

**Premessa alla traduzione delle Raccomandazioni ISRM per la determinazione della velocità delle onde acustiche in provini di roccia.**

La velocità delle onde elastiche è un parametro che fornisce delle importanti informazioni sulle caratteristiche fisiche e sul comportamento meccanico del materiale roccioso. La misura delle velocità tra l'altro può essere eseguita nel corso di prove meccaniche di laboratorio (prove di compressione uniassiale o triassiale).

Queste prove richiedono una strumentazione elettronica di costo relativamente basso e consentono una misura abbastanza semplice ed immediata della velocità delle onde. È auspicabile, pertanto, una sempre maggiore diffusione dei loro standard di esecuzione.

Le raccomandazioni suggeriscono tre possibili metodi di prova:

- la tecnica dell'impulso ultrasonico ad alta frequenza
- la tecnica dell'impulso ultrasonico a bassa frequenza
- il metodo della frequenza di risonanza.

Queste tre tecniche di prova presentano il vantaggio di poter essere condotte con una apparecchiatura i cui componenti elettronici possono essere scelti, per quanto possibile, in modo tale da essere utilizzabili in tutti e tre i casi.

Con i primi due metodi la velocità di propagazione si calcola misurando la distanza tra i due trasduttori ed il tempo richiesto dall'onda per percorrere questa distanza.

Il terzo metodo invece consente di determinare la cosiddetta «bar wave velocity» sia di dilatazione sia di torsione. Questa si calcola determinando la frequenza di risonanza di vibrazioni sia di dilatazione sia di torsione di campioni di roccia cilindrici a forma di barra o asta con rapporti lunghezza-diametro maggiore di 3 e lunghezza d'onda-diametro maggiore di 6.

A questo proposito le norme ASTM per lo stesso tipo di prove, nella prima versione del 1969, citata anche nelle presenti raccomandazioni D 2845-90, sottolineano che la *bar wave velocity* non deve essere confusa con la velocità di un'onda di compressione. Quest'ultima infatti va intesa come la velocità di propagazione di un'onda longitudinale in un mezzo che ha estensione laterale infinita.

Vengono descritte le apparecchiature e successivamente vengono date delle indicazioni riguardanti sia la procedura di preparazione dei provini, sia il modo di condurre le prove con i tre metodi. In particolare con riguardo ai primi due metodi si suggeriscono due possibilità per posizionare i ricevitori:

- la tecnica di trasmissione dell'impulso, secondo la quale il ricevitore è posto su un piano opposto a quello contro cui è applicato il trasmettitore;
- la tecnica del profilo sismico, secondo la quale il ricevitore è posto sulla superficie laterale del campione.

Quest'ultima tecnica è consigliata solo se si dispone di campioni di dimensioni opportune. Invece le norme ASTM D 2845-90 non vi fanno riferimento.

È importante sottolineare, per confronto, che le norme ASTM oltre a descrivere la strumentazione e le procedure per le misure di laboratorio delle velocità, riguardano il calcolo delle costanti elastiche ultrasoniche (così chiamate perché la frequenza dell'impulso usata supera il campo dell'udibile, valori tipici sono compresi fra 75

kHz e 3 MHz) per rocce isotrope o con un basso grado di anisotropia. Le stesse norme ASTM sottolineano che in laboratorio è meglio usare trasduttori liberi da elementi protettivi e se è necessaria una protezione esterna è meglio che questa sia metallica. Vengono date delle precise indicazioni circa i rapporti fra lunghezza, diametro del provino, dimensione media dei grani e rapporto fra la velocità di propagazione e la frequenza di risonanza propria dei trasduttori.

A conclusione di questa premessa ricordiamo anche che esistono delle raccomandazioni italiane piuttosto sintetiche ed indicative della serie Normal (n. 22/86) sulla misura della velocità di propagazione del suono curate dai Centri di Studio del CNR sulle Cause di Deperimento e sui Metodi di Conservazione delle Opere d'Arte di Milano e Roma e dall'Istituto Centrale del Restauro.

La curatrice della traduzione  
LILIANA TOTARO

# Raccomandazioni per la determinazione della velocità delle onde acustiche in provini di roccia

## 1. Finalità

Questa prova ha lo scopo di determinare in laboratorio la velocità di propagazione delle onde elastiche. Vengono presentate tre diverse varianti del metodo di prova. Esse sono: la tecnica dell'impulso ultrasonico ad alta frequenza, la tecnica dell'impulso ultrasonico a bassa frequenza ed il metodo della frequenza di risonanza.

## 2. Apparecchiatura

Sebbene ci siano tre diversi metodi, i componenti elettronici dovrebbero essere scelti, per quanto possibile, in modo da essere utilizzabili in tutti e tre i casi. Nei tre metodi si può far uso della stessa roccia o anche dello stesso campione facendo naturalmente attenzione alle frequenze da impiegare. Per assicurare un efficace trasferimento di energia i componenti elettronici devono avere impedenze opportunamente scelte e conduttori schermati. Per evitare danni al sistema non si dovrebbero superare le massime tensioni previste.

### Primo metodo

(a) Generatore di impulsi:  
forma dell'impulso: onda sinusoidale, quadra, a gradini;  
larghezza dell'impulso:  $1 \div 10$  s;  
campo di frequenza:  $100 \text{ kHz} \div 2 \text{ MHz}$ ;  
frequenza di ripetizione:  $10 \div 10^3$  ripetizioni al secondo;  
tensione dell'impulso: la più elevata possibile compatibilmente con quanto consentito dai trasduttori.

Il generatore di impulsi deve fornire in uscita un impulso di innesco per la sincronizzazione con l'oscilloscopio.

(b) Trasduttori:  
trasmettitore: converte gli impulsi elettrici in impulsi meccanici;

ricevitore: converte gli impulsi meccanici in impulsi elettrici;  
risposta in frequenza: se possibile, uniforme da  $100 \text{ kHz}$  a  $2 \text{ MHz}$ .

Nella scelta del trasduttore dovrebbero considerarsi le condizioni ambientali (temperatura, contenuto d'acqua del campione, umidità, pressione all'interfaccia trasduttore-campione, etc.).

Si raccomanda l'uso di ceramiche piezoelettriche (per esempio titanato di bario o titanato zirconato di piombo) in forma di piastre, dischi, aste, anelli o sfere per generare impulsi nel campo di frequenza  $100 \text{ kHz} \div 2 \text{ MHz}$ . Normalmente è necessario usare differenti trasduttori piezoelettrici per la trasmissione o la ricezione di onde rispettivamente di compressione o di taglio: per esempio dischi cilindrici (raggio  $\gg$  spessore) agenti a compressione per la trasmissione e la ricezione di onde di compressione; piastre di taglio agenti a taglio per trasmettere e ricevere onde di taglio.

(c) Filtro passa-banda o filtro passa-alti adatto alle frequenze suddette.

(d) Preamplificatore a basso rumore e a larga banda.

(e) Generatore marca tempo per controllare la ripetizione dell'impulso e per segnare il tempo all'oscilloscopio.

(f) Oscilloscopio: si raccomanda un oscilloscopio a doppia traccia;  
velocità di esplorazione massima:  $0.1 \mu\text{s/cm}$ ;  
larghezza di banda: la risposta deve essere fondamentalmente uniforme dalla corrente continua a  $5 \text{ MHz}$  o più.

(g) È bene utilizzare un contatore elettronico in grado di misurare gli intervalli di tempo.

La Fig.1 mostra due possibili schemi dei componenti elettronici.

### Secondo metodo

Tecnica dell'impulso ultrasonico a bassa frequenza per campioni in barre con dimensione laterale massima di  $10 \text{ cm}$ .

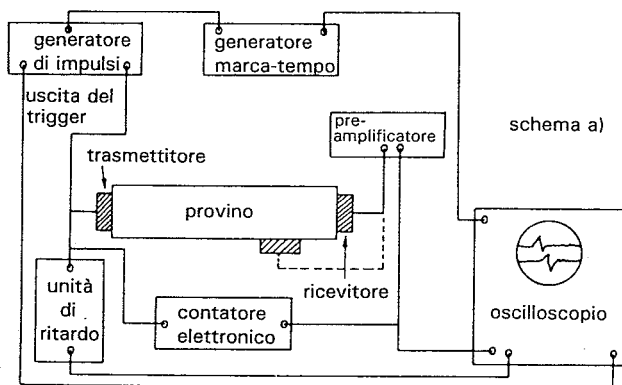


Fig. 1 - Due possibili schemi di collegamento delle apparecchiature di misura per il primo metodo.

a) Generatore di impulsi (per esempio generatore di funzione):  
 campo di frequenza:  $2 \div 30$  kHz (può essere utilizzato anche il generatore citato nel primo metodo a patto che abbia un campo di frequenza basso);  
 frequenza di ripetizione:  $10 \div 100$  ripetizioni al secondo;  
 tensione dell'impulso: come nel primo metodo.

b) Trasduttori:

(i) trasmettitori: ceramiche piezoelettriche o elementi magnetostrittivi, che sono in grado di generare impulsi di ampiezza elevata (in dipendenza del tipo di roccia e delle dimensioni del campione) nel campo di frequenza  $2 \div 30$  kHz;

(ii) ricevitori: ceramiche piezoelettriche con risposta in frequenza uniforme nel campo di frequenza  $2 \div 30$  kHz o elementi magnetostrittivi;

(iii) filtri, amplificatori, oscilloscopio, marcatempo analoghi a quelli del primo metodo, considerando un campo di frequenze basso.

#### Terzo metodo

a) Generatore di onda sinusoidale (per esempio un generatore di funzione) con un campo di frequenza di  $1 \div 100$  kHz e un impulso con tensione uguale a quella del primo e del secondo metodo.

b) Trasduttori:

(i) trasmettitori: ceramiche piezoelettriche o elementi magnetostrittivi con risposta in frequenza uniforme nel campo  $1 \div 100$  kHz;

(ii) ricevitori: ceramiche piezoelettriche (simili ai trasmettitori) o trasduttori capacitivi (principio del microfono a condensatore) con risposta in frequenza uniforme da 1 a 100 kHz (la prima frequenza di risonanza possibile dovrebbe essere maggiore di 100 kHz).

(c) Oscilloscopio, amplificatori adatti al metodo di registrazione.

Lo schema dei componenti elettronici è mostrato nella Fig. 2.

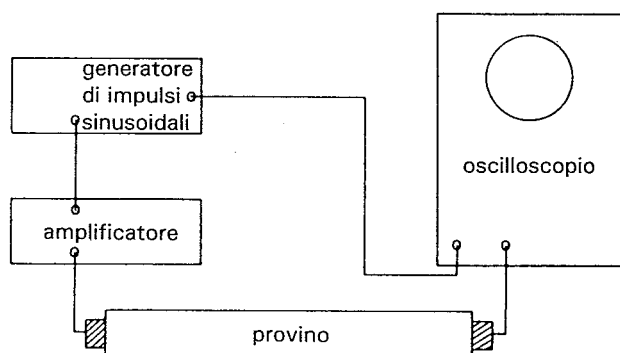


Fig. 2 - Schema di collegamento delle apparecchiature di misura per il terzo metodo.

### 3. Procedura

Le operazioni di carotaggio, di manipolazione, di segazione, di rettifica e di lappatura del campione di prova dovrebbero essere eseguite in modo da ridurre al minimo il danneggiamento meccanico. L'area della superficie di contatto con ciascun trasduttore dovrebbe essere sufficientemente piana per fornire un buon accoppiamento. I provini possono essere asciugati usando un essiccatore. I campioni saturi dovrebbero rimanere in acqua fino al momento della prova. Se si vuole determinare la velocità nelle condizioni in-situ, si deve prestare particolare attenzione nel corso della procedura di preparazione. Si suggerisce anche di riporre sia il campione da cui è tratto il provino sia il provino in buste a prova di umidità. Si possono impiegare in alcuni casi procedure di preparazione della superficie a secco.

#### Primo metodo

Questo metodo serve per determinare la velocità di onde di compressione (di dilatazione, longitudinali, P) e di taglio (rotazionali, trasversali, S) in campioni di roccia di dimensioni che possono considerarsi in pratica infinite in confronto alla lunghezza

d'onda dell'impulso usato. La condizione di dimensione infinita è soddisfatta quando: dimensione media dei grani  $<$  lunghezza d'onda dell'impulso  $<$  dimensione minima del campione.

(a) Si raccomanda di usare come campioni blocchi rettangolari, carote cilindriche o anche sfere (per la determinazione della simmetria elastica delle rocce anisotrope). Si consiglia di impiegare campioni con dimensione laterale minima (normale alla direzione di propagazione dell'onda) non minore di 10 volte la lunghezza d'onda\*. Il percorso dell'impulso attraverso la roccia dovrebbe essere almeno 10 volte la dimensione media dei grani.

(b) Il trasmettitore è compresso al centro di un piano normale alla direzione di propagazione dell'onda applicandovi uno sforzo di 0.1 MPa. La trasmissione di energia fra i trasduttori ed il campione di prova può essere migliorata nel modo seguente:

(i) levigando le facce dei provini per renderle lisce e piatte;

(ii) interponendo fra gli elementi dei trasduttori e le superfici piane di estremità del campione un film di lubrificante, vasellina, glicerina, mastice o olio;

(iii) realizzando un forte accoppiamento con un adesivo di tipo epossidico o con salicilato di fenile.

(c) Ci sono due possibilità per posizionare i ricevitori:

(i) tecnica di trasmissione dell'impulso: il ricevitore è posizionato su un piano opposto a quello contro cui è applicato il trasmettitore (Fig. 3a). Sia la velocità delle onde P sia le velocità delle onde S ( $v_p$ ,  $v_s$ ) si calcolano a partire dai tempi di percorrenza misurati e dalla distanza fra trasmettitore e ricevitore;

(ii) tecnica del profilo sismico: il ricevitore è posto sulla superficie laterale del campione (Fig. 3b). Variando la distanza  $d$  fra ricevitore e trasmettitore è possibile ottenere le curve dei tempi di percorrenza in funzione della distanza  $d$  sia per le onde P sia per le onde S. Le velocità si calcolano a partire da que-

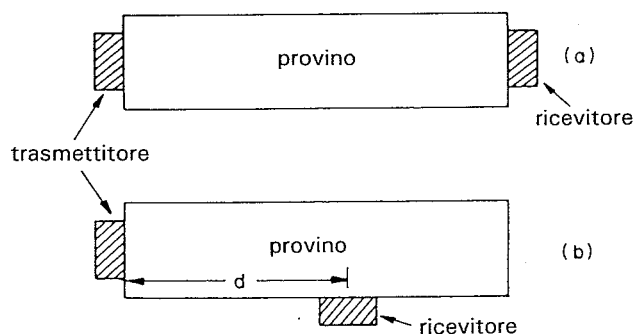


Fig. 3 - Posizionamento di trasmettitore e ricevitore sul campione nel primo metodo.

\* Le norme ASTM D 2845-69 raccomandano 5 volte la lunghezza d'onda.

ste curve. Se la dimensione del campione è idonea si consiglia di utilizzare quest'ultimo metodo.

(d) Aumentare l'uscita di tensione del generatore di impulsi, il guadagno dell'amplificatore e la sensibilità dell'oscilloscopio e del contatore ad un livello ottimale, per dare un fronte dell'impulso più ripido che permetta di misurare il tempo in modo più preciso. Il livello ottimale è appena inferiore a quello in corrispondenza del quale il rumore elettromagnetico raggiunge un'ampiezza intollerabile o attiva il contatore con la sua soglia di innesco più bassa. Il livello di rumore non deve essere maggiore di 1/10 dell'ampiezza del primo picco del segnale del ricevitore. Il tempo di percorrenza deve essere misurato con la precisione e l'accuratezza di 1 parte su 100 per le onde di compressione e di 1 parte su 50 per le onde di taglio utilizzando dei circuiti ritardanti insieme all'oscilloscopio o regolando il contatore alla precisione più alta utilizzabile.

(e) L'oscilloscopio viene utilizzato insieme al circuito di ritardo per mostrare sia l'impulso diretto sia il primo arrivo dell'impulso trasmesso, e per misurare il tempo di percorrenza.

Solitamente, il primo arrivo mostrato sull'oscilloscopio consiste in una transizione curva dalla traccia orizzontale a tensione nulla ad una traccia ripida più o meno lineare. È necessario scegliere in modo coerente la prima perturbazione sia per la determinazione della misura della prova sia per la determinazione del tempo zero. Essa può essere scelta all'inizio del tratto curvo di transizione o in corrispondenza dell'intercetta tra la traccia orizzontale a tensione nulla ed il tratto lineare del primo arrivo.

(f) Il contatore è avviato dall'impulso diretto applicato al trasmettitore ed è arrestato al primo arrivo dell'impulso che raggiunge il ricevitore. Poiché per avviare il contatore è necessario un cambiamento di tensione, non si può individuare accuratamente la prima perturbazione dovuta all'impulso. Per rendere il più possibile precisa la misura dei tempi, conviene aumentare la sensibilità di innesco del contatore ad un valore ottimale evitando però di causare una falsa attivazione per effetto di rumori elettrici estranei.

(g) Determinare il tempo zero del circuito includendo sia i trasduttori sia il dispositivo di misura dei tempi di percorrenza e applicare la correzione ai tempi di percorrenza misurati. Se le caratteristiche del circuito non cambiano, questo fattore rimarrà costante per una determinata roccia ed un certo livello di sforzo. La determinazione del tempo zero con la stessa procedura consente di scoprire qualsiasi cambiamento. Tale determinazione può essere effettuata in uno dei modi seguenti:

(1) ponendo i trasduttori in contatto diretto e misurando il ritardo (questo metodo non è consigliato per i trasduttori per i quali un lieve disallineamento può produrre grandi errori);

(2) misurando il tempo di percorrenza di un certo materiale con caratteristiche uniformi (quale l'acciaio) in funzione della lunghezza ed utilizzando come fattore di correzione l'intercetta della linea passante per i punti di dati in corrispondenza dell'origine dell'asse delle lunghezze (questo metodo è raccomandato in modo particolare per le onde di taglio).

h) Poichè il primo arrivo trasmesso è quello dell'onda di compressione la sua determinazione è relativamente facile. L'arrivo dell'onda di taglio può però essere mascherato da vibrazioni dovute al «ringing» dei trasduttori e dalle riflessioni dell'onda di compressione. Utilizzando trasduttori di taglio a spessore si può aumentare l'ampiezza dell'onda di taglio rispetto a quella dell'onda di compressione e quindi determinare il suo tempo di arrivo in modo più accurato. Questo tipo di elemento genera una certa energia di compressione cosicchè è possibile determinare entrambe le onde. Il far uso di un sottile strato di materiale accoppiante, come salicilato di fenile o un grasso lubrificante per vuoto spinto o una resina e l'applicare una piccola forza per stabilire un buon contatto fra trasduttore e campione, può migliorare la trasmissione di energia.

(i) Per campioni soggetti a campi di sforzo uniaxiale i primi arrivi delle onde di compressione sono in genere ben definiti. Però l'accurata determinazione dei primi arrivi dell'onda di taglio per questi campioni è complicata dalle conversioni di modo alle interfacce su entrambi i lati della piastra e in corrispondenza della superficie libera.

(j) La determinazione del tempo di arrivo dell'onda di taglio può effettuarsi più facilmente su campioni di lunghezza opportuna. Per esempio un campione con rapporto altezza/lunghezza 2:1 è spesso preferibile ad un altro campione per il quale lo stesso rapporto è 1:1.

### Secondo metodo

Questo metodo serve per determinare la velocità di onde di dilatazione e di torsione in campioni di roccia a forma di barre tozze o snelle (propagazione dell'onda unidimensionale). È bene che il rapporto fra la lunghezza del campione ed il suo diametro sia maggiore di 3 ed il rapporto fra la lunghezza d'onda dell'impulso ed il diametro del campione sia maggiore di 5.

(a) Le dimensioni devono essere quelle sopra indicate. Per la tecnica della trasmissione dell'impulso e per quella della frequenza di risonanza entrambe le facce di estremità del campione devono essere piane e parallele con una tolleranza di 0,005 mm/mm della dimensione laterale.

(b) Le carote di roccia devono essere posizionate nel porta campioni di un banco acustico e devono avere un rapporto lunghezza diametro maggiore di 3. Il trasmettitore, che genera un'onda sinusoidale di lunghezza d'onda maggiore di 5 volte il diametro della carota, deve essere premuto contro l'estremità segata e piana (normale all'asse della carota) per mezzo di uno sforzo di circa  $10 \text{ N/cm}^2$  (0,1 MPa; n.d.t.) per la misura di  $v_p$ . Per la misura di  $v_s$  si consiglia di posizionare il trasmettitore come illustrato in Fig. 4.

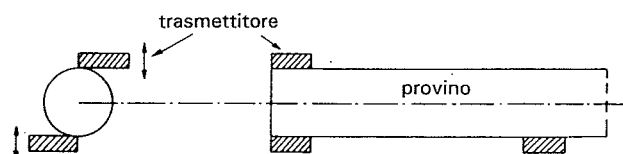


Fig. 4 - Posizionamento di trasmettitore e ricevitore nel secondo metodo.

(c) Ci sono due possibilità, analoghe a quelle descritte al punto (c) per il primo metodo, per il posizionamento del ricevitore :

(i) trasmissione dell'impulso: il ricevitore è posto all'estremità opposta della carota. Entrambe le estremità dovrebbero essere piane e parallele con una tolleranza di circa un grado; possono essere usati snodi sferici;

(ii) profilo sismico: il ricevitore è spostato lungo la superficie della carota parallelamente al suo asse.

(d) Il resto della procedura è identico al primo metodo.

### Terzo metodo

La velocità delle onde, sia di dilatazione, sia di torsione (condizioni di propagazione dell'onda unidimensionale, come per il secondo metodo può essere calcolata determinando la frequenza di risonanza sia di vibrazioni di dilatazione sia di torsione, di campioni di roccia cilindrici a forma di barra o asta con rapporto lunghezza-diametro maggiore di 3 (rapporto lunghezza d'onda diametro  $> 6$ ).

(a) Le dimensioni dovrebbero essere quelle stabilite prima. Per la tecnica della trasmissione dell'impulso e per la tecnica della frequenza di risonanza entrambe le facce di estremità del campione dovrebbero essere piane e parallele con una tolleranza di 0,005 mm/mm sulla dimensione laterale.

(b) Le carote di roccia con rapporto lunghezza-diametro  $> 3$  devono essere poste nel porta campione di un banco acustico. Entrambe le basi devono essere piane con tolleranza di  $10^{-3}$  mm e devono essere parallele con tolleranza di un grado.

(c) Per determinare la frequenza di risonanza longitudinale, sia il trasmettitore sia il ricevitore sono premuti al centro di entrambi i piani di estremità mediante molle molto deformabili (carico massimo 10 N) per realizzare la condizione di estremità libera (si raccomandano a questo scopo ricevitori capacitivi). Il campione deve essere posizionato sul porta campione in modo tale che esso possa essere considerato effettivamente libero.

(d) La frequenza del trasmettitore viene variata fino a dare la massima lettura sull'oscilloscopio. Occorre registrare almeno i primi tre modi della frequenza di risonanza.

(e) Per la determinazione della frequenza di risonanza di torsione il trasmettitore dovrebbe essere posizionato in modo da indurre vibrazioni di torsione.

#### 4. Calcolo

Vengono utilizzate le equazioni mono e tridimensionali di propagazione dell'onda.

##### *Primo e secondo metodo*

(a) Le velocità sono calcolate attraverso i tempi di percorrenza misurati e la distanza,  $d$ , fra trasmettitore e ricevitore facendo uso delle equazioni:

$$v_p = d \cdot t_p^{-1}$$

$$v_s = d \cdot t_s^{-1}$$

ove  $v_p$  è la velocità dell'onda longitudinale,  $v_s$  è la velocità dell'onda di taglio,  $t_p$  e  $t_s$  sono i tempi che l'onda P e l'onda S impiegano, rispettivamente, per compiere la distanza  $d$ .

(b) Se si fa uso della tecnica del profilo sismico le velocità sono date dall'inclinazione della curva tempo di percorrenza-distanza  $d$ .

##### *Terzo metodo*

Le velocità dell'onda di barra si calcolano con la formula

$$v_d = 2 l f_o$$

dove  $l$  è la lunghezza della barra ed  $f_o$  è la frequenza di risonanza del modo zero delle vibrazioni di dilatazione o di torsione.

#### 5. Relazione sui risultati

La relazione dovrebbe comprendere le seguenti informazioni:

(a) Il tipo di roccia, l'origine esatta (cioè, regione, zona, formazione geologica, cava, profondità dei fori di sondaggio, particolari caratteristiche geologiche e strutturali del luogo di prelievo).

(b) Dimensioni e geometria del campione.

(c) Il modo in cui è stato ottenuto il materiale roccioso (cioè abbattimento con esplosivi in cava, carotaggio su superficie fresca o alterata).

(d) Descrizione tessiturale e petrografica; distribuzione delle microfessure.

(e) Preparazione del campione (qualità delle carote, dei piani di estremità, numero di carote estratte da un blocco più grande, orientazione delle carote in relazione alle caratteristiche geologiche principali).

(f) Descrizione del metodo di prova sperimentale: dati sulla sorgente dell'impulso elettrico; dati sui trasduttori (molto consigliato un grafico ampiezza-frequenza); accoppiamento fra i trasduttori e il campione.

(g) Campo di sforzo applicato al campione.

(h) Tutte le proprietà fisiche disponibili sulla roccia (in particolare densità, porosità, permeabilità).

(i) Dati sulla velocità in condizioni normali (temperatura di laboratorio, pressione atmosferica, temperatura di laboratorio in condizioni secche)

(j) Ripetibilità.

(k) Variazioni di velocità fra campioni con parametri di prova costanti, velocità medie, errore medio, deviazioni massime.

(l) Nel caso del profilo «sismico»: curve tempo di percorrenza-distanza.

(m) Una fotografia rappresentativa della schermata dell'oscilloscopio o una stampa della forma d'onda.

(n) La tecnica utilizzata per ottenere la lettura dei tempi di percorrenza (cioè prima deviazione dell'impulso del trasmettitore, prima deviazione dell'impulso del ricevitore all'oscilloscopio; primo massimo dell'onda del ricevitore, etc.).

(o) Dati velocità-sforzi (se misurati).

(p) Velocità dell'onda di compressione,  $v_p$  in m/s.

(q) Velocità dell'onda di taglio,  $v_s$  in m/s.

(r) Velocità dell'onda: di dilatazione,  $v_d$  in m/s.  
di torsione,  $v_t$  in m/s.

(s) Densità in  $\text{kg/m}^3$ .

(t) Sforzo in Pa.

(u) Dimensioni geometriche, in mm.

#### Nota

(i) Un metodo per indurre vibrazioni torsionali e longitudinali in un'asta o in una barra è stato sviluppato da Obert (Obert L.S., Windes L. & Duvall W.I.-Standardized tests for determining the physical properties of mine rock. *U.S. Bur. Mines. Rep. Invest.* 3891 - (1946)).

(ii) Molte rocce porose, lievemente alterate o con microfessure sono sicuramente sensibili al livello di sforzo (e/o di saturazione) e per i problemi pratici può essere desiderabile effettuare le prove nelle condizioni di saturazione ed al livello di sforzo massimo al quale esse saranno sottoposte in pratica.