**Prefazione alle Raccomandazioni per il monitoraggio delle vibrazioni indotte dal brillamento di cariche esplosive**

Queste Raccomandazioni hanno un carattere in parte diverso da quelle presentate in precedenza, in quanto trattano argomenti non sempre strettamente geotecnici (ad esempio le sovrappressioni in aria indotte dalla volata). Inoltre le presenti Raccomandazioni non si limitano ad esporre le tecniche di misura, ma trattano in modo ampio anche le caratteristiche delle vibrazioni, le leggi di decadimento dell'ampiezza delle vibrazioni e l'individuazione di criteri di sicurezza.

L'argomento è tuttavia di rilevante interesse anche per la crescente sensibilità ai problemi ambientali. Si deve tener conto, inoltre, del fatto che la soglia di sensibilità e di disturbo personale è molto più bassa della soglia relativa agli effetti strutturali. Sono pertanto frequenti i reclami o le cause per danni in occasione di lavori con esplosivi anche ad una certa distanza dalle abitazioni.

Nelle Raccomandazioni viene così messa in evidenza l'opportunità di eseguire controlli prima e durante le operazioni di abbattimento, anche se i livelli di vibrazione previsti sono largamente al di sotto dei limiti di impatto strutturale in modo da acquisire elementi di giudizio obiettivo da utilizzare per eventuali controversie giudiziarie.

LA REDAZIONE

# Raccomandazioni per il monitoraggio delle vibrazioni indotte dal brillamento di cariche esplosive

## Introduzione

Il primo dicembre 1988 il Presidente della Commissione sui «Metodi di prova» incaricò il Coordinatore di organizzare un gruppo di lavoro per la stesura delle presenti *Raccomandazioni per il monitoraggio delle vibrazioni indotte dal brillamento di cariche esplosive*. Da quella data il gruppo di lavoro ha rielaborato, riducendole progressivamente di dimensioni, tre bozze di «linee guida» datate rispettivamente primavera 1989, estate 1990 e primavera 1991. Obiettivo di queste *Raccomandazioni* è quello di specificare procedure e di raggiungere un certo livello di standardizzazione senza tuttavia inibire lo sviluppo o il miglioramento delle tecniche.

Chiunque sia interessato a queste raccomandazioni e desideri consigliare aggiunte o modifiche può indirizzare le sue osservazioni al: Segretario Generale della ISRM presso: *Labóratorio Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, Lisboa,* Portogallo.


## Ringraziamenti

C.H. Dowding (USA) ha coordinato il gruppo ed ha redatto le tre bozze di «linee guida». Ampi commenti scritti sono stati inviati da B. New (U.K.), F. Ouchterlony (Svezia), D. Siskind (USA), K. Sassa (Giappone). Commenti scritti sono stati inviati da J. Esteven (Portogallo), E. Fernandez (Spagna), O. Müller (Ungheria) A. Ghose (India). Copie delle bozze sono state inviate a D. Beitzer (Germania), J. Brinkman (Sud Africa), P. Calder (Canada), Ti Li e T. Xu (Cina), V. Rosal e M. Leon (Messico) e A. Schwenzfeir (Francia).


## Scopo

1. Queste «*linee guida*» sono divise in tre sezioni principali. Nella prima sezione, *Caratteristiche del risentimento indotto dal brillamento di cariche esplosive*, è introdotta la terminologia necessaria per la descrizione delle vibrazioni nel terreno e dell'onda di sovrappressione in aria ad esse associata. In questa sezione è anche evidenziata l'importanza della frequenza dominante delle vibrazioni e della risposta delle strutture alle vibrazioni; una trattazione più approfondita di questi aspetti è sviluppata nella rimanente parte del documento. Nella seconda sezione, *Tecniche di misura e strumentazione*, sono descritte le caratteristiche generali della strumentazione per la misura delle vibrazioni. Una attenzione particolare è posta sui sistemi computerizzati. Suggerimenti sono dati per la scelta e per il posizionamento della strumentazione, sia in fase preliminare che in fase di esecuzione dei lavori. Nella terza sessione, *Valutazione delle misure*, sono presentate le problematiche connesse alla risposta strutturale dei manufatti interessati dalle vibrazioni del terreno e dall'onda di sovrapressione in aria. Viene illustrata la necessità di effettuare studi preliminari e successivi all'esecuzione dei lavori da mina, in modo da poter distinguere gli effetti delle volate da quelli delle variazioni meteoclimatiche. Inoltre sono dati suggerimenti per il controllo strumentale su ammassi rocciosi e su strutture interrate.

(a) L'oggetto di queste linee guide è la misura degli spostamenti transienti, o vibratori. Per completezza, nell'appendice, sono state affrontate anche le problematiche relative agli spostamenti permanenti. Questi, a distanze relativamente brevi, sono infatti direttamente associati agli effetti transienti. Le problematiche connesse agli spostamenti permanenti talvolta richiedono un'attenzione maggiore di quelle connesse ai fenomeni vibratori stessi.

(b) Gli effetti indotti dalle vibrazioni sono funzione della natura del disturbo transiente che si propaga, nel terreno e nell'aria, all'intorno del punto di sparo. In queste linee guida è stato ipotizzato che nella roccia o nel terreno all'intorno non si producano spostamenti permanenti. Di conseguenza i soli effetti indotti sono quelli associati alla risposta delle strutture. Transiente sta a significare che lo spostamento massimo indotto è solo temporaneo e che la struttura artificiale o naturale che sia, passato il transiente, ritorna nella sua precedente posizione di equilibrio.

(c) In queste linee guida sono affrontate le problematiche relative al controllo del *cosmetic cracking*, (fratturazione cosmetica) e sono state volutamente trascurate quelle relative al disagio indotto sulle persone. Differenti culture portano a differenti valori limite delle vibrazioni tollerabili. Alcuni limiti di tol-

lerabilità sono così bassi che l'abbattimento con esplosivi in centri urbani non è addirittura permesso. Altri son di ben lunga superiori ai 50 mm/s che costituiscono il valore limite di sicurezza della velocità particellare indotta nel terreno da vibrazioni ad alta frequenza. Visto che è poco probabile che il meccanismo di fratturazione cambi da una nazione all'altra, le variazioni dei limiti di tollerabilità sono condizionate certamente da molti altri fattori, oltre a quelli di resistenza delle strutture.

Nella misura e nella valutazione della pericolosità delle vibrazioni devono essere tenuti presenti, oltre ai fattori tecnici, anche gli aspetti psicologici, politici ed amministrativi.

## Caratteristiche del risentimento indotto dal brillamento di cariche esplosive

2. Come mostrato nella Fig. 1, sia le vibrazioni che si propagano nel suolo che quelle che si propagano in aria (vedi i quattro vibrogrammi superiori) producono un risentimento nelle strutture (vedi i quattro vibrogrammi inferiori). La frequenza dell'eccitazione è determinante per la risposta strutturale e pertanto, per la sua individuazione, è necessario registrare l'intera forma d'onda. Se è noto in una struttura un punto critico, la misura dovrebbe essere preferibilmente effettuata in quello specifico punto. In alternativa la velocità delle particelle può essere misurata fuori dalla struttura (come viene suggerito negli USA) oppure sulle fondazioni (come viene suggerito in Europa).

Tuttavia in molti recenti studi sulla fratturazione, le osservazioni visuali della fessurazione sono state messe in relazione con la velocità delle particelle misurate nel terreno.

### *Moto del terreno*

3. Il moto del terreno può essere scomposto nella somma vettoriale di tre componenti, tra loro perpendicolari: componenti verticale «V», orizzontale longitudinale «L» (o radiale «R») rispetto alla direzione di propagazione del transiente (ovvero coincidente con la retta che passa tra il trasduttore ed il punto di sparo) ed orizzontale trasversale «T» (Fig. 1). Quando lo studio è mirato alla risposta strutturale di un manufatto si possono anche utilizzare assi $H_1$, $H_2$ e V con $H_1$ e $H_2$ orientati parallelamente agli assi principali della struttura.

(a) La variazione del valore di picco caratteristico del moto per ciascuna delle tre componenti ha posto il problema della individuazione della componente più importante. Il moto orizzontale sembra controllare la risposta orizzontale di murature e di strutture in elevazione e la componente verticale sembra controllare la risposta verticale dei solai. In senso assoluto il valore di picco del moto del terreno, e conseguentemente della deformazione del terreno, è il massimo vettore somma delle tre componenti che usualmente si verifica in coincidenza del valore massimo di una delle tre componenti (vedi la linea verticale tratteggiata in Fig. 1). Questo vero massimo vettore somma, è diverso dallo pseudo-vettore massimo che viene calcolato come somma vettoriale dei

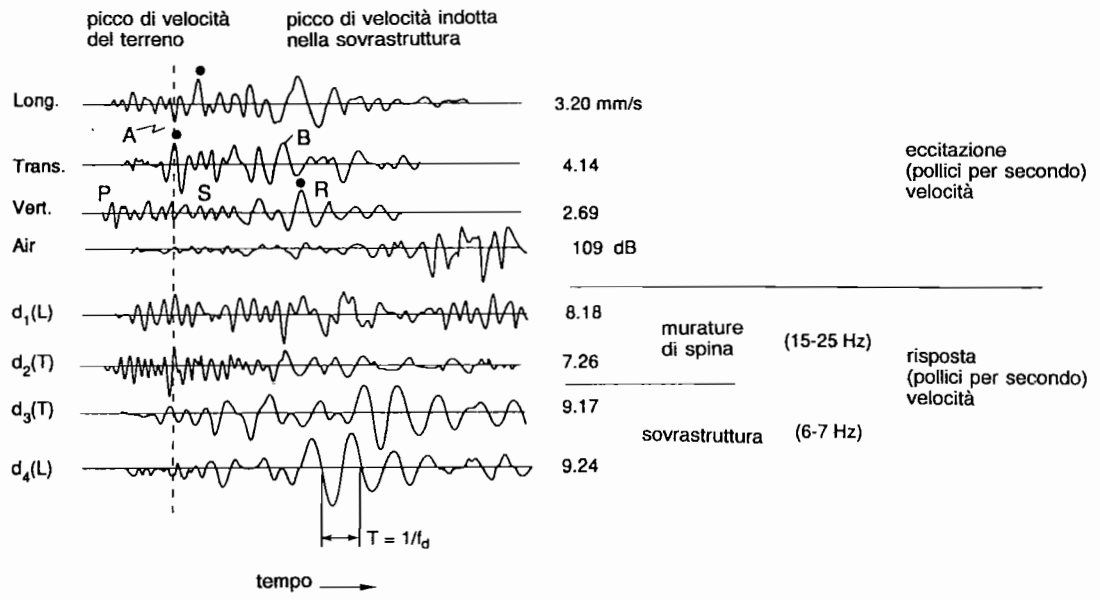


Fig. 1 - Confronto tra le vibrazioni propagantisi nel mezzo solido (onde sismiche) ed in aria (onde di sovrappressione aerea) e le vibrazioni da queste indotte nelle murature di fondazione e nelle sovrastrutture di civili abitazioni. Le misure sono state effettuate ad una distanza di circa 600 m per una tipica volata di produzione in una miniera di carbone a cielo aperto [10].

valori massimi per ciascuna componente (vedi i punti in Fig. 1) indipendentemente dall'istante in cui questi massimi si verificano. Lo pseudo-vettore massimo può essere superiore anche del 40% rispetto al vettore massimo il quale, a sua volta, è di solito del 5% ÷ 10% superiore alla maggiore delle tre componenti.

(b) Le osservazioni sperimentali relative al manifestarsi di fratture cosmetiche, che sono alla base dei controlli effettuati nel Nord America, sono state generalmente correlate con i valori massimi di una singola componente, indipendentemente dal suo orientamento. L'utilizzo dello pseudo-vettore somma massimo fornisce quindi un ampio, inspiegato, margine di sicurezza.

(c) Lo sparo delle mine genera due principali tipi di onde: onde di volume (P ed S) ed onde superficiali (R), indicate nel vibrogramma di Fig. 1, registrato a circa 600 m da una volata tipica delle miniere di carbone a cielo aperto.

Le onde di volume si propagano nell'ammasso roccioso o nel terreno, mentre le onde di superficie si propagano in prossimità della superficie o all'interfaccia tra terreni diversi. L'onda di superficie più importante è quella di Rayleigh, denominata R nella traccia verticale di Fig. 1. Le onde di volume possono essere ulteriormente suddivise in onde compressive (compressione o trazione) o onde soniche, ed onde di distorsione o di taglio, indicate rispettivamente con P ed S nella traccia verticale di Fig. 1.

Le volate producono in prevalenza onde di volume a brevi distanze che si propagano sfericamente fino ad incontrare un contatto, quale uno strato di roccia, un terreno o la superficie topografica. Al contatto, si producono onde di taglio e di superficie. Le onde superficiali di Rayleigh divengono importanti a grande distanza come si nota nella traccia verticale di figura 1 dalla relativamente maggiore ampiezza delle onde R rispetto a quella delle P ed S.

*Natura transiente del moto dal brillamento*

4. Bisogna fare attenzione a non confondere gli effetti di vibrazioni armoniche a frequenza unica con quelle delle vibrazioni transitorie ed irregolari provocate dalle volate. La Fig. 1 mostra che la massima ampiezza del moto indotto dal brillamento è raggiunta solamente per uno o due cicli con ampiezza e frequenza relativamente costanti. Il moto indotto dal brillamento non è dunque continuo (ovvero non dura molti cicli) e non è stazionario (ovvero non ha né frequenza né ampiezza costante).

*Approssimazione sinusoidale*

5. Le vibrazioni tipiche dei brillamenti, a prescindere dal tipo di onda, possono essere approssimate a sinusoidi sia in funzione del tempo sia della distanza come mostrato in Fig. 2a e 2b. Questa approssimazione è simile a quella del moto in acqua di un galleggiante di sughero al passaggio di un'onda marina. Lo spostamento del gallegiante è simile allo spostamento «u» della generica particella di terreno dalla sua posizione di riposo. Similmente la velocità del galleggiante che si posta su è giù nell'acqua «$\dot{u}$» è analoga a quella della generica particella di terreno al passaggio dell'onda sismica, da qui il termine velocità della particella o velocità particellare. La forma dell'onda che eccita il galleggiante può essere descritta dalla sua lunghezza d'onda «$\lambda$», cioè la distanza delle creste (i picchi) dell'onda; dalla velocità di propagazione «c» alla quale l'onda viaggia relativamente al galleggiante e dalla frequenza «f» ovvero dal numero di volte in cui il galleggiante va su e giù in un secondo. La frequenza «f» è uguale a «1/T» ovvero al reciproco del tempo impiegato dal galleggiante a completare un ciclo di moto. La frequenza è misurata in cicli al secondo o in Hertz Hz.

(a) Nel modello sinusoidale a frequenza singola l'equazione di spostamento sinusoidale «u» è data da:

$$u = u_{max} \sin (2 \pi f t) \qquad (1)$$

dove:

t: tempo
f: frequenza

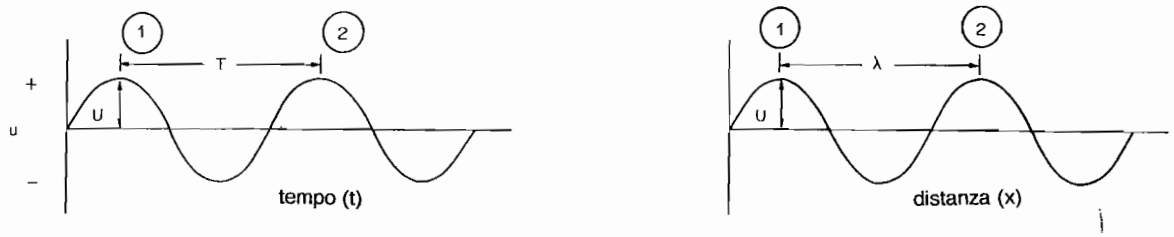


Fig. 2 - Approssimazione sinusoidale [1]: (a) spostamento sinusoidale di un punto (x = costante); (b) spostamento sinusoidale ad un dato istante (t = costante).

u: spostamento al variare del tempo
$u_{max}$: spostamento massimo
$u'_{max} = 2\pi f u_{max}$: velocità massima della particella
$\ddot{u}_{max} = 2\pi u_{max} = 4\pi^2 f^2 u_{max}$: accelerazione massima (2)

Di solito l'accelerazione è misurata in unità di accelerazione gravitativa «g» con $g = 9814$ mm/s$^2$. Ne segue che un'accelerazione di 2.000 mm/s$^2$ è pari a: $2000/9814 = 0.2$ g.

(b) Le relazioni cinematiche tra spostamento, velocità ed accelerazione particellare per treni d'onde complessi sono ricavabili per integrazione o derivazione di uno qualsiasi dei sismogrammi. In particolare l'integrale del sismogramma in accelerazione-tempo porta al sismogramma in velocità-tempo, l'integrale del sismogramma in velocità-tempo porta al sismogramma in spostamento-tempo. Anche se la derivata di un sismogramma in velocità-tempo porta al sismogramma in accelerazione-tempo, tale passaggio non è raccomandato in quanto piccole variazioni nella pendenza del sismogramma di velocità possono portare ad apprezzabili errori. Ulteriori discussioni sulla inaccuratezza della derivazione e della integrazione possono essere tratti dalla [1] e da testi dedicati alla interpretazione dei treni d'onda (ad es. [2]).

*Stima della frequenza dominante*

6. L'adozione di criteri basati sulla frequenza per valutare gli effetti indotti dalle vibrazioni, rende importante la stima ed il calcolo della frequenza dominante o principale. La frequenza dominante può essere stimata attraverso l'analisi visiva del sismogramma (1) o calcolata con lo spettro di risposta (2) o con lo spettro di frequenza di Fourier (3).

(a) L'accuratezza della stima visiva della frequenza dominante è condizionata dalla complessità del treno d'onda. Il treno d'onda con la frequenza dominante più facilmente stimabile è quello con un solo impulso dominante (vedi inserto nella Fig. 3). La frequenza dominante di un singolo impulso è calcolata come l'inverso del doppio dell'intervallo temporale tra due intercette della curva sull'asse orizzontale ai lati del picco.

(b) La registrazione più difficile da interpretare è quella che contiene picchi all'incirca uguali per due frequenze dominanti, come quella in Fig. 1. Le due frequenze dominanti sono quella del tratto iniziale (15-20 Hz, picco A) e del tratto successivo (5-10 Hz, picco B). Come si rileva nella figura, la porzione iniziale induce la più alta risposta nelle murature di fondazione mentre l'altra induce la più alta risposta nelle sovrastrutture. Per la migliore correlazione in frequenza di entrambi i tipi di risposta, entrambe le frequenze dovrebbero essere quindi calcolate

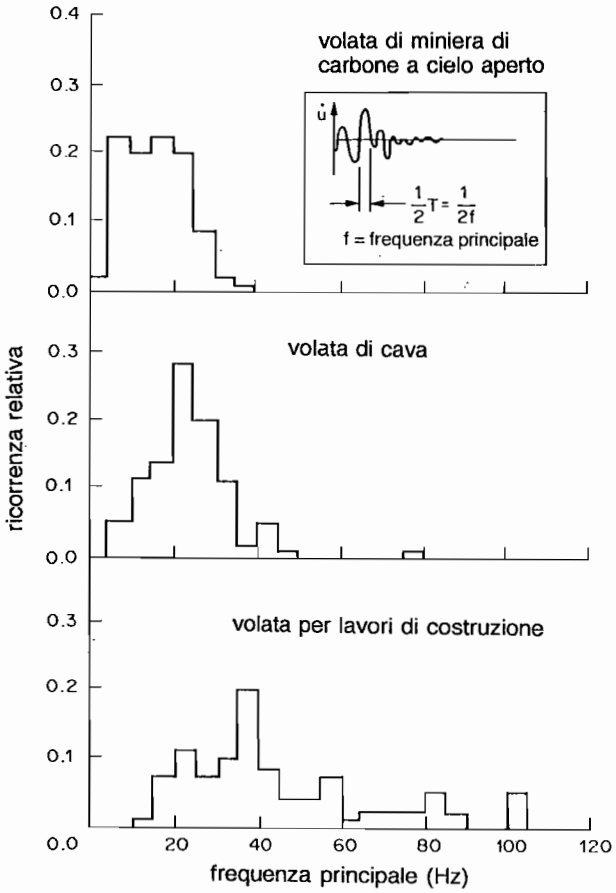


Fig. 3 - Istogrammi della frequenza dominante dell'impulso sismico indotto da volate di vario tipo nei pressi delle strutture. La frequenza dominante è definita nel testo [15].

(c) Il miglior approccio di calcolo per la determinazione della frequenza dominante è quello dello spettro di risposta. Lo spettro di risposta è da preferire allo spettro di Fourier in quanto può essere correlato agli spostamenti della struttura e quindi alle deformazioni [1]. Un approccio di compromesso è quello che prevede di calcolare la frequenza dominante associata a ciascun picco massimo con il metodo dell'intercetta sull'asse orizzontale così come prima descritto.

(d) Poiché generalmente nei sismogrammi non sono presenti molte frequenze predominanti, così come invece accade in Fig. 1, per brillamenti che producono basse velocità delle particelle può essere sufficiente il calcolo della frequenza associata al picco massimo di velocità. Analisi più complesse devono invece essere effettuate quando i valori di picco della velocità si approssimano ai valori limite di sicurezza.

(e) Come mostrato in Fig. 3, se le grandi volate eseguite in coltivazioni di carbone a cielo aperto vengono registrate su strutture relativamente distanti, tendono a produrre vibrazioni con frequenze dominanti più basse di quelle di volate per lavori di costruzione. I brillamenti per lavori di costruzione sono

generalmente effettuati con minori quantità di esplosivo, ma a breve distanza dalle strutture vicine; le onde si propagano, inoltre, in un unica formazione litoide, così che le frequenze predominanti sono più alte [3]. Per il lesionamento di strutture adiacenti le vibrazioni ad alta frequenza associate ai brillamenti per lavori di costruzione sono potenzialmente meno pericolose di quelle a più bassa frequenza, caratteristiche dei brillamenti in cava [1].

*Effetti della propagazione*

7. L'ampiezza delle vibrazioni diminuisce all'aumentare della distanza dal punto di brillamento. Gli effetti di interferenza positiva e negativa e quelli dovuti alla geologia, sono evidenziati dalla dispersione dei dati attorno alla curva di decadimento media dell'ampiezza al variare della distanza. Per quanto ampia sia la fascia di dispersione dei dati attorno alla curva dei valori medi, (in qualsiasi studio di vibrazioni indotte da volate) è possibile individuare un decadimento dell'ampiezza all'aumentare della distanza dal punto di brillamento (la velocità «$\ddot{u}_{max}$» cresce con la carica fatta detonare e decresce con la distanza dal punto di sparo secondo una legge di potenza del tipo: $\ddot{u}_{max} = K \cdot W/R$; dove K, e sono parametri funzione del di volata, di esplosivo e del mezzo di propagazione; R e W sono la distanza dal punto di volata e la massima carica fatta brillare per ritardo. La relazione sopra riportata, può essere anche espressa nella forma: $\ddot{u}_{max} = K \cdot (R/W^c)^- = K \cdot (DS)^-$ dove «c»(=/), K e sono calcolate da misure in situ e $DS = R/W^c$, è una distanza scalata carica N.d.T.). Tipici esempi di queste curve di decadimento sono riportati nella Fig. 4, in cui la velocità delle particelle è tracciata come funzione della distanza dal punto di brillamento scalata sulla radice quadrata della carica esplosiva.

(a) Normalmente la distanza dal punto di sparo viene scalata sulla radice quadrata della carica esplosiva e non sulla radice cubica come deriverebbe da considerazioni in termini di energia del fenomeno [4]. Sia lo scalamento in base alla radice quadrata che quello in base alla radice cubica, possono essere utilizzati per confrontare dati di campagna e per prevedere l'attenuazione o il decadimento del picco di velocità delle particelle; ciò nonostante lo scalamento in base alla radice quadrata della carica è il più usato. Talvolta è utilizzato un esponente «n» della carica per lo specifico sito così che la distanza scalata prende la forma di $R/W^n$, dove «n» è determinato empiricamente mediante aggiustamento della curva (3).

(b) Alcune delle leggi di decadimento utilizzate negli USA, con distanza scalata sul quadrato della carica, sono indicate nella Fig. 4. Queste sono comprese entro fasce in modo da inglobare la dispersione dei dati caratteristica delle misure di vibrazioni indotte dal brillamento di cariche esplosive. La curva più alta dovrebbe essere utilizzata per il *presplitting* (pre-sparo), sparo a cratere e spari di rinora (spari di apertura di nuovi fronti). Questa è anche il riferimento fornito dall'OSM (Office of Surface Mining., Ufficio delle Miniere a Cielo Aperto degli USA) per il dimensionamento prudenziale delle volate nel caso in cui non sia previsto il controllo strumentale delle vibrazioni indotte.

(c) Anche le frequenze predominanti del treno d'onda sismico tendono ad abbassarsi con l'aumentare della distanza dal punto di sparo e con crescente importanza delle onde superficiali. Alle grandi distanze, caratteristiche delle miniere a cielo aperto, le onde di volume con le più alte frequenze tendono ad avere un'ampiezza inferiore a quella delle onde superficiali con frequenza più bassa, così come mostrato nella Fig. 1. Poiché basse frequenze possono determinare effetti strutturali più rilevanti (5), come mostrato in Fig. 1, le distanze scalate di sicurezza indicate dall'OSM diminuiscono all'aumentare della distanza assoluta.

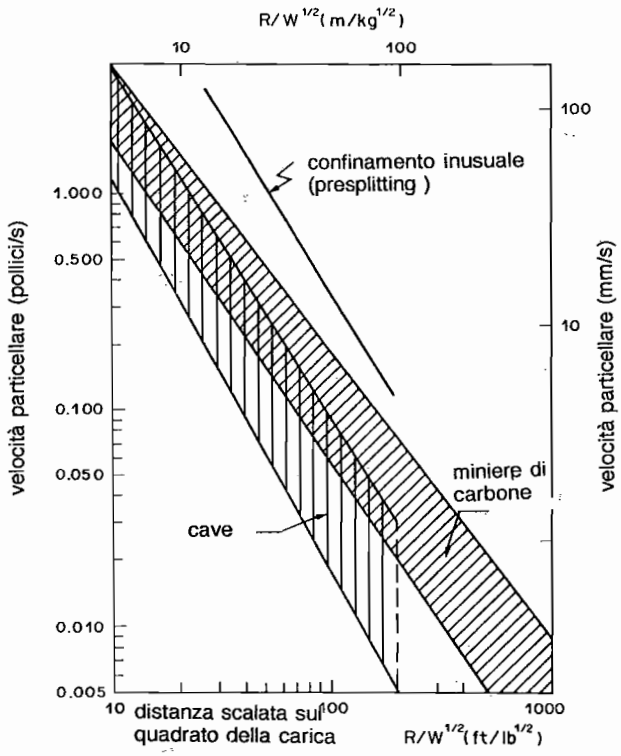


Fig. 4 - Curve di decadimento della velocità particellare nel terreno al passaggio del transiente sismico. Dal grafico è visibile la dispersione dei dati determinata dalle caratteristiche geologiche, dallo schema di volata e le alte velocità attese per spari confinati, quali il presplitting.

*Onda di sovrappressione aerea indotta dal brillamento*

8. Sebbene tecnicamente i disturbi propagantisi in aria non siano direttamente correlati con il moto del terreno, le onde di sovrappressione in aria indotte dal brillamento di cariche esplosive contribuiscono al disagio indotto sulla popolazione all'intorno e pertanto ne diviene opportuna la documentazione.

Precedenti ricerche hanno dimostrato che il rumore entro una struttura (per effetto rispettivamente del brillamento e del bang prodotto dagli aerei quando superano il muro del suono) è fonte di numerose lamentele. La frazione udibile dell'onda di sovrappressione aerea, produce direttamente rumore mentre la frazione a frequenza inferiore, da sola, o in combinazione col moto indotto dalle vibrazioni, produce movimento della struttura che si tramuta anch'esso in rumore. La sovrappressione aerea può portare alla rottura dei vetri delle finestre; tuttavia, affinché tale evento si verifichi, devono essere raggiunte ampiezze non usuali.

(a) Così come per le vibrazioni indotte nel terreno anche le onde di sovrappressione aerea possono essere descritte attraverso il treno d'onda (ampiezza al variare del tempo, N.d.T.) come mostrato nella Fig. 1. La frazione a frequenza più alta dell'onda di sovrappressione rientra nella gamma di frequenze udibili. Le frazioni a frequenza minore sono meno udibili ma eccitano le strutture provocando movimenti i quali, a loro volta, producono un caratteristico rumore di scuotimento (*rattling*) che è causa di molte lamentele. L'eccitazione delle murature dovuta all'onda di sovrappressione aerea è visibile dal confronto tra il treno d'onda di sovrappressione aerea e la risposta delle murature, nella parte all'estrema destra dei vibrogrammi in Fig. 1, là dove non c'è più moto del terreno. A differenza del moto del terreno l'onda di sovrappressione aerea può essere rilevata completamente dalla misura con un unico trasduttore in quanto il valore dell'onda di sovrappressione aerea in qualsiasi punto è uguale in ciascuna delle tre direzioni ortogonali.

(b) La propagazione dell'onda di sovrappressione indotta dal brillamento è stata studiata da numerosi ricercatori; generalmente la distanza dal punto di sparo viene scalata in base alla radice cubica piuttosto che in base alla radice quadrata. Il picco di pressione è indicato in termini di decibels «dB», che sono definiti come:

$$dB = 20 \log_{10}(P/P_0), \qquad (3)$$

dove P è il picco di sovrappressione misurato e $P_0$ è una pressione di riferimento pari a $2 \times 10^{-5}$ Pa.

(c) Il valore misurato del picco di sovrappressione aerea dipende sia dal tipo di strumentazione sia dal tipo di volata. Nella Fig. 5 l'effetto della scala di ponderazione è ben evidente. Il fattore di ponderazione «C» riduce enormemente il valore del picco di sovrappressione per qualsiasi distanza scalata. Ciò non significa che il picco è ridotto al variare della strumentazione ma solo che il sistema non risponde agli impulsi di pressione a bassa frequenza. Questi picchi di pressione a bassa frequenza eccitano le strutture ed i loro occupanti, sia che siano rilevati dalla strumentazione sia che non lo siano. Le altre indicazioni (5 e 0.1 Hz) indicano il confine di bassa frequenza delle capacità di registrazione dei sistemi definiti «lineari».

(d) In secondo luogo l'effetto dello sfiato dei gas di esplosione, conseguente ad un non ideoneo borraggio della carica nel foro, è indicato nella Fig. 5 dalla più alta pressione media prodotta dai *parting shots* a qualsiasi distanza scalata. I *parting shots* sono gli spari fatti brillare in piccoli strati di roccia tra banchi di carbone in miniere a cielo aperto. Conseguentemente c'è meno lunghezza del foro disponibile per il borraggio e questi fori possono, talvolta, fare cannone e produrre conseguentemente anomali valori del picco di sovrappressione. La legge di decadimento per spari non confinati dovrebbe essere

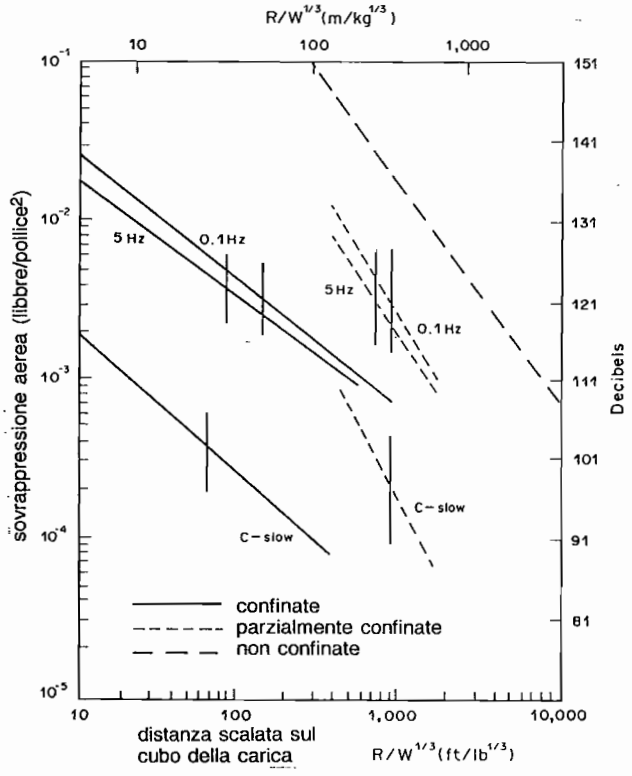


Fig. 5 - Curve di decadimento dell'onda di sovrappressione aerea indotta da volate di abbattimento confinate e parzialmente confinate in miniere di carbone a cielo aperto e da spari non confinati [29].

utilizzata per lavori di demolizione con aggiustamenti che tengano conto degli effetti dovuti alle riflessioni ed alle condizioni meteorologiche.

(e) Uno strato di inversione termica dell'aria provoca la rifrazione verso terra dell'onda di sovrappressione aerea con possibilità, entro aree di oltre 16 acri (60.000 $m^2$), di amplificazione del picco. L'inversione termica ha luogo quando la consueta diminuzione di temperatura all'aumentare dell'altitudine è invertita a causa della presenza di strati più cáldi in quota. Schomer ed altri [6] hanno mostrato che per distanze di propagazione di 3-60 km, l'inversione termica può produrre zone di intensificazione del picco, per onde di sovrappressione aerea attenuate o di bassa ampiezza, sino a tre volte i valori medi con un incremento medio di 1.8 volte (5.1 dB). A distanze inferiori ai 3 km, dove più frequentemente si registrano i più alti valori del picco di sovrappressione aerea, le misure dell'autore sopraccitato hanno dimostrato che l'inversione termica non produce alcun effetto.

## Tecniche di misura e strumentazione

9. In questa sezione sono descritte le caratteristiche degli strumenti che misurano le vibrazioni nel terreno (accelerazioni, velocità, spostamenti) ed in aria (onda di sovrappressione aerea). Poiché ci sono molte eccellenti fonti di informazioni sulla strumentazione le principali caratteristiche dei sistemi disponibili saranno sintetizzate piuttosto che trattate in dettaglio. La più completa singola fonte di informazione, periodicamente aggiornata è lo *Shock and vibrations handbook* [7]. Specifiche informazioni sul controllo strumentale delle vibrazioni indotte dal brillamento delle cariche esplosive sono contenute in recenti pubblicazioni dell'ufficio delle Miniere degli USA e dell'OSM [8].

(a) Nella Fig. 6 è riportata la schematizzazione di uno strumento portatile da campagna, operante con batteria da 12 V. Esso consiste in trasduttori (1) i quali trasformano il fenomeno fisico (accelerazione, velocità, spostamento, sovrappressione) in corrente elettrica la quale è trasmessa attraverso cavi (2) ad un sistema di amplificazione (3); segue una memoria di massa, analogica o digitale (4) nella quale sono memorizzate le variazioni temporali dell'evento misurato ed infine un dispositivo per la stampa dell'evento misurato (5). La varietà di configurazioni di questi cinque componenti di base è innumerevole. Tuttavia le migliori comprendono microprocessori (computer) per l'acquisizione, lo stoccaggio e la riproduzione delle registrazioni.

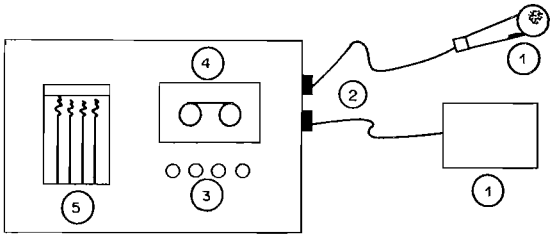


Fig. 6 - Schematizzazione di uno strumento per il controllo delle vibrazioni indotte dalle volate, con l'indicazione dei cinque componenti principali [1]. 1) Trasduttori di velocità (tre direzioni ortogonali di cui una verticale e due orizzontali) ed un trasduttore di sovrappressione aerea; 2) Cavi; 3) Amplificatore; 4) Registratore (a nastro, disco o memoria elettronica); 5) Oscilloscopio o stampante.

(b) Benché la misura tradizionalmente scelta sia quella della velocità delle particelle, di fatto sono le deformazioni delle strutture che inducono i lesionamenti. Le deformazioni dovrebbero essere misurate direttamente dagli spostamenti relativi su strutture o sulla roccia nei punti critici (per esempio condutture o geometrie inusuali di scavi) e possono essere effettuate da una grande varietà di strumenti per la misura delle deformazioni o degli spostamenti relativi. [9, 10]. Sfortunatamente questi punti critici possono essere non noti oppure in numero tale da rendere antieconomica la misura. Diviene pertanto necessario disporre di metodi di stima.

(c) Se sono note le caratteristiche di risposta in frequenza della struttura, le forme d'onda delle vibrazioni indotte nel terreno e nell'aria possono essere utilizzate per calcolare lo spostamento relativo di componenti strutturali [1]. Questi spostamenti relativi possono conseguentemente essere utilizzati per calcolare le deformazioni. La accuratezza di queste stime è limitata dalla misura in cui la struttura si comporta come un sistema ad un solo grado di libertà e dalla accuratezza della stima delle caratteristiche di risposta dinamica.

### *Corretta misura della velocità particellare*

10. Sebbene tutti e tre i parametri cinematici caratteristici (accelerazione, velocità e spostamento) possano essere utilizzati per la descrizione del moto del terreno, la velocità è quello da preferire. La velocità è sperimentalmente meglio correlata con i livelli di danno indotti dalle volate. Oltretutto può essere integrata per calcolare gli spostamenti. Se è necessario conoscere l'accelerazione sarebbe preferibile una misura diretta, onde evitare la derivazione del sismogramma della velocità. L'integrale delle forme d'onda in seguito alla somma vettoriale delle tre com-

ponenti (verticale, orizzontale longitudinale ed orizzontale trasversale, N.d.T.) dovrebbero essere effettuato solo previa verifica di eventuali sfasamenti tra le componenti.

(a) Il punto su cui effettuare la misura varia da uno stato all'altro. Nel Nord America la misura dell'eccitazione, ovvero del moto del terreno, è effettuata nel terreno in prossimità della struttura da controllare. In Europa la misura è effettuata sulle fondazioni della struttura. Tale differenziazione è dovuta più a precedenti metodologici in fase di osservazione scientifica dei fenomeni che a differenze della filosofia di approccio. In Nord America molto spesso è impossibile piazzare i trasduttori sulle strutture di terzi non direttamente coinvolti nei lavori. Oltretutto se è necessario descrivere il moto di eccitazione questo deve essere misurato sul terreno adiacente e non sulla struttura. Se è necessario misurare la risposta strutturale al moto allora i trasduttori dovrebbero essere posizionati sulle componenti strutturali più sensibili e quindi non sulle fondazioni e sulle mura di fondazione che sono confinate dal terreno sovrastante e circostante.

(b) Vista l'importanza della frequenza di eccitazione dovrebbe essere misurata la forma d'onda per le tre componenti del moto del terreno. La registrazione del solo picco massimo non consente, infatti, l'acquisizione di informazioni relative alla frequenza o alle frequenze dominanti del transiente sismico ed all'evoluzione temporale del fenomeno, fattore rilevante per la risposta in frequenza della struttura e delle deformazioni nell'ammasso roccioso. I valori di picco e la frequenza dominante possono essere utilizzati per la descrizione di variazioni di basso livello e non critiche. Gli apparecchi utilizzati per il controllo strumentale dei valori critici delle vibrazioni (I tipo appresso descritto) dovrebbero essere in grado di registrare tutta l'evoluzione temporale del fenomeno. Apparecchi che registrano solo il valore di picco (II tipo appresso descritto) possono essere affiancati a quelli di I tipo per fornire misure ridondanti e solo là dove l'ampiezza delle vibrazioni indotte sia bassa e la frequenza caratteristica non vari molto.

*Risposta in frequenza dei trasduttori*

11. La risposta in frequenza è il campo di frequenze entro il quale il segnale elettrico del trasduttore è lineamente proporzionale all'ampiezza dell'evento misurato. Il legame tra segnale elettrico di trasduzione ed ampiezza dell'evento è normalmente espresso in decibel dB. Per esempio una risposta lineare entro 3 dB tra 2 200 Hz sta a significare che il trasduttore genera un voltaggio costante con un 30% di variazione tra 2 e 200 Hz. Generalmente è meglio richiedere lo spettro di risposta del trasduttore (tipo quello di Fig. 7) per determinare la specifica frequenza alla quale questa differenza ha luogo. Molti fabbricanti di sistemi di misura per le vibrazioni indotte dai brillamenti stanno ampliando elettronicamente l'output alle basse frequenze per poter usare trasduttori ad alta frequenza che sono più piccoli. Gli strumenti con tale amplificazione elettronica devono essere calibrati fisicamente come descritto nel seguito.

(a) La scelta della appropriata risposta in frequenza dei trasduttori di velocità va fatta sulla base di due considerazioni: misura del fenomeno «vero» e misura efficiente delle caratteristiche importanti. Sfortunatamente l'intera gamma di frequenze necessarie per la descrizione del vero fenomeno legato all'esplosione è troppo ampia per qualsiasi trasduttore. Gli impulsi ritardati di pressione dei gas di esplosione hanno luogo con una frequenza inferiore ad 1 Hz ed in prossimità del punto di sparo sono state misurate accelerazioni con frequenze superiori a 1.000 Hz. Ne segue che è necessario arrivare ad una soluzione di compromesso nella individuazione del fenomeno vero quando si adotta un unico tipo di trasduttori. La scelta ottimale delle caratteristiche del trasduttore deve comunque essere fatta sulla base delle caratteristiche specifiche del moto da misurare.

(b) Il monitoraggio delle vibrazioni per il controllo delle lesioni cosmetiche in strutture di modesta altezza, è generalmente effettuato sulla base delle misure della velocità della particella di terreno, in una gamma di frequenze da 2 a 200 Hz. Questa gamma assicura una appropriata registrazione di ampiezze

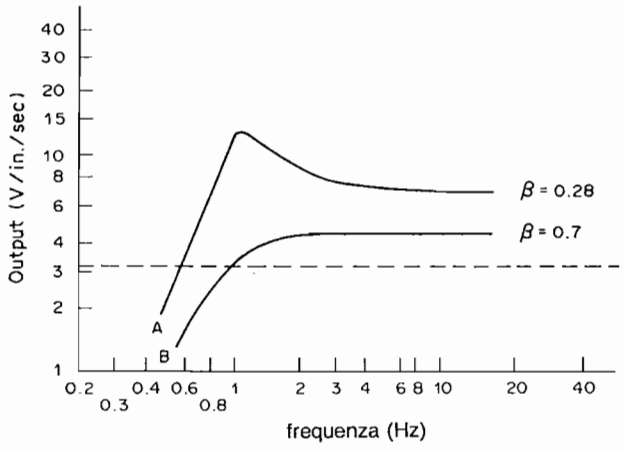


Fig. 7 - Esempio di spettri di risposta di un trasduttore di velocità a vari livelli di smorzamento percentuale. Con uno smorzamento al 70% di quello critico questo sistema ha una risposta di −3 dB (30%) in corrispondenza della frequenza di 1 Hz [1].

a frequenze di eccitazione che: (1) coprono la gamma di frequenze fondamentali delle strutture e (2) sono associate ai quei valori di picco della velocità che inducono i maggiori spostamenti (ovvero che sono dominanti). Le frequenze di risposta delle strutture sono generalmente comprese tra 5 e 10 Hz per manufatti ad uno o due piani e tra 10 e 30 per le murature ed i solai. Alcuni apparati meccanici possono avere frequenze fondamentali prossime a 100 Hz ma questi sono solitamente ancorati e posti in eccitazione da solai e murature con frequenze caratteristiche molto minori. Le tipiche frequenze predominanti di eccitazione variano tra 5 e 100 Hz come mostrato in Fig. 3. Per il controllo strumentale di moti con frequenze inusuali o con elevate frequenze predominanti diviene necessario l'impiego di trasduttori speciali con risposta lineare nella gamma di frequenze di interesse [30].

*Accoppiamento dei trasduttori al mezzo di propagazione dell'onda*

12. Uno degli aspetti più critici del controllo strumentale delle vibrazioni è l'installazione sul sito dei trasduttori. L'installazione è tanto più importante quanto maggiore è l'accelerazione massima del treno d'onda che deve essere misurato. Quando la componente verticale della accelerazione è inferiore a 0.2 g la soluzione più semplice è quella di accoppiamento del trasduttore su una superficie piana del mezzo sul quale effettuare la misura. In questo ambito la possibilità di oscillazione del trasduttore ovvero del contenitore entro il quale il trasduttore è sistemato, è molto bassa così che il trasduttore può essere semplicemente appoggiato su di un piano orizzontale senza ancoraggi. Quando l'accelerazione massima varia tra 0.2 e 1.0 g il trasduttore deve essere completamente immerso se la misura è effettuata su terreno [11]; non è opportuno l'ancoraggio del trasduttore al suolo mediante punta, in quanto il sistema risultante potrebbe condizionare la misura con una propria frequenza di risposta libera. Nel caso in cui la superficie di misura è costituita da roccia, asfalto o cemento il trasduttore dovrebbe esservi accoppiato per mezzo di nastri epossidici biadesivi o cementi a presa rapida (cemento ad idrocalumite o altri cementi a base di gesso con tempo di presa di 15-30 minuti). Se il metodo precedente dà risultati insoddisfacenti o se l'accelerazione supera 1.0 g, i traduttori vanno cementati o ancorati alla superficie di misura. Tutti i trasduttori montati su una superficie verticale devono essere ad essa ancorati.

(a) I trasduttori dell'onda di sovrappressione aerea dovrebbero essere montati ad almeno 1 m da terra, puntati verso il basso in modo da evitare danni per la pioggia e coperti dallo speciale cappuccio per ridurre la sovrappressione apparente causata dal vento.

*Registratori digitali, a nastro magnetico ed a carta*

13. Il mercato delle strumentazioni dedicate è attualmente dominato dai sistemi a microprocessore (computer) o digitali. Questi infatti sono facili da usare e possono essere collegati ai personal computer comunemente usati in ufficio. Il segnale dal trasduttore è campionato ad un certo intervallo, ad esempio 1.000 volte al secondo, e ciascun campione è convertito in una grandezza singola, in un numero. La registrazione digitale ha molti vantaggi. È accurata poiché eventuali variazioni nella velocità di scorrimento del nastro magnetico utilizzato come memoria di massa non condizionano la misura e, oltretutto, i dati registrati possono essere direttamente acquisiti con un computer. I dettagli sul procedimento di digitalizzazione sono discussi altrove [1].

(a) Tra i sistemi di registrazione che utilizzano registratori a nastro, la maggior parte utilizza cassette FM compatte ma i migliori utilizzano tecniche di registrazione digitale. Molti dei sistemi comprendono sistemi separati di registrazione e restituzione in modo da ridurre la complicazione del sistema. Molta cura deve essere riposta nella determinazione delle specifiche della strumentazione prima dell'acquisto in quanto la prestazione di molti di questi sistemi varia alle basse temperature.

(b) La registrazione permanente o «*hard copy*» della variazione temporale del fenomeno vibratorio può essere effettuata su carta fotosensibile, floppy disk, cips alimentati con batterie a tampone o carta; Quasi tutti i sistemi di registrazione basati su film utilizzano carta fotosensibile (ai raggi ultravioletti), che si sviluppa direttamente in campagna, in combinazione con oscilloscopi, per registrare vibrazioni ad alta frequenzaa. La più recente generazione di strumenti utilizza microcomputer con stampanti ad aghi e/o floppy disk. Sfortunatamente quelle che stampano immediatamente dopo aver registrato l'evento sono in grado di registrare un altro evento solo dopo aver completato la stampa. In caso di brillamenti sequenziali diviene pertanto opportuno stabilire in anticipo il tempo necessario per il resettaggio della strumentazione. Oltretutto la prestazione delle stampanti alle basse temperature è variabile e deve convenientemente essere studiata in anticipo.

(c) Molti registratori possono essere acquistati sia con canale singolo che multi canali. Per il monitoraggio dei brillamenti è necessario una unità a quattro canali: misura della velocità nelle tre componenti (V, L, T) e misura dell'onda di sovrappressione ae-

rea. La tendenza attuale è quella di includere nella strumentazione un amplificatore di condizionamento del segnale per consentire una amplificazione flessibile del segnale.

(d) Per l'analisi in frequenza del segnale è necessario disporre della variazione temporale dell'evento e quindi di qualche tipo di registrazione permanente. Gli strumenti che registrano solo il picco non permettono l'analisi di frequenza. L'invio delle registrazioni ad un interpretatore può comportare un ritardo variabile, da alcuni giorni ad un mese nell'analisi dei dati. I sistemi con restituzione della registrazione su carta fotosensibile e con stampanti a matrici consentono l'immediata interpretazione delle frequenze senza costosa attrezzatura addizionale.

*Calibrazione*

14. Per utilizzare in modo corretto i dati registrati l'intero sistema di misura deve essere calibrato. I fabbricanti forniscono, assieme ai loro strumenti, curve di calibrazione analoghe agli spettri di risposta in frequenza per i trasduttori mostrati in Fig. 7. Per la ricalibratura o per il controllo sono necessarie tavole vibranti nelle quali la frequenza e l'ampiezza del moto può essere fatta variare in modo controllato. È pure necessario un circuito di controllo per provare, in campagna, l'anima magnetica del geofono [12].

*Numero di strumenti*

15. Sebbene il numero minimo di strumenti, ovvero di punti di misura triassiale per la registrazione della eccitazione indotta dal brillamento dell'esplosivo, sia pari ad uno, è anche vero che due punti di misura forniscono una più ampia descrizione sulla variazione spaziale degli effetti indotti. Se viene utilizzato solo uno strumento questo dovrebbe essere ubicato nel punto più vicino o nel punto più critico. Questo unico strumento, I tipo, dovrebbe registrare le tre componenti della velocità particellare al passaggio del transiente sismico e l'onda di sovrappressione aerea.

Lo strumento deve essere in grado di entrare in funzione automaticamente ed essere capace di registrare anche nel corso della stampa o della trasmissione dei risultati. Quando il brillamento coinvolge varie strutture site a centinaia di metri di distanza l'una dall'altra, allora il numero minimo di punti di strumento è pari a 2 e quello ottimo è pari a 4. Un ulteriore strumento a disposizione in caso di guasto degli altri assicura il controllo continuativo.

(a) Il secondo e quarto strumento nelle situazioni soprascritte possono anche fornire un livello di informazioni più basso e potranno essere del II tipo. Questi devono, al limite, registrare il picco di velocità su un asse e possono anche non registrare il picco di sovrappressione aerea. La componente da misurare è preferibilmente la verticale, poiché non si richiedono decisioni riguardanti le componenti orizzontali e poiché le onde di superficie usualmente hanno una componente verticale significativa indipendentemente dalla direzione della massima componente orizzontale.

Questi strumenti dovrebbero essere collocati ad una distanza maggiore di quella della struttura più vicina allo sparo così da estendere l'area di monitoraggio.

(b) Il terzo strumento di riserva può essere sia del I che del II tipo. Quando è importante l'onda di sovrappressione aerea ovvero la conoscenza delle frequenze associate al treno d'onda, lo strumento di riserva dovrebbe essere del I tipo. Questo strumento di riserva può anche essere utilizzato per controllare zone in cui si sono avute proteste. Questo «monitoraggio per relazioni pubbliche», è essenziale in Nord America in quanto, anche quando i limiti di sicurezza delle raccomandazioni sono rispettati per tutti gli effetti indotti dal brillamento, sono intentate cause per danni (lo stesso accade in Italia, N.d.T.).

(c) L'approccio sopra descritto indica il numero minimo di strumenti. Un numero maggiore di strumenti può essere richiesto comunque per l'applicazione di specifici regolamenti minerari o di costruzione o per il rispetto del programma dei lavori. Un numero maggiore di strumenti può essere richiesto per la misura della risposta locale della struttura in aggiunta alla misura delle vibrazioni nel terreno; in ogni caso i limiti di controllo sono basati sul moto di eccitazione del terreno e non sulla risposta strutturale (negli USA; N.d.T.).

*Posizionamento degli strumenti in fase di sparo di prova*

16. Quando ha inizio un lavoro da mina, quando variano radicalmente le condizioni geologiche o quando vengono modificati gli inneschi delle cariche dovrebbero essere effettuati degli spari di prova in modo da ridurre il numero di strumenti necessari per il monitoraggio delle volate. La scelta del punto in cui posizionare lo strumento deve essere mirata alla rapida definizione dei parametri caratteristici della curva di decadimento dell'onda sismica e dell'onda di sovrappressione aerea. Tali parametri variano da sito a sito e sono funzione della geologia, e dei parametri caratteristici della volata. Oltretutto gli spari di prova consentono di individuare il contenuto in frequenza delle vibrazioni per diverse distanze scalate ed assolute.

(a) La legge di attenuazione non è solo funzione del sito. Essa è funzione della geologia ed è condizionata dalla geometria della volata e dalla successione di innesco delle cariche. Per esempio, a parità di quantità di esplosivo detonato simultaneamente, una volata con una spalla d'abbattimento maggiore, porterebbe ad una legge di decadimento parallela a quella di Fig. 4, ma con un valore di intercetta maggiore sull'asse della velocità. Inoltre, la variazione dell'intervallo temporale di innesco delle cariche produrrebbe modifiche nella forma d'onda sia in termini di lunghezza che di contenuti in frequenza.

(b) Durante gli spari di prova dovrebbe essere utilizzato un minimo di quattro strumenti per la misura del picco di velocità lungo una direzione a varie distanze scalate per lo stesso sparo. In tal modo i parametri e la sequenza di innesco delle cariche rimarranno costanti, per ciascuna volata, e la risultante legge di attenuazione mostrerà solo gli effetti della distanza, della direzione e/o della geologia. I sismografi e/o i trasduttori dovrebbero essere ubicati lungo una direzione su cui non vi siano variazioni delle condizioni geologiche, così da meglio determinare la relazione di attenuazione oppure dovrebbero essere piazzati presso tutte le strutture critiche così da determinare gli effetti indotti dalla direzione e da una geologia variabile. Idealmente, l'allineamento ottimale dovrebbe essere lungo un percorso con spessore costante della formazione e non dovrebbe attraversare discontinuità geologiche, come le faglie. Se la geologia cambia sensibilmente allora diviene necessario, ma non per tutti gli spari, effettuare la misura della attenuazione su due allineamenti.

(c) Diversi approcci alla progettazione delle volate per il controllo strumentale sono stati messi a punto. Essi si basano su uno sparo di prova a foro singolo e brillamento singolo ed un certo numero di trasduttori per registrare attenuazione e variazione di frequenza [13]. Queste singole registrazioni dei treni d'onda sono quindi sintetizzate per riprodurre l'effetto prodotto dal brillamento sequenziale di più fori a varie distanze dalla volata. Questi treni d'onda sintetizzati, da utilizzare per la progettazione delle volate, hanno riscosso un successo variabile ma di certo non possono costituire un'alternativa al controllo strumentale continuativo in corso d'opera per il monitoraggio delle strutture critiche.

## Valutazione delle misure

17. La più efficace forma di controllo per i lavori da mina, sotto il profilo normativo, è quella mirata alla definizione degli effetti indotti e non quella che fissa i valori dei parametri significativi della volata. In quanto gli effetti sono molto influenzati dai dettagli dello schema della volata e dalla sequenza degli inneschi. È pertanto impossibile tenere sotto controllo gli effetti della volata fissando solamente due o tre parametri caratteristici della volata. Per esempio, si prenda in considerazione una forma di controllo effettuato specificando la massima carica per ritardo fatta brillare ad una certa distanza dalla struttura più vicina. Persino con una specifica così precisa il livello di sicurezza al di sotto del quale si intendeva mantenersi potrebbe essere superato in conseguenza di una cattiva scelta nell'ubicazione dei fori o della non corretta scelta della sequenza di innesco.

### *Definizioni della risposta strutturale*

18. I risentimenti della struttura sono stati classificati in tre categorie riportate di seguito in ordine di severità decrescente e crescente distanza alla quale hanno luogo [14, 15].

*Risentimenti importanti* – distorsioni permanenti – hanno luogo solo per elevati valori della velocità delle particelle e portano a seri indebolimenti della struttura (per esempio grosse fratture, spostamenti delle fondazioni o delle murature portanti, importanti cedimenti determinanti distorsione e disassamento di murature). *Risentimenti minori* – fessurazione con spostamento – includono fratture superficiali che non condizionano l'assetto statico della struttura (per esempio finestre rotte, intonaco allentato o caduto), fratture capillari nelle murature. *Risentimenti di soglia* – lesionamento cosmetico – ha luogo alle velocità più basse e apre solamente vecchie fratture o produce lesioni capillari negli intonaci delle murature e può dislocare oggetti slegati (per esempio può allentare i mattoni nei camini). Definire queste risposte tutte insieme come «danni» confonde la distinzione tra lesioni cosmetiche e segnale di pericolo strutturale.

### *Analisti statistica dei dati con ispezioni preliminari e successive allo sparo*

19. L'apparizione di lesioni cosmetiche, qualora non dovesse essere possibile la loro misura o la loro documentazione, può essere valutata indirettamente come evento probabilistico. Per poter generalizzare i risultati di dati specifici è stata effettuata molte volte l'analisi della probabilità di apparizione di lesioni cosmetiche per vari livelli di velocità delle particelle [15, 16]. Tutte le osservazioni effettuate da Siskind sono state condotte mediante analisi, precedenti e successive allo sparo, sulle murature di strutture

residenziali in Europa ed in Nord America. Molte delle strutture residenziali analizzate erano vecchie, distorte ed in alcune le murature erano rivestite dall'intonaco. Queste ispezioni ravvicinate, prima e dopo lo sparo, sono necessarie per poter distinguere gli effetti di distorsione strutturale determinati dalle variazioni meteoclimatiche da quelli dovuti alle vibrazioni indotte dallo sparo.

(a) Sono stati analizzati dati, acquisiti da vari gruppi di osservazioni sistematiche, di lesioni con l'ipotesi che ogni osservazione di fessurazione escluda la possibilità che non si verifichino fessurazioni a più elevata velocità delle particelle. (SISKIND *et al.* [15], p. 55). Calcolando la probabilità di lesionamento come il numero percentuale di lesioni prodotte per bassi livelli della velocità si arriva ai grafici riportati nella Fig. 8. Questo approccio è da considerarsi conservativo in quanto, contrariamente a quanto accade nella realtà, è stata esclusa l'eventualità che lesionamenti possano non avere luogo per valori della velocità maggiori.

(b) Con riferimento alla Fig. 8 si rileva che al di sotto dei 12 mm/s pare che in nessuna parte del mondo siano stati rilevati lesionamenti cosmetici o di soglia (estensione di lesioni capillari). Queste osservazioni includono dati con frequenze dominanti inusualmente basse che sono stati raccolti da Dvorak [17]. I dati di Dvorak sono quelli che occupano la parte più bassa del grafico in Fig. 8. I dati ad alta frequenza (>40 Hz) mostrano che una probabilità del 5% di fratture con spostamento corrisponde a velocità particellari superiori a 75 mm/s [15].

(c) I dati forniti da Dvorak sono stati messi in dubbio da alcuni ricercatori in quanto quelli anteriori al 1970 non erano completi della forma d'onda; anche altri studi, come quello di Langefors *et al.* [18], sono carenti per l'assenza delle forme d'onda. Per tener conto di ciò, solo le recenti osservazioni dell'United States Bureau of Mines sono state utilizzate per costruire un nuovo grafico di analisi probabilistica della ricorrenza di fratture, Fig. 9. Le osservazioni includono moti a bassa frequenza indotti dalle volate di miniere a cielo aperto. Anche dal grafico di Fig. 9 si rileva che al di sotto dei 20 mm/s non è stata osservata l'insorgenza di lesioni cosmetiche. Oltretutto questo limite è stato rilevato per eccitazione con bassa frequenza predominante indotta da volate di miniere a cielo aperto.

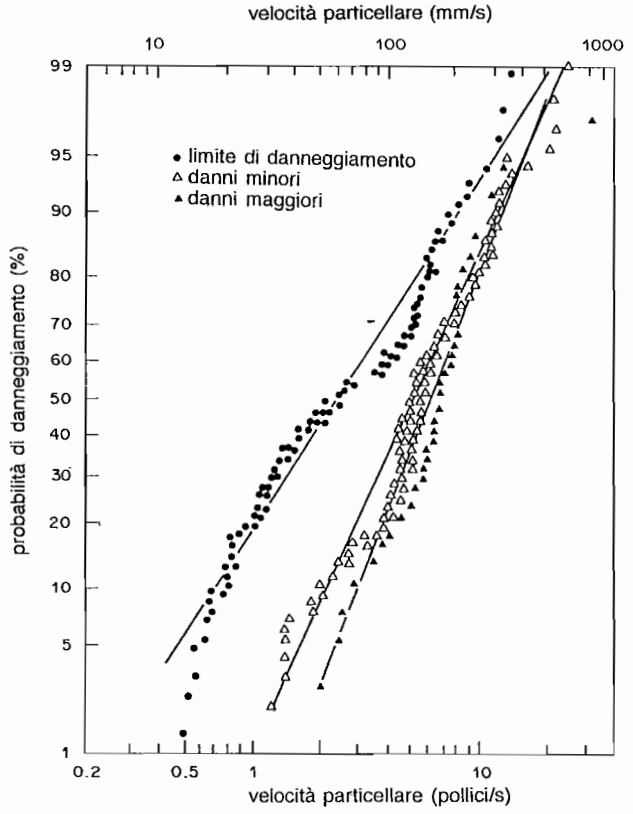


Fig. 8 - Analisi probabilistica effettuata da dati di danneggiamento rilevati in tutto il mondo [15]. La soglia di danneggiabilità consiste nella ricorrenza di lesionamenti cosmetici, capillari, simili a quelli causati dalla dilatazione e contrazione conseguente alla variazione di condizioni meteoclimatiche.

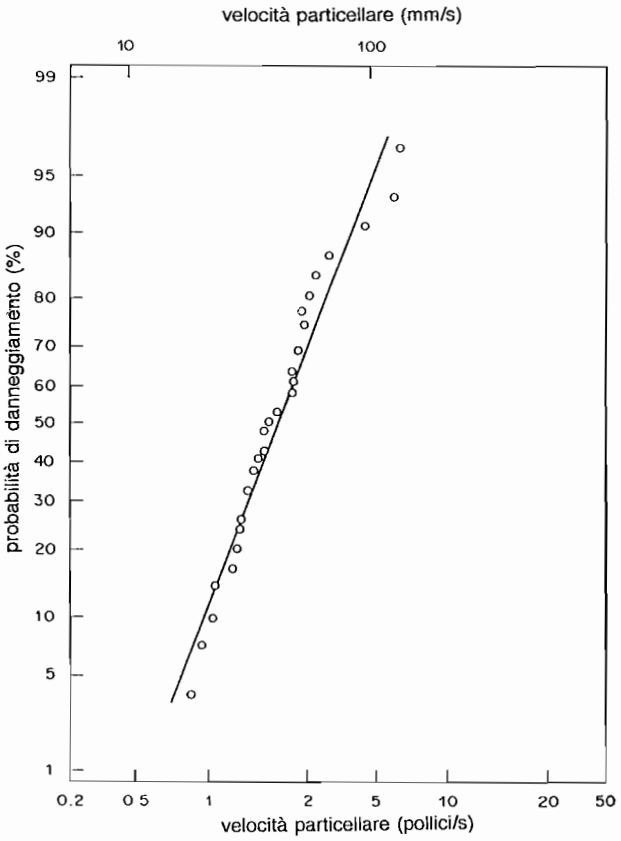


Fig. 9 - Analisi probabilistica dei livelli di soglia per l'insorgenza di lesionamenti ricavata da osservazioni dell'Ufficio Minerario Statunitense [16].

*Controllo in frequenza della risposta strutturale*

20. Le strutture rispondono molto di più all'eccitazione indotta dal moto del terreno quando la frequenza dominante del treno d'onda si avvicina alle loro frequenze caratteristiche. Come mostrato nella Fig. 1, le murature ed i solai rispondono di più alle frequenze più alte (15-20 Hz) nella prima porzione del treno d'onda, mentre le strutture in elevazione o il telaio della struttura rispondono di più alla parte rimanente del treno d'onda o alle frequenze più basse (5-10 Hz).

(a) Differenze nella risposta strutturale del tipo di quelle mostrate nella fig. 1 possono essere calcolate, a partire dal moto del terreno, se sono note o possono essere stimate le frequenze naturali e lo smorzamento delle componenti strutturali. Langan [19] ha mostrato che il valore misurato della risposta strutturale è meglio correlato con la risposta calcolata con un modello ad un singolo grado di libertà (SDOF) piuttosto che con il valore massimo del moto del terreno. Il moto indotto nelle strutture può dunque essere stimato con maggior accuratezza se assunto proporzionale ai valori dello spettro di risposta in corrispondenza delle frequenze naturali della struttura piuttosto che proporzionale al valore massimo del moto del terreno [1].

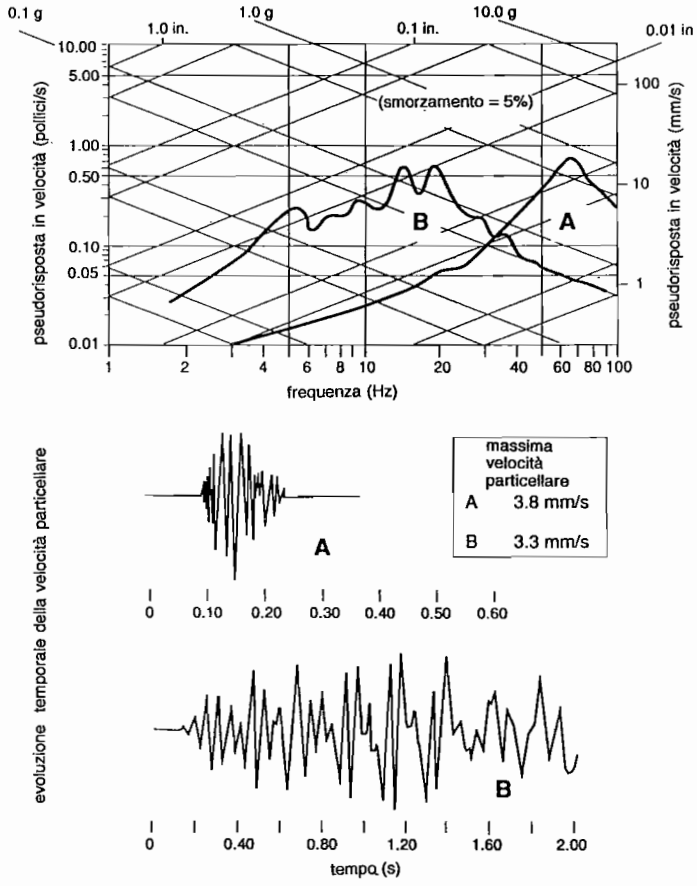


Fig. 10 - Confronto tra l'evoluzione temporale e gli spettri di risposta da vibrazioni indotte da volate per lavori di costruzioni «A» e da volate tipiche di coltivazioni minerarie «B», di durata rispettivamente pari a 0.15 e 0.20 secondi. Anche se le velocità particellari di picco sono quasi uguali la risposta, nella gamma da 5 a 20 Hz, differisce nettamente.

(b) Nella Fig. 10 è riportato il confronto tra l'evoluzione temporale e lo spettro di risposta delle componenti longitudinali di una piccola volata «A» (per costruzioni in centro urbano) e di una grande volata «B» (di produzione in una miniera di carbone a cielo aperto). Quest'ultima è stata realizzata con 12.600 kg di esplosivo ANFO (Nitrato d'Ammonio ed Olio Combustibile) con una massima carica per ritardo prevista pari a 60 kg e fatte brillare a circa 825 m dalla postazione di misura. La piccola volata per costruzioni è stata realizzata con 9 kg di gelatina, con una massima carica per ritardo di 2.3 kg; le vibrazioni sono state misurate a 15 m. Mentre i valori di picco della velocità particellare sono quasi uguali: 3.8 mm/s per la volata «A», 3.3 mm/s per la volata «B», al contrario gli spettri di risposta sono nettamente differenti. In particolare la differenza è molto rilevante nella gamma di frequenze naturali delle strutture residenziali e delle componenti strutturali di queste: 5-20 Hz. In questa gamma di frequenze le vibrazioni indotte dalla volata «B» producono velocità di risposta che sono circa 10 volte maggiori di quele indotte dalla volta «A».

(c) La bassa risposta delle strutture con frequenze naturali comprese tra 5-20 Hz alle eccitazioni ad alta

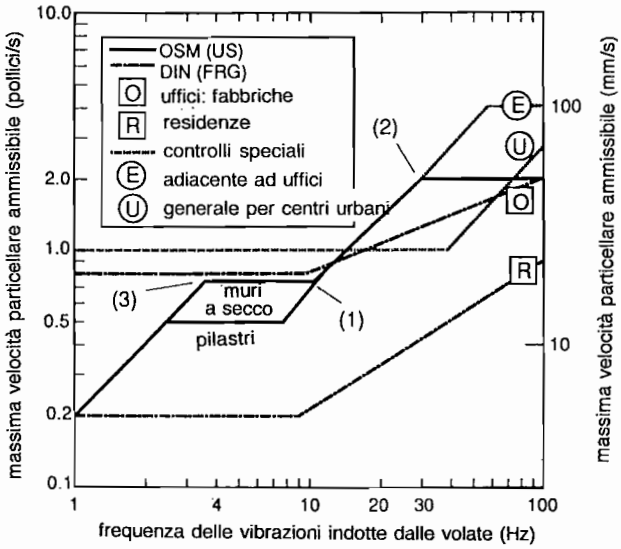


Fig. 11 - Limiti di sicurezza della velocità particellare basati sulla frequenza del transiente sismico: (———) OSM Office of Surface Mining, Ufficio Statunitense delle Miniere a Cielo aperto [21]; (—·—) Deutsche Institut für Normung, Istituto tedesco per la normativa [20]. Gli spigoli delle curve 2 e 3 dell'OSM non sono verificati. Le linee tratteggiate in alto ed in basso sono state utilizzate per attingere condizioni di sicurezza per spari negli immediati pressi di strutture attrezzate (E) ed in centri urbani negli immediati pressi di costruzioni antiche e di palazzi di rilievo storico (U).

frequenza mostrate in fig. 10 ha portato, in Germania e negli USA, all'adozione di standard di sicurezza basati anche sulla frequenza [20, 21]. Entrambi questi standard autorizzano maggiori valori limite della velocità particellare per le eccitazioni con componenti predominanti a frequenza maggiore; essi presentano tuttora una considerevole differenza nell'entità dei valori limite, come mostrato nella Fig. 11. I limiti sono relativi alla velocità particellare misurata nel terreno prospiciente il manufatto (OSM) e sulle fondazioni del manufatto (DIN). A prescindere dalle differenze dei valori limite l'incremento del valore limite in funzione della frequenza è comune ad entrambi le raccomandazioni. Molto lavoro deve essere ancora effettuato per mettere meglio in accordo i valori limite.

*Confronto tra gli effetti indotti dall'esplosivo e gli effetti indotti da agenti ambientali (meteoclimatici)*

21. Velocità particellari inferiori a 25 mm/s inducono modifiche dell'ampiezza delle fratture, minori di quelle prodotte dalla variazione settimanale delle condizioni atmosferiche [10]. Questa conclusione è stata raggiunta dopo aver misurato per 8 mesi le deformazioni indotte dalle volate di una miniera di carbone a cielo aperto, in una casa con telaio di legno, non ben costruita, priva di impianti e macchinari. Le deformazioni sono state misurate in 10 differenti posizioni nelle murature, sia in punti dove l'intonaco delle pareti era precedentemente fratturato che in punti dove esso era sano. Le deformazioni indotte dalle vibrazioni per le volate e quelle indotte dalle variazioni meteoclimatiche sulle fratture nell'intonaco delle pareti più sensibili alle vibrazioni sono mostrate nella Fig. 12. La curva continua, e maggiormente ciclica, è quella delle deformazioni indotte dai cambiamenti delle condizioni meteoclimatiche. I cerchi piccoli indicano, in valore assoluto, le deformazioni dinamiche massime, indotte dalle volate, registrate dallo stesso estensimetro. La deformazione indotta dalla massima velocità particellare registrata, pari a 24 mm/s, è circa tre volte inferiore a quella indotta dalle variazioni di condizioni meteoclimatiche. Altri estensimetri hanno misurato deformazioni massime indotte dalle variazioni di condizioni meteoclimatiche circa 10 volte superiori a quelle massime prodotte dalle volate.

*Strutture confinate e ammassi rocciosi*

22. La capacità di rispondere liberamente alle vibrazioni, amplificando selettivamente le componenti armoniche del treno d'onda incidente, è tipica delle strutture in elevazione, tipo case e pinnacoli di roccia. Al contrario le strutture interrate o confinate, tipo condutture o ammassi rocciosi, non possono rispondere liberamente. A prescindere dal fatto se la risposta sia libera o meno le fratture sono innescate dalle deformazioni. Mentre le deformazioni in una

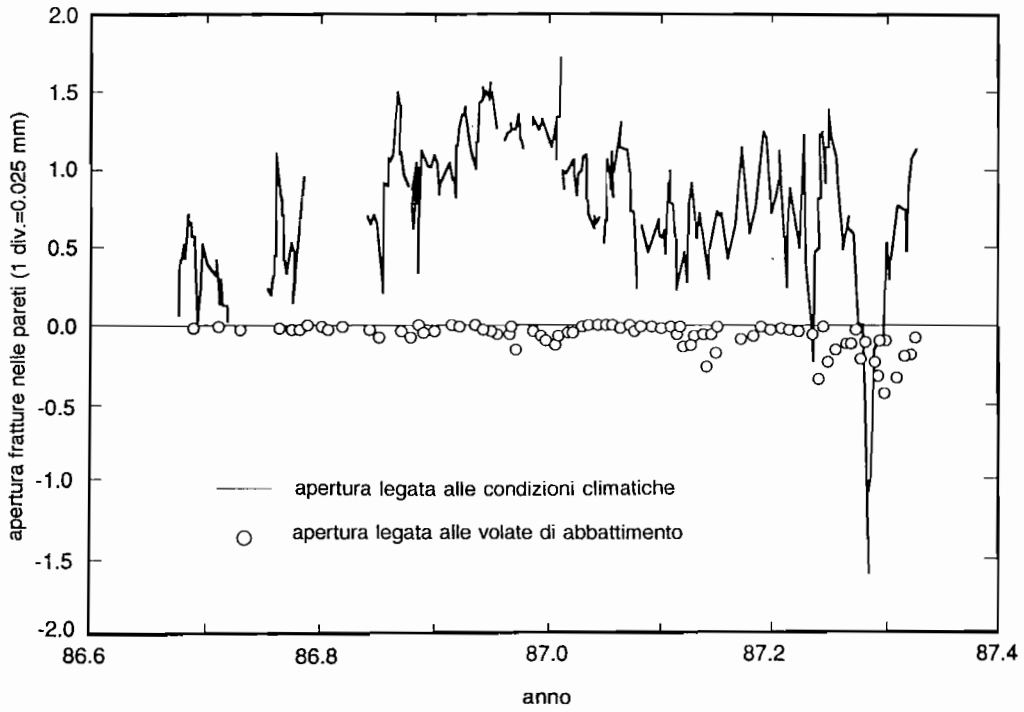


Fig. 12 - Confronto tra l'estensione delle fratture prodotte dalle variazioni di umidità e temperatura (——) e quelle prodotte dalle vibrazioni indotte dal brillamento di volate in miniere di carbone a cielo aperto (cerchietti), in una struttura residenziale con telaio in legno.

struttura che può rispondere liberamente sono proporzionali agli spostamenti relativi tra la struttura in elevazione ed il terreno, le deformazioni in una struttura confinata, tipo una conduttura, saranno pari a quelle del terreno circostante e possono essere approssimate a quelle prodotte da un'onda piana:

$$\varepsilon = \frac{\mathring{u}}{C_c} \quad e \quad \gamma = \frac{\mathring{u}}{C_s}$$

dove $\varepsilon$ e $\gamma$ sono rispettivamente la deformazione assiale e di taglio, Cc e Cs sono rispettivamente la velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio e $\mathring{u}$ è la velocità particellare [1]. Questo calcolo delle deformazioni è approssimato, soprattutto quando la velocità particellare è misurata in superficie, e richiede la misura della Cc e della Cs. molto altro lavoro deve essere fatto per migliorare l'approccio metodologico per la valutazione delle deformazioni.

Ancora molto lavoro è necessario per sviluppare l'approccio metodologico al calcolo delle deformazioni associate al transiente sismico. Nel caso in cui sia necessario tenere sotto controllo una conduttura le misure dovrebbero essere effettuate direttamente sul metallo. Nel caso di controllo dei rivestimenti di tunnel e caverne, le deformazioni critiche dovrebbero essere stimate mediante il calcolo della flessibilità relativa della roccia o del rivestimento [23].

## BIBLIOGRAFIA


1. Dowding C.H. (1985) - *Vibration monitoring and control.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
2. Hudson D.E. (1979) - *Reading and interpreting strong motion accelograms.* Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA.
3. New B.M. (1986) - *Ground vibration caused by civil engineering works.* Transport and Road Research Laboratory, LR53, TRRL, Crowthorne, U.K.
4. Hendron A.J. (1977) - *Engineering of rock blasting on civil projects.* Structural and Geotechnical Mechanics (W.J. Hall, Ed.), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
5. Medearis K. (1976) - *The development of a rational damage criteria for low rise structures subjected to blasting vibrations.* Report to National Crushed Stone Assoc., Washington, DC.
6. Schomer P.D., Goff R.J., Little M. (1976) - *The statistic of amplitude and spectrum of blasts propagated in the atmosphere.* U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Technical Report n. 13.
7. Harris C.M., Crede C.E. (Eds.) (1976) - *Shock vibration handbook.* McGraw-Hill, New York.
8. Rosenthal M.F., Morelock G.L. (1983) - *Blasting guidance manual.* Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, U.S. Department of the Interior, Washington, DC.
9. Stagg M.S., Siskind D.E, Stevens M.D., Dowding C.H. (1984) - *Effects of repeated blasting on a wood-frame house.* U.S. Bureau of Mines, Report of Investigation 8896.
10. Dowding C.H. (1988) - *Comparison of environmental and blast induced effects through computerized surveillance.* The Art and Science of Geotechnical Engineering at the Dawn of the 21st Century, E.B. Peck Honorary Volume (W.J. Hall, Ed.), pp. 143-160. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
11. Johnson C.F. (1962) - *Coupling small vibration gauges to soil.* Eastern Section, Seismological Society of America, Earthquake Notes, vol. XXXIII, n. 3, pp. 40-47.
12. Stagg M.S., Engler A.J. (1980) - *Measurement of blast induced ground vibrations and seismograph calibrations.* U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 8506.
13. Anderson D.A., Winzer S.R., Ritter A.P. (1983) - *Synthetic delay versus frequency plots for predicting ground vibration from blasting.* Proc. 3rd Int. Symp. on Computer Aided Seismic Analysis and Discrimination, IEEE, Computer Society Press, pp. 70-74.
14. Northwood T.D., Crawford R., Edwards A.T. (1963) - *Blasting vibrations and building damage.* The Engineer, n. 215.
15. Siskind D.E., Stagg M.S., Kopp J.W., Dowding C.H. (1980) - *Structure response and damage produced by ground vibrations from surface blasting.* U.S. Bureau of Mines, Report of Investigation 8507.
16. Siskind D.E. (1981) - *Open file report of responses to questions raised by RI 8507. Available for inspection.* U.S. Bureau of Mines, Minneapolis, MN.
17. Dvorak A. (1962) - *Seismic effects of blasting on brick houses.* Prace Geofyrikenina Ustance, Ceskoslovenski Akademie, Ved. n. 159. Geogysikalni, Sbornik.
18. Langefors U., Westerberg H., Kihlström B. (1958) - *Ground vibrations in blasting.* Water Power, Sept.
19. Langan R.T. (1980) - *Adequacy of single-degree-of-freedom system modeling of structural response to blasting vibrations.* M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Northwestern University Evanston, IL.
20. Din (1983) - *Deutsche Normen: Erschütterungen in Bauwesen - Einwirkungen auf bauliche Analgen.* DIN 4150.
21. Osm (1983) - *Office of Surface Mining.* U.S. Dept. of Interior. CFR, vol. XLVIII, n. 46.
22. Dowding C.H., Gilbert C. (1988) - *Dynamic stability of rock slopes and high frequency traveling waves.* J. Geotech. Engng. ASCE, n. 114, pp. 1069-1088.
23. Hendron A.J., Fernandez G. (1983) - *Dynamic and static design considerations for underground chambers.* Seismic Design of Embankments and Caversn (T. Howard, Ed.), American Society of Civil Engineering, Special Technical Publication.
24. Siskind D.E., Fumanti R. (1974) - *Blast-produced fractures in Lithonia granite.* U.S. Bureau of Mines, Report of Investigation 7901.
25. Holmberg R., Persson P.A. (1978) - *The Swedish approach to contour blasting.* Proc. Fourth Conf. on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers, Montville, OH, pp. 113-127.
26. Roth J. (1979) - *A model for the determination of flyrock range as a function of shot conditions.* Report preparated for the U.S. Bureau of Mines by Management Service Association, Los Altos, CA, NTIS, PB81-222358.
27. Lundborg N. (1981) - *The probability of flyrock.* Report DS 1981, 5, Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm.
28. Ivanov P.L. (1967) - *Compaction of noncohesive soils by explosions.* Translated from Russian by the National Science Foundation and available from the library of the U.S. Water and Power Resources Service, Denve, CO, TA 10193.
29. Siskind D.E., Stachura V.J., Stagg M.S., Koop J.W. (1980) - *Structures response and damage produced by airblast from surface mining.* U.S. Bureau of Mines, Report of Investigation 8485.
30. New B.M. (1991) - *The effect of detonator variability on explosively induced ground vibration.* Int. Conf. Earthquake, Blast and Impact, UMIST Manchester, Institution of Civil Engineers, London.
31. Stachura V.J., Siskind D.E., Engler A. (1981) - *Airblast instrumentation and measurement techniques for surface mining.* U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 8508 (1981).

## APPENDICE

### Degrado e spostamento permanente indotto nella roccia adiacente

Gli effetti permanenti indotti nell'ammasso roccioso, fatta eccezione per il lancio della roccia abbattuta, sono rilevabili nell'immediato intorno del foro e possono essere divisi in «degrado» e «spostamento». Il degrado è normalmente descritto dall'intensità della fratturazione. Si è osservato sperimentalmente che la fratturazione prodotta dall'esplosione varia con il diametro del foro ed il tipo di roccia, per fori di vario diametro e di rocce di varia natura [24, 25]. Abbattimenti per costruzioni con fori di piccolo diametro inducono fratture estese 1-2 m; abbattimenti per miniere a cielo aperto, con fori di grosso diametro, possono produrre fratture estese 10-15 m. Adottando la tecnica dell'abbattimento controllato, tali distanze massime possono essere drasticamente ridotte.

(a) Gli spostamenti della roccia possono essere prodotti dalla pressione esercitata dall'espansione dei gas di esplosione o, in misura minore, dallo scuotimento indotto dalle vibrazioni. L'espansione dei gas di esplosione ha provocato, in volate per costruzioni, lo spostamento di blocchi fino a 1.000 $m^3$ [1]. Movimenti di tale entità sono affatto inusuali, conseguenti ad una cattiva progettazione della volata e caratteristici di blocchi isolati allentati con giunti aperti sui quali agiscono i gas di esplosione. Lo spostamento di blocchi su scarpate rocciose per effetto delle vibrazioni si verifica quando le condizioni sono prossime all'equilibrio limite e gli spostamenti indotti dall'onda sismica sono maggiori della lunghezza d'onda di primo ordine delle asperità sul giunto o sul piano di scivolamento [22]. Lo spostamento di blocchi per effetto dell'espansione del gas può interessare gli ammassi rocciosi solo nell'ambito delle decine di metri.

(b) Il lancio di frammenti di roccia è un caso particolare di spostamento permanente della roccia dalla parte sommitale del foro ed ha raggiunto la distanza massima di 100 ÷ 1000 m [26]. Analisi statistiche hanno dimostrato che le probabilità di ricorrenza di questi eventi limite sono estremamente basse in condizioni normali: (1 su 10 milioni per un lancio a 600 m [27]). Poiché la probabilità cresce al diminuire della distanza dal punto di sparo, nel caso di volate in centri urbani diviene necessario coprire la volata con *Blasting mat* (tappetoni realizzati con vecchi copertoni di camion e corde d'acciaio, N.d.T.) per annullare del tutto il lancio.

(c) Un altro caso particolare di spostamento permanente è costituito dall'addensamento per effetto delle vibrazioni prodotte dalle volate di sabbie non addensate e piuttosto classate. La predisposizione all'addensamento per effetto delle vibrazioni è funzione del peso dell'unità di volume, delle caratteristiche mineralogiche e dell'assortimento granulometrico. I terreni che possono essere addensati sono sabbie poco addensate con una percentuale di limo inferiore al 5%. Questi terreni possono essere addensati sino ad una distanza di 20 m [28] facendo detonare una carica di 5 kg entro la massa stessa. Terreni che sono leggermente cementati o che contengono più del 5% di fini sono assai meno soggetti ad addensamento per vibrazioni tipiche dei lavori da mina.