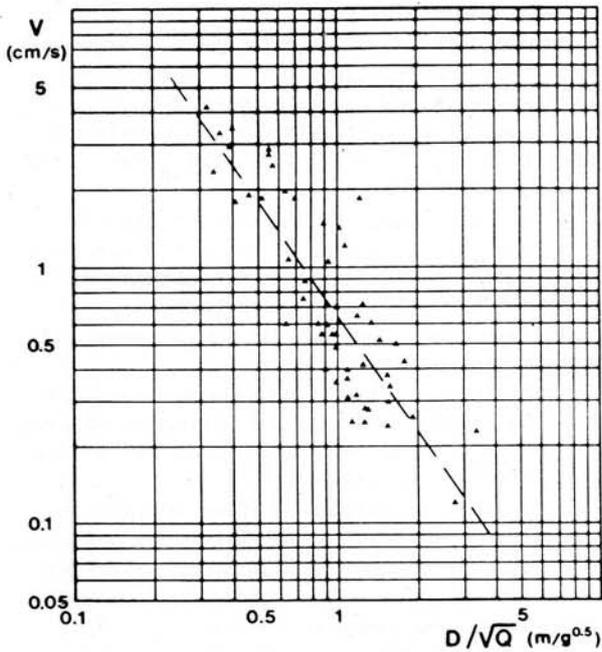


Fig. 6 - Cariche di Rinora Ritardate.

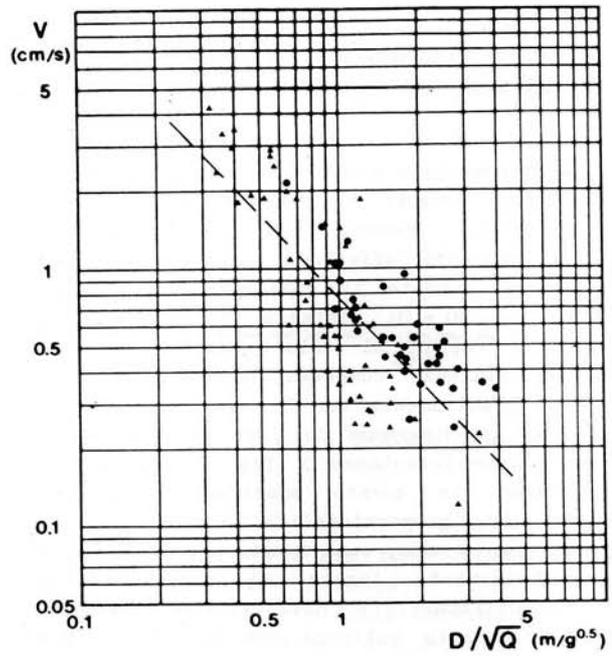


Fig. 7 - Totale cariche di Rinora.

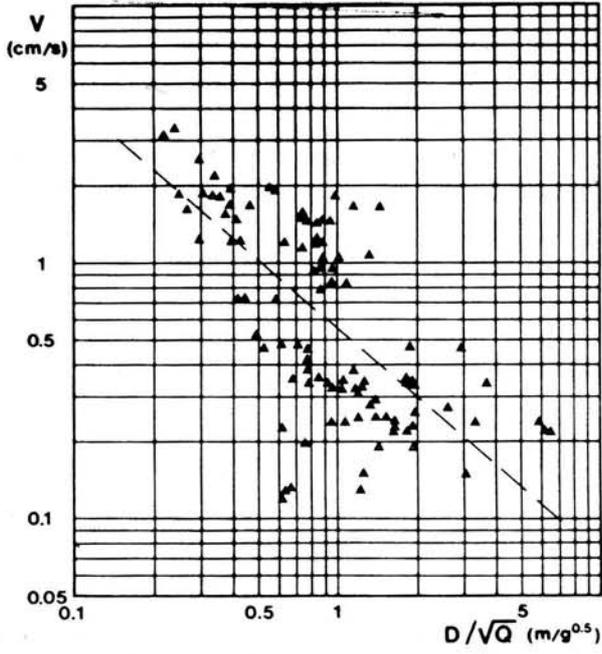


Fig. 8 - Cariche di Corona.

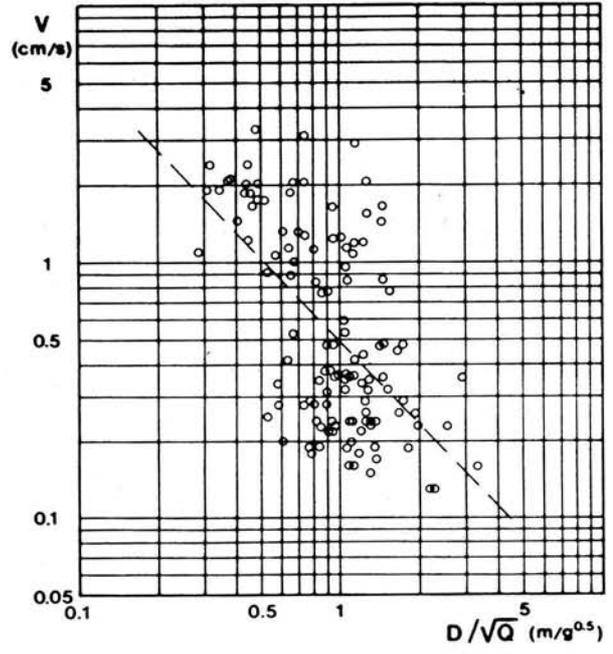


Fig. 9 - Cariche d'Angolo.

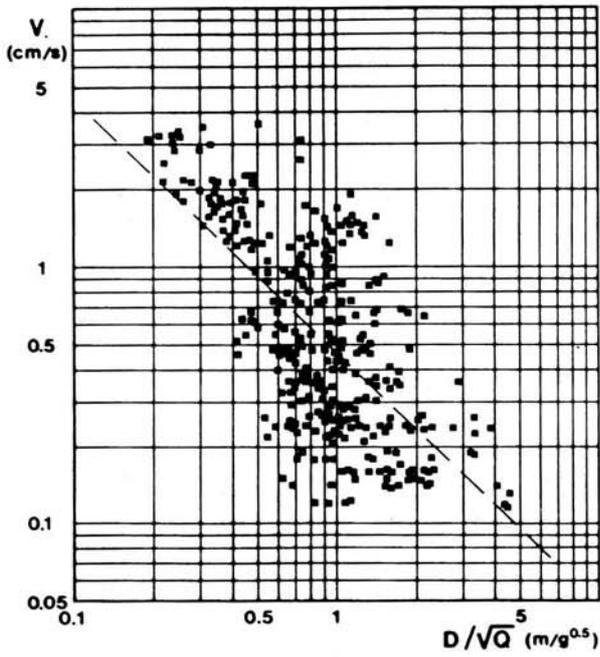


Fig. 10 - Cariche Intermedie.

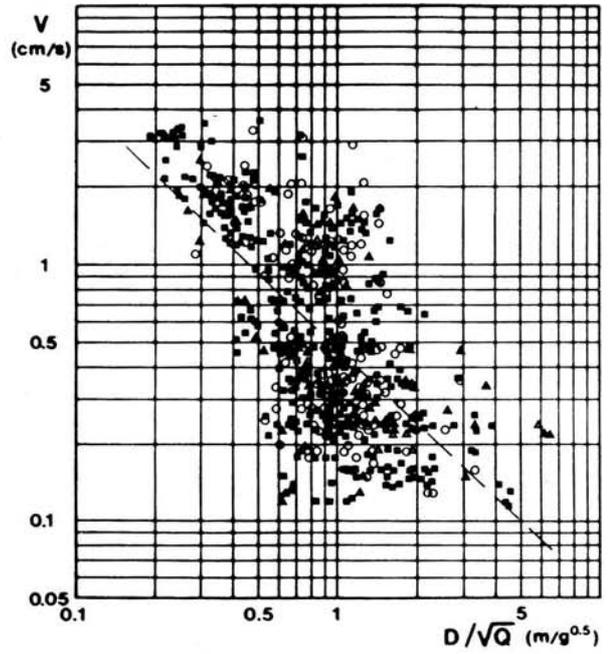


Fig. 11 - Totale cariche Ritardate.

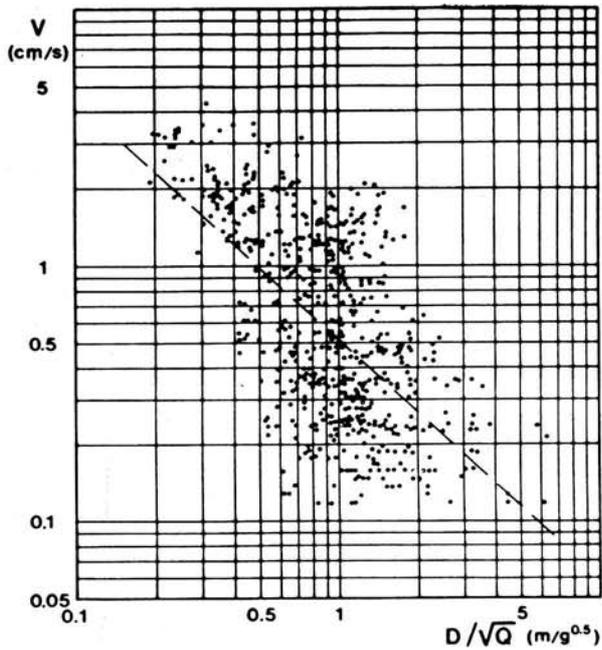


Fig. 12 - Totale cariche.

tempi disponibili, in modo da ottenere velocità di vibrazione, per quanto possibile, omogenee;
 - fissare in 1 cm/s il valore limite operativo della velocità di vibrazione in modo da poter ridurre i quantitativi di esplosivo, e quindi la lunghezza delle volate prima di superare i 2 cm/s.

5. ESECUZIONE DELLO SCAVO SOTTO LE AREE DENSA-MENTE EDIFICATE

Lo scavo della galleria sotto l'abitato di Sanremc è stato eseguito sempre a piena sezione, mentre il camerone della fermata in sotterraneo è stato scavato in fasi successive, data la maggiore sezione.

E' stato necessario adeguare, spesso da una volata all'altra, gli schemi di caricamento in base ai rilevamenti delle velocità di vibrazione, con rigoroso controllo dei quantitativi di esplosivo di ciascuna carica istantanea durante il caricamento in galleria. In alcune zone si è reso inoltre necessario ridurre gli sfondi per evitare la possibilità di superare le velocità di vibrazione prefissate.

Anche durante la 2^a fase sono state riscontrate quelle anomalie della propagazione delle vibrazioni già notate durante la fase preliminare.

Il costante controllo strumentale, ha però consentito, nonostante le difficoltà incontrate, di condurre i lavori di scavo in maniera soddisfacente senza eccessive penalizzazioni dei ritmi di lavoro e, soprattutto, senza causare apprezzabili danni alle strutture in superficie.

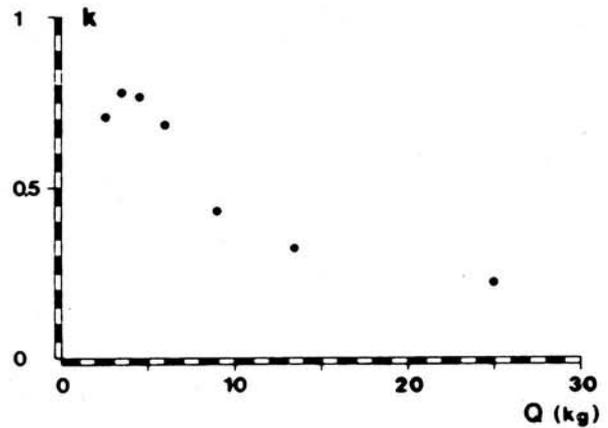


Fig. 13 - Coeff. K in funzione delle cariche Q.

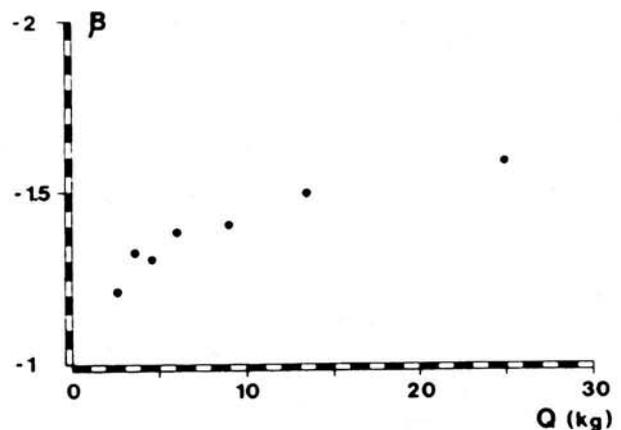


Fig. 14 - Coeff. β in funzione delle cariche Q.

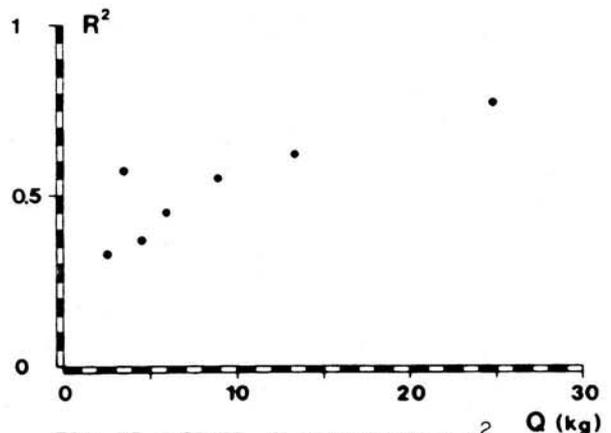


Fig. 15 - Coeff. di correlazione R^2 in funzione delle cariche Q.

Lo scavo della galleria di accesso alla fermata in sotterraneo ha invece richiesto una sensibile riduzione dei quantitativi di esplosivo e degli sfondi man mano che le coperture diminuivano. La disponibilità dei microritardi e della nuova serie di detonatori (24 tempi con ritardo 0,25 s) ha reso possibile l'esecuzione dello scavo con impiego di esplosivo anche con le coperture minime, sia pure ricorrendo parzialmente all'abbattimento meccanico per completare la sezione di scavo.

Per l'esecuzione della galleria Capo Nero, che prosegue dalla fermata in sotterraneo fino ad Ospedaletti, si è fatto ricorso allo scavo di un foro pilota con fresa di diametro di 3,5 m.

Questa soluzione, oltre ad accelerare i lavori di scavo e a permettere di conoscere le caratteristiche litologiche e tecniche dei terreni attraversati, è stata adottata anche in funzione delle vibrazioni. La presenza di coperture notevolmente ridotte (in alcuni casi inferiori a 20 m) in una delle zone più popolate di Sanremo, avrebbe richiesto una severa limitazione nell'impiego dell'esplosivo. La presenza invece di un foro di 3,5 m di diametro già eseguito al centro della sezione da scavare, consente di utilizzare per l'allargo cariche istantanee più elevate rispetto a quelle utilizzabili per lo scavo a piena sezione.

BIBLIOGRAFIA

- 1) BERTA G. (1983) "L'esplosivo e la roccia". Italesplosivi , Milano
- 2) BOLLINGER G. (1971) "Blast vibration analysis". Southern Illinois University Press.
- 3) CARASTRO M., FINOCCHIARO E. (1983) "Problemi di sicurezza connessi con le onde sismiche generate da volate nello scavo di gallerie in zone urbanizzate". AGI, Atti del XV Convegno Nazionale di Geotecnica, Spoleto.
- 4) CHAPEAU C. (1980) "Le creusement de tunnels à l'explosif en site urbain". Symposium International sur le securité des ouvrages souterrains, Bruxelles.
- 5) CHAPOT P. (1981) "Etude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux" Laboratoire central ponts et chaussées n. 105.
- 6) LANGEFORS V., KIHLSSTRÖM B. (1978) "The modern technique of rock blasting", John Willey and Sons ed. New York.
- 7) NICHOLLS H., JOHNSON C., DUVALL W. (1971) "Blasting vibrations and their effects on structures", USBM Bulletin n. 656.
- 8) STAGG M., ENGLER A., (1980) "Measurement of blast-induced ground vibrations and seismograph calibration", Bureau of Mines Report of Investigation n. 8506.
- 9) WISS J. (1981) "Construction vibrations: state of art", Journal of Geotechnical Engineering Division Vol. 107 - GT 2.